

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**EFICACIA DE DOS ESPECIES VEGETALES AISLADAS Y EN
ASOCIACIÓN AL CACAO PARA LA FITOEXTRACCIÓN DE
CADMIO EN SUELOS CONTAMINADOS BAJO CONDICIONES DE
VIVERO**

Tesis

para optar el título de

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR

GRIS ROSARIO TAYPE CAMARENA

Tingo María - Perú

2021



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 042-2022-FRNR-UNAS

Los que suscriben, miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 17 de junio de 2022 a horas 03:05 p. m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental para calificar la Tesis titulada:

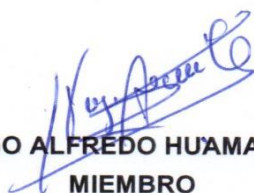
“EFICACIA DE DOS ESPECIES VEGETALES AISLADAS Y EN ASOCIACIÓN AL CACAO PARA LA FITOEXTRACCIÓN DE CADMIO EN SUELOS CONTAMINADOS BAJO CONDICIONES DE VIVERO”

Presentado por la Bachiller: **TAYPE CAMARENA, Gris Rosario**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 11 de octubre de 2022


Dr. CASIANO AGUIRRE ESCALANTE
PRESIDENTE


Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
MIEMBRO


Dr. VICTOR BETETA ALVARADO
MIEMBRO




Ing. M. Sc. LUZ BALCAZAR TERRONES
ASESOR

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**EFICACIA DE DOS ESPECIES VEGETALES AISLADAS Y EN
ASOCIACIÓN AL CACAO PARA LA FITOEXTRACCIÓN DE
CADMIO EN SUELOS CONTAMINADOS BAJO CONDICIONES DE
VIVERO**

Autor : TAYPE CAMARENA, Gris Rosario

Asesor : Ing. M.Sc. BALCÁZAR TORRES, Luz

Programa de investigación : Ciencia y tecnología ambiental

Línea de investigación : Biorremediación y recuperación de ambientes degradados

Eje temático : Captura y acumulación de metales pesados

Lugar de ejecución : Castillo Grande

Duración : 06 meses

Financiamiento : IIAP

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Gris Rosario', is located to the right of the 'Asesor' field.

Tingo María – Perú, 2021

DEDICATORIA

A Dios:

Divino creador de todo lo que existe, quien me dio la vida y me dotó de inteligencia para poder conseguir uno de mis mayores anhelos.

A mis madres:

A mi mami Genoveva y a mi mamá Silvia a quienes les debo la vida, gracias por su cariño, apoyo y aprecio.

A mis queridos hermanos:

A todos mis hermanos y en especial a Jessica y Mariela, que me apoyaron en todo momento.

A mi familia:

A Erick, Ian y Santhana., que me dieron todo su apoyo.

A los docentes:

Por la enseñanza que nos brindan y el ejemplo que representan para nuestra formación como profesionales.

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Nacional Agraria de la Selva y a todo el personal que la conforman, por su apoyo y confianza, en especial a los docentes de la Facultad de Recursos Naturales Renovables que contribuyeron en mi formación profesional.
- A los miembros de jurado de tesis: Dr. Casiano Aguirre Escalante, Dr. Huamani Yupanqui Hugo Alfredo y Ing. M.Sc. Beteta Alvarado Víctor M.
- A la Ing. M.Sc. Balcázar Terrones Luz, asesora de la presente tesis, por su apoyo en el proyecto, ejecución y culminación.
- Al Instituto de Investigación de la Amazonia Peruana (IIAP), por su apoyo, financiación y confianza al presente trabajo de investigación.
- A mis compañeros de la UNAS, en especial a Chávez Navarro, Ronny Kris; Valeriano Huataquispe, Leida Anais; Valer Cristóbal, Susan; Castañeda Malpartida, Daniel; Basilio Tavera, Jimi Charles; Velásquez Huayllas, Carlos; Flores Amasifuén, Royers y a todas aquellas personas que de alguna u otra forma hayan contribuido en la culminación del presente trabajo de investigación.

La autora

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Del cacao	3
2.1.1. Generalidades	3
2.1.2. Cultivo de cacao en el Perú	3
2.2. Metales pesados en suelos agrícolas	4
2.3. Origen de la contaminación del suelo por metales pesados	5
2.3.1. Origen natural:.....	5
2.3.2. Origen antropogénico	6
2.4. Biodisponibilidad del metal pesado	6
2.5. Factores que afectan la disponibilidad de los metales pesados en los suelos.....	7
2.5.1. El pH	7
2.5.2. Materia orgánica.....	7
2.5.3. Calcio	8
2.5.4. Composición granulométrica o clase textural de los suelos.....	8
2.5.5. Carbonatos.....	9
2.5.6. Óxidos de hierro y manganeso	9
2.6. Absorción y translocación de metales pesados en las plantas.....	9
2.6.1. Absorción	9
2.6.2. Translocación	10
2.6.3. Acumulación	10
2.7. Cadmio	10
2.7.1. Cadmio en el suelo	10
2.7.2. Ingreso del cadmio en la cadena trófica	12
2.7.3. Ingreso, transporte y acumulación del cadmio en plantas.....	13
2.8. Efectos del cadmio	15
2.8.1. En la salud humana	15
2.8.2. En las plantas.....	16
2.9. Biorremediación	16
2.9.1. Fitorremediación	17

2.9.2. Factor de bioconcentración y translocación de metales.	17
2.9.3. Fitoextracción.....	19
III. MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1. Lugar de ejecución	20
3.1.1. Ubicación	20
3.1.2. Zona de vida	20
3.1.3. Características climáticas	20
3.2. Materiales y métodos.....	20
3.2.1. Materiales y equipos.....	20
3.2.2. Metodología	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
4.1. Capacidad de fitoextracción de cadmio de las especies en estudio.....	28
4.1.1. Efecto de las especies vegetales en la concentración de cadmio en la estructura vegetal.....	28
4.1.2. Efecto de las especies vegetales en la concentración de cadmio en los suelos en estudio.....	30
4.2. Índice de bioconcentración y de translocación de cadmio de las especies en estudio	40
V. CONCLUSIONES	47
VI. RECOMENDACIONES	48
VII. REFERENCIAS.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Niveles máximos de cadmio en productos derivados del cacao.....	13
2. Criterios de clasificación de plantas de acuerdo con su concentración de EPT en biomasa biomasa aérea	18
3. Criterios de clasificación de plantas por su comportamiento en la acumulación de EPT basados en el factor de translocación (FT) y el factor de bioconcentración (BCF)	19
4. Descripción de los tratamientos en estudio	22
5. Modelo del análisis de variancia para los tratamientos en estudio.....	23
6. Características fisicoquímicas iniciales del suelo en estudio	24
7. Análisis de varianza de la concentración de cadmio (ppm) en la estructura vegetal de las especies en estudio a los 90 días de la siembra	28
8. Prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) para la concentración de cadmio (ppm) en la estructura vegetal de las especies en estudio a los 90 días de la siembra	68
9. Análisis de varianza de la concentración de cadmio (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio a los 90 días de la siembra	30
10. Prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) para la concentración de cadmio (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio a los 90 días de la siembra	68
11. Propiedades fisicoquímicas de los suelos en estudio por cada tratamiento.....	33
12. Concentración de cadmio (ppm) en la estructura vegetal de las especies, suelos en estudio e índice de bioconcentración (BCF) por tratamientos	41
13. Concentración de cadmio (ppm) en la estructura vegetal de las especies e índice de translocación (TF) por tratamientos	44
14. Datos generales del análisis de laboratorio realizado a las especies vegetales en estudio.....	64
15. Datos generales del análisis de laboratorio realizado a los suelos de los sustratos.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
Figura 1.	Concentración de cadmio (ppm) en la estructura vegetal de los individuos de cada tratamiento en estudio	29
Figura 2.	Concentración de cadmio (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio	31
Figura 3.	Nivel de relación entre las variables pH y materia orgánica (%) de los suelos en estudio	35
Figura 4.	Nivel de relación entre las variables pH y CIC de los suelos en estudio.....	37
Figura 5.	Nivel de relación entre las variables materia orgánica (%) y CIC de los suelos en estudio	37
Figura 6.	Concentración de cadmio y plomo (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio ...	38
Figura 7.	Niveles de los parámetros químicos de los suelos por tratamiento y del suelo inicial ...	39
Figura 8.	Concentración de cadmio (ppm) por tratamiento en la estructura vegetal y en el suelo.....	43
Figura 9.	Proporción de cadmio (%) por tratamiento en la estructura vegetal de las especies en estudio.	45

RESUMEN

La presente investigación se planteó como objetivo determinar la eficacia de *Pavonia fruticosa* (pega pega) y de *Xanthosoma sagittifolium* (pituca) aisladamente y en asociación con *Theobroma cacao* (cacao) para la fitoextracción de cadmio en suelos contaminados en el distrito de Castillo Grande, de la provincia de Leoncio Prado, región Huánuco. Las 02 especies vegetales fueron cultivadas en macetas en condiciones de vivero durante 90 días, de manera aislada y en asociación a *T. cacao*; se realizó un muestreo inicial para determinar el pH, los nutrimentos, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, la textura y la concentración en cadmio y plomo; este suelo se utilizó como sustrato para cultivar 03 repeticiones de cada tratamiento, siendo el T₁ (*P. fruticosa*); T₂ (*T. cacao*); T₃ (*X. sagittifolium*); T₄ (*T. cacao* + *X. sagittifolium*); T₅ (*T. cacao* + *P. fruticosa*) y T₆ (*T. cacao* + *X. sagittifolium* + *P. fruticosa*). No se encontraron diferencias de importancia en los parámetros fisicoquímicos de los suelos después del desarrollo de las especies; se puede resaltar el incremento de la C.I.C.; por otro lado, no se encuentran efectos en el nivel de plomo; para el caso del cadmio, los niveles en la estructura vegetal de las especies, confirmó la presencia de diferencias significativas ($\alpha=0,05$); así, para la estructura vegetal (raíz+tallo), aisladamente, *T. cacao* presentó los mayores valores (T₂ = 5,10 ppm), seguido de *P. fruticosa* (T₁ = 4,59 ppm) y de *X. Sagittifolium* (T₃ = 3,54 ppm); de forma asociada se encontraron mayores registros en el T₆ con 19,59 ppm, seguido del T₅ con 12,42 ppm y de T₄ con 9,68 ppm. De igual manera, respecto al suelo en cada tratamiento se obtuvo el mayor promedio de concentración en el suelo del T₆ con 2,27 ppm, en contraste, el menor registro se dio en el T₂ con 1,91 ppm. Se halló el factor de bioconcentración (BCF) en las variedades de plantas estudiadas teniéndose que, en aislamiento, en el BCF (aéreo) todas las especies se clasifican como “excluseras”, para el BCF (raíz), las especies *P. fruticosa* y *T. cacao* se clasifican como “acumuladoras”, mientras que la *X. sagittifolium* se denota como “exclusera”. Durante el crecimiento asociado, para el BCF (aéreo) todas las especies se clasifican como “excluseras”, a excepción del *X. sagittifolium*, la cual en el T₆ se clasifica como “acumuladora”; respecto al BCF “raíz” todas las especies se clasificaron como “acumuladoras”. Se halló el factor de translocación (TF) donde las variedades de plantas estudiadas como *P. fruticosa* y *T. cacao* se clasifican como “excluseras” (TF<1) al desarrollarse aisladamente y en asociación; para la *X. sagittifolium* se registra una TF>1 por lo que se denota como “exclusera” durante su crecimiento en aislamiento y en la asociación del T₆.

