

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y AMBIENTALES



Determinación de cadmio en granos de *Theobroma cacao* L “cacao”
del clon CCN - 51 cultivados en suelos de sistemas agroforestales
con manejo convencional en la Provincia de Atalaya, Ucayali –
Perú

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGRARIO CON MENCIÓN FORESTAL**

AUTORES

Jack Harry Fuchs Rengifo

Jimmy Frister Vergaray Ysminio

ASESORES

Roger Manuel Mestas Valero

Armando Chiclla Salazar

Atalaya, Perú

2024

METADATOS COMPLEMENTARIOS**Datos de los Autores****Autor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 2

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 3

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Autor 4

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (opcional)	

Datos de los Asesores**Asesor 1**

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

Asesor 2

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	
Número de Orcid (Obligatorio)	

Datos del Jurado

Presidente del jurado

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Segundo miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Tercer miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	
Número del documento de identidad	

Datos de la Obra

Materia*	
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado:	
Idioma	
Tipo de trabajo de investigación	
País de publicación	
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	
Grado académico o título profesional	
Nombre del programa	
Código del programa Consultar el listado:	

***Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesauro).**



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 009 - 2024/UCSS/FIA/DI

Siendo las 10:00 a.m. del martes 27 de febrero de 2024 a través de la plataforma virtual zoom de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis integrado por:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------|
| 1. Katerin Manuelita Encina Oliva | presidente |
| 2. Oswaldo Clever Villena Carpio | primer miembro |
| 3. Jeison Joan Cabanillas Vásquez | segundo miembro |
| 4. Roger Manuel Mestas Valero | asesor(a) |

Se reunieron para la sustentación virtual de la tesis titulada **Determinación de cadmio en granos de *Theobroma cacao* L. "cacao" del clon CCN - 51 cultivados en suelos de sistemas agroforestales con manejo convencional en la Provincia de Atalaya, Ucayali – Perú** que presentan los bachilleres en Ciencias Agrarias con mención Forestal, **Jack Harry Fuchs Rengifo y Jimmy Frister Vergaray Ysminio**, cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Agrario con mención Forestal**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el jurado acuerda:

APROBAR **X**

DESAPROBAR ...

La tesis, con el calificativo de **BUENA** y eleva la presente acta al decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare **EXPEDITA** para conferirle el **TÍTULO de INGENIERO AGRARIO CON MENCIÓN FORESTAL**.

Lima, 27 de febrero del 2024.

Katerin Manuelita Encina Oliva
Presidente

Oswaldo Clever Villena Carpio
1° miembro

Jeison Cabanillas Vásquez
2° miembro

Roger Manuel Mestas Valero
Asesor(a)

Anexo 2

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE TESIS / INFORME ACADÉMICO/ TRABAJO DE INVESTIGACIÓN/ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO

Atalaya, 16 de mayo de 2024

Señor(a),
Wilfredo Mendoza Caballero
Jefe del Departamento de Investigación
Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales - UCSS

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que **la tesis**, bajo mi asesoría, con título: **Determinación de cadmio en granos de *Theobroma cacao* L "cacao" del clon CCN - 51 cultivados en suelos de sistemas agroforestales con manejo convencional en la Provincia de Atalaya, Ucayali - Perú**, presentado por **Jack Harry Fuchs Rengifo** (código de estudiante: 2011100075 y DNI: 71213648) y de **Jimmy Fristher Vergaray Ysminio** (código de estudiante: 2011100108 y DNI: 72259590) para optar el **título profesional de Ingeniero Agrario con mención Forestal** ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser sustentado ante el Jurado Evaluador.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se le ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 5 %** (poner el valor del porcentaje)*. Por tanto, en mi condición de asesor(a), firmo la presente carta en señal de conformidad y **adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin**, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,



Firma del Asesor (a)
Roger Manuel Mestas Valero
DNI N°: 23842285
ORCID: 0000-0002-5097-9988
Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales
UCSS

(*) De conformidad con el artículo 8°, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:
Artículo 8°. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros
El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, **será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.**

DEDICATORIA

A Dios, a nuestra familia, amigos y a todas las personas de la Universidad Católica Sedes Sapientiae que aportaron en gran manera para realización de la presente tesis, sin su ayuda incondicional todo esto no hubiera podido realizarse.

A los agricultores de las comunidades Aeirja, Santa Rosa, Misión Unini y Atalaya quienes amablemente contribuyeron con la presente investigación mediante su permiso para realizar el estudio en sus parcelas agroforestales.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE APÉNDICES	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Antecedentes	5
1.2. Bases teóricas especializadas.....	11
1.3. Niveles permitidos de cadmio en los alimentos y en los suelos	28
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
2.1. Diseño de la investigación	29
2.2. Lugar y fecha	29
2.3. Población y muestra.....	27
2.4. Técnicas e instrumentos.....	30
2.5. Descripción de la investigación	31
CAPÍTULO III: RESULTADOS	37
3.1. Niveles de cadmio y caracterización fisicoquímica de los suelos de las parcelas de cacao	37
3.2. Nivel de cadmio total en los granos de cacao de las parcelas.....	42
3.3. Correlaciones entre el cadmio en los granos y las propiedades del suelo	44
Tabla 13.....	47
<i>Pruebas de normalidad de las variables evaluadas</i>	47
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN	50
4.1. Niveles de cadmio y caracterización fisicoquímica de los suelos de las parcelas de cacao	50
4.2. Nivel de cadmio total en los granos de cacao de las parcelas evaluadas.....	52
4.3. Correlaciones entre el cadmio en los granos y las propiedades del suelo	53

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	56
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES	57
REFERENCIAS	58
TERMINOLOGÍA	68
APÉNDICES.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Fuentes de incorporación de cadmio (Cd) en el suelo</i>	18
Tabla 2. <i>Límite permitido de metales pesados en el organismo</i>	21
Tabla 3. <i>Información de las parcelas agroforestales donde se realizó el estudio</i>	29
Tabla 4. <i>VARIABLES EN ESTUDIO</i>	33
Tabla 5. <i>Texturas de los suelos de las parcelas de cacao evaluadas</i>	37
Tabla 6. <i>Potencial de hidrogeno (pH) de los suelos de las parcelas de cacao evaluadas</i>	38
Tabla 7 <i>Capacidad de intercambio catiónico (C.I.C) de los suelos de las parcelas de cacao evaluadas</i>	39
Tabla 8. <i>Niveles de cadmio total y disponible de los suelos de las parcelas de cacao evaluadas</i>	40
Tabla 9. <i>Contenido de cadmio total en los granos de cacao de todas las parcelas evaluadas</i>	42
Tabla 10. <i>Resumen del modelo de regresión lineal múltiple</i>	44
Tabla 11. <i>Análisis de varianza (ANOVA) de la regresión lineal múltiple</i>	44
Tabla 12. <i>Coefficientes del análisis de regresión lineal múltiple</i>	45
Tabla 13. <i>Pruebas de normalidad de las variables evaluadas</i>	47
Tabla 14. <i>Pruebas de normalidad de la variable potencial de hidrógeno (pH)</i>	47
Tabla 15. <i>Prueba de Durbin -Watson del modelo de regresión lineal multiple</i>	48
Tabla 16. <i>Análisis de colinealidad de las variables evaluadas</i>	49

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Distribución geográfica de la especie <i>Theobroma cacao</i> L.....	12
<i>Figura 2.</i> Descripción botánica de la especie <i>Theobroma cacao</i> L.....	16
<i>Figura 3.</i> El cadmio (Cd) en el suelo y las enmiendas orgánicas como reductores de su biodisponibilidad.....	19
<i>Figura 4.</i> Reciclaje de materia orgánica (M.O) en un sistema agroforestal.....	24
<i>Figura 5.</i> Ejemplo de un sistema agroforestal con diferentes especies agrícolas y forestales en México.....	25
<i>Figura 6.</i> Mapa de ubicación de la provincia de Atalaya y el distrito Raimondi.....	27
<i>Figura 7.</i> Cadmio total y disponible en los suelos de las parcelas evaluadas.....	41
<i>Figura 8.</i> Cadmio total en los granos de cacao de las parcelas evaluadas.....	43
<i>Figura 9.</i> Análisis de linealidad de las variables evaluadas.....	46

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Media (μ) y error estándar (SE) de las muestras de suelos y granos de cacao evaluadas en SPSS.....	65
Apéndice 2. Comandos del SPSS versión 2019 utilizados en los análisis estadísticos.....	70
Apéndice 3. Análisis promedio de suelos y granos de cacao.....	71
Apéndice 4. Información de los productores de cacao	73
Apéndice 5. Iconografías	87

RESUMEN

Los estándares internacionales establecen un rango máximo de $0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ de Cd en los granos de cacao. Esta investigación tuvo como objetivo determinar el nivel de cadmio en granos de cacao *Theobroma cacao* L. del clon CCN-51, cultivados en suelos de sistemas agroforestales (SAF) con manejo convencional en la Provincia de Atalaya, Ucayali – Perú. Se colectaron 15 muestras de suelos a 30 cm de profundidad y 1 mazorca de cacao de 5 árboles de cada parcela (1 kg de granos). El cadmio en los granos se determinó mediante el Método EPA 3050 y se analizaron las muestras usando un espectrofotómetro de absorción atómica. El cadmio disponible y total en el suelo fueron determinados por el método del extractante (EDTA 0.05 M y pH 7), y las muestras se analizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica. Se calcularon los estadísticos descriptivos (media y el error estándar) de las variables pH, C.I.C, cadmio disponible y camdio total, así como la regresión lineal múltiple entre el contenido de cadmio total en los granos y las variables del suelo. Según los resultados, el promedio de cadmio disponible en los suelos fue $0,044 (\pm 0,004) \text{ mg.kg}^{-1}$ y el promedio de cadmio total en los suelos fue $0,198 (\pm 0,017) \text{ mg.kg}^{-1}$, los cuales no sobrepasaron los límites permisibles en suelos agrícolas, estipulados por el Ministerio del Ambiente ($< 1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$). Por otro lado, los contenidos de cadmio en los granos de cacao tampoco sobrepasaron los límites permisibles establecidos por la Unión Europea ($< 0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$), con un promedio de $0,104 (\pm 0,007) \text{ mg.kg}^{-1}$. Las principales conclusiones de este estudio son: el bajo contenido de cadmio en el suelo, el cual se debe al origen de los suelos y a la competencia en la absorción y acumulación de cadmio entre todas las especies del sistema agroforestal.

Palabras clave: Absorción, bioacumulación, cadmio disponible, cadmio total, límites máximos permisibles.

ABSTRACT

International standards establish a maximum range of 0.5 mg.kg⁻¹ of Cd in cocoa beans. This research aimed to determine the level of cadmium in *Theobroma cacao* L. cocoa beans of the CCN-51 clone, grown in soils of agroforestry systems (SAF) with conventional management in the Province of Atalaya, Ucayali - Peru. 15 soil samples were collected at a depth of 30 cm and 1 cocoa pod from 5 trees in each plot (1 kg of beans). Cadmium in grains was determined using EPA Method 3050 and samples were analyzed using an atomic absorption spectrophotometer. Available and total cadmium in the soil were determined by the extractant method (EDTA 0.05 M and pH 7), and the samples were analyzed in an atomic absorption spectrophotometer. The descriptive statistics (mean and standard error) of the variables pH, C.I.C, available cadmium and total cadmium were calculated, as well as the multiple linear regression between the total cadmium content in the grains and the soil variables. According to the results, the average of available cadmium in the soils was 0.044 (± 0.004) mg.kg⁻¹ and the average of total cadmium in the soils was 0.198 (± 0.017) mg.kg⁻¹, which did not exceed the limits permissible in agricultural soils, stipulated by the Ministry of the Environment (< 1.4 mg.kg⁻¹). On the other hand, the cadmium contents in the cocoa beans did not exceed the permissible limits established by the European Union (< 0.5 mg.kg⁻¹), with an average of 0.104 (± 0.007) mg.kg⁻¹. The main conclusions of this study are: the low cadmium content in the soil, which is due to the origin of the soils and the competition in the absorption and accumulation of cadmium between all species of the agroforestry system.

Keywords: Absorption, bioaccumulation, available cadmium, Total cadmium, maximum allowable limits.

INTRODUCCIÓN

Los elementos traza como el cadmio o también llamados metales pesados son aquellos que están presentes en los suelos naturalmente sin necesidad de su incorporación mediante otras actividades. Sin embargo, su acumulación en el suelo se debe a diferentes actividades antropogénicas, como el caso de la minería y el excesivo uso de fertilizantes y pesticidas con alto contenido de cadmio en la agricultura. En el suelo estos elementos pueden quedar retenidos por largos periodos de tiempo mediante mecanismos biológicos y químicos que son parte de su naturaleza, lo que le permite trasladarse a través de la solución suelo (Pagnanelli *et al.*, 2004; Prieto *et al.*, 2009).

Actualmente es común ver que los suelos agrícolas acumulan metales pesados en gran o menor cantidad, esto debido a varios factores como la aplicación de agroquímicos lo cual representa una preocupación de carácter ambiental, puesto que son conocidos los efectos toxicológicos que estos elementos producen en los organismos vivos cuando se acumulan en grandes cantidades, así mismo, estos elementos son absorbidos por la planta, las cuales los acumulan en las partes comestibles (Souza *et al.*, 2007).

Como es sabido el cadmio se presenta en casi todos los suelos agrícolas ya sea en bajas cantidades o elevadas según sea su incorporación, por ejemplo, en la región Ucayali se realizaron estudios en las cuales se determinó el contenido de cadmio en suelos y granos de *Theobroma cacao* L. “cacao” donde se encontró que tanto los suelos como los granos de cacao presentaron niveles de cadmio que sobrepasaron los límites permisibles ($0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$) (Campos *et al.*, 2015; Lopez, 2018; Mera, 2017; Huamani *et al.*, 2012).

Por otro lado, en los sistemas agroforestales se produce más cantidad de materia orgánica que en un sistema de monocultivo (una sola especie), por lo que la susceptibilidad en la absorción de cadmio aumenta tanto para las especies forestales y agrícolas (Vaast y Somarriba, 2014).

En un estudio desarrollado en un sistema agroforestal combinado con *Theobroma cacao* L., “cacao”. Llatance *et al.* (2018), cuantificó los niveles de cadmio en los tejidos de las plantas donde encontró que las especies forestales y el cacao fueron susceptibles a la absorción y acumulación de cadmio aun cuando las concentraciones de este elemento en el suelo fueron bajas. En los sistemas agroforestales que combinan la especie *Theobroma cacao* L., la materia orgánica se descompone más rápido puesto que existe abundante micro fauna por lo tanto el reciclaje de metales pesados se intensifica, y de esta manera los cultivos pueden absorberlos nuevamente (Moco *et al.*, 2005).

En la región Ucayali la problemática de los metales pesados radica en que muchas parcelas presentan valores que sobrepasan los límites máximos permisibles (LMP), principalmente en aquellas parcelas donde se realiza un manejo convencional con el uso de productos químicos como fertilizantes y pesticidas (Campos *et al.*, 2015). Así mismo el problema se intensifica porque los productores locales no tienen conocimiento de la acumulación de Cadmio en los granos de cacao, por lo que los trabajos de determinación y cuantificación de metales pesados en suelos y granos es el primer paso indispensable para realizar cualquier proyecto de remediación.

El presente trabajo de investigación tuvo como finalidad conocer los niveles de cadmio en los granos de *Theobroma cacao* L., “cacao” del clon CCN-51 cultivados en suelos de sistemas agroforestales con manejo convencional en la provincia de Atayala, puesto que en la región Ucayali los estudios en este tema son escasos y los existentes son muy poco difundidos, por esa razón la cuantificación de cadmio es muy importante ya que permitirá conocer si los sistemas combinados de cacao con especies forestales son aptos para la mitigación y control de estos elementos en el suelo y su acumulación en las almendras de cacao, lo cual puede influir para su comercialización, especialmente la exportación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar los niveles de cadmio en granos de *Theobroma cacao* L. “cacao” del clon CCN-51 y en suelos de sistemas agroforestales con manejo convencional en la Provincia de Atalaya, Ucayali – Perú.

Objetivos específicos

- Determinar los niveles de cadmio total y disponible en suelo de cultivos de *Theobroma cacao* L. “cacao”, con sistemas agroforestales de manejo convencional en la Provincia de Atalaya, Ucayali – Perú.
- Determinar los niveles de cadmio en granos de *Theobroma cacao* L. “cacao”, del clon CCN -51 en parcelas con sistemas agroforestales de manejo convencional en la Provincia de Atalaya, Ucayali – Perú.
- Estudiar la correlación entre la CIC, pH, cadmio disponible y cadmio total de los suelos con sistemas agroforestales de manejo convencional y el contenido de cadmio en los granos de *Theobroma cacao* L. “cacao” del clon CCN-51.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1. Antecedentes internacionales

Aguirre *et al.* (2020) en el trabajo de investigación “Contenido de metales pesados en suelos y tejidos de cacao en el departamento del Magdalena, Colombia: énfasis en cadmio”, el objetivo fue determinar el contenido de cadmio (Cd), níquel (Ni), plomo (Pb) y cromo (Cr) en dos regiones productoras de cacao en el Norte de Colombia. La metodología consistió en el análisis de las hojas, cáscaras y granos de cacao, así como de los suelos de las parcelas evaluadas. El análisis de los metales pesados fue realizado por medio de espectrofotometría de absorción atómica (EAA). Los parámetros obtenidos de las determinaciones químicas (tejido vegetal y suelo) fueron sometidos a análisis de varianza y prueba post hoc de Tukey ($p < 0,05$). Según los resultados el contenido medio de Ni, Pb y Cr en los tejidos vegetales no excedieron los límites máximos permisibles establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos. El contenido medio de Cd en los granos fue de $0,51 \text{ mg kg}^{-1}$ en la región 1 (Santa Marta) y $0,66 \text{ mg kg}^{-1}$ en la región 2 (Banana), que fueron considerados riesgosos según los informes de la Unión Europea y restringen la exportación del producto. El estudio concluyó que la concentración de cadmio en los granos de cacao fluctuó entre zonas y parcelas, pero todos los valores superan el límite permisible ($< 0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$) por bajas concentraciones de 0.01 mg.kg^{-1} lo que indica que los granos están ligeramente contaminados. Sin embargo, la concentración de Cd en el suelo muestra que el suelo es óptimo para el cultivo de cacao, lo que sugiere que el origen del Cd fue antropogénico y está relacionado con el manejo del cultivo.

Furcal-Beriguete y Torres-Morales (2020), en el estudio “Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica”, se tuvo como objetivo determinar los niveles de cadmio en granos de cacao no fermentados en tres regiones (Región

Sur: Guatuso y Región Norte: San Carlos) altamente productivas en Costa Rica. La investigación fue de tipo exploratoria y descriptiva. Las técnicas fueron la observación, el muestreo de suelos, hojas, raíces y granos de cacao y el instrumento fue el espectrofotómetro de absorción atómica. La metodología consistió en la colección de muestras de granos de cacao. Para analizar el contenido de cadmio en los granos, se utilizó el procedimiento del plasma de acoplamiento inductivo (ICP) y un espectrofotómetro óptico. La población en estudio fueron todas las parcelas de las 2 regiones evaluadas (Guatuso y San Carlos), tomando una muestra de 19 parcelas. Para analizar los datos recolectados usaron la Correlación de Pearson entre los promedios encontrados, utilizando el programa SPSS, versión 21. Los resultados mostraron que los promedios de cadmio en los granos en la región Norte fueron de 1,0 a 1,8 mg.kg⁻¹ y en la región Sur fueron de 1,3 a 4 mg.kg⁻¹ las cuales superaron los límites máximos permisibles (< 0,5 mg.kg⁻¹). El estudio concluyó que los órganos como las hojas y las raíces pueden acumular el cadmio en sus tejidos y transferirlo a los granos donde se detectaron concentraciones altas.

Gramlich *et al.* (2018) en el estudio “Absorción de cadmio en el suelo por el cacao en Honduras”, el objetivo fue determinar el contenido de cadmio en granos de cacao, hojas de cacao y cáscaras de mazorcas de cacao y su relación con el suelo en las zonas productoras de Honduras. La población en estudio fueron todas las parcelas de cacao convencionales al norte y este de Honduras y la muestra estuvo conformada por 55 parcelas. La metodología consistió en la colección de muestras de suelos y granos de cacao de las parcelas evaluadas. Para el análisis de datos se usó el análisis de varianza (ANOVA) y para las pruebas post-hoc se usó el método de Tukey HSD en el programa R versión 3,2,3. Los resultados las concentraciones de cadmio en los granos fueron de 1,1 a 0,2 mg.kg⁻¹ los cuales superaron los límites permisibles (< 0,5 mg.kg⁻¹) y en suelos de 0,25 a 0,02 mg.kg⁻¹ los que también superaron los límites permisibles en suelos agrícolas (< 1,4 mg.kg⁻¹). Así mismo el cadmio del suelo en gradientes difusivos fue el mejor predictor del cadmio del grano ($R^2 = 0,5$). El estudio concluyó en que las concentraciones más altas de cadmio en los granos se encontraron en los sustratos aluviales, así el valor de la regresión ($R^2 = 0,5$) requiere un mayor número de muestras.