Palabras clave: Bioacumulación, translocación, acumuladora, exclusera, *Pavonia fruticosa*, *Xanthosoma sagittifolium*.

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the effectiveness of *Pavonia fruticosa* (pega pega) and *Xanthosoma sagittifolium* (pituca) in isolation and in association with *Theobroma cacao* (cacao) for the phytoextraction of cadmium in contaminated soils in the district of Castillo Grande, Leoncio Prado province, Huanuco region. The 02 plant species were grown in pots under nursery conditions for 90 days, in isolation and in association with *T. cacao*; an initial sampling was carried out to determine pH, nutrients, organic matter, cation exchange capacity, texture and cadmium concentration; this soil was used as a substrate to grow 03 replicates of each treatment, considering T₁ (*P. fruticosa*); T₂ (*T. cacao*); T₃ (*X. sagittifolium*); T₄ (*T. cacao* + *X. sagittifolium*); T₅ (*T. cacao* + *P. fruticosa*) and T₆ (*T. cacao* + *X. sagittifolium* + *P. fruticosa*). No significant differences were found in the physicochemical parameters of the soils after the development of the species; the increase in C.I.C. is noteworthy. In the case of cadmium, the levels in the plant structure of the species confirmed the existence of significant differences ($\alpha=0.05$); thus, for the plant structure (root+stem), in isolation, *T. cacao* presented the highest values (T₂ = 5.10 ppm), followed by *P. fruticosa* (T₁ = 4.59 ppm) and *X. Sagittifolium* (T₃ = 3.54 ppm); the highest values were found in T₆ with 19.59 ppm, followed by T₅ with 12.42 ppm and T₄ with 9.68 ppm. Similarly, with respect to the soil in each treatment, the highest average concentration was obtained in the soil of T₆ with 2.27 ppm; in contrast, the lowest concentration was found in T₂ with 1.91 ppm. The bioconcentration factor (BCF) was determined for the species, showing that, in isolation, for the BCF (aerial) all species are classified as "excluders", for the BCF (root), the species *P. fruticosa* and *T. cacao* are classified as "accumulators", while *X. sagittifolium* is denoted as "excluder". During associated growth, for BCF (aerial) all species are classified as "excluders", with the exception of *X. sagittifolium*, which at T₆ is classified as "accumulator"; with respect to BCF "root" all species were classified as "accumulators". The translocation factor (TF) was determined where *P. fruticosa* and *T. cacao* species are classified as "excluders" (TF<1) when growing in isolation and in association; for *X. sagittifolium* a TF>1 is recorded so it is denoted as "excluder" during its growth in isolation and in association at T₆.

Key words: Bioaccumulation, translocation, accumulator, excluder, *Pavonia fruticosa*, *Xanthosoma sagittifolium*.

I. INTRODUCCIÓN

Los metales pesados se utilizan en varios movimientos económicos como la agricultura, la minería, la fundición, la galvanoplastia, el refinado del oro, entre otros; este aprovechamiento ha sido asociado a serios problemas de contaminación de los suelos. Es así que se da la acumulación de estos metales en la estructura de las plantas inhibiendo o activando algunos procesos enzimáticos que afectan de manera negativa su productividad. El plomo (Pb), el arsénico (As), el cadmio (Cd), el zinc (Zn), etc., las plantas suelen absorberlos, concentrándose en sus tallos, hojas, raíces en concentraciones peligrosas. Este suceso favorece la entrada de los metales en la alimentación de los seres humanos directa o indirectamente, ya que muchos de estas plantas son de consumo humano.

Hay evidencias de que el cadmio es el causante de negativos efectos en la salud de la humanidad, de los animales y en el deterioro de ecosistemas naturales y agroecosistemas. La acumulación de este metal es muy dañina para los organismos del suelo agrario y es nocivo para la salud de la humanidad, estas consecuencias en la salud van a depender de la cantidad de metal presente y de las características del suelo.

Particularmente, en la actividad cacaotera de nuestro país, las prácticas en las parcelas de producción contaminan los suelos, aire y agua con una variedad de sustancias con un potencial tóxico como el cadmio y plomo, existiendo evidencia de estos metales en los cultivos de cacao orgánico de la provincia de Leoncio Prado, Huánuco. El más resaltante comprador de este cultivo es el internacional, los países compradores ponen los requisitos para poder ingresar y comercializar el producto, entre estos está el nivel de concentración de ciertos metales; en ese sentido, el mercado europeo está presentando restricciones a la concentración de Cd presente en los productos derivados del cacao a través de límites máximos permisibles.

Se sabe que la acumulación de metales pesados en la superficie del suelo puede reducirse de manera lenta a través de la lixiviación, la erosión, la deflación y al ser absorbidos por las plantas. Cuando existen cultivos como el cacao en estos suelos, se requiere de soluciones afectivas y rápidas para que disminuyan la contaminación ocasionada por estos metales pesados y cualquier otro contaminante, también es necesario la preparación de procedimientos para remediar los suelos que sea durable y económico para el productor, esto es debido a que los procesos de remediación para suelos contaminados con metales pesados, suelen ser muy costosos y tienen efectos adversos como la destrucción de la biota del suelo.

En este contexto, la fitorrestauración representa una alternativa viable porque no requiere cuantiosas inversiones, este procedimiento concentra los contaminantes en la planta. Este procedimiento natural suele demorar más que otros procedimientos, la ventaja es que no tiene efectos adversos que impacten negativamente el ambiente y que para remediarlo es muy costoso, este procedimiento no altera la belleza natural de la zona tratada. Por ello, la presente investigación pone en cuestión la capacidad fitoextractora de dos especies vegetales para remediar suelos contaminados con cadmio; para esto se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la eficacia de *Pavonia fruticosa* (pega pega) y de *Xanthosoma sagittifolium* (pituca) en la fitoextracción de cadmio en condiciones de aislamiento y en asociación con el *Theobroma cacao* (cacao)?

Para esto, se considera como hipótesis general que, las especies *Pavonia fruticosa* (pega pega) y de *Xanthosoma sagittifolium* (pituca) presentan buena eficacia durante la fitoextracción de cadmio de forma aislada y en asociación al *Theobroma cacao* (cacao) durante la fase vivero. Por ello:

Objetivo general:

Determinar la eficacia de *Pavonia fruticosa* (pega pega) y de *Xanthosoma sagittifolium* (pituca) aisladamente y en asociación con *Theobroma cacao* (cacao) para la fitoextracción de cadmio en suelos contaminados.

Objetivos específicos:

1. Evaluar la capacidad de absorción de cadmio de *Pavonia fruticosa* y de *Xanthosoma sagittifolium* aisladamente y en asociación a *Theobroma cacao* (cacao).
2. Determinar el índice de bioconcentración y de translocación de cadmio de las especies en estudio, aisladamente y en asociación a *Theobroma cacao* (cacao).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Del cacao

2.1.1. Generalidades

Esta especie es oriunda del bosque húmedo tropical de América del sur. La mayor cantidad de cultivos cacaoteros se encuentran ubicados de manera geográfica entre los 10° de latitud Norte y Sur del Ecuador. Se puede encontrar cacao en el Oeste Africano, América latina y Sur Este de Asia (Arévalo *et al.*, 2004). Por su parte, Aguirre (2020) sostiene que es originario de la cuenca del río Orinoco o el río Amazonas y que desde ahí se extendió hasta el sureste de México. La clasificación taxonómica de acuerdo a Condezo (2011) es como sigue:

Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Malvales
Familia	: Sterculiaceae
Género	: Theobroma
Especie	: <i>T. cacao</i>

De acuerdo a Sánchez *et al.* (2019), en muchos países latinoamericanos y del Caribe, el cacao es muy importante por estar siempre presente en las tradiciones, era producido desde la época colonial para ser exportado, esto ha favorecido la economía de estos países. A este cultivo se le considera un aliado en el enfrentamiento de los efectos negativos del cambio climático y para reducir los cultivos ilícitos, al ser una buena alternativa. Este cultivo viene siendo muy importante en la región, por ello 1,8 millones de hectáreas están siendo actualmente usadas para su producción; esta superficie ha ido creciendo de modo incesante a partir del 2006 esto significó un aumento en la producción, y un incremento en la oferta de este producto, especialmente del grano de cacao. Esto se debió, a la gran aceptación internacional del chocolate y para todos los involucrados en la cadena de valor, esto significó una oportunidad para poder desarrollarse, especialmente para el agricultor (FAO, 2018).

2.1.2. Cultivo de cacao en el Perú

Al presente, el Perú viene a ser el segundo productor mundial agroexportador de cacao fino del mundo, debido a que el fruto es excelente por sus condiciones y características (su aroma y sabor único) particulares para la elaboración de chocolate, por ello logro

establecerse como alimento antioxidante al estar presente en esa lista. Nuestro País llegó a ser considerado como el tercer productor de cacao en Latinoamérica y el Caribe en el año 2015, obteniéndose 87 317 toneladas alrededor de 120 000 hectáreas, que provenían especialmente de las regiones San Martín, Junín, Cusco, Ayacucho, Amazonas y Huánuco. La producción de cacao originó cerca de 8.2 millones de jornales anuales, esto genera en las zonas de producción un beneficio directo para más de 90 000 familias y de manera indirecta a 450 000 personas, en su mayoría pertenecientes a la selva (Alcalde *et al.*, 2017). La importación mundial del cacao en grano del Perú creció 6,3% promedio anual, entre los años 2013 y 2017 y fue el 2019 cuando aumentó, al alcanzar un crecimiento de hasta 189.0%. La mayor demanda del cacao proviene de la industria, siendo el continente europeo países como: (Países Bajos, Alemania, Bélgica, Francia, España y Reino Unido) y Estados Unidos los más resaltantes importadores (MINAGRI, 2019).

Al efectuarse un examen específico del escenario del cultivo de cacao en el Perú mediante el método FODA se logró registrar significativas Fortalezas y Oportunidades para generar un mayor desarrollo de esta actividad, potenciándose así y obteniendo mayores beneficios y un mayor desarrollo para el país. No obstante, esta posibilidad socioeconómica, que representa un potencial y que podría generar la mejora de la calidad de vida de los agricultores, presenta mucha dificultad para su desarrollo y mejora, estas se encuentran principalmente en la disposición de las Debilidades (López *et al.*, 2020). Existe un conjunto de limitantes en el cultivo de cacao, estando en las más resaltantes que, la mayor parte de los agricultores presentan menos de 5 hectáreas, no tienen una relación contable de sus costos de producción y no saben sobre los estándares requeridos; gran parte de los agricultores carece de accesibilidad crediticia apropiada para la mejora de su producción, la mayoría trabaja su producción de forma individual, muy pocos trabajan de manera organizada, estimándose que representan un 70% que no trabaja de manera organizada (Barrientos *et al.*, 2014). Sin embargo, el Perú registra un promedio de crecimiento de 8,4% por año; superado únicamente por el aumento registrado en México (8,6%) y Uganda (13,3%). En nuestro país la exportación ha seguido una conducta progresiva 16,7% promedio anual. La exportación de los países de la Unión Europea (Bélgica, Países Bajos) responde a una reexportación. La UE es el más grande receptor de productos provenientes de las naciones subdesarrolladas (MINAGRI, 2019).