Chávez *et al.* (2015) en el trabajo de investigación “Concentración de cadmio en granos de cacao y su relación con el cadmio del suelo en el Sur de Ecuador”, el objetivo fue determinar los niveles de cadmio en suelos y en hojas, cáscaras y granos de cacao en parcelas del Sur de Ecuador (Guayas). La población en estudio fueron todas las parcelas de producción en la región Sur del Ecuador, de las cuales la muestra estuvo conformada por 19 parcelas en Guayas. Las muestras de suelo fueron colectadas a diferentes profundidades de 0 a 5; 5 a 15; 15 a 30 y 30 a 50 cm, así mismo las muestras de los tejidos como los granos de cacao también fueron colectadas de las mismas parcelas. La metodología consistió en la colección de muestras de suelos y granos de cacao para analizar el contenido de cadmio. Los datos fueron analizados con el software JMP® (versión 8,2 instituto SAS), usando el análisis de varianza (ANOVA) de una vía y las correlaciones entre el suelo y las plantas de cacao mediante la correlación por pares y regresión simple. Los resultados mostraron que los valores de cadmio extraíble en los suelos fueron de 0,40 y 0,10 mg.kg⁻¹ y los valores de cadmio recuperable variaron de 0,88 a 2,45 y de 0,06 a 2,59. Según la “United States Environmental Protection Agency” USEPA los valores del cadmio recuperable fueron críticos para los suelos agrícolas los cuales superaron el 0,43 mg.kg⁻¹ el cual es importante para conocer si ese suelo es apto para producir alimentos y evitar su posible contaminación. Por otro lado, el cadmio total en los tejidos disminuyó de la siguiente forma: granos, cascara y hojas. El contenido de cadmio en los granos de todas las parcelas evaluadas fue de 0,02 a 3 mg.kg⁻¹ con un promedio de 0,94 mg.kg⁻¹ los cuales superaron a los límites máximos permisibles (< 0,5 mg.kg⁻¹). El estudio concluyó que en los suelos superficiales y en los granos de cacao evaluados de todas las parcelas superaron los límites máximos permisibles por lo que en esa zona existe contaminación por cadmio.

1.1.2. Antecedentes nacionales

Santander *et al.*, (2021) en el trabajo de investigación “Determinación del contenido de cadmio en suelos, frutos, granos fermentados y secos, licor de cacao y chocolate en zonas productoras (Huingoyacu, Panamá y Tingo de Sapoosa) de la Región San Martín, Perú”, el objetivo fue determinar el contenido de cadmio en granos de cacao seco y fermentado, así como en los suelos de parcelas de cacao. El contenido de cadmio fue determinado por espectrofotometría de absorción atómica, utilizando muestra filtrada obtenida de 0,5 g de muestra seca y 5 ml de solución nítrica perclórica, previa digestión. Según los resultados los valores máximos obtenidos para contenido de cadmio (ppm) fueron: en suelos, 0,960; en

hojas 0,780; en testa y cotiledón 0,098; en almendras fermentadas y secas 0,075; en licor de cacao, 0,210; en tabletas de chocolate al 70 % de cacao 0,625. Cabe mencionarse que el límite máximo permisible de cadmio es de 0.8 mg.kg⁻¹ para granos de cacao y productos derivados y los valores encontrados son menores a estos límites. El coeficiente de correlación (R²) para almendras fermentadas y secas indicó que no existió diferencias significativas entre zonas, mientras que en licor de cacao la muestra de Tingo de Saposoa fue estadísticamente diferente (p <0,05), estando todos los valores por debajo del máximo permisible (< 0,5 mg.kg⁻¹). El estudio concluyó que el alto contenido de cadmio en el chocolate puede deberse a los ingredientes complementarios (leche, panela) o al equipo de procesamiento utilizado y no a los granos.

Llatance *et al.* (2018) en el trabajo de investigación “Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú”, el objetivo fue determinar los niveles de cadmio en las especies: *Malvaviscus sp.*, *Theobroma cacao* L., *Carludovica palmata* Ruiz & Pav., *Attalea sp.*, *Pouteria caimito* (Ruiz & Pav.) Radlk., *Vochysia sp.* y *Matisia cordata* Bonpl., en una parcela con sistema agroforestal en la región Amazonas en Perú. La metodología consistió en la colección de muestras de suelos, hojas, raíces y tallos de plantas de cacao para analizar su contenido de cadmio, utilizando el método de espectrofotometría de absorción atómica (EAA). La población en estudio fueron todas las especies que crecen en la parcela agroforestal y la muestra estuvo conformada por 6 especies. Los datos obtenidos se analizaron mediante el análisis de varianza (ANOVA), y para identificar la especie con mayor potencial de acumulación de cadmio, se realizaron las pruebas de Tukey y Duncan. Según los resultados, *Theobroma cacao* L., presentó los niveles más altos de cadmio en todos los tejidos en comparación a las demás especies evaluadas (de 0,4 a 1,6 mg.kg⁻¹). El estudio concluyó que el cacao fue la especie que presentó mayor susceptibilidad a la absorción y acumulación de cadmio, aun cuando las concentraciones en el suelo eran bajas.

Tantalean y Huauya (2017) en el estudio “Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelos aluviales y residuales en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana”, Huánuco, Perú; el objetivo fue determinar el contenido de cadmio en los diferentes tejidos del cultivo de cacao del clon CCN-51, en suelos aluviales y

residuales. El contenido de cadmio fue analizado en muestras de suelo colectadas de las calicatas construidas con la finalidad de obtener los datos de los horizontes, así mismo fueron analizadas las ramas, hojas, almendras y raíces de las plantas de cacao. Para obtener las cantidades de Cd en muestras de suelo y de los diferentes tejidos de la planta se usó Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA). La población en estudio fueron todas las parcelas en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana y la muestra estuvo constituida por 7 parcelas de cacao. Para analizar la base de datos se usó el programa SPSS versión 22. Según los resultados los contenidos de cadmio disponible en el suelo en los horizontes A, AB, y C fueron 1,71; 0,52 y 0,46 mg.kg⁻¹ en el suelo residual. Así mismo en el suelo aluvial en los horizontes A, AC, C1 y C2 los contenidos de cadmio fueron de 1,26; 2,55; 3,68 y 1,80 mg.kg⁻¹. Por otro lado, en el suelo residual los contenidos de cadmio en las raíces, ramas, hojas, almendras y cáscaras fueron 1,22; 2,29; 1,44; 0,84 y 0,77 mg.kg⁻¹ y en el suelo aluvial fueron de 1,14; 2,97; 2,84; 1,08 y 0,75 mg.kg⁻¹ respectivamente. El estudio concluyó que el suelo aluvial presentó mayor contenido de cadmio disponible y en los suelos residuales las ramas fueron las que más acumularon cadmio total.

Arévalo *et al.* (2016) en el trabajo de investigación “Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú”, el objetivo fue determinar los niveles de varios metales pesados incluyendo el cadmio en suelos de plantaciones ubicadas en tres zonas de mayor producción de cacao en el Perú. La metodología consistió en la toma de muestras de suelos a diferentes profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 cm), en calicatas de 80 cm. La población en estudio fueron todas las parcelas de cacao de la zona centro, sur y norte del Perú, y la muestra estuvo conformada por 19 parcelas (Huánuco, San Martín y Junín en la zona centro, Tumbes, Piura, Cajamarca, Amazonas en la zona Norte y Cuzco en la zona Sur). Los datos obtenidos a partir del análisis de suelos fueron procesados utilizando el programa InfoStat, versión 2014, usando el análisis de varianza (ANOVA) y comparando las medias con la prueba de Scott y Knott ($p < 0.05$), y realizando la prueba de correlación de Pearson. Según los resultados los niveles de cadmio en suelos no sobrepasaron los límites máximos permitidos en suelos agrícolas ($< 1,4$ mg.kg⁻¹) en todas las parcelas evaluadas. El estudio concluyó que los suelos evaluados tienen buenas condiciones físicas y químicas que favorecen el cultivo de cacao. Así mismo hubo una correlación positiva entre pH, Materia orgánica (M.O), azufre (S), fósforo (P) y potasio (K) con el cadmio disponible.

Campos *et al.* (2015) en la investigación “Presencia de metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la región Ucayali”, tuvo el objetivo de determinar los niveles de cadmio y plomo en suelos de parcelas de “cacao” *Theobroma cacao* L., en las Provincias de Padre Abad y Coronel Portillo, Región Ucayali, Perú. La metodología consistió en la toma de muestras de suelo a 30 cm de profundidad de cada una de las parcelas evaluadas, con el patrón de recorrido en zig - zag. El estudio se realizó en 14 parcelas de cacao con manejo convencional. Los datos obtenidos a partir del análisis de suelos fueron procesados utilizando el programa SPSS versión 2019, usando el análisis de varianza (ANOVA). Los resultados evidenciaron que, en todas las parcelas evaluadas, los contenidos de cadmio disponible en los suelos no sobrepasaron los límites máximos permisibles para suelos agrícolas ($< 1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$). La investigación concluyó en que los contenidos de cadmio no fueron más altos que los límites establecidos, de igual forma con los niveles de plomo no fueron significativos en cuanto a los valores para suelos agrícolas ($< 70 \text{ mg.kg}^{-1}$).

Huauya y Huamani (2014), en la investigación “Macrofauna edáfica y metales pesados en el cultivo de cacao, *Theobroma cacao* L. (Malvaceae), Ucayali, Huánuco, Perú; el objetivo fue determinar los valores de cadmio y plomo en parcelas de cacao orgánico de bosques secundarios en las regiones de Ucayali y Huánuco en la Selva Peruana. La metodología consistió en la toma de muestras compuestas de suelo de 1 kg para su respectivo análisis. Las poblaciones en estudio fueron las parcelas de la región Ucayali y Huánuco, de las cuales la muestra estuvo conformada por 22 parcelas (17 en Huanuco y 5 en Ucayali). Los datos obtenidos a partir del análisis de suelos fueron procesados utilizando el programa SPSS versión 2017, realizando el análisis de varianza (ANOVA), prueba de tukey y análisis de correlaciones utilizando la Correlación de Pearson. Los resultados mostraron que los valores promedios encontrados de plomo y cadmio fueron $3,02 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $0,53 -2 \text{ mg.kg}^{-1}$. El estudio concluyó que no se encontraron una alta contaminación de cadmio y plomo puesto que no sobrepasan los valores para los suelos agrícolas.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Generalidades de la especie *Theobroma cacao* L.

Dentro de las generalidades de la especie *Theobroma cacao* L., se encuentra lo siguiente:

a) Origen y distribución

La especie *Theobroma cacao* L., es originaria del Sur de América, específicamente de los bosques tropicales en la región que se encuentra comprendida entre las cuencas de los ríos Napo, Caquetá y Putumayo en el río Amazonas (Durán, 2010).

De manera general el cultivo se extiende a lo largo de varios países, desde la región del Amazonas (Perú, Ecuador, Venezuela y Brasil), las Guayanas llegando a México en Centro América. También está presente en países del Caribe, Asia y África donde se registra la mayor producción de cacao en el mundo (Figura 1). Según Romero y Vargas (2016), en el Perú el cultivo se extiende por varias regiones como Piura, Madre de Dios, Loreto, Junín, Huánuco, Cuzco, Cajamarca, Ucayali, Ayacucho, Pasco y San Martín. Geográficamente esta especie de cacao se cultiva entre las latitudes de 15° al norte y 15° al sur. También se puede encontrar a latitudes de 23°26' del hemisferio norte que comprenden a las latitudes subtropicales y 23°26' del hemisferio sur.

Según Romero y Vargas (2016), el Perú ha incrementado su área y volumen de producción de grano seco de cacao, es por ello que el cultivo se produce en varias regiones del país, ubicándose la mayor parte de las zonas productivas en Ceja de Selva y Selva (siendo Región San Martín la que produce el mayor volumen), en donde también se produce el mayor volumen. El clon de cacao que más se produce en el Perú es el CCN – 51, el cual está distribuido por todo el país, aunque también existe una población menor de cacao nativo y criollo, nombre al que se refieren comúnmente al cacao híbrido. Es por ello que el Perú se encuentra entre los países de mayor producción del mundo y en la región Sudamericana destaca también como uno de sus principales productores junto a Brasil y Ecuador.

Figura 1

Distribución geográfica de la especie *Theobroma cacao* L



Nota. Romero (2016).

b) Taxonomía

The International Plant Name Index (2021) describe a la especie *Theobroma cacao* L., de la siguiente forma:

- **Reino:** Plantae
- **Subreino:** Tracheobionta
- **División:** Magnoliophyta
- **Clase:** Magnoliopsida
- **Subclase:** Dilleniidae
- **Orden:** Malvales
- **Familia:** Sterculiaceae
- **Subfamilia:** Byttnerioideae
- **Género:** *Theobroma*
- **Especie:** *Theobroma cacao* L.

c) Descripción botánica

El *Theobroma cacao* L. es una especie diploide ($2n = 20$ cromosomas), de porte alto con 8 - 20 m de altura y de ciclo vegetativo perenne (Figura 2a) sus características botánicas son:

➤ Raíces

Es de tipo pivotante de 1,5 - 2 m de profundidad. En los primeros 30 cm se ubican las raíces laterales de la planta. Puede alcanzar una longitud horizontal de 5 – 6 m, y esta extensamente distribuida en el suelo (Benito, 1991).

➤ Tallo

Es de crecimiento vertical durante su primera fase que dura de 12 a 15 meses. Después aparecen de 4 a 5 ramitas las que se denominan “horquetas”, las cuales crecen de forma horizontal (Figura 2b). Aparecen cada 3 a 4 veces brotes (chupones) de crecimiento vertical, las cuales se ubican debajo de las horquetas (Benito, 1991; García, 2007).

➤ Hojas

Presentan dimensiones de 15 a 50 cm de longitud y de 5 a 20 cm de ancho, su ápice es romo; de crecimiento vertical (Figura 2c). El limbo puede ser elíptico y abovado, sus peciolo presentan “pulvínulos” que son engrosamientos, uno de ellos esta insertado en el tallo, y otro en el limbo de la hoja. Las ramas son plagiotrópicas y los pulvínulos están casi unidos (Benito, 1991).

➤ Flores

Son hermafroditas de tipo pentámeras también son completas y perfectas con androceo y gineceo. Aparecen en las ramas ya sea solas o en cojines florales (García, 2007) (Figura 2d), su diámetro esta entre 1 a 1,5 cm de longitud. Los sépalos son de prefloración valvar la que presenta una base cóncava y un puente que es delgado con un ápice llamado “lígula”. Los estambres están en el ápice (Benito, 1991). Los estaminodios presentan infertilidad, protegen

a gineceo y atraen insectos. El ovario es de tipo súpero, pentalocular y pentacarpelar. Cada lóculo contiene dos series de óvulos, entre 30 a 60 óvulos por ovario.

➤ **Frutos**

Son bayas (Figura 2e), de 10 – 42 cm de longitud, pueden ser oblongas, elípticas, ovadas, esféricas y oblatas; su superficie puede ser lisa o rugosa, según los genotipos puede ser de rojo a verde cuando están inmaduros. El ápice de las mazorcas puede ser agudo, obtuso, atenuado, redondeado, apezonado o dentado; la cáscara posee surcos superficiales o profundos (García, 2007). Posee un epicarpio y el endocarpio carnosos separados por un mesocarpio fino y de tipo leñoso.

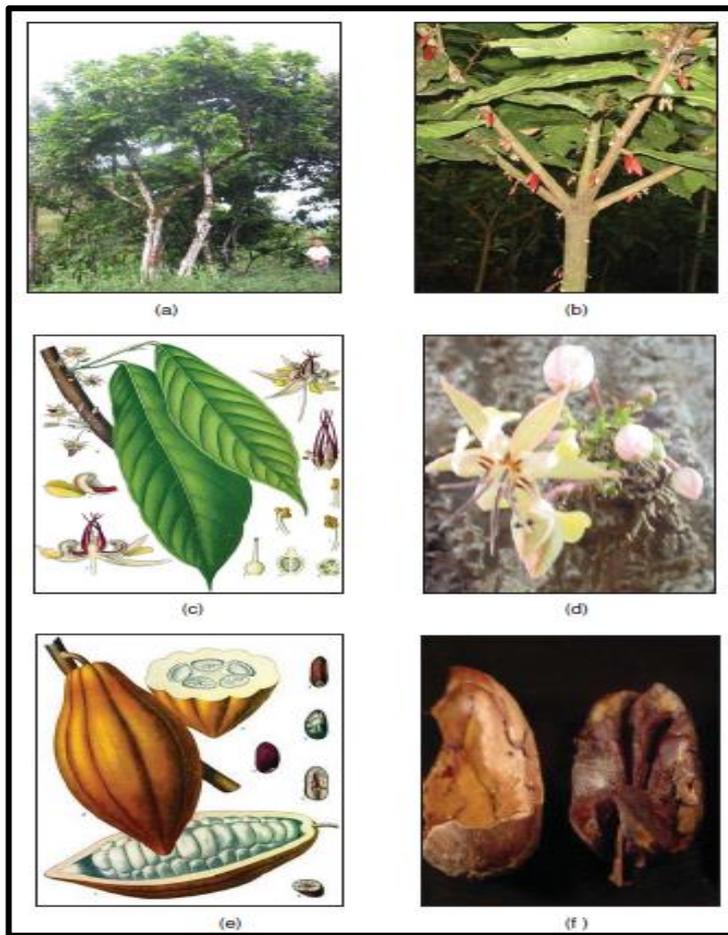
➤ **Semilla**

Son tamaño variable de 1,2 a 3 cm, están cubiertas con un mucílago blanquecino, que poseen sabores como floral, frutal y nueces, también presenta grados de acidez, dulzura y astringencia. Los cotiledones pueden ser morados, violetas, rosados o blancos, según su genética. (Figura 2 f). Por otro lado es importante resaltar que el primer centro de diversidad genética se ubica en el Perú, específicamente en la zona Nororiental, pero es posible encontrar muchas poblaciones genéticas de origen silvestres y nativas que están dispersados por el Centro y Sur de la Amazonía alta, por lo que se llegaría a la conclusión que no solo en dichas partes estaría situado su origen sino que también incluirá la región centro y sur por pertenecer a dicha zona, incluyendo en ellas las partes entre los ríos Huallaga, Ucayali y Urubamba (García, 2008).

Así mismo, mencionar que las poblaciones nativas de cacao en la región amazónica; representan un potencial inmenso con respecto a su utilización en programas de mejoramiento genético, ya que están adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas de la zona, además, muchas de esas poblaciones pueden tener características ejemplares de calidad, como el aroma, sabor, color y contenido nutricional, las mismas que se pueden aprovechar teniendo en cuenta una estrategia a mediano y largo plazo.

Figura 2

Descripción botánica de la especie *Theobroma cacao* L



Nota. Elaborado por García, (2008). (a) Figura del árbol completo en estado natural. (b) Detalle del fruto en el árbol. (c) Detalle de las hojas y sus componentes. (d) Detalle de las flores. (e) Detalle del fruto y su interior. (f) Detalle del grano seco del cacao.

d) Requerimientos de climáticos y fisiología de la planta

Para que la especie *Theobroma cacao* L., obtenga una buena producción en los campos de cultivo, es necesario que cuente con las condiciones agroclimáticas adecuadas. En una plantación de cacao los factores climáticos influyen en gran manera, por lo que la temperatura y humedad deben favorecer al cultivo, el cual es una especie perenne y su ciclo vegetativo está regulado por el tipo de clima y razón por la cual se realizan los calendarios agronómicos (Paredes, 2003).

Así mismo, Paredes (2003), menciona que en cuanto a las condiciones edáficas y climáticas la especie requiere una precipitación pluvial de 1600 a 2500 mm, distribuidos durante todo el año. La temperatura para el cultivo de cacao debe estar entre los valores siguientes: mínima de 23 °C; máxima de 32 °C y óptima de 25° C. En cuanto a los vientos, las plantaciones soportan velocidades de hasta 4 m/seg. En cuanto a la altitud el cacao se puede establecer entre 800 a 1400 m s.n.m. Por último, para la luminosidad para plantaciones ya establecidas, se considera que una intensidad lumínica menor del 50 %.

En cuanto a la fisiología, las poblaciones de cacao que provienen de América del Sur están adaptadas a condiciones de sombra, razón por la cual es una especie tolerante a la sombra, pero específicamente no es una planta de sombra (Souza y Díaz, 2004).

La tolerancia de las plantas a las radiaciones solares es un aspecto importante, ya que tiene poco tiempo de resistencia, y la vida de las hojas es de 450 y 250 días en plantas bajo sombra o bajo sol lo cual es bastante corta (Muller *et al.*, 1992).

La intensidad de sombra es el punto crucial que afecta a las plantas, puesto que altera otros factores como, por ejemplo: la temperatura, evaporación, humedad y disponibilidad de agua en el suelo. Además, en este caso se podría mencionar la misma fertilidad del suelo que es considerado otro factor importante. Finalmente, el tiempo de descomposición de la hojarasca junto con los factores antes mencionados afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas y por ende la producción (Beer *et al.*, 1998).

1.2.2. El cadmio (Cd) como elemento y su presencia en el suelo

El cadmio (Cd) es un elemento traza que está presente de forma natural en el suelo y es casi común encontrarlo en suelos agrícolas en grandes o pequeñas cantidades. Este elemento está involucrado en procesos fisiológicos y bioquímicos en los seres vivos, ya que forman parte de la cadena trófica (Sanabria, 2002).

Si el cadmio sobrepasa los límites máximos permisibles representan un grave problema para los seres vivos cuando se consume. El cadmio de acuerdo a su peligrosidad se encuentra en los niveles más altos junto a otros elementos como el Hg, Pb y As. Considerando sus propiedades, el cadmio es un metal pesado de forma divalente, el cual tiene una masa atómica con un valor de 112,41 y un peso atómico de 48. También, es soluble en ácidos minerales y sales de sulfato y cloro, mas no en el agua (H₂O) lo cual representa una de sus características químicas. Su presencia en los suelos se debe a las actividades antropogénicas como la agricultura y minería, y pueden considerarse también a los incendios forestales (Sanabria, 2002).

En la Tabla 1 se presentan las fuentes de incorporación de cadmio en el suelo de las cuales la gran mayoría de ellas son de origen antropogénico.

Tabla 1

Fuentes de incorporación de cadmio (Cd) en el suelo

Actividades antropogénicas	Naturales
Estiércol y lodos residuales	Actividad de los volcanes
Fertilizantes nitrogenados y fosfatados	Roca madre
Manufacturas de galvanizado	
La minería	
Alimentos fosfatados	
Fundición de metales	

Nota. Elaborado a partir de Pérez *et al.* (2012).