2.2. Metales pesados en suelos agrícolas

Se llama metal pesado a los metales que presentan una densidad mayor a 4 g/cm³ y peso atómico mayor a 20 (Londoño *et al.*, 2016), no tienen una función biológica muy

reconocida y suelen ser per turbantes en determinada cantidad para los seres vivos al perturbar la función vital de los organismos; entre estos metales se tiene al mercurio, plata, cadmio y plomo. Por lo general suelen ser dañinos, no son biodegradables y algunos suelen acumularse en los cuerpos vivos. Por ello su biodisponibilidad (Facultad para traspasar de una manera libre la cápsula celular de un organismo a partir del medio) esto se relaciona directamente con su característica tóxica. (Fichet *et al.*, 1999).

Los metales pesados que se encuentran en el suelo pueden encontrarse de diferentes maneras: iones de recambio adsorbidos en el período sólido e inorgánico del suelo, complejos solubles o insolubles o unidos en las estructuras cristalinas de las arcillas, iones libres o componentes solubles, partículas precipitadas o insolubles (Meers y Tack, 2004). Los metales pesados se encuentran de manera disponible para los vegetales en el suelo, consiguen mudarse o desplazarse hacia las capas inferiores del suelo hasta las aguas subterráneas (Micó, 2005), por ello también consiguen estar disponibles y las raíces de los vegetales los logran absorber. Por ello las calidades del suelo de actividad agraria deberían estar monitoreadas para crear la línea base ya que esto serviría en el futuro para poder comparar datos y los cambios en la calidad del suelo producidas por la actividad humana podrían detectarse (Fincheira *et al*, 2018).

El peligro de los metales pesados se incrementa por no ser química ni biológicamente degradable. Pueden estar en el ambiente durante muchos años. También, se incrementa su presencia en los seres vivos cuando sirven de alimento para otros, debido a esto alimentarse con algún animal o planta que tengan contaminación, podría ocasionar sintomatologías de daño en nuestro organismo (CONSUMER, 2001).

Se observó que se reducía la presencia de óxidos de Fe y Mn a medida que se iba profundizando, en la capa de la superficie (0 a 2 cm) hubo mayor concentración de estos metales que en las capas más profundas. Es un buen indicador de movilidad, la presencia de metales traza en el suelo, también ayuda cuando se va medir el nivel de contaminante presente en este (Cala *et al.*, 1985; Kabata, 1995).

2.3. Origen de la contaminación del suelo por metales pesados

2.3.1. Origen natural:

Los metales pesados se pueden encontrar en la naturaleza, en cantidades, que, no suelen ser perjudiciales para la gran variedad de especies vivas. No se podrían degradar o destruir, pero sí podrían disolverse gracias a compuestos químicos y físicos y luego se lixiviarían. Unos formarían complejos de fácil solubilidad y serían trasladados y esparcidos al

ecosistema hasta ser incorporados en la cadena trófica (suelo, agua, plantas, semillas y forrajes), especialmente los que provienen de sitios con contaminación (Dwivedi *et al.*, 2011; García *et al.*, 2012).

Los metales pesados al ser meteorizados, se acumulan en el suelo y esta acumulación natural podría ser muy tóxica, debido a que podría producirse el cumulo de algunos de estos metales en los vegetales y esto generaría consecuencias nocivas en las especies que comen estos vegetales. Los metales pesados más presentes (1-1500 mg/kg) son el manganeso, cromo, zinc, níquel, y plomo (Sánchez, 2003).

2.3.2. Origen antropogénico

La contaminación de suelos por metales pesados es considerada un problema que abarca a todo el planeta, generado esencialmente por actividades humanas () como la urbanización, industria, actividad agraria, tecnológica y minera (Dos Santos *et al.*, 2015; Londoño *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2019).

2.4. Biodisponibilidad del metal pesado

Su biodisponibilidad de los metales es el elemento más importante, establecería el nivel toxico de los contaminantes, es un componente muy significativo que establecería la eficacia en la fitorremediación. (Meers y Tack, 2004).

El metal disponible o biodisponible está compuesto por la parte que puede ser tomada por la planta de la solución suelo, y su abundancia está fuertemente relacionada a factores biológicos, químicos y físicos (Chin, 2007).

- a. **Factor físico:** El factor físico como la textura de suelo influiría ampliamente en la biodisponibilidad del metal, debido a la disponibilidad de estos de unir y conservarlos en su interior al metal.
- b. **Factor biológico:** El agrupamiento de microorganismos ligados al rizoma afecta considerablemente a la biodisponibilidad del metal. De acuerdo a algunas investigaciones se ha podido concluir que el aglomeramiento de metales pesados en la planta se acrecienta numerosamente esto se da al asociarse a alguna bacteria fotosintética o micorriza (Tseng, 2008).
- c. **Factor químico:** Aquí se puede mencionar al pH del sustrato y el agente quelante en el sustrato (Chin, 2007). Se considera al pH como el integrante más

significativo que se relaciona con la capacidad de los metales para disolverse y su persistencia. De manera concreta, la disolución de los metales y su capacidad de estar disponible aumenta cuando el pH del sustrato se reduce (Meers, 2005). Con respecto a la presencia de agentes quelantes en el sustrato, se les puede encontrar de manera natural en el sustrato (en forma de ácido orgánico de pequeño peso molecular y de sustancia húmica) o podrían ser complementos (como el EDTA) que incrementarían la especiación del metal y su disponibilidad en el suelo (Shahid *et al.*, 2012).

Con respecto a la enmienda orgánica, varias estarían relacionadas a una reducción del metal para estar disponible por ello favorecería su capacidad de reaccionar con otras porciones macizas del sustrato al inmovilizarse y convertirse en un metal menos disponible para la planta (Sik *et al.*, 2011). Por otra parte, los ácidos orgánicos simple tal como los ácidos cítricos ayudan a la capacidad de desplazarse de los metales pesados excluyendo al plomo (Schwab *et al.*, 2008).

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

2.5.1. El pH

El pH es una de las medidas más importantes para detallar el movimiento del catión (Wong, 2003). Fundamentalmente las porciones que presentan mayor movilidad de iones ocurren cuando el pH es bajo. No obstante, la mayor parte de los metales están de una forma más disponible al haber pH ácido.

Cuando el pH es más alcalino pasarían en algunas ocasiones de nuevo a la solución como hidroxicomplejos (Rodríguez *et al.*, 2009). Pero es frecuente que, al incrementarse el pH del sustrato, la forma soluble de la mayoría de metales pesados disminuya y la reunión de elementos traza se reduzca en sustratos que tengan un pH neutro y básico en comparación con los que son un poco ácido (Kabata y Pendias, 2000).

2.5.2. Materia orgánica

La materia orgánica es muy relevante en todos los procesos de adsorción del sustrato. Al actuar como ligando en el proceso de intercambio, al ceder electrones de alguna molécula a algún catión metálico, que aceptarían estos electrones y forman al quelato que logra movilizarse con más soltura a través de los perfiles (Pilon, 2005). De acuerdo a ello la capacidad de la materia orgánica de favorecer la formación de complejos en el sustrato es un proceso que

afectarían las solubilidades y las bioasimilidades de los metales pesados. Se elevaría lo tóxico de los metales pesados, gracias a la capacidad que tiene de crear complejos organometálicos, esto facilitaría su solubilidad, disponibilidad y dispersión (Adriano, 1986).

Los organismos del sustrato son muy relevantes en la estabilidad o degradación del complejo organometálico. Los que constituyen las materias orgánicas suministrarían lugares que favorecerían la adsorción de metales (que presentan grupo funcional con conducta ácida, como los carboxílicos, fenólicos, alcohólicos, enólicos -OH y grupos aminos), lograrían ser una de las principales fuentes de capacidad de intercambio catiónico en los niveles superiores del sustrato (McLean y Bledsoe, 1992). Son significativas estas contribuciones a la capacidad de intercambio catiónico, en suelos agrícolas, que suelen presentar bajas concentraciones de materia orgánica, aunque suelen variar en relación a la tipología de los sustratos (Kabata, 2004). Asimismo, las materias orgánicas pueden detener y concentrar al metal gracias a su capacidad de intercambio catiónico y también gracias a su capacidad de quelante (Adriano, 2001).

2.5.3. Calcio

La alta capacidad de concentrar calcio en el sustrato reduciría la capacidad de absorber al metal pesado (cadmio y cobre) por las diferentes partes de la planta, esto se da porque entre estos hay competitividad iónica; del mismo modo, la elevada acumulación de estos metales pesados logra disminuir su capacidad de absorber calcio y logra reducir la acumulación de este componente en la raíz, hoja y fruto de la planta (Ósteras y Greger, 2006).

Generalmente en gran parte de sustratos donde se puede encontrar calcio, este se puede encontrar únicamente a modo de calcio libre, también podría hallarse a modo de fosfato de calcio y carbonato; en este escenario el cadmio se podría controlar por medio de la alcalinización del sustrato y precipitaría al metal pesado. También, el resultado competidor del calcio y las secuelas en la fisiología y química debido a una elevación del pH del suelo reduciría la capacidad de absorber cadmio por las raíces de las plantas (Contreras *et al.*, 2002).

2.5.4. Composición granulométrica o clase textural de los suelos

Juegan un papel importante las estructuras del sustrato (la textura) en los procesos como las adsorciones, infiltraciones y/o pérdidas de los metales pesados en el sustrato. Los que son de textura arcillosa consiguen detener el deslizamiento de los metales pesados en los terrenos de cambio, paralizando su marcha a los horizontes freáticos (Rodríguez *et al.*, 2009).

Las diferentes variedades de minerales tienen un expreso valor de descompensación eléctrica y superficies específicas. Estas particularidades serían las culpables de su capacidad de adsorber de estos minerales y la disminución de su reducción por lixiviación. Esto es de transcendental relevancia porque debido al proceso de adsorción, el catión está en forma disponible para la planta (Pilon, 2005).

2.5.5. Carbonatos

Gracias a la presencia de carbonatos se puede garantizar el sostenimiento de valores elevados de pH, estos tenderían a favorecer la precipitación de los metales pesados. El cadmio y otros metales pesados, mostrarían gran disposición a quedarse adsorbidos por los carbonatos (Rodríguez *et al.*, 2009).

2.5.6. Óxidos de hierro y manganeso

Estos también son componentes significativos ya que regulan la dinámica de los metales pesados en el suelo. De hecho, cumplen una función significativa en la adsorción del cromo, principalmente en los sustratos ácidos. Asimismo, el óxido de hierro y el manganeso pueden ser muy significativos en la adsorción del cobre, plomo o manganeso (Adriano, 2001).

2.6. Absorción y translocación de metales pesados en las plantas

Las plantas tienen componentes mejorados que actúan de manera específica para traslocar, absorber y almacenar nutrientes, pero asimismo existen metales no fundamentales para la vegetación que son absorbidos, traslocados y acumulados en la vegetación ya que muestran una conducta electroquímica parecido a los elementos nutritivos requeridos (Volke y Velasco, 2002).