El cadmio en el suelo está presente como metal, junto con los complejos óxidos. A continuación, se mencionan algunos usos en la elaboración de productos en las que es parte el cadmio: aleaciones, placas de acero, plástico, esmaltes, baterías y cerámicas con otros elementos químicos como el cobre y plomo (Robledo y Castaño, 2012). El cadmio también es considerado como uno de los mayores contaminantes del medio ambiente. Algunas de las características del cadmio son las siguientes:

- Son perjudiciales para los animales y seres humanos en altas cantidades.
- En las especies vegetales tiende a bioacumularse fácilmente.
- Persiste en gran manera en el ambiente.

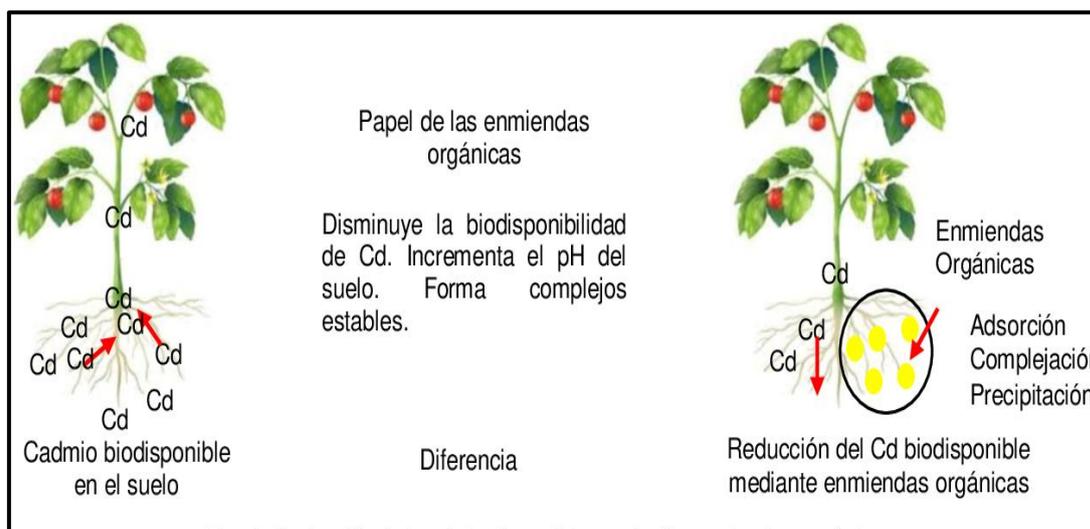
- Se traslada grandes distancias por medio del viento y agua por su gran movilidad.

En los campos agrícolas es casi normal encontrar cadmio en grandes o pequeñas cantidades según el manejo y la naturaleza de los suelos, y en las plantaciones de cacao es uno de los metales pesados más comunes. Su presencia en suelos agrícolas se aduce al uso de productos químicos como los fertilizantes nitrogenados y fosfatados que tienen cadmio en su composición. Así mismo, se le puede encontrar en los abonos orgánicos debido a los residuos que acumularon cadmio durante su producción (Martí *et al.*, 2002; Rosal *et al.*, 2007; Acosta *et al.*, 2003).

Por otro lado, el cadmio es un elemento que presenta alta movilidad en el suelo, por lo que se realizaron diferentes estudios con el objetivo de inmovilizar este elemento en el suelo y para ello se utilizaron diferentes tipos de enmiendas orgánicas (Figura 3) (Park *et al.*, 2011).

Figura 3

El cadmio (Cd) en el suelo y las enmiendas orgánicas como reductores de su biodisponibilidad



Nota. Elaborado por Park *et al.*, (2011).

1.2.3. Efectos del cadmio (Cd) en la salud humana

El cadmio (Cd) en cantidad que sobrepasen los límites máximos permisibles en los alimentos puede causar una serie de efectos negativos y tóxicos para la salud humana. La fuente principal de la exposición de cadmio en los organismos vivos son el agua y los alimentos, las partículas de cadmio son absorbidas por el aparato respiratorio y esto se da en aquellos

que trabajan expuestos al humo en las fábricas donde utilizan este elemento, también, es muy común en los fumadores. En cuanto a los animales su exposición, es más amplia, pero sin duda que es más bajo que los seres humanos. En el caso de las especies de plantas como los cereales, tubérculos y verduras la bioacumulación de cadmio se da en mayor medida ya que son ricos en fibra que favorecen la absorción y acumulación del elemento en sus tejidos (Rogers *et al.*, 2012; Hernández, 2011 y Dickson, 2013).

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud, conocida por sus siglas en Ingles “WHO” (World Health Organization, 2013), los signos, síntomas y la presentación de las alteraciones que causa el cadmio en el organismo son diversas y está relacionado a la cantidad presente en cada cuerpo, así como también al tiempo de exposición, y a la vía en la que el metal ingreso al organismo. Una sobre exposición al cadmio puede causar disfunción renal, anemia, osteoporosis, cálculos renales, trastornos respiratorios, trastornos nerviosos, hipertensión, también algunas complicaciones como paresia, sudoración, contracciones musculares involuntarias, alteración al sueño, vértigo, pérdida de peso y apetito, cáncer de pulmón y próstata. En los casos donde se presenta una intoxicación aguda puede causar gastroenteritis, vómito, náuseas, edema pulmonar, fallo renal, diarrea, dolor abdominal y en muchos casos también pueden presentarse alteraciones cromosómicas (International Lead Association, 2014; Järup, 2012; World Health Organization, 2008). En la Tabla 2 se observan los límites permitidos de metales pesados en el organismo y en el caso del cadmio se puede notar que es una de las cantidades más bajas con 0,005 mg/L.

Tabla 2*Límite permitido de metales pesados en el organismo*

Metales pesados	Límite permitido por el “Environmental Protection Agency” EPA (mg/L)
Arsénico (As)	0,010
Cadmio (Cd)	0,005
Hierro (Fe)	0,3
Plomo (Pb)	0,015
Selenio (Se)	0,05
Talio (Tl)	0,002
Zinc (Zn)	5,0
Bario (Ba)	2,0
Plata (Ag)	0,10

Nota. Elaborado a partir de Environmental Protection Agency (USA) (2010).

1.2.4. El cadmio (Cd) en el cultivo del cacao

Durante las últimas décadas el cultivo de la especie *Theobroma cacao* L. “cacao” fue creciendo en volumen e interés como actividad por parte de los productores agrícolas en el Perú, convirtiéndose en uno de los principales productos de exportación del país. Además, muchos países de América latina se han sumado a esta actividad productiva, sin dejar de lado a los países de África donde se encuentra la mayor producción de cacao del mundo. La producción estimada promedio de grano seco de cacao entre los años 2014 al 2015 fue de 4236 toneladas, de igual forma la tasa de crecimiento en la demanda de incremento en un 2,5 % en esos años. Durante ese tiempo algunos de los mayores productores mundiales de cacao como Ghana, Nigeria, Brasil, Indonesia y Costa de Marfil llegaron a producir alrededor de 3,286 miles de toneladas según The International Cocoa Organization (ICCO, 2014).

Los metales pesados como el cadmio (Cd) sin duda han generado mucha preocupación en los productores de cacao en el Perú y los demás países ya que debido a la amenaza que representan, se han establecido condiciones para el ingreso del cacao y sus derivados al mercado internacional. Así, de esta manera se enfatizó con mayor fuerza la consideración de los límites máximos permisibles de metales pesados en los alimentos. La norma 488 fue establecida por la Comisión Europea en años anteriores en el 2014, en donde se señalaron y enfatizaron los límites máximos permisibles de metales pesados en los granos de cacao y sus derivados (0,1 a 0,5 mg.kg⁻¹) (Nelino, 2021).

Por lo anterior los productores peruanos tuvieron cierta preocupación por conocer más sobre el tema, conocer la situación de su producto y las posibles formas de mitigación y control de estos elementos, en tal sentido realizaron muchos proyectos en varias zonas productoras para determinar el contenido de metales pesados en suelos y en los tejidos de las plantas de cacao (hojas, tallos, raíces y frutos).

En los campos de producción del cacao el problema que presentan las plantas es que absorben los metales pesados del suelo y los acumulan en los diferentes tejidos como las hojas, ramas, frutos y raíces (Augstburger *et al.*, 2000).

Esta absorción y acumulación de los metales pesados en los tejidos de las plantas de cacao tiende a incrementarse cuando se aplica de forma desmedida productos químicos como los fertilizantes nitrogenados y fosfatados, pesticidas, e incluso enmiendas orgánicas que están contaminadas (Martí *et al.*, 2002; Rosal *et al.*, 2007; Acosta *et al.*, 2003), esto hace que los productores busquen nuevas formas para no incorporar metales pesados al suelo y que estos no sean absorbidos por las plantas, puesto que para obtener altos rendimientos la gran mayoría de ellos utilizan insumos químicos, lo cual puede intensificar el problema. Otro punto muy importante en los campos de cultivo de cacao es el reciclaje natural y permanente que existe, una por la gran producción de biomasa que genera el cacao debido a la caída de las hojas y la otra forma es por la incorporación de abonos orgánicos al suelo elaborados con cáscaras de cacao, los cuales están contaminados con metales pesados.

1.2.5. Sistemas agroforestales

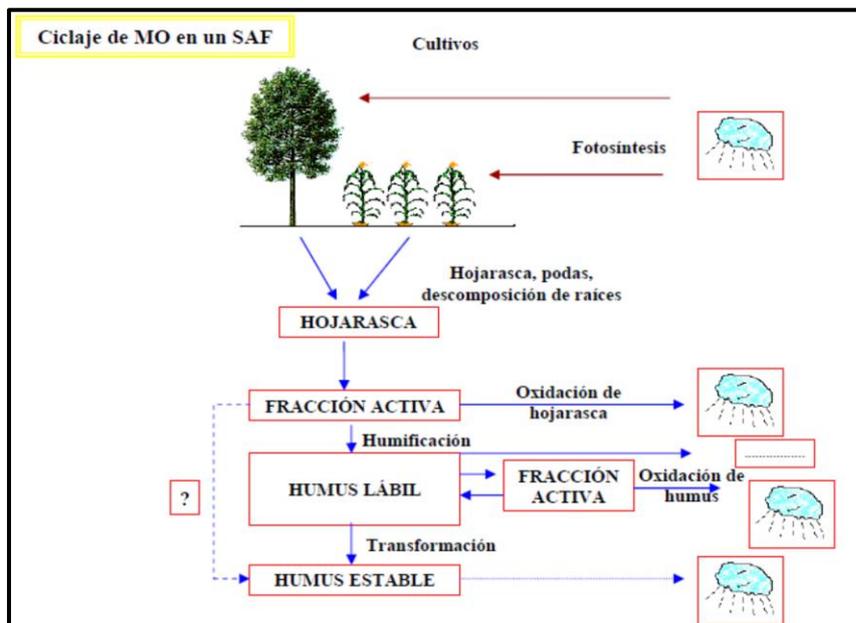
Concepto y generalidades de un sistema agroforestal

El Sistema Agroforestal (SAF) es un sistema combinado de animales, árboles y cultivos, por lo tanto, presenta características como: componentes, límites, ingresos, egresos e interacciones, dinámicas dentro de un campo de cultivo o de producción (Mendieta y Rocha, 2007). Es de saber que los sistemas agroforestales tienen grandes ventajas en comparación con los sistemas monocultivo durante el tiempo en producción. Entre esas principales ventajas se encuentran: la mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo, el reciclaje de nutrientes y el secuestro de carbono tal como se muestra en la Figura 4 (Feliciano *et al.*, 2018).

La combinación de especies forestales y agrícolas en los sistemas agroforestales es de gran importancia, por lo que se deben designar tierras para el desarrollo de esta ya que proveen de beneficios no solo a la diversidad del paisaje, sino también en la conservación de especies y disminuyendo las actividades humanas que perjudican el medio ambiente (Abada *et al.*, 2016).

Figura 4

Reciclaje de materia orgánica (M.O) en un sistema agroforestal



Nota. Elaborado por Mendieta y Rocha, 2007.

Por otro lado, en los sistemas agroforestales que involucran la especie *Theobroma cacao* L., presentan algunas características específicas de las plantas, puesto que estas pueden absorber una mayor cantidad de metales pesados frente a otras especies tal como se lo demostró en el trabajo de investigación realizado por Llatance *et al.* (2018), donde la especie *Theobroma cacao* L., acumuló mayor cantidad de Cd que otras especies forestales, siendo esta una ventaja si se quiere remediar suelos altamente contaminados con metales pesados en el trópico. Otra de las mayores ventajas que provee el cacao a los sistemas agroforestales que la combinan es que produce gran cantidad de hojarasca debido a su característica fisiológica de caída de las hojas, formando en el suelo una densa biomasa. Esta característica del cacao es una gran ventaja porque puede reciclar naturalmente nutrientes de las hojas que será la futura materia orgánica al descomponerse en el suelo (Vaast y Somarriba, 2014).

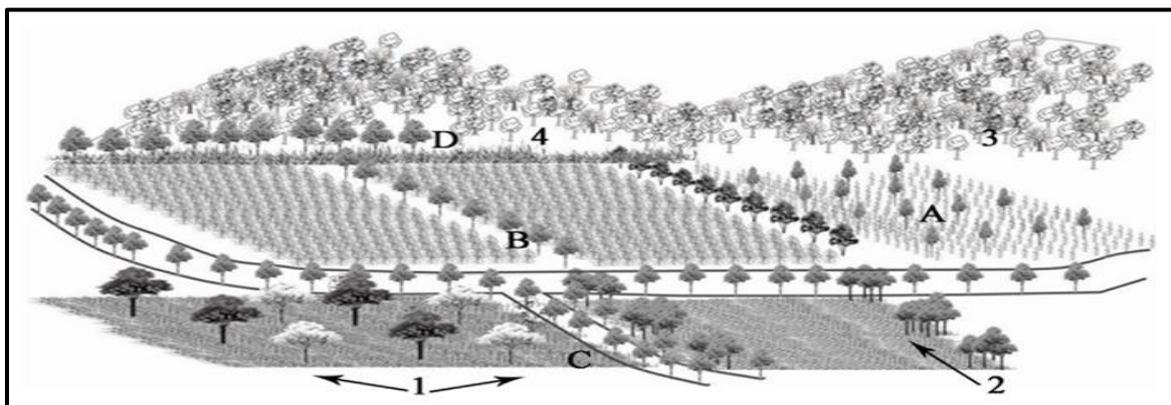
Los sistemas agroforestales también favorecen a la formación de microorganismos benéficos en el suelo y sus asociaciones con las especies de plantas que se siembran, a su vez estas asociaciones microbianas aceleran de forma eficiente la descomposición de la materia orgánica, lo que se traduce en mayor cantidad de nutrientes (Cline y Zak, 2015).

También existen otros sistemas más complejos como la conocida Agrosilvicultura que es un sistema que combina especies forestales y agrícolas asociados con ganado bovino. Este sistema utiliza especies vegetales que sirven como cobertura al suelo, la cual es muy importante para su conservación (Buyer *et al.*, 2017).

En la Figura 5 se puede observar el diseño de un sistema agroforestales en México que combinan especies forestales y agrícolas, mostrando diversidad en un ecosistema.

Figura 5

Ejemplo de un sistema agroforestal con diferentes especies agrícolas y forestales en México



Nota. Elaborado por Dzib, (2021).

Mendieta y Rocha (2007), mencionan que entre las ventajas que presenta un sistema agroforestal (SAF) frente a un monocultivo son las siguientes:

- Aprovecha mejor la radiación solar entre los estratos del sistema y utiliza de mejor forma el espacio vertical del ecosistema.
- Presenta un moderado microclima con mayor sombra, minimiza las altas temperaturas, el viento y evapotranspiración.
- Protege de mejor forma la erosión del suelo por los agentes climáticos como el agua y el viento.
- Fija mejor el nitrógeno (N) de la atmósfera que se realiza mediante las especies de árboles.
- Conserva la fertilidad y estructura del suelo mediante una mayor actividad biológica, aporte de materia orgánica, mayor extracción de nutrientes y reducción de la acidez.
- Recupera los suelos que han sido degradados.
- Ofrece productos numerosos como frutos, leña, madera, hojarasca, forraje, etc.
- En ambientes rurales se puede obtener una producción de calidad.
- Provee una mayor diversidad de especies, además de reducir el daño causado por las enfermedades y plagas en un cultivo.

Tipos de sistemas agroforestales (SAF)

La clasificación de los Sistemas Agroforestales (SAF) es importante para mejorarlas y evaluarlas en el tiempo, así como también para caracterizarlas. Mendieta y Rocha (2007), mencionan que los tipos de sistemas agroforestales más comunes son los siguientes:

a) Sistemas agrosilvopastoriles

A su vez los sistemas agrosilvopastoriles se dividen en:

- **Agricultura migratoria**

La agricultura migratoria o también llamada agricultura de subsistencia es un sistema que básicamente está enfocado en satisfacer la necesidad alimenticia de los agricultores que la practican, así como también es una fuente de habitación y combustible. En raras ocasiones está orientado a generar ingresos para los productores con los productos excedentes. En términos prácticos la agricultura migratoria es un sistema que involucra la tumba, roza y quema del bosque, que en muchos casos o podríamos decir que en la mayoría de veces se realiza en bosques primarios, la misma que se cultiva por un periodo corto para luego dar un periodo de descanso a la tierra (fase de barbecho). El periodo de descanso es generalmente mucho más largo que el periodo de producción y va entre 5 a 20 años, siendo solo el periodo de producción de 2 a 3 años. El uso transitorio de la tierra, así como la rotación de parcelas son características principales de este tipo de sistema.

- **Sistema de Plantaciones Forestales y el Sistema Taungya**

El sistema de plantaciones forestales y el sistema Taungya son métodos en las cuales interactúan las plantaciones de árboles con los cultivos anuales durante el tiempo en el que los árboles crecen y el follaje se encuentra densamente desarrollado. Presenta diferencias frente a la agricultura migratoria en la que los cultivos y árboles están solo temporalmente. En el sistema Taungya o también llamado agricultura de ladera, los cultivos y las especies de árboles crecen y se desarrollan desde el inicio y durante el tiempo que se establezca la parcela. Uno de los fines de este tipo de sistema es también la obtención de madera, que es el fin primordial,

por lo que los cultivos anuales asociados son considerados como una motivación hasta esperar el objetivo central. Otra de las características sobresalientes de estos sistemas es que las plantaciones forestales crecen y se desarrollan de la mejor forma puesto que no tienen competencia, ya que existe menos prevalencia de malezas, además de que los árboles estarán favorecidos por el reciclaje de nutrientes.

- **Sistemas de árboles para sombra de cultivos**

Estos sistemas son combinaciones de cultivos perennes con árboles, tal es el ejemplo de los cultivos de *Theobroma cacao* L., “cacao” y *Coffea arabica* “café” que son básicamente los cultivos agrícolas que utiliza este sistema. La especie *Theobroma cacao* L., en este sistema presenta algunas ventajas que otros cultivos como el café por su capacidad para crecer y desarrollarse en purmas bajas de suelos fértiles. Por ejemplo, en Brasil, uno de los mayores productores de cacao en el mundo, los campos de cultivo están dispuestos bajo sombra de varias especies de árboles que particularmente fueron establecidos para este propósito. Los suelos fértiles son la clave para que estos sistemas sean exitosos, a parte de un buen mercado para vender sus productos, además, este sistema tiene grandes oportunidades para ser mejorado mediante el uso de variedades elites o mejoradas de especies de frutales y cultivos perennes. Para diversificar la producción en un campo de cultivo, es importante combinar el sistema con árboles, por lo tanto, la elección de un sistema con especies de árboles de sombra está en función a la demanda de los productos que ofrece (materia prima) en el mercado. La razón principal de estos sistemas radica en la seguridad económica para vender sus productos.

- **Árboles en los campos de cultivos: cortinas, cercas vivas, árboles en los bordes y dispersos**

Este tipo de sistema consiste en utilizar los árboles o especies de arbustos que son distribuidos al azar o de manera sistemática en los linderos de las parcelas agrícolas en producción. Las cercas vivas son elaboradas sembrando líneas de árboles o en muchos casos también arbustos que ponen limite a las parcelas, a parte de esa función proveen leña, madera, forraje, frutos y otros productos. Las ventajas de este tipo de sistemas pueden ser muchas, pero entre las principales pueden considerarse a la siguientes:

- Proveen de varios productos que puede venderse, ya sea medicina, leña, alimento, forraje etc.
 - Protegen de los vientos fuertes a los animales y cultivos sembrados.
 - Sirven como barrera para proteger a los suelos de la erosión.
 - Tienen un costo bajo y duran mucho tiempo.
 - Son una fuente importante de biomasa.
- **Huertos caseros**

Dentro de las prácticas agroforestales más antiguas se encuentran los denominados huertos familiares. La principal característica de estos sistemas es que cubren las necesidades o requerimiento de alimentación de los agricultores o también de las comunidades mediante la producción en pequeña escala, pudiendo vender los productos sobrantes. Los arbustos son intercalados con los árboles altos, y se incorpora los cultivos anuales para la producción de alimentos, producir abono verde y proteger al suelo de la erosión.

b) Sistemas silvopastoriles

Los denominados sistemas silvopastoriles consisten en la combinación de especies de frutales con árboles forestales y animales, pero sin la inclusión de ningún cultivo. Pueden practicarse en distintos niveles, desde plantaciones comerciales con la interacción del ganado hasta el pastoreo simple de una agricultura para la subsistencia.

Algunas de las características de este sistema se describen a continuación:

- Los animales proveen algunos aspectos en la aceleración del reciclaje de nutrientes.
- Los árboles de especies forestales proveen de sombra y un microclima bueno para los animales.
- Los animales en el campo pueden ayudar a la diseminación de las semillas que favorece a la germinación.
- En este sistema existen los ingresos económicos a corto y largo plazo que salen de los animales y de los árboles.

c) Sistemas especiales

Los sistemas agroforestales especiales son dos:

- **Silvoentomología**

Este sistema agroforestal especial utiliza los árboles para criar insectos útiles como las abejas, gusanos de seda, etc.

- **Silvoacuicultura**

Las hojas de los árboles en este sistema pueden suministrarse a los peces como alimento extra para aminorar los costos de producción. También los árboles pueden proveer de muchos otros servicios, así como las estacas en los campos de producción, ya que pueden generar ingresos para los productores y mejorar la dieta proteica en su alimento diario.

1.3. Niveles permitidos de cadmio en los alimentos y en los suelos

Según el tratado N° 488 del 2014 desarrollado por la Unión Europea (Unión Europea, 2014) el contenido máximo permisible en granos y derivados de cacao es de 0,5 mg.kg-1, siendo los más rigurosos los controles para los granos de cacao. Estos niveles mostrados de los límites máximos permitidos son relativos a la exposición normal del cadmio, puesto que se considera a la exposición real cuando se consume este elemento y aparece como alimentos con alto contenido de cadmio. Debido a esto, es de vital importancia que se tomen medidas de control para tratar de mitigar la presencia de cadmio en los alimentos que se comercializan alrededor del mundo, esto es para los productos de primera necesidad como de los demás productos, el control debe realizarse a los que trabajan con estos productos, así como también a la contaminación y hábitos. Los límites máximos permisibles de cadmio para los suelos presentan valores diferentes a los alimentos, puesto que se considera el volumen del suelo y al elemento presente en el mismo. El Ministerio del Ambiente en el Perú considera que los niveles máximos permitidos de cadmio en el suelo no deben ser mayor a 1,4 mg.kg-1, esto según a lo establecido en el año 2012 (MINAM, 2012).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

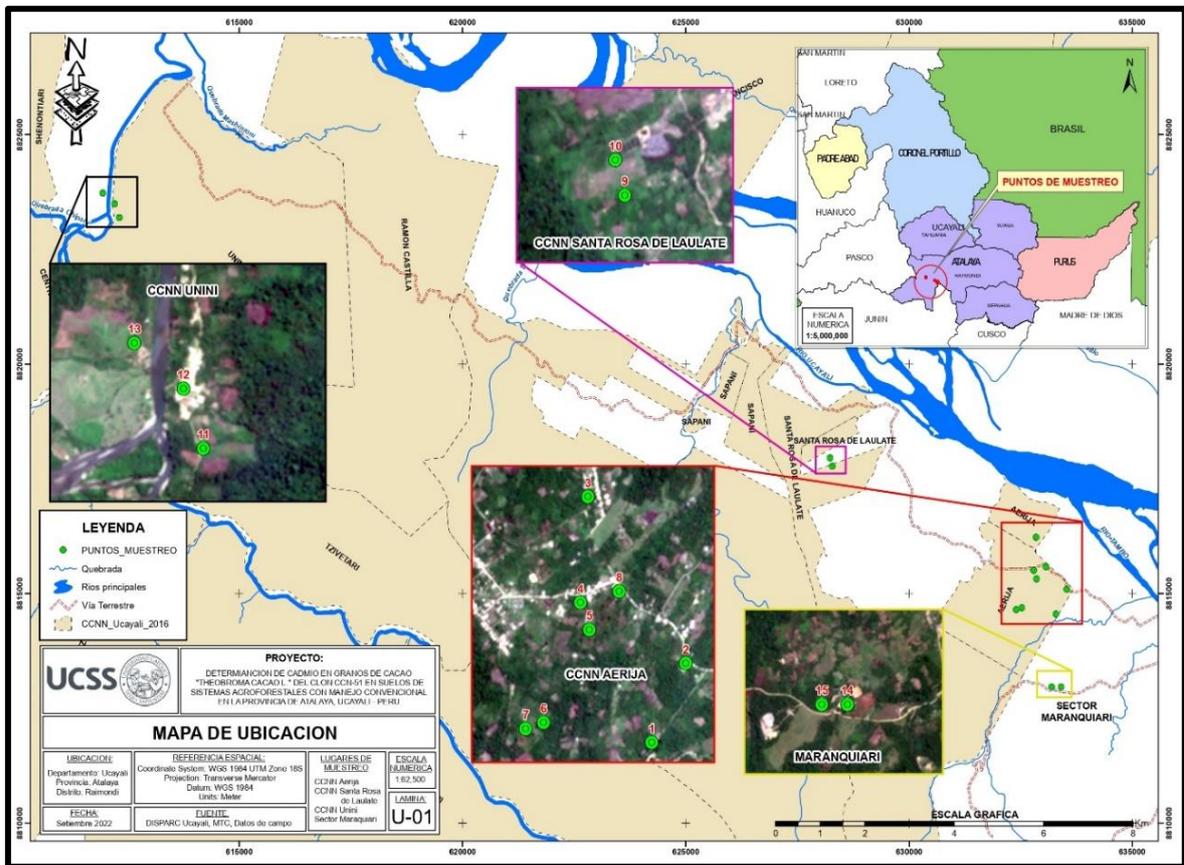
La investigación tuvo un diseño mixto no experimental de tipo cuantitativo y cualitativo, además, tuvo un nivel descriptivo – correlacional, porque consideró la determinación del contenido de cadmio en suelos de las parcelas agroforestales, así como en los granos de cacao. Según Rojas (2015), este tipo de investigación descriptiva o exploratoria exhibe un determinado conocimiento sobre la realidad de una situación que se desarrolla en el tiempo y espacio. Es decir, en esta investigación se observa, se registra y se pregunta, así como la descripción de fenómenos relacionadas al problema.

2.2. Lugar y fecha

El trabajo de investigación en el campo fue realizado durante los meses de setiembre, octubre, noviembre y diciembre del año 2021, fue cuando se empezó a realizar de muestreo de suelos y tejidos en las parcelas de las comunidades nativas de Aerija, Santa Rosa, Misión Unini y Atalaya que están ubicadas en la carretera Atalaya – Sapani, en el distrito de Raimondi, Provincia de Atalaya, Región Ucayali (Figura 6). Las parcelas de cacao en donde fue realizado el estudio fueron parcelas con sistemas agroforestales (S98AF) en asociación con el cultivo de cacao de la especie *Theobroma cacao* L. Así mismo, es importante mencionar que se tomaron datos de las parcelas evaluadas, en las que fueron considerados los datos de los propietarios a quienes se les solicitó, el permiso correspondiente para llevar a cabo el trabajo de investigación.

Figura 6

Mapa de ubicación de la provincia de Atalaya y el distrito Raimondi donde se extrajeron muestras



Nota. Elaboración propia.

2.3. Población y muestra

La población en estudio fueron 28 parcelas del sector carretera Atalaya - Sapani agroforestales de la provincia de Atalaya que combinaron árboles forestales como *Guazuma ulmifolia* Lam, “Bolaina” y *Calycophyllum spruceanum* Benth, “capirona” con la especie *Theobroma cacao* L., “cacao” las mismas que estuvieron ubicadas en la carretera Atalaya – Sapani, distrito de Raimondi, Provincia de Atalaya, Región Ucayali.

Según Fuentelsaz (2004), se denomina población a un grupo o conjunto de determinados elementos que poseen características que son objeto de estudio. En la investigación la población fueron las 28 parcelas agroforestales que existen en la zona.

La muestra de estudio estuvo conformada por 15 parcelas agroforestales de la zona antes mencionada, las cuales cultivan el clon CCN-51 con un manejo convencional. Según Velasco-Rodríguez (2003), se denomina muestra a un subgrupo de la población seleccionada la cual está conformada por unidades a las que se pretende analizar. Es importante mencionar que no existen muchas parcelas agroforestales en combinación con el cacao en la provincia de Atalaya, por lo que se tomó en cuenta considerar un muestreo no probabilístico de tipo intencional, puesto que este tipo de muestreo permite seleccionar una población limitando la muestra objetiva a conveniencia o posibilidad del investigador. Su utilización es recomendable por tanto en casos donde se tienen poblaciones pequeñas o muy variadas, teniendo así una muestra pequeña (Otzen y Manterola, 2017).

Otro de los criterios que se consideró para aplicar el muestreo intencional fue la accesibilidad a las parcelas agrícolas que este caso fueron muy buenas, sin tener ningún tipo de problemas para trasladarse a los lugares de muestreo, ya que en las comunidades antes mencionadas habían alrededor de 15 parcelas lo que representaría un poco más del 50 % del total de parcelas que existe en la provincia. La información de los productores donde se realizó el estudio se describe en la Tabla 3, donde también se muestra información sobre el manejo, coordenadas geográficas, número de hectáreas y demás información. Así mismo, en la Figura 6, se puede observar el mapa de ubicación de la provincia de Atalaya y del distrito Raimondi, de donde las muestras de suelo y de frutos de cacao fueron colectados.

Tabla 3*Información de las parcelas agroforestales donde se realizó el estudio*

Parcelas	Coordenadas		Lugar	Nombre y Apellido del agricultor	DNI	Ha	Manejo	Clon
	E	N						
1	0633288	8814550		Jorge Maldonado Valderrama	00160253	2.5	Convencional	CCN51
2	0633530	8815088		Jorge Manuel Yumbo Blanco	00159609	2	Convencional	CCN51
3	0632845	8816224		Francisco Ituraran Rios	00158433	1	Convencional	CCN51
4	0632792	8815503	C.C.N.N.	Esteban Reynoso Fonseca	2096885	3	Convencional	CCN51
5	0632852	8815320	Aerija	Mari Izurieta Campos	-	2	Convencional	CCN51
6	0632529	8814689		Yovana Mori Mañoro	47426790	1	Convencional	CCN51
7	0632402	8814647		Gonzalo Miranda Ramirez	0015479	2	Convencional	CCN51
8	0633063	8815580		Jaime Pascual Rivera	00016318	5	Convencional	CCN51
9	0628282	8817776	C.C.N.N.	Brigida Piroco Izurieta	46911820	1	Convencional	CCN51
10	0628233	8817956	Santa Rosa	Hector Tucno Casaverde	28276338	2	Convencional	CCN51
11	0612307	8823185	C.C.N.N.	Saul Casara Diaz	00151081	1.5	Convencional	CCN51
12	0612203	8823491	Misión	Gloria Meri Rios	62751135	1	Convencional	CCN51
13	0611945	8823724	Unini	Olga Ramirez Campa	00160681	5	Convencional	CCN51
14	0633404.2	8812964.7	C.C.N.N	Felix Hilario Zarzo Romero	00150164	3	Convencional	CCN51
15	0633191.5	8812965.6	Atalaya	Felix Hilario Zarzo Romero	00150164	3	Convencional	CCN51

2.4. Técnicas e instrumentos

2.4.1. Técnicas

En el trabajo de investigación se utilizaron las siguientes técnicas:

- **Observación no experimental:** consistió en el muestreo de los suelos de las parcelas agroforestales y los granos de cacao.
- **Análisis documental:** consistió en la revisión bibliográfica para determinar los métodos, el muestreo y antecedentes relacionados al tema.
- **Análisis y determinación de cadmio (Cd) en suelos y granos:** el análisis de cadmio en suelos y granos de cacao fue realizado mediante espectrofotometría y el equipo fue el espectrofotómetro de absorción atómica (EAA).

2.4.2. Instrumentos

Uno de los instrumentos importantes utilizados fue el análisis documental mediante la ficha técnica del productor (ver Apéndice 4), donde podemos encontrar los datos generales tales como las coordenadas UTM, hectáreas totales de cacao, rendimiento por hectárea, etc., que proporcionó el productor como uno de los requisitos para poder ingresar a su finca, para poder realizar el trabajo de recopilación de las muestras de suelos y muestras de granos de cacao.

Otro instrumento utilizado fue el análisis de suelos y análisis en granos de cacao (ver Apéndice 3), realizadas por el laboratorio de la Universidad Nacional Agraria de la Selva-Huánuco. A través de los resultados se pudo evaluar los porcentajes del cadmio total y cadmio disponible en el suelo, como también el porcentaje de cadmio en los granos de cacao.

Tanto para el muestreo de suelos y granos de cacao, así como para su respectivo análisis el instrumento utilizado fue la guía de muestreo y detección de cadmio en suelos propuesta por Barrueta (2013), en el cual se indica las instrucciones para el muestreo de suelos tales como:

- Definir las unidades de muestreo: se tuvo en cuenta el número de muestras y donde se iniciaba el muestreo de suelos y tejidos.
- Definir el patrón de recorrido: se especificó el patrón de recorrido en zig – zag para el muestreo de suelos y tejidos.
- Determinar la intensidad de muestreo o puntos mínimos de muestreo: se determinó mediante al tamaño de las parcelas un total de 5 puntos para las sub muestras de suelos, puesto que la mayoría de parcelas fueron menores de 4 ha.
- Determinar la profundidad de muestreo, así como el procedimiento de muestreo de suelos: se especificó que la muestra fue a 30 cm que es la profundidad más recomendable en el muestreo de suelos.
- En cuanto a los granos, se tomaron varias muestras de frutos de cacao (mazorcas) de cada parcela, de las cuales solo se consideró de 1 kg de granos por muestra.

2.5. Descripción de la investigación

Las actividades que realizadas en la investigación fueron las siguientes:

2.5.1. Selección de parcelas agroforestales (SAF) y georreferenciación

Para el estudio 15 parcelas agroforestales combinadas con la especie *Theobroma cacao* L., fueron seleccionadas para el muestreo de suelos y tejidos en las comunidades nativas Aerija, Santa Rosa, Misión Unini y Atalaya que están ubicadas en la carretera Atalaya – Sapani, en el distrito de Raimondi, Provincia de Atalaya, Región Ucayali. Se seleccionaron las parcelas, considerando el acceso, pendientes inclinadas, y que no tuvieran problemas sanitarios ya sea de plagas o enfermedades. Finalmente, se georreferenció cada parcela con la ayuda de un GPS (marca Montana, modelo 750 i) para luego recolectar la información sobre las parcelas y datos de los propietarios (ver Apéndice 4).

2.5.2. Muestreo de suelos

Las muestras de suelo de 1 kg fueron colectadas de todas las parcelas agroforestales seleccionadas (SAF) a unos 30 cm de profundidad. El patrón de recorrido fue en Zig – Zag. Las muestras fueron colocadas en bolsas con cierre hermético para después ser rotuladas con

los datos de la parcela (ver Apéndice 4). Para realizar esta actividad fue utilizada la guía para el muestreo y detección de cadmio en suelos, desarrollada por Barrueta (2013). Finalmente, las muestras de suelo fueron enviadas al Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva en la ciudad de Tingo María, Región Huánuco para su análisis respectivo.

2.5.3. Muestreo de granos de cacao

Para el muestreo de granos de cacao, fueron colectadas un promedio de 5 mazorcas (1 kg de granos) de 5 arboles, sin problemas de ataques de plagas y enfermedades, y de buen aspecto (Barrueta, 2013). Todas las mazorcas de cacao colectadas fueron del Clon CCN – 51, que es el predominante en las parcelas. Una vez colectadas las mazorcas, los granos de cacao fueron extraídos para trasladarlos a un lugar con la luz del sol para que el mucilago se desprenda y finalmente fueran colocadas en bolsas con cierre hermético. Las muestras de granos fueron de 1 kg por parcela. Todas las bolsas fueron rotuladas con la información de cada parcela y fueron enviadas al Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva en la ciudad de Tingo María, Región Huánuco para su respectivo análisis. Para realizar esta actividad fue utilizada la guía para el muestreo y detección de cadmio en suelos, desarrollada por Barrueta (2013).

2.5.4. Análisis de Cd en suelos y granos de cacao

Las muestras de granos de cacao y suelos fueron enviaron al laboratorio de la Universidad Nacional Agraria de la Selva para analizar el contenido de Cd. Los metodos utilizados para el analisis de suelos fueron: el potenciómetro, con una relación 1:1 para determinar el pH. El método de Bouyoucos para analizar la textura (Bouyoucos, 1962). Mediante el desplazamiento con KCl 1N (Suelos en pH < 5,5) fue determinado la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C). Finalmente, el cadmio disponible y total en los suelos fueron determinados por el método del extractante (EDTA 0.05 M y pH 7), y la lectura en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica. Las muestras de suelos fueron tamizadas a 2 mm, secadas en la estufa a 70 °C durante 72 h, luego se aplicó el ácido etilendiaminotetracético (EDTA) al 0.05%, con un pH de 7, a cada una de las 15 muestras. Luego del proceso de digestión, se calibró el espectrofotómetro de absorción atómica (Marca VARIAN AA220FS), para luego colocar las muestras de suelo y realizar las lecturas a una longitud de onda de 228,8 nm (Westerman,

1990). Por otro lado, el cadmio en los granos fue determinado siguiendo las pautas del Método EPA 3050 (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 1996). Las muestras de granos de cacao se lavaron con agua destilada y se secaron en la estufa a 70 °C durante 72 h, luego se molieron y se le aplicó el ácido nítrico a razón de 5 ml para la digestión de las muestras. La absorbancia de las muestras de granos de cacao se leyó directamente en el espectrofotómetro de absorción atómica (Marca VARIAN AA220FS) a una longitud de onda de 228,8 nm para cadmio (AOAC, 2000).

2.6. Variables en estudio y su medición

Las variables en estudio se describen a continuación en la Tabla 4:

Tabla 4

Variables en estudio

Variab	Dimensiones e indicadores	Instrumento	Metodología
	Variable dependiente		
Contenido de cadmio	Suelos	Espectrofotómetro de Luz visible-UV.	Método del extractante (EDTA 0,05 M y pH 7), y la lectura en Espectrofotómetro de Absorción Atómica.
	Granos de cacao		
	Variable independiente		
Variables físicas y químicas del suelo	pH	Potenciómetro.	Método EPA 3050 (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 1996) y lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica. Método de diferencia de los electrodos
	Textura	Densímetro	
	C.I.C	Destilador de Kjeldahl	Método de Bouyoucos
			Método del desplazamiento con KCl

2.7. Análisis estadístico de datos

Los datos fueron analizados y procesados mediante el uso del software Excel, versión 2019. Los cuadros y figuras estadísticas fueron elaborados de los resultados obtenidos. Los promedios de cadmio en el suelo fueron comparados con los estándares nacionales e internacionales (Estándares de calidad del Ministerio del Ambiente de Perú y límites máximos permisibles de la Unión Europea N° 488/2014) para determinar su grado de contaminación. El software estadístico SPSS versión 21-2019 fue utilizado para realizar los estadísticos descriptivos como la media (\bar{u}) y el error estándar (\pm) de las muestras de pH, C.I.C, cadmio disponible en el suelo, cadmio total en el suelo y cadmio total en los granos de cacao. Los comandos del SPSS se pueden observar en el apéndice 2 de los anexos. Así mismo, se calculó la regresión lineal múltiple entre el contenido de cadmio total en los granos y las variables del suelo (pH, C.I.C, cadmio disponible, cadmio total). Según Montero (2016), el análisis de regresión lineal múltiple mide el grado de relación entre una variable dependiente y más de una variable independiente. Con este análisis se puede medir al mismo tiempo la interacción de varias variables sobre una sola. En este caso la variable dependiente fue el contenido de cadmio total en los granos y las variables independientes fueron pH, C.I.C, cadmio disponible en el suelo y cadmio total en el suelo. Finalmente se realizó el análisis de residuos del modelo de regresión lineal múltiple utilizado para comprobar si es el más adecuado para este estudio, pudiendo comprobar que presenta todos los supuestos como: Linealidad, normalidad, heteroestadisticidad y colinealidad.

El modelo matemático de la regresión lineal múltiple utilizado es el siguiente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p + E$$

donde:

- β_0 : es el valor esperado de Y cuando X_1, \dots, X_p son cero
- β_1 : mide el cambio en Y por cada cambio unitario en X_1 , manteniendo X_2, X_3, \dots, X_p constantes.
- β_p : mide el cambio en Y por cada cambio unitario en X_p , manteniendo X_1, \dots, X_{p-1} constantes.

- E: es el error de observación debido a variables no controladas.

La fórmula matemática del error estándar (\pm) es la siguiente:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde:

- σ : es la desviación estándar de la población
- n: es el tamaño (número de observaciones) de la muestra.

La fórmula matemática de la media (u) es la siguiente:

$$u = \frac{\sum X}{N}$$

Donde:

- $\sum X$: sumatoria de todas las observaciones.
- N: número de datos.

2.8. Materiales y equipos

Para desarrollar la investigación fueron utilizados los siguientes materiales y equipos:

Materiales e insumos

- Bolsas con cierre hermético.
- Machete.
- Cavador.
- Alcohol de mano.
- Plumón marcador.

Equipos

- GPS (marca Montana, modelo 750 i)
- Cámara fotográfica.
- Espectrofotómetro de absorción atómica (Marca VARIAN AA220FS).

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Niveles de cadmio y caracterización fisicoquímica de los suelos de las parcelas de cacao

3.1.1 Textura

Tabla 5

Texturas de los suelos de las parcelas de cacao evaluadas

Parcelas	Procedencia (Lugar)	Textura
1	C.C.N.N Aerija	Franco Arenoso
2	C.C.N.N Aerija	Franco Arenoso
3	C.C.N.N Aerija	Franco Arenoso
4	C.C.N.N Aerija	Franco Arenoso
5	C.C.N.N Aerija	Franco Arenoso
6	C.C.N.N Aerija	Franco Arenoso
7	C.C.N.N. Aerija	Franco Arenoso
8	C.C.N.N Aerija	Franco Arenoso
9	C.C.N.N Santa Rosa	Franco
10	C.C.N.N Santa Rosa	Franco arenoso
11	C.C.N.N Misión Unini	Franco Arenoso
12	C.C.N.N Misión Unini	Franco Arenoso
13	C.C.N.N Misión Unini	Franco Arenoso
14	C.C. N.N Atalaya	Franco Arenoso
15	C.C.N.N Atalaya	Franco Arenoso

En la tabla 5 se muestran las texturas de los suelos de las parcelas evaluadas, donde se observa que los suelos de la comunidad nativa Aerija presentaron texturas Franco arenosas, en la comunidad nativa de Santa Rosa las muestras 9 y 10 presentaron texturas Francas y Franco arenosas y por último las muestras de la comunidad nativa Misión Unini y Atalaya presentaron texturas Franco arenosas.