2.6.1. Absorción

Este proceso, en el que las plantas absorben los metales pesados, es por lo particular el primer paso para su entrada en la cadena alimentaria, esto depende de (Noriega, 2016):

- El desplazamiento del metal del sustrato a los rizomas.
- El desplazamiento de los metales por la membrana de la célula cortical del rizoma.
- La transportación de los metales desde la célula cortical al xilema, desde el cual se transportaría del rizoma a los tallos.

- El desplazamiento de los metales desde la hoja hasta el tejido de acumulación usado para alimentarse (semillas, tubérculos y frutos) por el floema.

2.6.2. Translocación

La translocación es el camino por donde el metal pesado se puede desplazar de las raíces hasta los diversos órganos del vegetal, esto depende también del movimiento en el lugar (Prieto *et al.*, 2009).

2.6.3. Acumulación

La acumulación es el incremento de la presencia de una sustancia química en un cuerpo vivo en un determinado tiempo, en comparación a la reunión de este producto químico en el ambiente. Los metales pesados representan un peligro porque se suelen acumular en muchos tipos de vegetación (Mendieta y Taisigue, 2014).

2.7. Cadmio

Al cadmio raramente se le encuentra en la naturaleza, está asociado al zinc. Es blanco azulejo, peso atómico 112 y densidad relativa de 8. Presenta ocho isótopos estables y tiene once radioisótopos vacilantes de tipología artificial (Peris, 2006). De manera natural no se le puede encontrar en estado libre y las greenockitas (sulfuro de cadmio) serían el único mineral de cadmio. Cerca de la gran parte de cadmio que es producido se adquiere como subproducto del proceso de fundición y refinamiento de los minerales de zinc. USA, Bélgica, Australia, Canadá, México, Luxemburgo y República de Corea son fabricantes significativos (Magnusson y Örnemark, 2014).

Respecto al plomo, el número atómico es 82, peso atómico 207, color azulado, formaría sales, óxidos y compuestos organometálicos (Hardman *et al.*, 2011). Se utiliza como agregado antidetonante en la gasolina, batería, en el monitor de computadoras y en la pantalla de los televisores, en el tinte para el cabello, joyería, lata de conservas, grifería, pigmentos, aceites, cosmetología, en el proceso de aleación, cerámica, municion, soldadura, plomada, armamentos, radiaciones atómicas, insecticida, etc. (Lanphear *et al.*, 2000)

2.7.1. Cadmio en el suelo

García y Dorronsoro (2005), sostienen que los metales agregados al sustrato podrían dar seguimiento a cuatro desiguales rutas:

- Permanecer de manera fijada o disuelta por procesos de adsorción, complejación y precipitación, de esta manera permanece retenido en el sustrato.
- Los vegetales los pueden absorber y Pueden con esto incorporar a la cadena trófica.
- Llegar a la atmósfera por el proceso de volatilización.
- Llegar y desplazarse por el agua superficial y subterránea.

Cuando llega al sustrato, los metales pesados llegan a quedarse retenidos en el medio, pero también consiguen movilizarse en el sustrato por medio de diversos procesos como el proceso biológico y el proceso químico (Pagnanelli *et al.*, 2004). El metal pesado agregado al sustrato se distribuye y reparte de manera lenta entre los que componen la fase sólida del sustrato. Su distribución se identifica por ser rápida en su capacidad para retener al inicio y después tener una reacción lenta, esto depende también de la clase de metal, de la propiedad del sustrato, hasta que horizonte ha llegado y el tiempo (Han *et al.*, 2003).

Influirían en la movilidad del metal pesado en el sustrato estos son peculiaridades del sustrato como es: el pH, potencial redox, composición iónica del medio (sustrato), capacidad de intercambio (catiónico y/o aniónico), el carbonato, las materias orgánicas, textura, etc. Influye el cómo se dio la contaminación y la procedencia de los metales, en la acidificación, en el cambio en la condición redox, en la variedad de la temperatura y humedad en los sustratos. (Sauquillo *et al.*, 2003).

Según Cárdenas (2012), el cadmio resulta inaccesible o se disipa del sustrato gracias a la lixiviación, se produce una reacción entre los minerales o elementos del sustrato al extraer los cultivos, principalmente cuando el sustrato es del tipo calcáreo, la capacidad de absorber cadmio del sustrato depende de diferentes factores de este, como es la absorción de cadmio, por parte del cultivo, se puede mencionar:

- La acidez del sustrato: La capacidad de absorber del Sustrato tiene una fuerte relación con su acidez.
- La cantidad de cadmio en el sustrato: al incrementar la presencia de cadmio aumentaría su capacidad de ser absorbido por el vegetal.
- La temperatura del sustrato: al elevarse la temperatura aumenta su capacidad de absorber porque aumenta la rapidez de darse las reacciones y hay mayor solubilidad.

- Unión de minerales del sustrato: al haber mayor capacidad de unirse hay menos absorción de cadmio.
- Cantidad de humus en el suelo: al incrementarse la presencia de humus se incrementa la Capacidad de Intercambio Catiónico, por lo que se generaría una reducción de la presencia de cadmio en el medio, esto permitiría una menor absorción.

2.7.2. Ingreso del cadmio en la cadena trófica

Según Rubio (2002), el uso del cadmio en la industria sería el origen de encontrarlo en el alimento, especialmente en los vegetales, y estos luego llegan a los animales, que comen estos vegetales para alimentarse. El fertilizante y plaguicida, el agua residual usada para regar, la expulsión atmosférica, hacen del cadmio un componente frecuente en los sustratos de cultivo, de donde se absorbe de manera fácil por el vegetal. En el alimento industrializado son mencionados como probables fuentes de contaminación por las etapas de elaboración y el material que se usa para envasarlo.

Por el derramado húmedo o seco de cadmio atmosférico en la vegetación el cadmio podría hacer su ingreso en la cadena alimentaria gracias a la absorción foliar o a la absorción del rizoma. La tasa de transmisión de cadmio dependería de muchos componentes, como es el tipo de suelo y en el vegetal la cantidad de acumulación, el pH del sustrato, el estado disponible de la materia orgánica, la cantidad de humus, el uso de algún fertilizante, el clima, y si está presente el zinc (PNUMA, 2010). Se hizo una investigación con personas de diferentes edades de la ciudad y se concluyó que, las personas llegan a contaminarse de manera alimentaria por cadmio gracias a: chocolate (4,3 %), estos han sido los que más ayudaron a contaminarse de cadmio en todos los grupos de edad (EFSA, 2011). Concretamente para el cacao y sus derivados, la Comisión Europea sostuvo que los chocolates y el cacao en polvo que son vendidos al comprador final podría presentar un elevado nivel de cadmio, también sostienen que serían un origen relevante para tener expuestos a los humanos y, continuamente, los consumidores son los niños; por esto, se establecieron los niveles máximos de cadmio, para las diferentes tipologías de chocolates y de cacao que se vende al comprador final. Aquí se encuentran la cocoa y los derivados del chocolate como: el chocolate de leche con sólidos de cacao menores a 30 % con $0,1 \text{ mg.kg}^{-1}$, chocolate con sólidos de cacao menores al 50 % y chocolates con leche con sólidos de cacao superior o igual al 30 % con $0,3 \text{ mg/kg}^{-1}$; el chocolate con sólido de cacao superior o igual al 50 % con $0,8 \text{ mg/kg}^{-1}$, en la cocoa en polvo con $0,6$

mg/kg⁻¹. La Unión Europea notifica que esta adición al Reglamento 1881 de 2006 empieza a ser cumplida de manera obligada a partir de enero de 2019 y es ratificado en el estatuto 2021/1323 del 10 de agosto del 2021 (Unión Europea, 2021).

Tabla 1. Niveles máximos de cadmio en productos derivados del cacao

Clasificación	%	mg.kg ⁻¹ peso fresco
Chocolate con leche que contiene materia seca total de cacao	< 30%	0,10
Chocolate que contiene materia seca total de cacao	< 50%	0,30
Chocolate con leche que contiene materia seca total de cacao	≥ 30 %	0,30
Chocolate que contiene materia seca de cacao	≥ 50%	0,80
Cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final (chocolate para beber)		0,60

Fuente: Adaptada del Reglamento UE 2021/1323 de la Comisión que modifica el Reglamento CE No. 1881/2006 con respecto al contenido máximo de cadmio en explícitos productos alimentarios.

2.7.3. Ingreso, transporte y acumulación del cadmio en plantas

Según Seregin e Ivanov (1997), el cadmio ingresa al vegetal principalmente en forma de Cd²⁺, porque sus iones quelatos, por lo general, no estarían de forma disponible para ser absorbidos por el rizoma. Las capas de célula epidérmica son el primer tejido para captar iones y dentro de esta, los pelos radicales llegan a ser la zona que presenta mayor actividad para absorber iones del suelo y es la estructura que facilitaría la capacidad de absorber Cd²⁺. De acuerdo a (Song *et al.*, 2017) se han propuesto tres distintas vías de ingreso del Cd²⁺ en el rizoma:

Primera vía: En la epidermis de la raíz más específicamente en la membrana plasmática de la célula que se encuentran aquí, el CO₂ (ac) se disgrega en H⁺ y HCO₃⁻, debido a la respiración del vegetal. El H⁺ es intercambiado con el Cd²⁺ del sustrato y el metal es absorbido por la parte superficial de las células de la epidermis del rizoma. Este camino de adsorción es muy veloz y no necesita de energía, esta etapa antecede a la siguiente etapa que es la de absorber Cd²⁺ en la piel por medio de las vías del apoplasto.

Segunda vía: el cadmio es un elemento no fundamental y, por ello, se asumiría que la planta no dispondría del mecanismo de ingreso definido para él. Ingresaría a la célula vegetal por medio de los transportadores de metales principales Fe²⁺, Zn²⁺ y Ca²⁺, como vendría

a ser las proteínas IRT1 y LCT1. Posteriormente de mezclado con la proteína transportadora, el cadmio ingresa en la superficie de la epidermis del rizoma, por medio de la vía del simplasto.

Tercera vía: se incrementa el estar disponibles los iones en el sustrato del rizoma, la raíz de la planta secreta unos compuestos de escasa masa molecular, como los ácidos mugineicos (MA), que forman complejos con el Cd^{2+} . Por ello, el Cd^{2+} hace su ingreso a la capa de la piel del rizoma por medio de las proteínas de tipo YSL en forma de quelatos.

Según Mendoza *et al.* (2011) mediante tres métodos se registra el desplazamiento de cadmio desde la raíz hacia el tallo: la retención de metales adentro de las células en el rizoma; es transportado hasta la estela y la liberación del metal a la xilema. La detención es fruto de los muros apoplásticos y la quelación en vacuolas, se indicó que la fitoquelatina y otros tioles son los quelantes principales en el proceso de retener cadmio en el rizoma. Un nuevo mecanismo que ha sido propuesto para la explicación de la retención de Cadmio en raíces es la saturación de la suberina en la pared celular esto se da en la maduración de exodermis y endodermis, afectando de esta manera su flexibilidad y limitando su desplazamiento a la estela (Lux *et al.*, a<2010). El traspaso y la removilización del cadmio desde la xilema al floema es otro de los pasos importantes en la transportación de este ion. Otros escritores observaron la elevada concentración de fitoquelatinas, glutatión y cadmio en la savia del floema de *Brassic napus* y propusieron que el floema además es un canal que se usa para la transportación de los complejos Cd-fitoquelatina y Cd-glutatión (Mendoza *et al.*, 2008).

Particularmente en el cacao, la absorción de cadmio parte radicular está en competencia inmediata con otros nutrimentos como el calcio, potasio, magnesio, hierro, cobre, manganeso, zinc esto se debería a que alcanzan ser absorbidos por los propios transportadores de proteínas (Benavides *et al.*, 2005). De mayor concentración a menor concentración la acumulación de cadmio en el tejido de cacao esto se da en el sucesivo orden: raíz, tallo, hojas, cáscara y grano de cacao, esto vendría a decir que el grano de cacao contendría una pequeña cantidad de cadmio en comparación a los otros tejidos de los vegetales. El grano de cacao que es originario de América del Sur tiene substancialmente mayor nivel de Cd^{2+} . La alta presencia de Cd^{2+} en estos países es probable que se deba a la cantidad de Cd^{2+} en el suelo, por la utilización del fertilizante y otras actividades industriales, como pueden ser por: las extracciones mineras o por las contaminaciones ambientales (CODEX, 2014). Según los estudios de Huamaní *et al.* (2012) la clase de sustrato influiría de una manera importante en su capacidad de absorber Cd^{2+} en la planta del cacao. En la investigación, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre el cadmio disponible en el sustrato con ciertas variables foliares,

en donde se encontró una correlación significativa y positiva ($P < 0,05$) entre el cadmio total en el tejido foliar y el sustrato. De forma inversa, la correlación entre el Cd^{2+} en el sustrato y la presencia de calcio y magnesio fue significativa pero negativa. De acuerdo a NATURLAND (2000), el cacao absorbería levemente al metal pesado que se encuentra naturalmente en el suelo y los vendría a concentrar en sus semillitas.

2.8. Efectos del cadmio

2.8.1. En la salud humana

Los estándares de calidad varían de acuerdo a cada país, pero todos coinciden con respecto de la cantidad de elementos tóxicos como (plomo, níquel, cobre, cadmio y manganeso, etc.) en la almendra. Este metal se almacenaría en los órganos de los cuerpos de las personas, generando así el surgimiento de la enfermedad, y en numerosas ocasiones, el fallecimiento de las personas. Cada uno de los metales y cada uno de los elementos químicos contaminantes presentan un procedimiento para actuar y un lugar preferido para acumularse. El más popular es el plomo que afectaría muchos sistemas, vendría a ocasionar un daño en las neuronas del sistema nervioso principalmente las del cerebro, también a la médula ósea y a los riñones, concretamente en el sistema tubular de las nefronas. Los daños son amplios dependen del tipo de metal, pero usualmente se presenta lesión en la célula. El estar intoxicado por plomo puede parecerse a otras enfermedades, como la esclerosis, puede aparentar y afectar al sistema nervioso con los mismos síntomas, como parestesias, paresias, fatiga, etc., y podría originar de manera general una disfunción, últimamente se está relacionado con la aparición de conductas antisociales, y también se le viene relacionando con retardo mental y con las pérdidas de habilidad cognitiva. Los metales pesados con el tiempo van a producir daños en los riñones, que podrían ocasionar una insuficiencia renal (Romero, 2009). Al ser ingerido, inhalado o al absorberse por la epidermis, resultaría ser muy tóxico para los seres vivos (vegetal y animal), particularmente para los humanos. Para Herrera (2000), el intoxicamiento con Cd^{2+} se ha relacionado a diversos problemas de salud humana en estos se pueden encontrar: la deficiencia renal, enfisema pulmonar, osteoporosis, hipertensión arterial y ciertas clases de cáncer como el prostático. El Cd^{2+} entra al organismo especialmente por la vía oral y en pequeña proporción por inhalación. Su entrada por vía oral sucede en la gran parte de los casos por el consumo de alimentos, pueden ser vegetales o animales, que vienen de lugares contaminados.

La gran parte de la presencia total de Cd^{2+} que se acumula en el organismo se encuentra localizada en el hígado y el riñón, se excreta lo que no se absorbe por medio del orín.

La capacidad toxica del cadmio en los organismos se da cuando los iones de cadmio corren a los iones del Zn, al centro reactivo de enzimas fundamentales. Dada esta intoxicación se manifiesta de forma aguda en daños alveolares, gástricos y en anomalías en reproducción. Una consecuencia de estar expuesto crónicamente puede ser el enfisema pulmonar, anemia. Variación del sistema nervioso central y variaciones del metabolismo mineral (osteoporosis). Es cancerígeno para el ser humano (Adriano, 2001).

2.8.2. En las plantas

Las consecuencias toxicas del Cd^{2+} en los vegetales son muy investigados; la más importante sintomatología visible que genera la toxicidad por Cd^{2+} es la decoloración y el enrollamiento en las hojas. La decoloración aparecería debido al cambio del cadmio por el Fe o el Mg (Mysliwa *et al.*, 2004), generándose en este último caso la estabilización y biosíntesis de la clorofila. Otros perjuicios relacionados además con la clorosis es la falta de fosforo y la disminución en el envío de Mn. (Godbold y Hüttermann, 1985). En los diferentes estudios de toxicidad con cadmio, los daños más marcados que se pueden observar son: el estrés oxidativo, la disminución en el desarrollo y en las actividades fotosintéticas, el desbalance en la nutrición, y la afectación en la actividad enzimática. De manera generalizada, el estar presente el cadmio genera un efecto diferente en la actividad enzimática. La enzima más vulnerable a la oxidación generada por el cadmio, es la que presenta grupos sulfidrilos. El Cadmio elimina los puentes disulfuro, generándose la desnaturaliza miento de la proteína y su invariable actividad enzimática (Lösch, 2004). Además, el cadmio inhibe la actividad de la metaloenzima, esto se debe al cambio del mismo por metales con parecida carga o tamaño como es el Zn y el Mg, este último se encuentra en las enzimas RuBisCo y su cambio con el cadmio genera la separación de la enzima en pequeñas unidades (Mysliwa *et al.*, 2004).

2.9. Biorremediación

Mediante la biorremediación se puede sacar el contaminante orgánico e inorgánico de los suelos y del agua, este es un “método que usa a los organismos naturales para convertir a la sustancia toxica en sustancia menos tóxicas o sin toxicidad”, lo que contiene la bioacumulación, la biosorción y la fitorremediación (Vijayaraghavan y Balasubramanian, 2015). Se podría usar organismos originarios del lugar que presenta contaminación o de otros lugares (exógenos), podría ser realizado in situ o ex situ, en condición aerobia (cuando hay oxígeno) o anaerobia (cuando no hay oxígeno). Sin embargo, no todos los compuestos orgánicos son aptos para ser biodegradados, este proceso de biorremediación se ha utilizado

con mucha eficiencia para hacer el tratamiento de los suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburo de petróleo, solventes, explosivos, clorofenoles, pesticida, conservadores de madera e hidrocarburos aromáticos policíclicos, en métodos aeróbicos y anaeróbicos (Martínez *et al.*, 2011). La biorremediación, también es conocida como biotecnología ambiental (Guerrini, 2008).

2.9.1. Fitorremediación

La fitorremediación (phyto significaría planta y remedio que significaría limpiar), es el uso natural y de forma directa de la vegetación para conseguir la absorción de las sustancias tóxicas por medio de los rizomas y de la translocación a las hojas y los tallos del vegetal (Sharma *et al.*, 2015), provocando la eliminación del contaminante orgánico y/ o inorgánico (metal, pesticida, contaminantes orgánicos persistentes, entre otros) (Bhatia y Goyal, 2014).

Las variedades de vegetación que van a ser usadas en la fitorremediación deberían presentar de manera preferente las siguientes características: ser especies nativas con un desarrollo que no demore mucho, que tengan unas raíces muy extensas, que presente mucha biomasa, que tenga adaptabilidad a varios hábitats, mucha tolerancia y capacidad de acumular al contaminante en la parte aérea del vegetal. Se considera que ciertos componentes ambientales como la temperatura, el pH, la radiación solar y la salinidad del agua influyen en el desarrollo y en la utilidad de los vegetales en la fitorremediación (Valipour y Ahn, 2016). Entre los métodos de fitorremediación distinguidos se tiene a la fitoextracción, fitodegradación, fito- estabilización, rizofiltración, fitosalinización y fitovolatilización (Rahman y Hasegawa, 2011).

2.9.2. Factor de bioconcentración y translocación de metales.

Para optar por algún género de vegetal útil en la remediación, las características que deben presentar una alta cantidad del elemento con un potencial tóxico (EPT) en la parte aérea y en la parte de la raíz, y presentar una alta capacidad para bioacumular. Se suele recomendar que los vegetales sean exclusoras de EPT (o almacenen muy bajas cantidades) en su parte aérea. Así se buscaría que la mayor concentración de los EPT se encuentre inmovilizados en la rizósfera (parte de influencia de la raíz) o en la raíz misma. Pero, en la fitoextracción, se recomienda que los vegetales almacenen altas concentraciones de EPT en la parte aérea (plantas acumuladoras). Preferentemente, para que el procedimiento sea eficiente y económicamente beneficioso, los vegetales deberían ser hiperacumuladoras (Arthur *et al.*,

2005). González *et al.* (2017) sostiene que, para lograr clasificarlos a los vegetales en estos casos lo que se suele hacer es hallar la cantidad de EPT en los rizomas y las partes aéreas, también en el sustrato o residuo. Gracias a estas averiguaciones se puede obtener los factores de bioacumulación, son las más comunes el factor de bioconcentración (FBC) y el de translocación (FT). La siguiente tabla, basada en peso en seco, clasifica a las plantas de acuerdo a su capacidad de acumulación de EPT's.

Tabla 2. Criterios de clasificación de plantas de acuerdo con su concentración de EPT en biomasa aérea

Clasificación	Zn	Cd	Pb	Ni	Co	Cu
	mg.kg ⁻¹					
Normal en sitios no contaminados	1-400	0,1-2,4	0,2-20	0,02-5	0,02-1	5-20
Fitotóxico	150-200	5-10	10-20	20-30	60-170	15-20
Hiperacumulación	10000	100	1000	1000	1000	1000
Nueva propuesta de hiperacumulación	3000	100	1000	1000	300	300

Fuente: Tomada de GONZÁLEZ *et al.* (2017)

2.9.2.1. Factor de bioconcentración (BCF)

El BCF o FBC es la relación de la concentración del EPT en el vegetal con respecto a la concentración total del EPT en el suelo. (Rossi *et al.*, 2002; Pérez *et al.*, 2008). Este índice es muy utilizado para contrastar la eficiencia de acumulación de los metales en la biomasa de diferentes vegetales. (Kabata y Pendias, 2000). En el cual valores > 1 sostendrían que estos vegetales tienen un potencial hiperacumulador y se les consideraría hiperacumuladoras y aquellos vegetales que son consideradas exclusoras presentan un BCF < 1, cuanto menor es cuanto mayor es su capacidad de ser exclusivas (Avelino, 2013).

2.9.2.2. Factor translocación (TF)

El TF es la relación de la concentración de EPT en la parte aérea respecto a la concentración en la raíz (González *et al.*, 2017); y es empleado para medir la efectividad del vegetal en la translocación del metal pesado desde la raíz hacia la parte aérea (Avelino, 2013). Si el valor de TF es menor de 1, la mayoría del contaminante se acumulará en la raíz y no se traslocara (movera) hacia la parte aérea, en este caso la planta es exclusora (Deng *et al.*, 2004). Si por el contrario el TF es mayor de 1, el contaminante se acumula de manera principal en la parte aérea y no en la parte radicular; por esto, se trataría de una planta acumuladora (Yoon *et al.*, 2006).