3.1.2 Potencial de hidrógeno (pH)

Tabla 6

Potencial de hidrogeno (pH) de los suelos de las parcelas de cacao evaluadas

Parcelas	Procedencia (Lugar)	pH
1	C.C.N.N Aerija	5,26 ± 0,35
2	C.C.N.N Aerija	4,55 ± 0,29
3	C.C.N.N Aerija	4,12 ± 0,12
4	C.C.N.N Aerija	4,56 ± 0,35
5	C.C.N.N Aerija	4,47 ± 0,40
6	C.C.N.N Aerija	4,41 ± 0,01
7	C.C.N.N. Aerija	4,56 ± 0,02
8	C.C.N.N Aerija	3,90 ± 0,03
9	C.C.N.N Santa Rosa	6,51 ± 0,01
10	C.C.N.N Santa Rosa	5,55 ± 0,03
11	C.C.N.N Misión Unini	5,43 ± 0,02
12	C.C.N.N Misión Unini	4,19 ± 0,01
13	C.C.N.N Misión Unini	4,57 ± 0,01
14	C.C. N.N Atalaya	4,74 ± 0,02
15	C.C.N.N Atalaya	4,16 ± 0,02
Promedio		4,73± 0,18

Nota. ± Error estándar.

En la tabla 6 se muestran los valores de pH de los suelos de las parcelas evaluadas, el valor promedio de pH en los suelos de la comunidad nativa de Aerija fue 4,48 ($\pm 0,196$), en la comunidad nativa de Santa Rosa fue 6,03 ($\pm 0,02$), en la comunidad nativa de Misión Unini fue: 4,73 ($\pm 0,013$) y finalmente el valor promedio de pH en los suelos de la comunidad nativa Atalaya fue 4,45 ($\pm 0,02$). En condiciones naturales, el pH de los suelos pueden oscilar entre 4,5 y 8,0. Los suelos con pH de 6,5 a 7,5 se consideran neutros, suelos con pH inferior a 6,5 se consideran ácidos y suelos con pH superior a 7,5 se consideran alcalinos (Cropeia, 2024). Tal como se puede observar en la tabla 6 no existe mucha diferencia entre una zona y otra y los valores de pH en las zonas evaluadas presentaron valores medianamente ácidos (5 a 6), fuertemente ácidos (4 a 5) y extremadamente ácidos (3,90).

3.1.3 La capacidad de intercambio catiónico (C.I.C)

Tabla 7

Capacidad de intercambio cationico (C.I.C) de los suelos de las parcelas de cacao evaluadas

Parcelas	Procedencia (Lugar)	C.I.C (meq/100g)
1	C.C.N.N Aerija	3,93 ± 0.02
2	C.C.N.N Aerija	2,93 ± 0.02
3	C.C.N.N Aerija	3,89 ± 0.01
4	C.C.N.N Aerija	3,58 ± 0.01
5	C.C.N.N Aerija	3,04 ± 0.01
6	C.C.N.N Aerija	5,83 ± 0.01
7	C.C.N.N. Aerija	5,48 ± 0.02
8	C.C.N.N Aerija	4,09 ± 0.01
9	C.C.N.N Santa Rosa	6,56 ± 0.01
10	C.C.N.N Santa Rosa	6,28 ± 0.01
11	C.C.N.N Misión Unini	4,03 ± 0.01
12	C.C.N.N Misión Unini	4,29 ± 0.01
13	C.C.N.N Misión Unini	3,71 ± 0.01
14	C.C. N.N Atalaya	2,79 ± 0.01
15	C.C.N.N Atalaya	4,37 ± 0.01
Promedio		4,32 ± 0.31

Nota. ± Error estándar.

En la tabla 7 se muestran los valores promedios de la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C) de los suelos de las parcelas evaluadas, el valor promedio de C.I.C en los suelos de la comunidad nativa de Aerija fue 4,09 ($\pm 0,0137$) meq/100g, en la comunidad nativa de Santa Rosa fue 6,42 ($\pm 0,01$) meq/100g, en la comunidad nativa de Misión Unini fue 4,01 ($\pm 0,01$) y finalmente el valor promedio de C.I.C en los suelos de la comunidad nativa Atalaya fue 3,58 ($\pm 0,01$) meq/100g. La capacidad de intercambio catiónico (C.I.C) se define como el número de cationes intercambiables que un suelo puede retener, y es importante porque este valor es un indicador del potencial que tiene un suelo para intercambiar y retener nutrientes (Intagri, 2024). Los valores de C.I.C encontrados en las muestras de los suelos en las zonas evaluadas

fueron aceptables dentro del rango de los suelos Franco Arenosos, los cuales presentan valores de C.I.C de 5 a 10 meq/100g (Intagri, 2024).

3.1.4 Contenido de cadmio disponible y total en los suelos

Tabla 8

Niveles de cadmio total y disponible de los suelos de las parcelas de cacao evaluadas

Parcelas	Procendencia (Lugar)	Cd disponible (mg.kg⁻¹)	Cd total (mg.kg⁻¹)	*NMP (mg.kg⁻¹)
1	C.C.N.N Aerija	0,052 ± 0.001	0,208 ± 0.001	1,4
2	C.C.N.N Aerija	0,048 ± 0.002	0,171 ± 0.001	1,4
3	C.C.N.N Aerija	0,056 ± 0.001	0,181 ± 0.001	1,4
4	C.C.N.N Aerija	0,040 ± 0.002	0,200 ± 0.001	1,4
5	C.C.N.N Aerija	0,032 ± 0.001	0,188 ± 0.001	1,4
6	C.C.N.N Aerija	0,032 ± 0.001	0,152 ± 0.008	1,4
7	C.C.N.N. Aerija	0,028 ± 0.002	0,117 ± 0.009	1,4
8	C.C.N.N Aerija	0,032 ± 0.001	0,213 ± 0.002	1,4
9	C.C.N.N Santa Rosa	0,040 ± 0.001	0,333 ± 0.002	1,4
10	C.C.N.N Santa Rosa	0,028 ± 0.002	0,156 ± 0.002	1,4
11	C.C.N.N Misión Unini	0,032 ± 0.002	0,123 ± 0.001	1,4
12	C.C.N.N Misión Unini	0,048 ± 0.001	0,137 ± 0.001	1,4
13	C.C.N.N Misión Unini	0,092 ± 0.001	0,297 ± 0.001	1,4
14	C.C. N.N Atalaya	0,048 ± 0.001	0,166 ± 0.002	1,4
15	C.C.N.N Atalaya	0,056 ± 0.003	0,329 ± 0.001	1,4
Promedio		0,044 ± 0.004	0,198 ± 0.017	

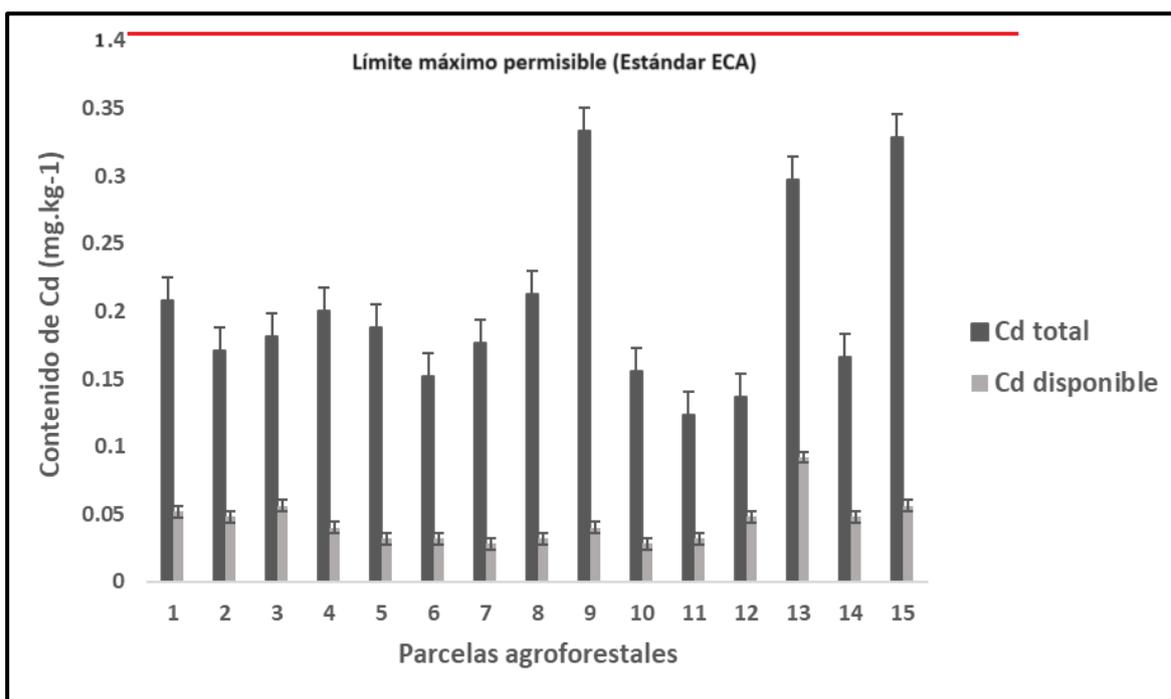
Nota. ± Error estándar. *NMP: nivel máximo permisible de Cd en suelos agrícolas. ECA: Estándar de Calidad Ambiental. MINAM-Perú, (2012).

En la tabla 8 y figura 7 se muestran los contenidos de cadmio disponible y total en las muestras de suelos de las parcelas evaluadas, los contenidos promedios de cadmio total y disponible en los suelos de la comunidad nativa de Aerija fueron 0,040 (± 0,00137) y 0,179 (± 0,0030) mg.kg⁻¹, en la comunidad nativa de Santa Rosa fueron 0,034 (± 0,0015) y 0,245 (± 0,002) mg.kg⁻¹, en la comunidad nativa de Misión Unini fueron 0,0573 ± (0,0013) y 0,1856 ± (0,001)

mg.kg-1, y finalmente los contenidos de cadmio disponible y total en los suelos de la comunidad nativa Atalaya fueron $0,052 (\pm 0,002)$ y $0,248 \pm (0,0015)$ mg.kg-1. Según los Estándares de calidad (ECA) del Ministerio del Ambiente de Perú, los límites máximos permisibles de cadmio en el suelo son de 1,4 y 2 mg.kg-1 (MINAM, 2012), valores que están por encima de los encontrados en todas las muestras evaluadas, lo que indica que no existe contaminación por cadmio en los suelos evaluados.

Figura 7

Cadmio total y cadmio disponible en los suelos de las parcelas evaluadas



3.2. Nivel de cadmio total en los granos de cacao de las parcelas

Tabla 9

Contenido de cadmio total en los granos de cacao de todas las parcelas evaluadas

Parcelas	Procedencia (Lugar)	Contenido de Cd total en granos (mg.kg⁻¹)	*NMP (mg.kg⁻¹)
1	C.C.N.N Aerija	0,075 ± 0.001	0,5
2	C.C.N.N Aerija	0,067 ± 0.002	0,5
3	C.C.N.N Aerija	0,117 ± 0.001	0,5
4	C.C.N.N Aerija	0,125 ± 0.001	0,5
5	C.C.N.N Aerija	0,075 ± 0.001	0,5
6	C.C.N.N Aerija	0,117 ± 0.013	0,5
7	C.C.N.N. Aerija	0,042 ± 0.014	0,5
8	C.C.N.N Aerija	0,117 ± 0.001	0,5
9	C.C.N.N Santa Rosa	0,113 ± 0.001	0,5
10	C.C.N.N Santa Rosa	0,100 ± 0.002	0,5
11	C.C.N.N Misión Unini	0,100 ± 0.001	0,5
12	C.C.N.N Misión Unini	0,133 ± 0.001	0,5
13	C.C.N.N Misión Unini	0,133 ± 0.001	0,5
14	C.C. N.N Atalaya	0,142 ± 0.001	0,5
15	C.C.N.N Atalaya	0,100 ± 0.001	0,5
Promedio		0,104± 0.007	

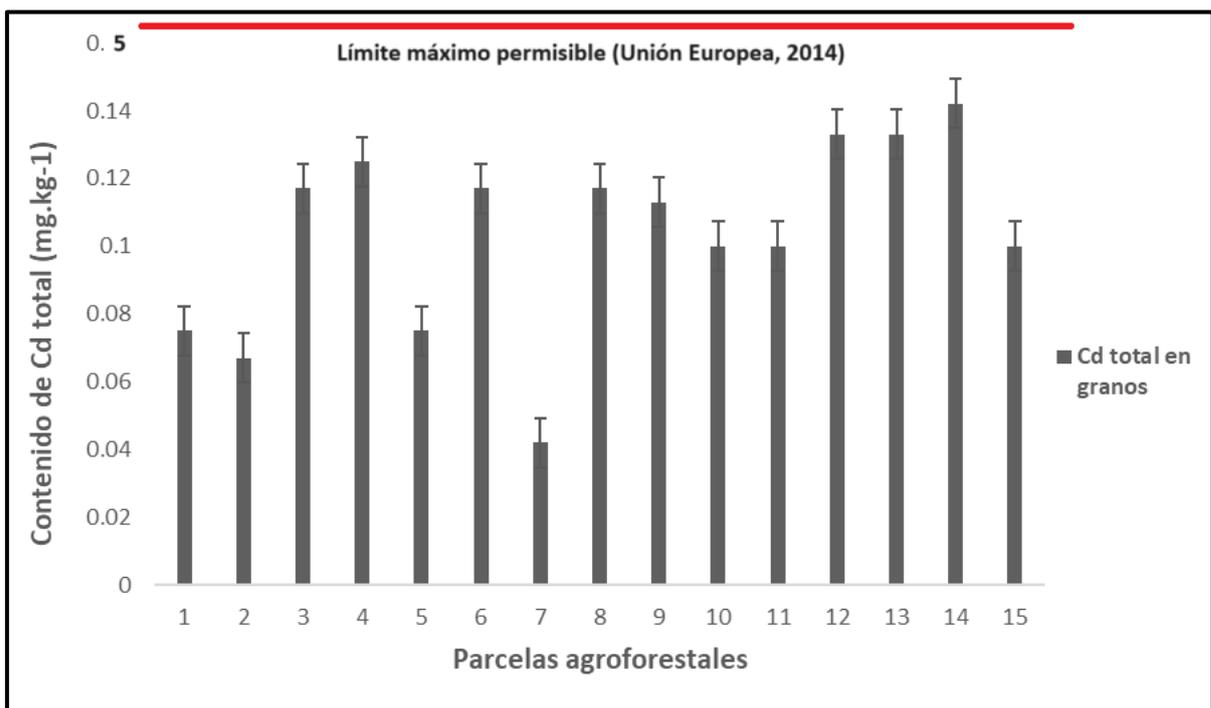
Nota. ± Error estándar . *NMP: nivel máximo permisible de cadmio en granos de cacao. Reglamento N° 488/2014 (Unión Europea, 2014).

En la Tabla 9 y Figura 8 se observan los contenidos totales de cadmio en los granos de cacao de todas las parcelas evaluadas. El contenido de cadmio en los granos de la comunidad Aerija fue 0,092 (± 0,0043) mg.kg⁻¹, en la comunidad nativa de Santa Rosa fue 0,107 (± 0,0015) mg.kg⁻¹, en la comunidad nativa de Misión Unini fue 0,122 ± (0,001) mg.kg⁻¹, y finalmente el contenido de cadmio en los granos de cacao de la comunidad nativa Atalaya fue 0,121 (± 0,001) mg.kg⁻¹.

En la Figura 8 se puede observar que las parcelas de la comunidad Aerija contienen el mayor cadmio en granos junto con las muestras de la comunidad Misión Unini y Atalaya, sin embargo, los granos de la comunidad Aerija también poseen parcelas donde encontró el contenido más bajo de cadmio, los cuales no sobrepasan los límites máximos permitidos de cadmio en el suelo (Ministerio del Ambiente, MINAM, 2012). Por otro lado, según lo establecido por la Unión Europea N° 488/2014 (Unión Europea, 2014) el contenido máximo permisible en granos y derivados de cacao es de $0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$, por lo tanto, todas las muestras de grano de cacao de las parcelas agroforestales evaluadas están por debajo de los límites máximos permisibles, esto indica que los granos de cacao presentan un nivel bajo de contaminación por cadmio.

Figura 8

Cadmio total en los granos de cacao de las parcelas evaluadas



3.3. Correlaciones entre el cadmio en los granos y las propiedades del suelo

3.3.1. Correlaciones entre el cadmio en los granos y las propiedades del suelo

Tabla 10

Resumen del modelo de regresión lineal múltiple

Resumen del modelo									
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio				
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	gl ¹	gl ²	Sig. Cambio en F
1	0,382 ^a	0,146	0,136	0,026639	0,146	1,707	4	40	0,168

a. Predictores: (Constante), Cadmio total suelos, Capacidad de intercambio catiónico, Potencial de Hidrógeno, Cadmio disponible suelos

b. Variable dependiente: Cadmio en granos

Nota. Significancia *($p < 0,05$), Fuente: elaboración propia, SPSS (2024).

Para determinar las correlaciones entre el cadmio en los granos y las propiedades químicas (pH, C.I.C., cadmio disponible y cadmio total) del suelo se utilizó el análisis de regresión múltiple al $p < 0,05$. En la tabla 10 se muestra el resumen del modelo de regresión lineal, donde se observa que el R^2 es de 0,146, con un R ajustado de 0,136, lo que significa que las variables del suelo como el pH, C.I.C, Cadmio disponible y cadmio total en el suelo explican un 14% del cadmio en los granos, por lo tanto presenta una correlación baja, casi nula por lo que estas variables no son las mas adecuadas para determinar la presencia de cadmio en los granos, y que probablemente sean otras variables que tengan una mayor influencia. En cuanto al error estándar de la estimación se puede observar que el modelo tiene un valor de 0,0267 lo cual es bastante bajo, por lo que se puede observar que presenta un nivel aceptable en los calculos realizados.

Tabla 11*Análisis de varianza (ANOVA) de la regresión lineal múltiple*

ANOVA ^a						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	0,005	4	0,001	1,707	0,168 ^b
	Residuo	0,028	40	0,001		
	Total	0,033	44			

a. Variable dependiente: Cadmio en granos

b. Predictores: (Constante), Cadmio total suelos, Capacidad de intercambio catiónico, Potencial de Hidrógeno, Cadmio disponible suelos

Nota. Significancia *($p < 0,05$), Fuente: elaboración propia, SPSS (2024).

Tabla 12*Coefficientes del análisis de regresión lineal múltiple*

Coefficientes ^a							
Modelo	Coefficientes no estandarizados		Coefficientes estandarizados			Límite inferior	Límite superior
	B	Desv. Error	Beta	t	Sig.		
1 (Constante)	0,079	0,034		2,337	0,025	,011	,148
Potencial de Hidrogeno	-0,003	0,007	-0,074	-0,427	0,672	-0,017	0,011
Capacidad de intercambio catiónico	0,002	0,004	0,075	0,404	0,689	-0,007	0,011
Cadmio disponible suelos	0,599	0,336	0,356	1,780	0,083	-0,081	1,278
Cadmio total suelos	0,023	0,077	0,057	0,300	0,765	-0,132	0,179

a. Variable dependiente: Cadmio en granos

Nota. Significancia *($p < 0,05$), Fuente: elaboración propia, SPSS (2024).

En la tabla 11 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) de la regresión lineal múltiple calculada, donde se muestra que el modelo de regresión no presenta diferencias significativas entre las variables correlacionadas con un nivel de significancia de 0,168, lo que indica que

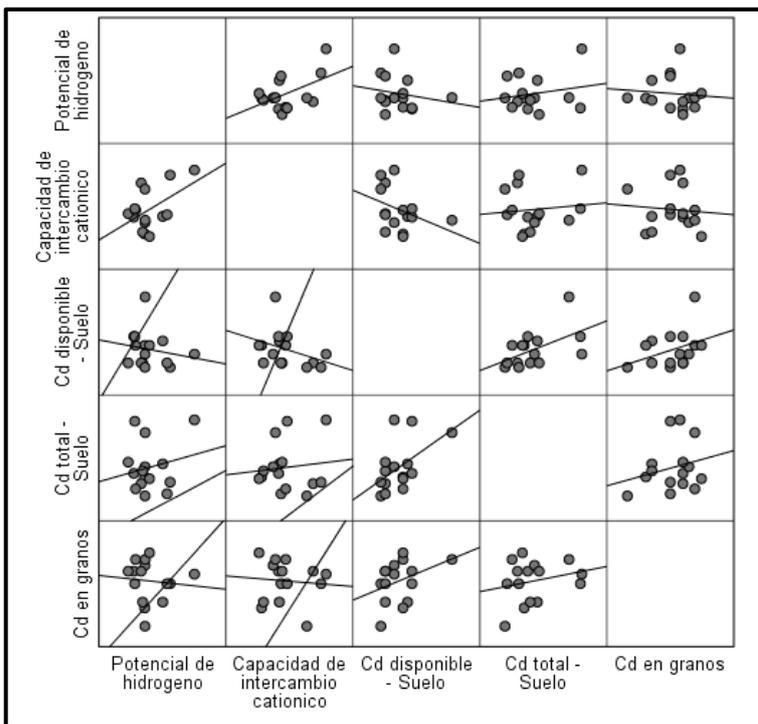
entra las variables estudiadas no existe ninguna correlación. Por último, en la tabla 12 se muestran los coeficientes del análisis de regresión lineal múltiple, donde se muestra que las variables del suelo como el pH, C.I.C, cadmio disponible y cadmio total no presentan ninguna correlación con el contenido de cadmio en los granos, con niveles de significancia de 0,672 para el pH, 0,689 para la C.I.C, 0,083 para el cadmio disponible en el suelo y 0,765 para el cadmio total en el suelo.