Tabla 3. Criterios de clasificación de plantas por su comportamiento en la acumulación de EPT basados en el factor de translocación (FT) y el factor de bioconcentración (BCF)

Clasificación		FBC	
		>1	<1
FT	>1	Acumuladora (>1 hiperacumuladora)	-
	<1	-	Exclusora

Fuente: Tomada de GONZÁLEZ *et al.* (2017)

2.9.3. Fitoextracción

La fitoextracción o fitoacumulación radica en la absorción de metales contaminantes a través de las raíces de la planta y su acumulación en tallos y hojas. El primer procedimiento para aplicar esta técnica, es el selecciona miento de las especies vegetales más favorecedores para los metales presentes y las características de la instalación. Una vez concluido el desarrollo vegetativo del vegetal vendría el paso de cortarlas y llevarlas a incinerar y enviar a las cenizas a un vertedero de seguridad. La fitoacumulación se puede repetir de manera ilimitada hasta que la concentración remanente de metales en el suelo esté dentro de los límites estimados como aceptables (Kumar *et al.*, 1995).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

3.1.1. Ubicación

El presente trabajo de investigación se realizó en el vivero de producción del Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP), situado en el distrito de Castillo grande, Provincia de Leoncio Prado, región Huánuco, cuyas coordenadas geográficas son:

Latitud Sur	:	09° 45' 09''
Longitud Oeste	:	75° 57' 00''
Altitud	:	660 m.s.n.m.
Precipitación anual	:	3500 mm

3.1.2. Zona de vida

Considerando la clasificación propuesta por Holdridge (1982), la zona de estudio pertenece a la formación vegetal bosque muy húmedo Pre -montano Tropical (transicional a bosque húmedo Tropical) bmh – PT, de acuerdo a las regiones naturales del Perú se encuentra Rupa o Selva Alta.

3.1.3. Características climáticas

De acuerdo a la Estación Meteorológica José Abelardo Quiñonez (2018) de Tingo María, durante el periodo de estudio se presentó una precipitación mensual promedio de 280.1 mm; teniéndose la mayor cantidad de precipitaciones en el mes de noviembre con una valoración mensual de 494.1 mm; y el periodo más seco fue en julio con 62.4 mm. La humedad relativa promedio fue de 84.08%. Se registró una temperatura media de 25.4 °C, la valoración máxima fue de 32.3 °C en el mes de setiembre y la mínima temperatura obtuvo apenas 19 °C en el mes de agosto.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

- Bolsas impermeables de 2 kg, mantada de plástico, etiqueta para rotular, cinta métrica de 1 m, 5 m y 50 m, plumón indeleble, pala, lampa, machete, prensa botánica, tijeras, cinta adhesiva, estacas, fichas de evaluación, entre otros.

- Placas petri, mortero de porcelana, vasos precipitados 50 ml, matraz Erlenmeyer de 250 ml, tamizador de 10 mm, probetas, entre otros materiales y equipos de laboratorio

3.2.2. Metodología

3.2.2.1. Tipo y nivel de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que se recurrió a las ciencias biológicas para describir las especies vegetales en prueba, así como a las ciencias ambientales para relacionarlo con la fitoextracción. Se tiene como referido teórico a Jacobo *et al.* (2013), quién indicaría que las investigaciones aplicadas se caracterizan porque buscan el aplicar o utilizar los conocimientos que se logran adquirir y está muy vinculado a la investigación básica.

El nivel de investigación es experimental, debido a que se puso a prueba las especies vegetales con potencial uso para reducir la contaminación de los suelos con cadmio. Considerando la mención de Hernández (2004), quién indica que los estudios experimentales se refieren a “estudios en los cuales se manipula de manera intencional una o más variables independientes (supuestas causas – antecedentes), para examinar la consecuencia que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos - efectos), adentro de un contexto de vigilancia para el investigador”.

Por ser una investigación experimental presenta variables de tipo independiente, dependiente e interviniente:

a. Variable independiente

- Las concentraciones de cadmio (Cd) en la planta fitoextractora

b. Variable dependiente

- Las concentraciones de cadmio (Cd) disponible en el suelo

c. Variable interviniente

- Condiciones edafoclimáticas

3.2.2.2. Tratamientos en estudio

Los tratamientos en estudio resultaron del desarrollo de diversas especies, en aislamiento y en asociación con el cacao, en suelos contaminados con cadmio; la Tabla 4 muestra a detalle la descripción de cada uno de estos.

Tabla 4. Descripción de los tratamientos en estudio

Clave	Descripción *	N° de plantas por unidad experimental	Sustrato
T ₁	Pavonia	1	Sustrato contaminado por (Cd)
T ₂	Theobroma	1	Sustrato contaminado por (Cd)
T ₃	Xanthosoma	1	Sustrato contaminado por (Cd)
T ₄	Theobroma + Xanthosoma	2	Sustrato contaminado por (Cd)
T ₅	Theobroma + Pavonia	2	Sustrato contaminado por (Cd)
T ₆	Theobroma + Xanthosoma + Pavonia	3	Sustrato contaminado por (Cd)

*Los términos usados en el cuadro de los tratamientos corresponden al género taxonómico de las especies en prueba

3.2.2.3. Diseño estadístico

Se uso el diseño completamente al azar (DCA) para evaluar a los 06 tratamientos definidos por las especies en prueba para la fitoextracción de cadmio (Cd), distribuidos en 03 repeticiones. Para esto, el modelo aditivo lineal usado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \epsilon_{ij}$$

Dónde:

Y_{ij} = Valor de respuesta en la unidad experimental a la cual se aplicó el i-ésimo tratamiento de la j-ésima repetición.

μ = Efecto de la media general.

α_i = Efecto del i-ésimo tratamiento.

ϵ_{ij} = Efecto aleatorio del error experimental del i-ésimo tratamiento.

Para:

i = 1, 2, ..., 6 tratamientos.

j = 1, 2, 3 repeticiones

3.2.2.4. Análisis estadístico

A partir de este diseño, se efectuó el análisis de variancia (F. tab. = 0.01 y 0.05) para los niveles de cadmio (ppm) en la estructura vegetal de las especies en prueba, así como para los niveles de cadmio (ppm) en los suelos utilizados para el crecimiento de estas especies; esto considerando los tratamientos en estudio (Tabla 4). Se estableció la diferencia de las medias usando Duncan ($\alpha= 0.05$); para ello se siguió el modelo de análisis de la Tabla 5.

Tabla 5. Modelo del análisis de variancia para los tratamientos en estudio

Fuente de variación	G.L.	C.M.	F cal.
Tratamientos	t -1	$CM_{\text{trat}} = SC_{\text{Trat}} / k-1$	$CM_{\text{Trat}} / CM_{\text{Error}}$
Error experimental	$t_x(r-1)$	$CM_T = SC_{\text{Error}} / k-1$	
Total	$(t_x r)-1$		

3.2.2.5. Procedimiento

- **Reconocimiento y análisis de la parcela cacaotera contaminada con cadmio.**

Se reconoció el área de estudio, para poseer un punto de vista real del área de estudio. Así, se constató que, desde el año 1970 se viene aprovechando intensamente en diversos cultivos como:

- 1970 - 1984: Siembra de coca
- 1985 - 1993: Coca, yuca y fréjol de palo
- 1993 - 2003: Cacao común, abandonado.
- 2012- 2018: Cacao en mantenimiento

Se realizó un muestreo en toda la parcela, considerando la recolección de 20 submuestras de 1 kg de sustrato aproximadamente, a una profundidad de 0-20 cm, las cuales se mezclaron y homogeneizaron para lograr una única muestra de 1 kg, la cual se trasladó al Laboratorio de Análisis de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, para determinar el pH, la porosidad, los nutrientes, la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, la textura, la humedad y la concentración de cadmio. La siguiente tabla detalla los resultados del análisis realizado, teniéndose que se trata de un suelo moderadamente profundo, de textura franca, con pH ligeramente ácido, presenta un bajo nivel de materia orgánica, así como de nitrógeno, fósforo y de potasio disponible; asimismo, presenta

niveles importantes de metales pesados, esto permite inferir que se trata de un suelo contaminado, de malas condiciones nutricionales para la producción agrícola.

Tabla 6. Características fisicoquímicas iniciales del suelo en estudio

Tipo de parámetro	Parámetro	Suelo contaminado con Cd
Físicas	Arena (%)	31,00
	Arcilla (%)	20,00
	Limo (%)	49,00
	Textura	Franco
Químicas	pH (1:1)	5,85
	Materia orgánica (%)	1,86
	Nitrógeno (%)	0,08
	Fósforo disponible (ppm)	6,74
	Potasio disponible (ppm)	78,72
	CIC	8,04
	Ca (Cmol+)/kg)	6,23
	Mg (Cmol+)/kg)	1,50
	K (Cmol+)/kg)	0,16
	Na (Cmol+)/kg)	0,15
	Bas. Camb. (%)	100
	Ac. Camb. (%)	0,00
	Sat. Al. (%)	0,00
Metales pesados	Cadmio (ppm)	2,74
	Plomo (ppm)	2,32

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

- **Selección de las especies vegetales y análisis de cadmio**

Se escogieron 02 especies vegetales diferentes para conocer su capacidad de absorción de cadmio. Se eligieron las plantas considerando las siguientes características:

- Mucha biomasa
- Que estuvieran muy distribuidas en el área.
- Que no muestren sintomatologías de fitotoxicidad, característica esencial para su utilización en la fitorremediación.

- **Extracción de suelo y homogenización para su cultivo.**

Se extrajo 90 kg. de suelo contaminado de la parcela cacaotera y se llevó a las instalaciones del vivero productivo del Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP) para instalar el vivero, se homogenizó y se procedió a realizar el llenado de los contenedores donde se va cultivar las especies vegetales en prueba. Se uso 5 kg de suelo en cada contenedor. En cada uno de los cuales se sembraron de 2 a 3 semillas por cada especie determinada en los tratamientos de la Tabla 4, para así, garantizar que al menos una de ellas germine.

- **Análisis final de suelo y de las plantas en estudio (parte aérea y radicular)**

Después de 90 días de haber cultivado se cortaron las plantas y se extrajeron las muestras de suelo y planta de cada contenedor para analizar la concentración de cadmio. Se lavo cada especie vegetal de una manera cuidadosa, evitando así algún daño en sus partes. Después se lavó con agua corriente fregando de manera suave y se enjuago dos veces con agua destilada. Después se secaron colgándolas en la cuerda y se llevaron muestras al herbario de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos para ser correctamente identificadas. Se llevó a laboratorio (tallos y hojas) y raíz al igual que el suelo para hacer los análisis de cadmio y plomo, fueron analizadas por espectrofotometría de absorción atómica en el Laboratorio de Análisis de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Finalmente, se determinó su eficacia para el proceso de fitoextracción.

3.2.2.6. Análisis de la información

- **Clasificación de las especies vegetales**

La clasificación se efectuó de acuerdo a los factores de bioconcentración (BCF) y de translocación (TF).

El cálculo del factor de bioconcentración (BCF) se hizo para determinar la relación entre los residuos químicos en las plantas y las concentraciones medidas en el medio donde existen (Mendieta y Taisigue, 2014). Los BCF se calcularon a través de las siguientes fórmulas:

$$BCF_{aérea} = \frac{Ca}{Cs}$$

$$BCF_{raíz} = \frac{Cr}{Cs}$$

Donde:

$BCF_{aérea}$ = Factor de bioconcentración en la parte aérea de la planta

$BCF_{raíz}$ = Factor de bioconcentración en el rizoma de la planta

Ca = Concentración de cadmio en la parte aérea del vegetal (ppm)

Cr = Concentración de cadmio el rizoma de la planta (ppm)

Cs = Concentración de cadmio en el suelo (ppm)

Posteriormente, se realizó la categorización del vegetal de acuerdo a los valores conseguidos del BCF, como se puede ver a continuación (Medina y Montano, 2014; Avelino, 2013):

$BCF < 1$: Planta exclusiva

$1 < BCF < 10$: Planta acumuladora

$BCF > 10$: Planta hiperacumuladora

El factor de translocación se obtuvo realizando el cálculo de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$FT = \frac{Ca}{Cr}$$

Donde:

FT = Factor de translocación

Ca = Concentración de cadmio en la parte aérea de la planta (ppm)

Cr = Concentración de cadmio en el rizoma de la planta (ppm)

después, se realizó la clasificación de la planta en relación a los valores conseguidos del TF, como se puede mostrar a continuación (Deng *et al.*, 2004; Yoon *et al.*, 2006):

TF < 1: Planta exclusora

TF > 1: Planta acumuladora

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Capacidad de fitoextracción de cadmio de las especies en estudio

4.1.1. Efecto de las especies vegetales en la concentración de cadmio en la estructura vegetal

En la Tabla 7 se detalla el análisis de varianza ($\alpha=0,05$) realizado a los niveles promedio de cadmio en la estructura vegetal (parte aérea + parte radicular) de las especies en estudio de acuerdo a los tratamientos. Se demuestra que a los 90 días de siembra existen altas diferencias significativas entre las concentraciones de cadmio en la estructura de los individuos en estudio, lo que sugiere que al menos una de las especies muestra concentraciones de cadmio en su estructura que se diferencian de las otras. Estas diferencias se deben a que los niveles de concentración en los T₄, T₅ y T₆ están conformados por más de un individuo, por lo cual, su nivel de acumulación promedio es mayor que de los tratamientos conformados únicamente por un individuo (T₁, T₂, T₃).

Tabla 7. Análisis de varianza de la concentración de cadmio (ppm) en la estructura vegetal de las especies en estudio a los 90 días de la siembra

F.V.	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	5	113,234	10,626	AS
Error	12	10,656		
Total	17			

NS: No existe significancia

S: Existen diferencias estadísticas significativas al 5 % de probabilidad

AS: Existen diferencias estadísticas significativas al 1 % de probabilidad

A partir de esto, se detalla con la prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) que, a los 90 días después de la siembra, existen altas diferencias significativas, por cuanto existe homogeneidad en 03 subgrupos homogéneos; esto se evidencia en la diferencia de las concentraciones por cada tratamiento (Tabla 8). Se tiene que, para la estructura vegetal (raíz+tallo) de las especies en estudio, de manera aislada, *T. cacao* presentó los mayores valores de concentración (T₂ = 5,10 ppm), seguido de *P. fruticosa* (T₁ = 4,59 ppm) y de *X. Sagittifolium* (T₃ = 3,54 ppm); asimismo, en el cultivo asociado se encontraron los mayores registros del experimento, teniéndose en el T₆ (Theobroma+Xanthosoma+Pavonia) 19,59 ppm, seguido del T₅ (Theobroma+ Pavonia) con 12,42 ppm y de T₄ (Theobroma+Xanthosoma) con 9,68 ppm (Figura 1).

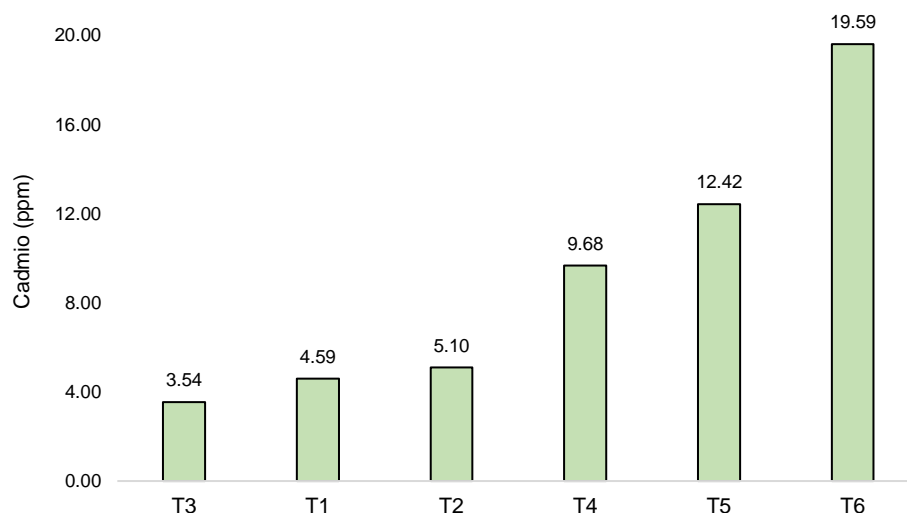


Figura 1. Concentración de cadmio (ppm) en la estructura vegetal de los individuos de cada tratamiento en estudio

Leyenda:

T1: *Pavonia fruticosa*

T2: *Theobroma cacao*

T3: *Xanthosoma sagittifolium*

T4: *Theobroma cacao* + *Xanthosoma sagittifolium*

T5: *Theobroma cacao* + *Pavonia fruticosa*

T6: *Theobroma cacao* + *Xanthosoma sagittifolium* + *Pavonia fruticosa*

A partir de ello puede evidenciarse concentraciones relativamente bajas de cadmio en la estructura vegetal de las especies en comparación de otros suelos con altos índices de contaminación: esta condición puede asociarse a la relativamente baja biodisponibilidad de cadmio en el sustrato inicial, el cual registró un valor promedio de 2,74 ppm, valor que no es recomendable para la producción agrícola de acuerdo al MINAM (2017), quien menciona en sus estándares de calidad ambiental para suelos agrícolas que, no pueden superar el $1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ (1,4 ppm) para la producción agrícola; así, se afirma lo mencionado por Diez (2008) y Avelino (2013), quienes refieren que bajas concentraciones evidencian un bajo potencial acumulador en las plantas evaluadas; asimismo, este comportamiento obedece al incremento de la concentración de cadmio en el sustrato, la cual puede estar causada por actividades naturales y/o antropogénicas, haciendo que se torne más biodisponible para las plantas. Los elevados niveles de cadmio en el suelo son fácilmente transferibles a las plantas y estos a su vez se pueden bioacumular en diferentes partes de la planta (Argüello *et al.*, 2019; Barraza *et al.*, 2017; Chávez *et al.*, 2015). Particularmente, en los tratamientos sin asociaciones, el *T. cacao* mostró valores superiores a las otras dos especies, evidenciando su mayor capacidad de absorción en esta etapa; así, se coincide con Oc *et al.* (2018) y Meter *et al.* (2019), quienes refieren que *T. cacao* L. “cacao” es una de las especies cultivables, con mayor concentración de cadmio en sus

estructuras vegetales. Por ello, afianzándonos en la mención de Lasat (2000); el cadmio en la estructura vegetal del cacao, es absorbido, traslocado y acumulado en la planta debido al comportamiento electroquímico similar al de los elementos nutritivos que posee la especie.

4.1.2. Efecto de las especies vegetales en la concentración de cadmio en los suelos en estudio

Posterior al análisis de las plantas fitoextractoras que determinan la capacidad de absorción de cadmio, se realizó la caracterización de los suelos contaminados utilizados para la elaboración de los sustratos que permitieron el crecimiento de las plantas en cada tratamiento. En ese contexto, la Tabla 9 detalla el análisis de varianza ($\alpha=0,05$) realizado a los niveles promedio de cadmio en el suelo de cada tratamiento. Se demuestra que a los 90 días de siembra existen altas diferencias significativas entre las concentraciones de cadmio en los suelos estudiados, lo que supone que al menos una de las especies afecta la concentración del metal pesado en la estructura del suelo diferenciándola de otras.

Tabla 8. Análisis de varianza de la concentración de cadmio (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio a los 90 días de la siembra

F.V.	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	5	0,057	67,630	AS
Error	12	0,001		
Total	17			

NS: No existe significancia

S: Existen diferencias estadísticas significativas al 5 % de probabilidad

AS: Existen diferencias estadísticas significativas al 1 % de probabilidad

A partir de esto, se detalla con la prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) que, a los 90 días después de la siembra, existen altas diferencias significativas, por cuanto existe homogeneidad en 04 subgrupos homogéneos; esto se evidencia en la diferencia de las concentraciones por cada tratamiento en los suelos en estudio (Tabla 10).

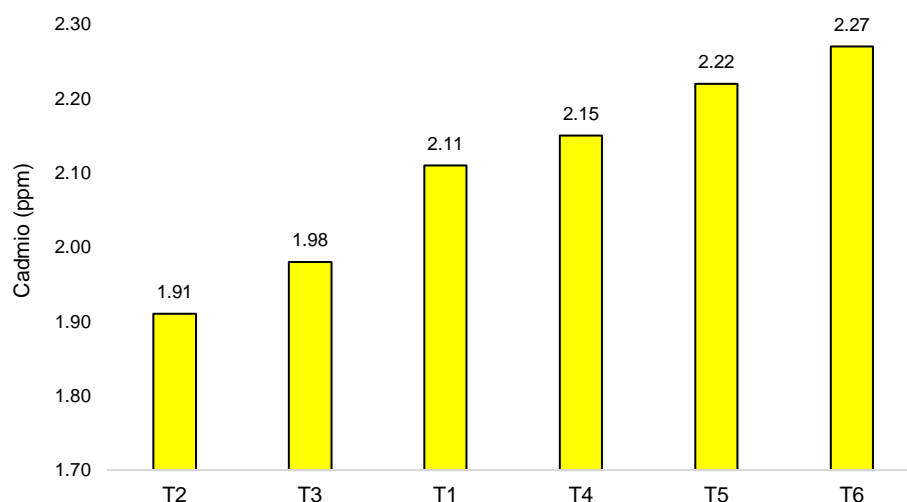


Figura 2. Concentración de cadmio (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio

Leyenda:

T₁: *Pavonia fruticosa*

T₂: *Theobroma cacao*

T₃: *Xanthosoma sagittifolium*

T₄: *Theobroma cacao* + *Xanthosoma sagittifolium*

T₅: *Theobroma cacao* + *Pavonia fruticosa*

T₆: *Theobroma cacao* + *Xanthosoma sagittifolium* + *Pavonia fruticosa*

Teniéndose que el mayor promedio de concentración se dio en el suelo del T₆ con 2,27 ppm, en contraste, el menor registro se dio en el suelo del T₂ con 1,91 ppm; valores que, como se había mencionado, no cumplen con lo estipulado por el MINAM (2017) en sus ECA's para suelos agrícolas, donde se refiere que los niveles no deben superar el 1,4 mg.kg⁻¹ para suelos agrícolas; por otro lado, de acuerdo a la normatividad mundial, la FAO clasifica al suelo como normal cuando contiene menos de 0,35 mg/kg y es considerado un suelo peligroso cuando este nivel se incrementa a 3-5 mg/kg de suelo (OMS, 1987); en ese sentido, podrían considerarse como suelos ligeramente peligrosos. La OMS, para el cultivo de cacao, recomienda como prevención, que las plantaciones de cacao deben ubicarse en áreas donde el contenido de cadmio no sea tan alto, de modo que los suelos agrícolas no excedan de 1,4 mg.kg⁻¹ (1,4 ppm) de cadmio.