3.3.2. Análisis de residuos de la regresión lineal múltiple

- Análisis de linealidad

Figura 9

Análisis de linealidad de las variables evaluadas



Como se puede observar en la figura 9, los gráficos de las variables evaluadas presentan una tendencia lineal, lo que indica que el modelo de regresión cumple con este supuesto, para su validación.

- **Análisis de normalidad de residuos**

Tabla 13

Pruebas de normalidad de las variables evaluadas

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Capacidad de intercambio catiónico	,217	15	,057	,905	15	,115
Cd disponible - Suelo	,172	15	,200*	,817	15	,006
Cd total - Suelo	,215	15	,061	,865	15	,028
Cd en granos	,181	15	,200*	,932	15	,295

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Tabla 14

Pruebas de normalidad de la variable potencial de hidrógeno (pH)

	Pruebas de normalidad					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Raizcuadrada SQRT (Potencial de hidrógeno)	,252	15	,011	,888	15	,062

a. Corrección de significación de Lilliefors

En la tabla 13 se muestra en análisis de normalidad de las variables capacidad de intercambio catiónico, camdio disponible en el suelo, cadmio total en el suelo y cadmio total en los granos de cacao, donde se observa según los valores de significación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov que los datos de estas variables presentan una curva de distribución normal. Asi mismo, en la tabla 14 se presenta los valores de significancia del analisis de normnalidad de la prueba de Shapiro - Wilk para los datos del potencial de hidrogeno, donde se observa que tambien presenta normalidad, lo que indica que el modelo de regresión lineal múltiple también cumple con este supuesto.

- **Homogeneidad de la varianza de los residuos (Homeoestadisticidad)**

Tabla 15

Prueba de Durbin -Watson del modelo de regresión lineal múltiple

Resumen del modelo					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	0,382 a	0,146	0,136	0,026639	2,260

a. Predictores: (Constante), Cd total - Suelo, Capacidad de intercambio catiónico, Potencial de hidrogeno, Cd disponible - Suelo

b. Variable dependiente: Cd en granos

Según el análisis de Durbin -Watson que se observa en la tabla 15, indica un valor de 2,260 en la significación que el modelo de la regresión lineal múltiple utilizada, lo que significa que los datos no presentan problemas de homeoestadisticidad por lo que los datos son heteroestadísticos, existiendo independencia de variables, y que ninguna de ellas explica lo mismo de otras variables.

- **Colinealidad**

Tabla 16

Análisis de colinealidad de las variables evaluadas

Coefficientes^a							
Modelo	Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados			Estadísticas de colinealidad	
	B	Desv. Error	Beta	t	Sig.	Tolerancia	VIF
1 (Constante)	,080	,069		1,161	,273		
Potencial de hidrogeno	-,003	,014	-,078	-,225	,826	,713	1,403
Capacidad de intercambio catiónico	,002	,009	,079	,212	,836	,623	1,606
Cd disponible - Suelo	,605	,687	,355	,880	,399	,526	1,902
Cd total - Suelo	,023	,155	,056	,145	,887	,583	1,714

a. Variable dependiente: Cd en granos

Así mismo, en la tabla 16 se puede observar que los valores del factor de inflación de la varianza (VIF) son menores que 3 que en todas las variables analizadas en el modelo de regresión lineal múltiple utilizado, lo que significa que no existen problemas de multicolinealidad, puesto que las variables evaluadas presentan una baja correlación según lo observado en los análisis anteriores, por lo que el modelo de regresión lineal múltiple utilizado también cumple este supuesto.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN

4.1. Niveles de cadmio y caracterización fisicoquímica de los suelos de las parcelas de cacao

a) Textura

Los suelos de la zona de estudio que incluye las comunidades Aeriya, Santa Rosa, Misión Unini y Atalaya presentan texturas Francas y Francas Arenosas y no corresponden a texturas arcillosas, lo que puede influir en el contenido de cadmio en el suelo, puesto que Miliarium (2009), citado por Cargua *et al.* (2010), menciona que la arena no adsorbe metales pesados en su superficie en gran cantidad como las arcillas, por lo que estos elementos pasan al subsuelo de forma rápida. Lo que implica que las plantas de cacao tendrán menos probabilidad de absorber y acumular cadmio en sus tejidos.

b) Potencial de Hidrógeno (pH)

Los suelos de la zona de estudio que incluye las comunidades Aeriya, Santa Rosa, Misión Unini y Atalaya presentan un pH promedio de 4,73 ($\pm 0,18$), lo que corresponden a suelos ácidos. El estudio de Huauya y Huamaní (2014) y Huamaní – Yupanqui *et al.* (2012), en parcelas de cacao en las regiones de Huánuco y Ucayali (San Alejandro), reportaron valores de pH de 4,4 a 5,6 los cuales son similares a los encontrados en los suelos de las parcelas agroforestales en la Provincia de Atalaya. Esto se debe a que ambas zonas de estudio tiene similares texturas, contenido de arena, etc. Estos valores de pH encontrados en los suelos son comunes o característicos de los suelos amazónicos en el Perú, puesto que contienen baja cantidad de materia orgánica (M.O) y alta acidez (Ocampo, 1997; Alegre *et al.*, 1988). Por otro lado, todas las parcelas agroforestales de donde se colectaron las muestras son manejadas de forma convencional utilizando productos químicos como los fertilizantes nitrogenados y herbicidas como el glifosato, que de acuerdo a algunos estudios las altas

cantidades de Al^{+3} es la causa de la acidez de los suelos y esto se debe al utilizar de forma continua de estos productos (Vincent *et al.*, 2012). Los valores encontrados en los suelos evaluados difieren mucho del promedio de pH en los suelos de la sierra del Perú, los cuales tienen en promedio de 6.34 a 7 siendo menos ácidos y también difieren con los suelos de la costa que tienen en promedio de 7 a 8 (Aliaga *et al.*, 2016; Corcuera, 2016). Estos valores de pH influyen en el cultivo de cacao de muchas formas, según Arévalo *et al.* (2016), existe una correlación significativa entre el contenido de pH y el contenido de cadmio en los granos de cacao, por lo que a menor pH aumenta la absorción de Cadmio, sin embargo este comportamiento no sucede en todos los casos, puesto que hay estudios en donde el pH es independiente de los contenidos en los granos como en el estudio de Florida *et al.* (2018), donde el pH no influye en el contenido de cadmio en los granos de cacao, puesto que los contenidos de cadmio en el suelo también son bajos, similares a los encontrados en las zonas evaluadas, lo que lleva a pensar que también depende del contenido del suelo y como también a las otras propiedades como la C.I.C y el contenido de materia orgánica.

c) Capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.)

Los suelos de la zona de estudio que incluye las comunidades Aeriya, Santa Rosa, Misión Unini y Atalaya presentan un promedio de C.I.C de $(4,32 \pm 0,31)$. La capacidad de intercambio catiónico (C.I.C) se define como el número de cationes intercambiables que un suelo puede retener, y es importante pues este valor es un indicador del potencial que tiene un suelo para intercambiar y retener nutrientes (Intagri, 2024). Los valores de C.I.C encontrados en las muestras de los suelos en las zonas evaluadas fueron aceptables dentro del rango de los suelos Franco Arenosos, los cuales presentan valores de C.I.C de 5 a 10 meq/100g (Intagri, 2024).

Al respecto, los valores bajos capacidad de intercambio catiónico (C.I.C) favorecen el lavado o lixiviado de metales pesados en el suelo, ya que en un suelo con una alta C.I.C (59,0 – 60,6 meq/100g) los metales pesados se lixivian menos (Cargua *et al.*, 2010). En tal sentido, el estudio de McBride *et al.* (1997), muestra que los bajos valores de la C.I.C favorecen la disponibilidad y solubilidad del cadmio en el suelo, lo que provoca una disminución de este elemento en los lugares de intercambio catiónico. Balderas *et al.* (2003), realizó un estudio en suelos agrícolas contaminados con metales pesados, donde se muestra valores bajos de la C.I.C y al mismo tiempo estos se relacionó con los bajos contenidos de cadmio en los suelos

evaluados. Por lo tanto, el bajo contenido de cadmio en las parcelas de cacao evaluadas, puede estar influenciado por los bajos valores de la C.I.C encontrados en estos suelos

d) Contenido de cadmio disponible y total en los suelos

Los suelos de la zona de estudio que incluye las comunidades Aerija, Santa Rosa, Misión Unini y Atalaya presentaron promedios de 0,044 (\pm 0.004) y 0,198 (\pm 0.017) mg.kg⁻¹ de camdio disponible y total respectivamente. Al respecto, todas las prcelas evaluadas en las comunidades nativas presentaron niveles de cadmio por debajo de los límites máximos permisibles para suelos agrícolas (< 1,4 mg.kg⁻¹) estipulados por el ministerio del ambiente (MINAM, 2012), esto se relaciona con los resultados obtenidos por Llatlance *et al.* (2018), quien reportó contenidos de 0,008 a 0,1 mg.kg⁻¹ de cadmio total en el suelo de un sistema agroforestal con cacao en el trópico con condiciones similares de suelo y clima a la zona de estudio. En las parcelas evaluadas el bajo contenido se deba generalmente al manejo donde utilizan en menor medida productos químicos, sumado a ello la misma composición del suelo que no presenta un alto contenido de cadmio, puesto que, generalmente en zonas agrícolas y forestales la presencia de este elemento está ligada a las actividades antrópicas y a causas naturales (Mendoza *et al.*, 2021).

En el estudio de Rankin *et al.* (2005), se menciona que el uso de fertilizantes y pesticidas en los campos de producción, así como las emisiones de gasolina son los responsables directos de la presencia de metales pesados en el suelo, que luego es absorbido por las plantas de cacao, tal como se estudió en las plantaciones de Nigeria bajo condiciones edafoclimáticas similares. Por otro lado, todas las parcelas presentaron un bajo nivel de cadmio (< 1,4 mg.kg⁻¹) en suelos agrícolas estipulados por el ministerio del ambiente (MINAM, 2012), lo que indica que existe baja contaminación por cadmio.

4.2. Nivel de cadmio total en los granos de cacao de las parcelas evaluadas

Los granos de cacao de la zona de estudio que incluye las comunidades Aerija, Santa Rosa, Misión Unini y Atalaya presentaron un promedio de 0,104 (\pm 0.007) mg.kg⁻¹ de cadmio. En

cuanto al contenido de cadmio total en los granos, como se mencionó anteriormente todas las muestras de granos de las parcelas agroforestales están por debajo de los límites máximos permisibles lo que guarda relación con el estudio realizado por Mendoza *et al.* (2021), quien reporto contenidos similares con $0,075 \text{ mg.kg}^{-1}$ de cadmio en los granos a unos 400 m s.n.m., en un sistema agroforestal. Así mismo Llatlance *et al.* (2018) también reportaron valores en el fruto con $0,411 \text{ mg.kg}^{-1}$ de cadmio que no sobrepasaron los límites permisibles en un sistema agroforestal, por lo que resulta interesante que cuando se combina especies forestales y agrícolas ambas especies absorberán y acumularán cadmio en sus tejidos por lo tanto se disminuirá el cadmio en los tejidos de una sola especie, tal como se aprecia en los resultados de la cuantificación de cadmio en las especies forestales del mismo autor (Llatlance *et al.*, 2018), donde las especies *Pouteria caimito* (Ruiz & Pav.) Radlk., *Matisia cordata* Bonpl., *Malvaviscus* sp., *Vochysia* sp., *Carludovica palmita* Ruiz & Pav., *Attalea* sp., absorbieron y acumularon cadmio en sus tejidos y no solo la especie *Theobroma cacao* L., lo mismo que sucedió en el estudio realizado por Gramlich *et al.* (2017), quienes encontraron que las plantas de cacao en un sistema agroforestal presentaron concentraciones más bajas que un sistema monocultivo y explicaba el hecho a la competencia que existe entre las especies del mismo sistema, en el caso de la investigación desarrollada por Llatlance *et al.* (2018), tanto las especies como *Guazuma ulmifolia* “bolaina” y *Calycophyllum spruceanum* “capirona” absorbieron y acumularon Cd junto con la especie *Theobroma cacao* L., haciendo de que esta no acumule sola el cadmio en sus tejidos. Finalmente, como las plantas de cacao no absorbieron solas el cadmio del suelo, se encontró un bajo nivel de cadmio en los granos, por lo que no existe contaminación de cadmio en los granos al no sobrepasar los límites máximos permisibles ($< 0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$).

4.3. Correlaciones entre el cadmio en los granos y las propiedades del suelo

No se encontraron correlaciones entre el contenido de cadmio en los granos con las propiedades del suelo como el pH, C.I.C, contenido total en el suelo y contenido disponible de cadmio en el suelo. Estos resultados tienen relación a la investigación de Metro *et al.* (2019), quienes mencionan que la planta de cacao es una especie hiperacumuladora de metales pesados, por lo que no existe ninguna correlación con el cadmio del suelo y las almendras. Por lo que, la bioacumulación de cadmio en los tejidos de las plantas de cacao no dependerá solo de la disponibilidad del elemento en el suelo, si no también al aspecto

fisiológico de la planta y a su capacidad de absorber y bioacumular este elemento que son características propias de estas especies (Cahuasqui, 2011). En el estudio de Llatance *et al.* (2018), se evaluó el comportamiento en la absorción y bioacumulación de cadmio de las plantas de cacao en un sistema agroforestal, en donde se observó que aunque las concentraciones de cadmio en el suelos fueran bajas, las plantas de cacao absorbieron y acumularon cantidades considerables de este elemento en los tejidos ($0,34 \text{ mg.kg}^{-1}$), lo que indica que la especie *Theobroma cacao* tiende a absorber y acumular metales pesados del suelo, aunque las condiciones no sean favorables. Así mismo, es importante mencionar que en un sistema agroforestal las plantas de cacao pueden absorber y acumular menos cadmio debido a la competencia de especies que existe en ese tipo de ecosistema, ya que no solo las plantas de cacao compiten por los elementos del suelo, si no también las otras especies, esto se relaciona la investigación realizada por Gramlich *et al.* (2017), quienes encontraron que las plantas de cacao en un sistema agroforestal presentaron concentraciones más bajas de cadmio que un sistema monocultivo. El hecho de que la planta de cacao absorba los metales pesados del suelo, no quiere decir que estos se acumularan solo en los granos de cacao, ya que pueden ser trasladados a diferentes partes de la planta como las raíces, ramas y tallos, hojas, cáscara y finalmente en los granos, tal como se fue demostrado en el estudio de Chavez *et al.*, 2015 donde el orden de mayor acumulación de cadmio en los tejidos de la plantas de cacao fueron: hojas > cáscara > grano. Tantalean y Huauya (2017), también evidenció este mismo comportamiento donde el orden de mayor acumulación de cadmio en los tejidos de la plantas de cacao fueron: Ramas > hojas > raíces > grano, por lo que se puede pensar que el fruto es la parte donde menos se acumula el cadmio, y aun exista cadmio disponible en suelo para que la planta lo absorba su acumulación dependerá de otros factores como fisiológicos y genéticos (Gramlich *et al.* 2017), razón por la cual, en los análisis de correlación se observó una influencia baja de las variables del suelo con relación al cadmio en los granos de cacao, ya que sufre una disminución al llegar hasta las partes superiores de las plantas.

Por otro lado, es importante señalar que el estudio estuvo limitado por una serie de factores lo que si bien es cierto no le quita validez, puede influir en los resultados finales. Estos factores pueden ser: el tamaño de la muestra, el cual estuvo limitado por cuestiones de acceso a las parcelas y a la economía de los tesisistas. Rendón (2017), menciona que un número

limitado de muestras influye en los análisis estadísticos e incrementan los riesgos potenciales a los sujetos incluidos en la investigación. Otro factor fue la similitud de las muestras, ya que 14 muestras tuvieron el mismo resultado en cuanto a textura (Franco arenosa) los cuales también tuvieron resultados casi similares de pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC). El contenido de pH fue uno de los factores que pudo haber influido más en los resultados, ya que controla la solubilidad de un metal en el suelo, puesto que la mayoría de los metales son relativamente móviles a pH ácidos (Giusquiani *et al.*, 1992) y todas las muestras de suelos evaluadas tuvieron valores ácidos a muy ácidos por lo que es probable que el cadmio se haya lixiviado por infiltración. Así mismo, es necesario mencionar que estas parcelas estaban cercanas al río por lo que esto favorece el proceso de lixiviación. En el estudio realizado por Del Aguila *et al.*, (2005), se evidenció contenidos más bajos de cadmio en suelos que estuvieron cerca al río, considerando también que estos suelos tuvieron pH ácidos, que favorecieron su lixiviación. Las parcelas estudiadas fueron seleccionadas en base a dos criterios, el primero fue por el acceso al lugar lo cual permitió desarrollar el estudio de manera más fácil, sobre todo al momento de coleccionar las muestras de suelos y granos. El segundo criterio es que, en estas zonas casi todas las parcelas se encuentran ubicadas cerca al río y no existen parcelas de cacao en otras zonas, por lo que si se quiere hacer un estudio en este lugar se deben tomar en cuenta solo estas parcelas. En cuanto a la acumulación de cadmio en los granos de cacao, existen trabajos como los de Chavez *et al.*, (2015) y Gramlich *et al.*, (2017) que confirman la naturaleza fisiológica de la especie *Theobroma cacao* en cuanto a la acumulación de metales pesados, que a su vez están relacionadas con los parámetros del suelo como el pH y la C.I.C. Por último, el análisis de residuos muestra que los datos presentaron normalidad, pero podrían mejorar aun más aumentando el número de muestras, que en los futuros trabajos de investigación se debieran incluir un gran número de muestras, ya que el tamaño de la muestra tiene gran influencia en los análisis estadísticos (Rendón, 2017).

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en el trabajo de investigación se concluye lo siguiente:

- Los contenidos de cadmio en los suelos de todas las parcelas agroforestales de manejo convencional tuvieron valores de 0,044 (± 0.004) y 0,198 (± 0.017) mg.kg^{-1} de cadmio disponible y total respectivamente, los cuales no sobrepasaron los límites máximos permisibles en suelos agrícolas estipulados por el Ministerio del Ambiente (1,4 mg.kg^{-1}). Resultados que pueden deberse a factores como la ubicación de las parcelas cerca al río que favorecen el lixiviado de los metales pesados.
- Los contenidos de cadmio en los granos de cacao no sobrepasaron los límites máximos permisibles establecidos por la Unión Europea N° 488/2014 (0,5 mg.kg^{-1}) en todas las parcelas agroforestales de manejo convencional evaluadas se encontró un contenido promedio de 0,104 (± 0.007) mg.kg^{-1} de cadmio en los granos de cacao. Los bajos contenidos de cadmio en los granos se puede deber a factores como los bajos valores de pH y C.I.C encontrados en los suelos evaluados, así como también a los factores no evaluados como la materia orgánica, factores genéticos y fisiológicos.
- No se encontró ninguna correlación entre el contenido de cadmio en los granos y las propiedades del suelo como el pH, C.I.C, cadmio total y cadmio disponible en las parcelas agroforestales evaluadas, por lo que la bioacumulación de cadmio en los granos estuvo influenciada por otros factores la fisiología de la planta con su capacidad de absorber y bioacumular este elemento en diferentes partes de la planta, así como puede deberse a factores genéticos.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

Se recomienda lo siguiente:

- Realizar más investigaciones en sistemas agroforestales cuantificando el contenido de cadmio en todas las especies presentes tanto agrícolas como forestales en las parcelas, considerando el contenido en las hojas, raíces, tallos y frutos.
- Realizar investigaciones en diferentes especies forestales para determinar los niveles máximos de absorción y acumulación de cadmio en sus tejidos.
- Realizar investigaciones donde se evalué la mejor asociación de especies forestales o agrícolas combinados con la especie *Theobroma cacao* L., orientado a la mitigación de cadmio en los granos.
- Realizar investigaciones donde se evalúen los contenidos de cadmio en los residuos de cosechas como las cáscaras y hojas que caen al suelo de las parcelas de cacao y determinar su influencia en el contenido del grano.
- Realizar estudios de translocación de los metales pesados dentro de las plantas de cacao y encontrar alguna relación con el aspecto genéticos de las variedades y los patrones.
- Aumentar el número de muestras en futuros trabajos de investigación y hacer análisis más preciso

REFERENCIAS

- AOAC. (2000). Official methods of analysis. En línea: AOAC (<http://img.21food.cn/img/biaozhun/20100108/177/11285282.pdf>, 24 abr 2016)
- Abada, Mbolo, M.M., Zekeng, J.C., Mala, W.A., Fobane, J.L., Djomo, C.C., Ngavounsia, T., Nyako, C.M., Florent, E. y Tamanjong, Y.V. (2016). The role of cocoa agroforestry systems in conserving forest tree diversity in the Central region of Cameroon. *Agroforestry systems* 90 (4): 577-590. <https://search.proquest.com/openview/470fc3f8ad92e649e28741c018eac5d4/1?pq-origsite=gscholar&cbl=54133>
- Acosta, Y., Paolini, J., Flores, S., Benzo Z., El Zauahre, M., Toyo, L., y Senior, A. (2003). Evaluación de metales pesados en tres residuos orgánicos de diferente naturaleza. *Multiciencias*, 3:1. <https://www.redalyc.org/pdf/904/90430107.pdf>
- Alegre, J.C., Cassel, D.K. y Bandy, D.E. (1988). Effect of Land Clearing Method on Chemical Properties of an Ultisol in the Amazon. *Soil Sci.Soc.Am.J.* 52: 1283.
- Aliaga, I., Velásquez, B.F., Amaya, J. y Siche, R. (2016). El pH de los suelos de la Sierra Central del Perú en la calidad industrial de hojuelas de *Solanum tuberosum* L. var. Capiro. *Agroindustrial Science*, 6 (1): 53-58. <file:///C:/Users/Cesar/Downloads/Dialnet-ELPHDeLosSuelosDeLaSierraCentralDelPeruEnLaCalidad-6583409.pdf>
- Alloway B.J. (2013). *Heavy metals in Soils: Trace Metals and Metallloids in Soils and their Bioavailability*, 3 ed. Springer.
- Aguirre-Forero, S. E., Piraneque-Gambasica, N. Virgilio, y Vásquez-Polo, J. R. (2020). Contenido de metales pesados en suelos y tejidos de cacao en el departamento del Magdalena, Colombia: énfasis en cadmio. *Entramado*, 16(2), 298–310. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.6753>
- Arevalo, G.E., Obando, C.M., Zúñiga, C.L., Arévalo, H.C., Baligar, B. y He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2): 81-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>
- Arévalo-Hernández, C.O., Arévalo-Gardini, E., Farfán-Pinedo, A., Baligar V. y He, Z. (2016). Metales pesados en suelos, hojas y granos de zonas cacaoteras del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2). http://www.lamolina.edu.pe/ecolapl/metales_pesados_en_suelos_de_plantaciones_de_cacao.htm
- Atalaya noticias, (2022). Perú: Invitan a Ollanta al I Congreso de los Pueblos Indígenas de la Provincia de Atalaya. [online]. <https://www.servindi.org/actualidad/46581>

- Augstburger, F., Berger, J., Censkowsky, U., Heid, P. y Milz, JS. (2000). Agricultura Orgánica en el Trópico y Subtrópico. 1ª edición. Guías de 18 cultivos. Cacao. KleinhadernerWeg 1-82166 Gräfelfing-Alemania. 24.
- Balderas, P.M., Cajuste, L.J., Lugo, J.A. y Vasquez, A.A. (2003). Suelos agrícolas contaminados por metales pesados provenientes de depósitos de vehículos de desecho. *Terra Latinoamericana*, 21: 449-459. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321401>
- Barrantes, E. R. (2006). Investigación: Un camino al conocimiento, un enfoque cualitativo y cuantitativo. San José, C.R. Editorial EUNED.
- Barrueta, R.S. (2013). *Guía metodológica para el muestreo y detección de cadmio en suelos, agua, fertilizantes, almendras de cacao y productos derivados* (12 -37 p). Recuperado de https://issuu.com/riicchperu/docs/guia_metodologica_muestreo
- Benito, S. J. (1991). Tecnificación del cacao en la amazonia peruana. Fundación para el desarrollo de la amazonia peruana (FUNDEAGRO). Lima, Perú. 156.
- Beer, R., Muschler, R., Kass, D. y Somarriba, E. (1998). Shade management in coffee and cocoa plantations *Agroforestry Systems* (38): 139-164.
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agron. J.* 54, 464-465.
- Buyer, J. S., Baligar, V. C., He, Z. y Arévalo-Gardini, E. (2017). Soil microbial communities under cacao agroforestry and cover crop systems in Peru. *Applied Soil Ecology* 120: 273-280.
- Cahuasqui, S. (2011). *Determinación de metales pesados (plomo, cadmio y níquel) en el cilantro (Coriandrum sativum L) en Aloag, cantón Mejía, provincia de Pichincha por espectrofotometría de absorción atómica de llama*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica Del Ecuador].
- Campos, F., Flores G.C. y Díaz Z.E. (2015). Presencia de metales pesados en suelos de plantaciones de Cacao (*Theobroma cacao L.*) en la región Ucayali. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Ucayali, Pucallpa – Perú. http://www.repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/4174/UNU_FORESTAL_AC_2015_FERMIN-CAMPOS_CESAR-FLORES.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Campos, S.F., Flores, G.C., Díaz, Z.E. y Valera, R.C. (2021). *La orina humana como fertilizante y el método de limpieza de parcelas como estrategias para la mitigación de cadmio y plomo en suelos y granos del cultivo de cacao*. Pucallpa: Editorial Campos Solórzano, Fermín. http://isbn.bn.p.gob.pe/catalogo.php?mode=busqueda_menu&id_editor=232174
- Cargua, J., Mite, F., Carrillo, M. y Durango, W. (2010). Determinación de las formas de Cu, Cd, Ni, Pb, y Zn y su biodisponibilidad en suelos agrícolas del litoral ecuatoriano. XII

Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo, 17-19 de noviembre 2010.

CODEX ALIMENTARIUS, (2015). Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos. 44 p. file:///C:/Users/HP-USER/Downloads/CXS_193s_2015%20(1).pdf

Corcuera, M.C. (2016). *Análisis de la fertilidad de los suelos agrícolas destinados al cultivo de arroz en la cuenca baja del río Jequetepeque*. [Tesis de Posgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/7551>

Chávez, 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. *Scien of Total Environ.* 533: 205–214. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969715302990?via%3Di hub>

Christensen, T.H. (1984). Cadmium soil sorption at low concentrations. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium. *Water, Air, and Soil Pollution*, 21(1–4), 105–114.

Cline, L.C. y Zak, D.R. (2015). Soil microbial communities are shaped by plant-driven changes in resource availability during secondary succession. *Ecology* 96 (12): 3374–3385. <https://doi.org/10.1890/15-0184.1>

Cropaia (31 de Marzo, 2024). *El pH y la acidez del suelo*. <https://croipaia.com/es/blog/el-ph-del-suelo/#:~:text=En%20suelos%20naturales%2C%20el%20pH,%2C8%20a%206%2C5.>

Del Águila, De la Fuente, L. y Vaca, P.R. (2005). Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma. *CIENCIA ergo sum*, 12(2): 155-161. <https://www.redalyc.org/pdf/104/10412207.pdf>

Dickson, T.R. (2013). *Química Enfoque Ecológico* (102 p). 2 ed. México D.F. (México): Limusa, Noriega Editores, 102.

Durán, R. F. (2010). *Cultivo y Explotación de Cacao* (420 p). Primera Edición, 2010. Grupo Latino Editores S.A.S., Colombia. 424.

Dzib, B., Van der Wal, H., Cervantes-Gutiérrez, V., Cetzal, W., Chantásig-Vaca, C. y Casanova-Lugo, F. (2021). Diversidad arbórea nativa: base para el diseño de sistemas agroforestales en una comunidad maya en la península de Yucatán, México. *Polibotánica*, 51: 73-89. DOI: 10.18387/polibotanica.51.5

Environmental Protection Agency, (2010). National Primary Drinking Water Regulations; Announcement of the Results of EPA's Review of Existing Drinking Water Standards and Request for Public Comment and/or Information on Related Issues; Notice. [En Línea]. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2010-03-29/pdf/2010-6624.pdf>

- Feliciano, D., Ledo, A., Hillier, J. y Nayak, D.R. (2018). Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 25 (4): 117–129. file:///C:/Users/HP-USER/Downloads/Feliciano-et-al.ManuscriptSubmittedJul2017.pdf
- Florida, R.N., Shilton R.C. y Gómez, B.R. (2018). El pH y la absorción de cadmio en almendras de cacao orgánico (*Theobroma cacao* L.) En Leoncio Prado, Huánuco, Perú. *Folia Amazónica*, 27 (1): 1-8. DOI: <https://doi.org/10.24841/fa.v27i1.458>
- Fuentelsaz, C. (2004). Cálculo del tamaño de la muestra. *Matronas Prof.* 5(18):5-13.
- Furcal-Beriguete, P., y Torres-Morales, J. L. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 33(1): 122–137. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i1.5027>
- García, C.L. (2008). Estudio de caracterización del potencial genético del cacao en el Perú. Consultoría 24/2007/PNR/Lote 2. M y O, Consulting S.A.C., 5 p. https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/direccionesyoficinas/dgca/estudio_caracterizacion.pdf
- García, C. L. (2007). Mejoramiento genético del cacao. En: Diplomado en cultivos industriales tropicales. Ed. UNAS. Tingo María: 69-98.
- 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*, Volume 580 (15): 677-686. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969716326985>
- GREEN FACTS, 2022. FACTS ON HEALTH AND THE ENVIROMENT. GLOSARRY. en línea. 2022. [Accedido 16 enero 2023]. <https://www.greenfacts.org/en/index.htm>
- Giusquiani, P. L.; G. Gigliotti y D. Businelli (1992). Mobility of Heavy Metals in Urban, Organic Matter and pH in Temperature Soils, *J. Environ. Quality*, 13(2): 234-245.
- Hernández, A. (2011). *Determinación de metales pesados en suelos de Natividad Ixtlán de Juárez Oaxaca*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de la Sierra.

- Huamani, Y.H., Huauya, R.M., Mansilla, M.L., Florida, R.N. y Neira, T.G. (2012). Presencia de metales pesados en el cultivo del cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta Agronómica*. 61 (4), 339 -344. <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v61n4/v61n4a06.pdf>
- Huauya, M. y Huamani, H. (2014). Macrofauna edáfica y metales pesados en el cultivo de cacao, *Theobroma cacao* L. (malvaceae). *The biologist*, 12: (1). <https://doi.org/10.24039/rtb2014121385>
- ICCO, (2014). The World Cocoa Economy: Current Status, Challenges and Prospects. [En Línea].http://unctad.org/meetings/es/Presentation/SUC_MEM2014_09042014_ICCO.pdf
- INTERNATIONAL LEAD ASSOCIATION (ILA), (2014). Agency International Lead ([online]. Disponible: <http://www.ila-lead.org/>. [Citado 26 de Julio de 2014].
- Intagri (30 de Marzo, 2024). *La Capacidad de Intercambio Catiónico del Suelo*. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/la-capacidad-de-intercambio-cationico-del-suelo>
- Järup, L., Hellstrom, L., Alfven, T., Carlsson, M.D., Grubb, A., Persson, B., Pettersson, C., Spang, G., Schütz, A. and Elinder, C.G. (2012). Low level exposure to cadmium and early kidney damage: The Oscar study. *Occupational and Environmental Medicine*, 3(6) 668- 672.
- Llatance, W., Gonza S.C., Guzmán C.W. y Pariente M. E. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 33 (1): 63 – 75. <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1156>
- Lopez, U.A y Hoyos, C.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. Publicación Académica, Universidad Nacional de Ucayali. <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/3926>
- Martí, L., Burba, N.G. y Cavagnaro, M. (2002). Metales pesados en fertilizantes fosfatados, nitrogenados y mixtos. *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo XXXIV. N° 2. https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/2829/martiagrarias2-34-02.pdf
- Mera, S.K. (2017). Determinación del contenido de plomo en las almendras de cacao del clon CCN-51 y la variedad híbrida de las provincias de Padre Abad y Coronel Portillo en la región Ucayali. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Ucayali].

<http://repositorio.unu.edu.pe/browse?value=Mera+Silva%2C+Karla+Patricia&type=author>

- Mendieta, L.M. y Rocha, M.L. (2007). Sistemas agroforestales. Universidad Nacional Agraria. Managua – Nicaragua. 30-45 p. Recuperado de https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/training_material/docs/1_RENF08M538.pdf
- Mendoza, L.K., Mostacero L.J., Lopez, M.S., Gil, R.A., De la Cruz, C.A. y Villena S.L. (2021). *Manglar* 18(2): 169-173. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2021.022>
- Metro, A., Atkinson, R. y Laliberte, B. (2019). Cadmio y cacao: una revisión de la investigación y recomendaciones para minimizar el cadmio en el cacao producido en América Latina. Bioersity International. Lima, Perú. 77 p.
- McBride, M., S. Sauvé y W. Hendershot. 1997. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *European J. Soil Sci.* 48: 337-346.
- MINAM (Ministerio del Ambiente - Perú), (2012). Resolución Ministerial N° 307-MINAM. Anexo1: Estándares de calidad ambiental para el suelo. Recuperado de https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/rm_307-1.pdf
- Moço, M., Gama-Rodríguez, E., Gama, R.A. y Correia, M. (2005). Caracterização da fauna edáfica em diferentes coberturas vegetais na Regiao Norte Fluminense. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 29: 555-564. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000400008>
- Montero, G. R (2016): Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada. Universidad de Granada. España. https://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion_lineal.pdf
- Muller, M., Serrano, M. y Biehl, B. (1992). Photosynthetic characteristics during development of leaves of *Theobroma cacao* L. *Acta Physiologiae Plantarum* 85(3): 132- 140.
- Nelino, F.R. (2021). Revisión sobre limites máximos de cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). La Granja. *Revista de Ciencias de la Vida*, 34 (2):117-130. <https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.08>

- Ocampo, P.M. (1997). Resultados Preliminares de Investigación Forestal en Shampubales en el Alto Mayo Región San Martín. Otorongo No. 05. 03-17.
- Otzen, T. y Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *Int. J. Morphol.*, 35(1): 227-232. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ijmorphol/v35n1/art37.pdf>
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V. y Toro, L. (2004). Sequential extraction of heavy metals in river sediments of an abandoned pyrite mining area: Pollution detection and a ffinity series. *Environmental Pollution*, 132: 189-201. 10.1016/j.envpol.2004.05.002
- Park, J.H., Lamb, D., Paneerselvam, P., Choppala, G., Bolan, N. y Chung (2011). Role of Organic Amendments on enhanced Bioremediation of Heavy Metal Contaminated Soils. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2-3), 549-574. [vhttps://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.082](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.082)
- Paredes, A.M. (2003). Manual del cultivo del cacao. Ministerio de Agricultura, Perú. 9 p. <https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/372/1/cacao%20-%20copia.pdf>
- Pérez, G. P. y Azcona, C. M. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 17(3): 199-205. <https://www.redalyc.org/pdf/473/47324564010.pdf>
- Prieto, J., González, C., Román, A. y Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plan tas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10:29- 44. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>
- Ramtahal, G., Yen, I. C., Hamid, A., Bekele, I., Bekele, F., Maharaj, K. y Harrynanan, L. (2018). The Effect of Liming on the Availability of Cadmium in Soils and Its Uptake in Cacao (*Theobroma Cacao* L.) In Trinidad y Tobago. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 0(0), 1–9.
- Rendón, M.M. y Villasís, K.M. (2017). El protocolo de investigación V: el cálculo del tamaño de muestra. *Rev Alerg Mex*, 64(2):220-227. <https://www.scielo.org.mx/pdf/ram/v64n2/2448-9190-ram-64-02-00220.pdf>
- Revoredo, A. (2018). *Efecto del tratamiento con 3 cepas de estreptomicetos en la acumulación de cadmio en plantas de Theobroma cacao* L. (Tesis de grado). Universidad Cayetano Heredia.

- Robledo, V. L. y Castaño, P. (2012). *Validación de la metodología para el análisis de los metales cadmio y plomo en agua tratada por absorción atómica*. (Tesis de grado) Universidad Tecnológica de Pereira. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3145/5430858R666.pdf;jsessionid=792488BBE80157D2DE06B1074BEFC1FC?sequence=1>
- Rodríguez, A.H. (2017). *Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. <file:///C:/Users/User/Downloads/1019048469.2017.pdf>
- Rogers, J.M., Stewart, M., Petrie, J.G. y Haynes, B.S. (2012). Department and management of metals produced during combustion of CCA treated timbers. *Hazard Material*, 2(4): 500-505.
- Rojas, C. M. (2015). Tipos de Investigación científica: Una simplificación de la complicada incoherente nomenclatura y clasificación. *Revista electrónica de Veterinaria*, 16(1): 1 – 4 p. <https://www.redalyc.org/pdf/636/63638739004.pdf>
- Romero, A.C. y Vargas, U.M. (2016). *Estudio del cacao en el Perú y en el Mundo, un análisis de la producción y comercio*. Primera Edición. Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI-PERU).
- Rosal, A., Pérez, J.P., Arcos, M.A y Dios, M. (2007). La Incidencia de Metales Pesados en Compost de Residuos Sólidos Urbanos y en su uso Agronómico en España. *Información Tecnológica*. Vol. 18(6), 75-82. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642007000600010>
- Sanabria, R. (2002). *Toxicidad y acumulación de cadmio en poblaciones de diferentes especies de Artemia*. [Tesis de grado, Universidad de Valencia, España]. <https://core.ac.uk/download/pdf/70998513.pdf>
- Sánchez, T.C. (2012). *Caracterización fisicoquímica de los suelos agrícolas contaminados con cadmio en el Distrito De Leonor Ordoñez, Provincia De Jauja*. [Tesis de grado, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8573/4/IV_FIN_107_T E_Sanchez_Tello_2021.pdf
- Santander, R.W., Garay, M.R., Verde, G.C. y Mendieta, G.O. (2021). Determinación del contenido de cadmio en suelos, frutos, granos fermentados y secos, licor de cacao y

chocolate en zonas productoras de la Región San Martín. *Rev Soc Quím Perú*, 87, (1): 39-49. <http://dx.doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.321>

Souza, M. De., Vitti, G. y Trevizam, A. (2007). Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42:527-535. <https://www.scielo.br/pdf/pab/v42n4/11.pdf>

Souza, C. y Días, L. (2004). Environmental and socio-economic improvement. In: Genetic improvement of cacao. Dias L.A.S. (ed). FAO. 260 p.

Tantalean, E. P. y Huauya, R.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. *Rev. de investig. agroproducción sustentable* 1(2): 69-78. DOI:10.25127/aps.20172.365

The International Plant Name Index (IPNI). Published In: *Species Plantarum* 2: 782. 1753. Consultado el 7 de diciembre del 2021. <https://www.ipni.org/>

UE (UNIÓN EUROPEA), (2006). Reglamento (CE) No 1881/2006 que fija el contenido máximo de determinados contaminantes en los productos alimenticios. *Reglamento de la Comunidad Europea, Bélgica*, 20 p. <https://www.boe.es/doue/2006/364/L00005-00024.pdf>

United States Environmental Protection Agency, (1996). Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. Selected Analytical Methods for Environmental Remediation and Recovery (SAM). Revisión 2. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>

Vaast, P. y Somarriba, E. (2014). Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agrofor. Syst.* 88: 947–956. 10.1007/s10457-014-9762-x

Velasco-Rodríguez, V.M., Martínez-Ordaz, V.A., Roiz-Hernández, J., Huazano-García, F. y Nieves-Rentería A. (2003). Muestreo y tamaño de muestra. Una guía práctica para personal de salud que realiza investigación. Buenos Aires: E-libro.net.

Vincent, K.N., Maxwell, H., Louis, K.D. y Enoch, D. (2012). Studies on the contribution of fertilizers to heavy metals levels in soils and cocoa from some cocoa farms in the Western Region of Ghana. *Journal of Natural Sciences Research*, 2 (8). <https://iiste.org/Journals/index.php/JNSR/article/view/3099/3140>

Westerman, R. (1990). Soil testing and plant analysis. 3era edición. Soil Sciences Society of America. SSSA. Madison, WI. EE.UU.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), (2008). Cadmium. Environmental health criteria. Geneva (Italy):119-137 p.

TERMINOLOGÍA

Absorción: Es un proceso de asimilación de nutrientes en el caso de las plantas. En el caso de animales y humanos, el proceso sucede cuando una sustancia ingresa en el organismo a través de ojos, piel, estómago, intestinos o pulmones (GREEN FACTS 2022).

Bioacumulación: En términos de las plantaciones de cacao y el cadmio (Cd), bioacumulación es la absorción que realizan las plantas para luego depositar o transferir el cadmio a los diferentes tejidos de las plantas (Augstburger, 2000).

Cadmio (Cd): Elemento químico de forma divalente, cuya masa atómica es de 112,41 y un peso atómico de 48, según la tabla periódica. Su solubilidad se obtiene en ácidos minerales, propio de su característica (Rogers *et al.*, 2012).

Codex alimentarius: Es un número de normas, directrices, reglas, códigos y otras sugerencias internacionalmente reconocidas y que controlan la calidad y la producción de alimentos y su inocuidad (CODEX ALIMENTARIUS 2015).

Contaminación: Es la intromisión de algún tipo de agente o sustancia en un medio que es físico, donde puede causar perjuicio. La contaminación se mide de varias formas, así existen varios tipos de ellas (Robledo y Castaño, 2012).

Límites máximos permisibles: Son los valores máximos que se permiten en los alimentos, estos valores fueron establecidos siguiendo los lineamientos y recomendaciones de la FAO y OMS (Robledo y Castaño, 2012).

Metales pesados: Son elementos que se encuentran naturalmente en las primeras capas del suelo a bajos niveles por eso es que también llevan el nombre de elementos traza, la mayoría de ellos no afecta la vida de los organismos vivos si es que no se encuentran en niveles excesivos (Rogers *et al.*, 2012).

Plantaciones agrícolas: Son las especies agrícolas que son sembradas para la autosubsistencia o para el proceso industrial en un determinado terreno (Mendieta y Rocha, 2007).

Plantaciones forestales: Son las especies forestales que son sembradas con fines de reforestación o explotación industrial en una determinada área de terreno (Mendieta y Rocha, 2007).

Reciclaje: Es un proceso en el cual se transforman los desechos en productos nuevos o en materia prima para su reutilización. En cuestión al reciclaje de nutrientes en un sistema agrícola se refiere a la deposición de nutrientes al suelo, luego de la caída y descomposición de las hojas (Gramlich *et al.*, 2017).

Sistema monocultivo: Es un sistema de producción agrícola donde se siembra y cosecha plantas de una sola especie en una gran extensión de manera uniforme (Mendieta y Rocha, 2007).

Sistemas agroforestales: Es un sistema que combina especies forestales y agrícolas en un mismo ecosistema sostenible, donde existe un manejo especial permitiendo que las especies se desarrollen en un ambiente propicio (Feliciano *et al.*, 2018).

APÉNDICES

Apéndice 1

Media (u) y error estándar (SE) de las muestras de suelos y granos de cacao evaluadas en SPSS

Estadísticos descriptivos							
		N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	
Muestra		Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	
					Desv. Error		
M1	Potencial de Hidrogeno	3	5,20	5,32	5,2600	,03464	,06000
	Capacidad de intercambio catiónico	3	3,90	3,96	3,9300	,01732	,03000
	Cadmio disponible suelos	3	,050	,054	,05200	,001155	,002000
	Cadmio total suelos	3	,204	,212	,20800	,002309	,004000
	Cadmio en granos	3	,075	,077	,07500	,000577	,001000
	N válido (por lista)	3					
M2	Potencial de Hidrogeno	3	4,50	4,60	4,5500	,02887	,05000
	Capacidad de intercambio catiónico	3	2,90	2,96	2,9300	,01732	,03000
	Cadmio disponible suelos	3	,044	,052	,04800	,002309	,004000
	Cadmio total suelos	3	,170	,172	,17100	,000577	,001000
	Cadmio en granos	3	,064	,070	,06700	,001732	,003000
	N válido (por lista)	3					
M3	Potencial de Hidrogeno	3	4,10	4,14	4,1200	,01155	,02000
	Capacidad de intercambio catiónico	3	3,88	3,90	3,8900	,00577	,01000
	Cadmio disponible suelos	3	,054	,058	,05600	,001155	,002000
	Cadmio total suelos	3	,179	,183	,18100	,001155	,002000
	Cadmio en granos	3	,115	,119	,11700	,001155	,002000
	N válido (por lista)	3					
M4	Potencial de Hidrogeno	3	4,50	4,62	4,5600	,03464	,06000
	Capacidad de intercambio catiónico	3	3,56	3,60	3,5800	,01155	,02000
	Cadmio disponible suelos	3	,035	,045	,04000	,002887	,005000
	Cadmio total suelos	3	,198	,200	,19933	,000667	,001155
	Cadmio en granos	3	,123	,127	,12500	,001155	,002000
	N válido (por lista)	3					

M5	Potencial de Hidrogeno	3	4,40	4,54	4,4700	,04041	,07000
	Capacidad de intercambio catiónico	3	3,02	3,06	3,0400	,01155	,02000
	Cadmio disponible suelos	3	,030	,034	,03200	,001155	,002000
	Cadmio total suelos	3	,186	,190	,18800	,001155	,002000
	Cadmio en granos	3	,073	,077	,07500	,001155	,002000
	N válido (por lista)	3					
M6	Potencial de Hidrogeno	3	4,40	4,42	4,4100	,00577	,01000
	Capacidad de intercambio catiónico	3	5,80	5,86	5,8300	,01732	,03000
	Cadmio disponible suelos	3	,030	,034	,03200	,001155	,002000
	Cadmio total suelos	3	,150	,154	,15200	,001155	,002000
	Cadmio en granos	3	,115	,119	,11700	,001155	,002000
	N válido (por lista)	3					
M7	Potencial de Hidrogeno	3	4,52	4,60	4,5600	,02309	,04000
	Capacidad de intercambio catiónico	3	5,46	5,50	5,4800	,01155	,02000
	Cadmio disponible suelos	3	,026	,030	,02800	,001155	,002000
	Cadmio total suelos	3	,115	,119	,11700	,001155	,002000
	Cadmio en granos	3	,041	,043	,04200	,000577	,001000
	N válido (por lista)	3					
M8	Potencial de Hidrogeno	3	3,84	3,96	3,9000	,03464	,06000
	Capacidad de intercambio catiónico	3	4,07	4,11	4,0900	,01155	,02000
	Cadmio disponible suelos	3	,030	,034	,03200	,001155	,002000
	Cadmio total suelos	3	,210	,216	,21300	,001732	,003000
	Cadmio en granos	3	,115	,119	,11700	,001155	,002000
	N válido (por lista)	3					
M9	Potencial de Hidrogeno	3	6,50	6,52	6,5100	,00577	,01000
	Capacidad de intercambio catiónico	3	6,54	6,58	6,5600	,01155	,02000
	Cadmio disponible suelos	3	,035	,045	,04000	,002887	,005000
	Cadmio total suelos	3	,331	,335	,33300	,001155	,002000
	Cadmio en granos	3	,111	,115	,11300	,001155	,002000
	N válido (por lista)	3					
	Potencial de Hidrogeno	3	5,50	5,60	5,5500	,02887	,05000

M1	Capacidad de	3	6,26	6,30	6,2800	,01155	,02000
0	intercambio catiónico						
	Cadmio disponible	3	,026	,030	,02800	,001155	,002000
	suelos						
	Cadmio total suelos	3	,153	,159	,15600	,001732	,003000
	Cadmio en granos	3	,099	,101	,10000	,000577	,001000
	N válido (por lista)	3					
M1	Potencial de Hidrogeno	3	5,40	5,46	5,4300	,01732	,03000
1	Capacidad de	3	4,01	4,05	4,0300	,01155	,02000
	intercambio catiónico						
	Cadmio disponible	3	,030	,034	,03200	,001155	,002000
	suelos						
	Cadmio total suelos	3	,120	,126	,12300	,001732	,003000
	Cadmio en granos	3	,099	,101	,10000	,000577	,001000
	N válido (por lista)	3					
M1	Potencial de Hidrogeno	3	4,18	4,20	4,1900	,00577	,01000
2	Capacidad de	3	4,27	4,31	4,2900	,01155	,02000
	intercambio catiónico						
	Cadmio disponible	3	,044	,052	,04800	,002309	,004000
	suelos						
	Cadmio total suelos	3	,134	,140	,13700	,001732	,003000
	Cadmio en granos	3	,130	,136	,13300	,001732	,003000
	N válido (por lista)	3					
M1	Potencial de Hidrogeno	3	4,55	4,59	4,5700	,01155	,02000
3	Capacidad de	3	3,70	3,72	3,7100	,00577	,01000
	intercambio catiónico						
	Cadmio disponible	3	,090	,094	,09200	,001155	,002000
	suelos						
	Cadmio total suelos	3	,296	,298	,29700	,000577	,001000
	Cadmio en granos	3	,131	,135	,13300	,001155	,002000
	N válido (por lista)	3					
M1	Potencial de Hidrogeno	3	4,70	4,78	4,7400	,02309	,04000
4	Capacidad de	3	2,77	2,81	2,7900	,01155	,02000
	intercambio catiónico						
	Cadmio disponible	3	,047	,049	,04800	,000577	,001000
	suelos						
	Cadmio total suelos	3	,164	,168	,16600	,001155	,002000
	Cadmio en granos	3	,140	,144	,14200	,001155	,002000
	N válido (por lista)	3					
M1	Potencial de Hidrogeno	3	4,12	4,20	4,1600	,02309	,04000
5	Capacidad de	3	4,35	4,39	4,3700	,01155	,02000
	intercambio catiónico						

Cadmio disponible suelos	3	,053	,059	,05600	,001732	,003000
Cadmio total suelos	3	,327	,331	,32900	,001155	,002000
Cadmio en granos	3	,099	,101	,10000	,000577	,001000
N válido (por lista)	3					

Apéndice 2

Comandos del SPSS versión 2019 utilizados en los análisis estadísticos

UBICACIÓN DEL MENÚ	NOMBRE DEL COMANDO	DESCRIPCIÓN
Analizar > Estadísticos descriptivos > Descriptivos	DESCRIPTIVES	Muestra las estadísticas de resumen univariados para varias variables en una única tabla y calcula valores estandarizados (puntuaciones z). Se puede calcular el error estándar ($SE \pm$) y la media (u).
Analizar > Regresión > Regresión lineal	REGRESSION	La regresión lineal estima los coeficientes de la ecuación lineal, con una o más variables independientes, que mejor prediga el valor de la variable dependiente.

Nota: Elaboración propia IBM SPSS Statistics (2024).

Apéndice 3

Análisis promedio de suelos y granos de cacao

- Análisis de suelos

SOLICITANTE: VERGARAY ISMINIO JIMMY		PROCEDENCIA: ATALAYA - UCAYALI																		
N°	CODIGO DEL LAB.	CODIGO DEL SOLICITANTE	ANALISIS MECANICO			pH	Cd		CIC	CAMBIABLES						CICe	%	%	%	
			Arena %	Arcilla %	Limo %		Textura	1:1		Disponible ppm	Total ppm	Ca	Mg	K	Na					Al
1	S01100-1	MUESTRA 1	79	12	9	Arena franca	5.26	0.052	0.208	3.93	2.44	0.32	--	--	0.75	0.42	3.93	70	30	19
2	S01100-2	MUESTRA 2	81	12	7	Arena franca	4.55	0.048	0.171	2.93	1.23	0.18	--	--	1.24	0.28	2.93	48	52	42
3	S01100-3	MUESTRA 3	71	14	15	Arena franca	4.12	0.056	0.181	3.89	1.19	0.16	--	--	2.31	0.23	3.89	35	65	59
4	S01100-4	MUESTRA 4	73	14	13	Arena franca	4.56	0.040	0.200	3.58	1.34	0.16	--	--	1.89	0.19	3.58	42	58	53
5	S01100-5	MUESTRA 5	81	12	7	Arena franca	4.47	0.032	0.188	3.04	1.28	0.20	--	--	1.43	0.14	3.04	48	52	47
6	S01100-6	MUESTRA 6	79	12	9	Arena franca	4.41	0.032	0.152	5.83	1.55	0.23	--	--	3.57	0.48	5.83	30	70	61
7	S01100-7	MUESTRA 7	71	14	15	Arena franca	4.56	0.028	0.117	5.48	2.90	0.43	--	--	2.01	0.14	5.48	61	39	37
8	S01100-8	MUESTRA 8	81	12	7	Arena franca	3.90	0.032	0.213	4.09	1.34	0.20	--	--	2.46	0.09	4.09	38	62	60
9	S01100-9	MUESTRA 9	43	24	33	Franco	6.51	0.040	0.333	6.56	5.63	0.72	0.12	0.09	0.00	0.00	6.56	100	0	0
10	S01100-10	MUESTRA 10	83	12	5	Arena franca	5.55	0.028	0.156	6.28	5.45	0.69	0.08	0.06	0.00	0.00	6.28	100	0	0
11	S01100-11	MUESTRA 11	65	16	19	Arena franca	5.43	0.032	0.123	4.03	3.08	0.44	--	--	0.34	0.17	4.03	87	13	8
12	S01100-12	MUESTRA 12	67	14	19	Arena franca	4.19	0.048	0.137	4.29	2.74	0.37	--	--	1.02	0.16	4.29	72	28	24
13	S01100-13	MUESTRA 13	69	12	19	Arena franca	4.57	0.092	0.297	3.71	2.67	0.36	--	--	0.54	0.15	3.71	81	19	15
14	S01100-14	MUESTRA 14	77	12	11	Arena franca	4.74	0.048	0.166	2.79	1.45	0.20	--	--	1.02	0.13	2.79	59	41	37
15	S01100-15	MUESTRA 15	67	20	13	Arena franca	4.16	0.056	0.329	4.37	1.35	0.17	--	--	2.74	0.11	4.37	35	65	63

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
TINGO MARIA, 11 Diciembre del 2021
RECIBO N° 0640369



- Análisis promedio de los granos de cacao

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología Carretera Central Km 1.21 - Tingo Maria - Celular 941531359 analisisdesuelosunas@hotmail.com			
ANALISIS ESPECIAL			
SOLICITANTE:		VERGARAY IYMINIO JIMMY	PROCEDENCIA
			ATALAYA - UCAYALI
DATOS DE LA MUESTRA			Cd TOTAL EN GRANOS DE CACAO
			PARTES POR MILLON (ppm)
Código	Muestra	Cultivo	Cd total ppm
S0 1070-1	1	CACAO	0,075
S0 1070-2	2	CACAO	0,067
S0 1070-3	3	CACAO	0,117
S0 1070-4	4	CACAO	0,125
S0 1070-5	5	CACAO	0,075
S0 1070-6	6	CACAO	0,117
S0 1070-7	7	CACAO	0,042
S0 1070-8	8	CACAO	0,117
S0 1070-9	9	CACAO	0,113
S0 1070-10	10	CACAO	0,100
S0 1070-11	11	CACAO	0,100
S0 1070-12	12	CACAO	0,133
S0 1070-13	13	CACAO	0,133
S0 1070-14	14	CACAO	0,142
S0 1070-15	15	CACAO	0,100

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
 TINGO MARIA, 11 Diciembre del 2021
 RECIBO N° 0640369




Apéndice 4

Información de los productores de cacao

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 10/09/21

Nombre del productor(ra): Esteban Reinoso Fonseca

DNI: 2096885 COORDENADAS UTM: 632792, 18815503

Lugar de acción: Aerija Provincia: Atalaya Región: Ucayali

Sistema de manejo del cultivo: convencional

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
<u>CCN 51</u>	<u>3</u>	<u>400 Kg</u>

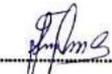
3. EVALUACION DE APLICACIÓN DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: URPA

Yavamila integrador

CANTIDAD APLICADA: 250 gr.

VECES POR AÑO: 1 vez


Firma del productor

FICHA TÉCNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 04/09/21

Nombre del productor(ra): Jorge Maldonado Valderrama

DNI: 00160253 COORDENADAS UTM: 0633288, 18814550

Lugar de acción: CCNN Aeriya Provincia: Atalaya Región: Ucayali

Sistema de manejo del cultivo: Convencional

2. CARACTERÍSTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
clon CCN51	2.5	800 kg

3. EVALUACION DE APLICACIÓN DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Guano de isla

urea

yaramila integrador

CANTIDAD APLICADA: 300 g de Yaramila

un puñado de urea por

planta.

VECES POR AÑO: 1 vez

Jorge R

Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 10/09/21

Nombre del productor(ra): Francisco Ituraran Rios

DNI: 00158433 COORDENADAS UTM: 0632845, 8816224

Lugar de acción: Aeriya Provincia: Atalaya Región: Ucayali

Sistema de manejo del cultivo: Convencional

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
Clon CC.N 51	1	800 Kg

3. EVALUACION DE APLICACIÓN DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Yaramila integrado
nitabor

CANTIDAD APLICADA: 300 gr por planta

VECES POR AÑO: 2 veces



Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 18, 09, 21

Nombre del productor(ra): Mari Izurieta Campos

DNI: COORDENADAS UTM: 632P52, 18815320

Lugar de acción: Aeriya Provincia: Atalaya Región: Ucayali

Sistema de manejo del cultivo: convencional

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
C.C. N 51	2	1000 Kg

3. EVALUACION DE APLICACIÓN DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Urea

Yaramila integrador

CANTIDAD APLICADA: 250 gr.

VECES POR AÑO: 1 vez



Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 04/09/21

Nombre del productor(ra): Jorge Manuel Yumbo Blanco

DNI: 00159609

COORDENADAS UTM: 0633530, 8815088

Lugar de acción: CCNN Aeriya Provincia: ATALAYA Región: UCAVALI

Sistema de manejo del cultivo: CONVENCIONAL

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
CC-N 51	2	80 kg

3. EVALUACION DE APLICACIÓN DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Gallinaza

Yaramila

CANTIDAD APLICADA: Medio balde de gallinaza

por planta y vara un

poco (250 gr)

VECES POR AÑO: 1 vez



Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 25/09/21

Nombre del productor(ra): Jaime Pascual Rivera

DNI: 00016318

COORDENADAS UTM: 0633063, 8815580

Lugar de acción: Aeria Provincia: Atalaya Región: Ucayali

Sistema de manejo del cultivo: Convencional

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
CC-N51	5	1000 kg

3. EVALUACION DE APLICACIÓN DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Yaramila Integrador

CANTIDAD APLICADA: 300 gr/planta

VECES POR AÑO: 2 veces


Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 18/09/21

Nombre del productor(ra): Gonzalo Miranda Ramirez

DNI: 00150479 COORDENADAS UTM: 632402, 18814647

Lugar de acción: 632402 Acrija Provincia: Atalaya Región: Ucayali

Sistema de manejo del cultivo: Convencional

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
Clon CCN 51	2	300 kg

3. EVALUACION DE APLICACION DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Abono

Roca fosforica

Urea

CANTIDAD APLICADA: 300 gr/planta

VECES POR AÑO: 1 vez

Gonzalo

Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 12/09/21

Nombre del productor(ra): Yovana Mari Mañoro

DNI: 47426790 COORDENADAS UTM: 652529, 8814689

Lugar de acción: Acrija Provincia: Atalaya Región: Ucayali

Sistema de manejo del cultivo: convencional

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
clon CCN51	1	250 kg

3. EVALUACION DE APLICACIÓN DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Abono

Roca fosforica

Urea

CANTIDAD APLICADA: Abono le hecho bastante

Roca una lata de 1kg (200gr)

un Duñado de Urea (100gr)

VECES POR AÑO: 3 veces



Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 03/10/21

Nombre del productor(ra): Gloria Meri Rios

DNI: 62751135 COORDENADAS UTM: 06122203, 8823491

Lugar de acción: Misión Unini Provincia: Atalaya Región: Ucayali

Sistema de manejo del cultivo: convencional

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
CC-N 51	1	500kg

3. EVALUACION DE APLICACIÓN DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Roca fosforica
Yara integrador

CANTIDAD APLICADA: 250 gr/planta (Roca)
100gr - Roca.

VECES POR AÑO: 2 veces.

Fabrizio
Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 02/10/21

Nombre del productor(ra): Hector Tucno Cosaverde

DNI: 2827638

COORDENADAS UTM: 0628233 / 8817956

Lugar de acción: Santa Rosa Provincia: Atalaya Región: Ucayali

Sistema de manejo del cultivo: Convencional

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
CCN 51	2	300 Kg.

3. EVALUACION DE APLICACION DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Guano de Isla

Yaramila

CANTIDAD APLICADA: 250gr/planta

VECES POR AÑO: 1 vez



Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 02/10/21

Nombre del productor(ra): Saul Casara diaz

DNI: 00151081

COORDENADAS UTM: 0612307 / 823185

Lugar de acción: Unini Misión Provincia: Atalaya Región: Ucayali

Sistema de manejo del cultivo: Convencional

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
CCN 51	1.5	200 kg

3. EVALUACION DE APLICACIÓN DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Yaramila integrador

CANTIDAD APLICADA: 200 gr/planta

VECES POR AÑO: 1 vez


Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 15/10/21

Nombre del productor(ra): Felix Hilario Zarzo Romero

DNI: 00150164

COORDENADAS UTM: 0633404, 8812964

Lugar de acción: Alalaya Provincia: Alalaya Región: Ucayali

Sistema de manejo del cultivo: Convencional

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
CCN 51	5	450 kg

3. EVALUACION DE APLICACION DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Yara integrador
urea

CANTIDAD APLICADA: 300 gr / planta (yara)
150 gr / urea

VECES POR AÑO: 2 veces


Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 03/10/21

Nombre del productor(ra): Olga Ramirez Campa
 DNI: 00160681 COORDENADAS UTM: 0611945, 18823724
 Lugar de acción: Misión Unga Provincia: Atalaya Región: Ucayali
 Sistema de manejo del cultivo: Convencional

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
Clon CCN51	5	250 kg

3. EVALUACION DE APLICACIÓN DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Yara integrador
 Guano de la isla
 CANTIDAD APLICADA: 200 gr / planta
 100 gr / guano
 VECES POR AÑO: 2 veces



Firma del productor

FICHA TECNICA DEL PRODUCTOR

1. DATOS GENERALES

FECHA: 01.10.21

Nombre del productor(ra): Brigida Piroca Izurieta
 DNI: 46911820 COORDENADAS UTM: 06.33603, 1881776
 Lugar de acción: CCNN Santa Rosa Provincia: Atalaya Región: Ucayali
 Sistema de manejo del cultivo: Convencional.

2. CARACTERISTICAS DE LA FINCA PRODUCTIVA DE CACAO

TIPO DE VARIEDAD O TIPO DE CACAO	HECTARIAS TOTALES	RENDIMIENTO POR HECTAREA
clon cc. n si	1	350 kg

3. EVALUACION DE APLICACIÓN DE INSUMOS.

PRODUCTOS QUE UTILIZA: Gallinaza

CANTIDAD APLICADA: media balde

VECES POR AÑO: 1 vez

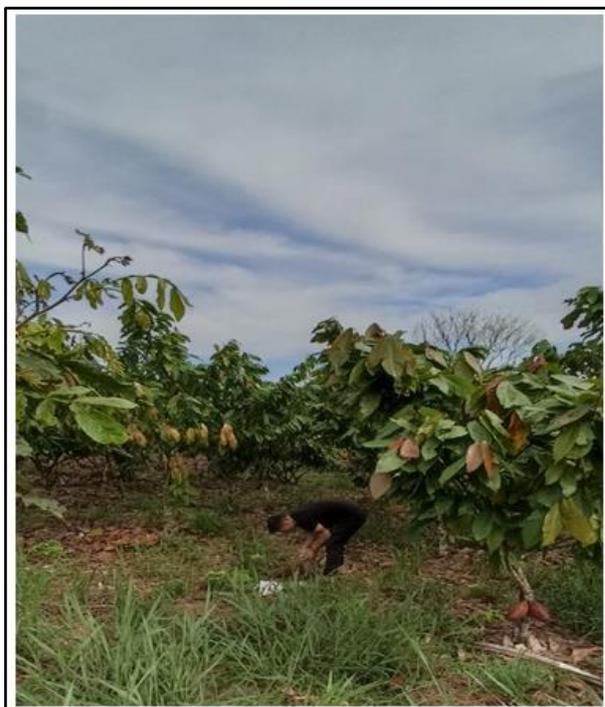


Firma del productor

Apéndice 5

Iconografías

Realizando visitas a las fincas de los productores para el recojo de las muestras de suelo y granos de cacao.



Evidencia del recojo de las muestras de suelo, para la determinación de cadmio.



Embolsado y rotulación de las muestras de los suelos y granos de cacao del clon CCN 51.