En razón a esto, los suelos estudiados no son favorables para la producción del cultivo de cacao, más aún, considerando la mención de Gutiérrez y León (2017) quienes detallan que, dada la existencia de cadmio en las importaciones de América Latina recomiendan determinar el nivel de cadmio en suelos de cultivos y en granos de cacao; concluyendo, que si el cadmio en el grano excede el valor de 0,5 mg.kg⁻¹, se recomienda investigar los orígenes de cadmio en los cultivos para tomar las medidas necesarias.

La fuente de cadmio en los suelos podría tener un génesis muy variado, sin embargo, entre las acciones que propiciaron la acumulación de esto, se tiene la intensidad de uso de la tierra, la acidez del suelo, los niveles de materia orgánica y las fertilizaciones fosfatadas durante la producción de ciertos cultivos; así, se coincide con Herrera (2000) quien refiere que, últimamente se ha obtenido un gradual incremento en los niveles de cadmio en ciertos suelos agrarios esto se debería a una larga fertilización fosfatada, y llama la atención la posibilidad de mayores aumentos en distintos suelos a causa del uso agrario de lodos residuales, asimismo, con Sánchez (2016), donde se menciona que en suelos ácidos, el cadmio se intercambia fácilmente, haciéndole disponible para las plantas, el mismo autor menciona que la fijación de Cd es mayor en los suelos con mayores contenidos de materia orgánica, textura más fina, mayor capacidad de intercambio catiónico y mínima presencia de aluminio intercambiable; para nuestro caso, esto podría considerarse convincente debido a los antecedentes de aprovechamiento del área en estudio, la cual se desarrolló de manera intensiva, empobreciendo y permitiendo la acumulación de cadmio en el suelo.

Los resultados coinciden con la mención de McLaughlin, (2016), quien detalla que entre las características de los factores edáficos y de cultivo que determinan la absorción de cadmio por las plantas se tiene que, la absorción aumenta cuando el pH disminuye (suelos ácidos), asimismo, la absorción aumenta con el incremento de la salinidad y el nivel de cadmio, con la deficiencia de zinc y manganeso; el autor menciona que las verduras absorberían más que las raíces, las raíces absorberían más que los cereales y los cereales absorberían más que las frutas; también que las plantas de mayor edad tienen mayor nivel de absorción que las más recientes.

En ese contexto, se realizó la caracterización de los diversos parámetros fisicoquímicos de los suelos usados en los tratamientos; la Tabla 11, muestra los valores promedio de cada parámetro, teniéndose que:

Tabla 9. Propiedades fisicoquímicas de los suelos en estudio por cada tratamiento

Parámetros			T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆
Análisis mecánico	Arena	%	35,67	35,00	39,00	33,67	33,67	34,33
	Arcilla	%	20,00	24,00	22,00	24,00	22,00	22,00
	Limo	%	44,33	41,00	39,00	42,33	44,33	43,67
	Textura		Franco	Franco	Franco	Franco	Franco	Franco
pH	1:1		5,57	5,53	5,55	5,53	5,77	5,68
M.O.	%		1,60	1,73	2,13	2,18	1,87	1,82
N	%		0,07	0,08	0,10	0,10	0,08	0,08
P	ppm		5,52	5,46	6,62	5,64	6,58	6,36
K	ppm		84,96	90,96	109,62	89,93	68,64	83,13
CIC			9,99	12,06	12,82	11,97	12,03	11,29
Cambiables Cmol(+)/kg.	Ca		7,53	9,49	9,91	9,62	9,66	9,16
	Mg		1,85	1,91	2,13	1,91	1,92	1,89
	k		0,22	0,26	0,32	0,17	0,21	0,14
	Na		0,39	0,40	0,46	0,28	0,24	0,11
	Al		...	...	...	...	...	...
	H		...	...	...	...	...	...
CICe	Bas. Camb	%	100	100	100	100	100	100
	Ac. Camb	%	0	0	0	0	0	0
	Sat. Al	%	0	0	0	0	0	0
Metales pesados	Cd	ppm	2,11	1,91	1,98	2,15	2,22	2,27
	Pb	ppm	2,32	2,23	3,16	2,36	2,51	2,51

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

Los valores correspondientes a los diversos parámetros fisicoquímicos de los sustratos denotan que, posterior al crecimiento de las especies en estudio, resultaron suelos de textura “franco”, esta determinación se realizó basándose en las clases texturales referidas por la USDA, realizando la comparación de los niveles de arena, arcilla y limo con el triángulo textural. Los niveles de pH demuestran que son suelos ácidos; según la FAO (s.f.), son pertenecientes a la banda de suelos ácidos de la zona tropical húmeda, las que se encuentran asociados a toxicidades y deficiencias y otras condiciones restringentes para las plantas según sea el caso; a pesar de ser suelos naturalmente ácidos, la lixiviación podría contribuir a ello,

esto debido a las diversas acciones a las que se encuentra sometido el suelo (remoción de vegetación natural, infestación de estas malezas, contaminación), los efectos negativos producidos por el nivel de acidez del suelo se deben a las propiedades físicas y químicas del suelo; la FAO detalla que una forma de compensar la acidez se puede dar a través de la adición de materia orgánica al suelo. Debemos considerar que, para la producción de plantas se debe realizar el control del nivel de acidez, debido a que las plantas solo absorben sustancias minerales disueltas en agua, siendo este parámetro el que afecta el grado de solubilidad de estas sustancias minerales en el medio acuoso, según Gracia (2012), los valores demasiado elevados o reducidos del pH, se pueden convertir en un factor que limite la absorción de sustancias minerales.

Después de 90 días de crecimiento de las especies, en los suelos los niveles de materia orgánica (M.O.) de acuerdo al método de Walkey y Black, se registran como “valores bajos” en los T₁, T₂, T₃, T₅ y T₆; así como “valores medios” en los T₃ y T₄; esto de acuerdo a la clasificación propuesta por Benzing (2001). Una deficiencia de materia orgánica provoca deficiencias en la estructura e infiltración de agua, por ello, la baja humedad, la fragilidad ante la erosión hídrica y la baja disponibilidad de diversos nutrientes. Considerando a Gracia (2012), los bajos niveles de M.O. podrían deberse a su mineralización, que se aceleraría en condiciones aerobias y de alta temperatura, así como a la usencia de aportes procedentes de organismo vivos presentes en los suelos en estudio.

La siguiente figura refleja la correlación de las variables: pH en relación al nivel de materia orgánica (%) de los suelos en estudio, el cual arroja un coeficiente de Pearson de $r = -0,1189$; es decir, existe una débil correlación lineal, con un coeficiente negativo cercano a la unidad, donde a medida que aumenta el nivel de pH, decrece ligeramente el nivel de materia orgánica en función a la ecuación: $y = -0,2503x + 3.2916$; $R^2 = 0,0141$ (Figura 3).

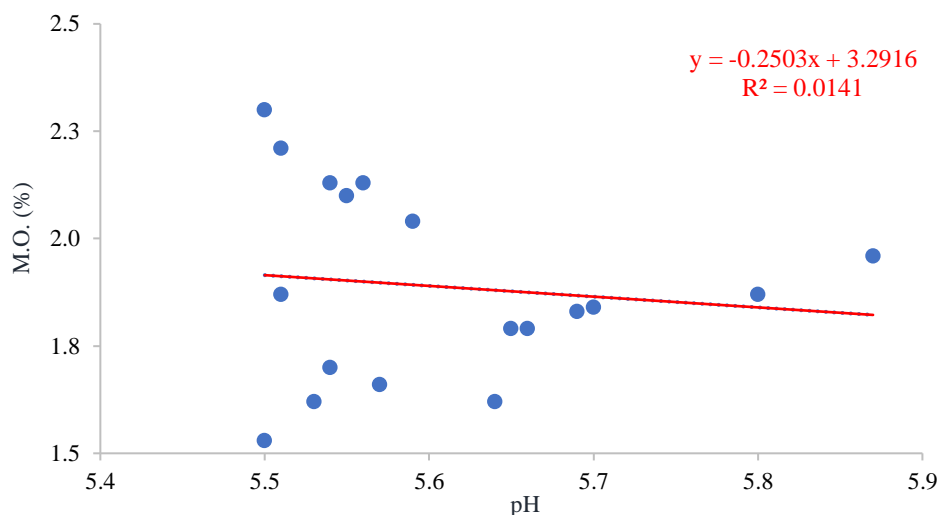


Figura 3. Nivel de relación entre las variables pH y materia orgánica (%) de los suelos en estudio

Empleando el método de Micro Kjeldahl, se determinaron los niveles de nitrógeno en los suelos en estudio; según Benzing (2001), se clasifican como de “nivel medio”; puesto que se trata de uno de los elementos de mayor relevancia para el crecimiento de las plantas debido a que existe en muy pequeñas cantidades en forma mineral, que es la forma como la asimila la planta, se hace indispensable conocer los requerimientos de nitrógeno de un cultivo en particular así como los niveles naturales de este elemento en el suelo a emplearse para la producción. Según Rodríguez (1991), el nitrógeno influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas, determinando el balance del crecimiento vegetativo y reproductivo, a través de la relación C/N, Por otro lado, es importante mencionar a Yakabi (2014) quien detalla que el comportamiento del nitrógeno en el suelo se relaciona con el pH, a través de la nitrificación, se liberan iones H^+ , de esta manera, la mineralización de la materia orgánica y el suministro de fuentes de nitrógeno amoniacales, acrecienta la acidez; esto no se encontró en los estudios, puesto que existe deficiencia en los niveles encontrados.

Respecto al fósforo disponible en los suelos después del crecimiento de las especies vegetales, la clasificación de Benzing (2001), la categoriza como de “nivel bajo”. Como se infiere, este elemento no existe en abundancia en los suelos en estudio, pudiéndose encontrar de forma “no disponible” siendo parte de los minerales del suelo. De acuerdo a Jiménez *et al*, (2010), en los suelos ácidos, como los estudiados, existe una alta fijación de fósforo y, bajos niveles en la formación de formas nitrogenadas (amonio y nitratos). Por otro lado, de acuerdo a Gomero y Velásquez (1999), se puede realizar la adición de distintas formas,

pudiendo ser orgánica o mineral, transformándose a HPO_4^{-2} (ión fosfato monoácido) y el H_2PO_4^- (ión fosfato diácido).

Respecto al parámetro: potasio disponible, los suelos en estudio se registran, de acuerdo a la clasificación de Benzing (2001), como de “nivel muy bajo”; de acuerdo a Gomero y Velásquez (1999), es un elemento ilimitado que se encuentra en función a la liberación del “potasio intercambiable”, en razón a ello, a pesar de tenerse suelos con altos niveles, se hace necesario adicionar este elemento de distintas formas. Es importante mencionar que los niveles bajos de potasio, tal como lo menciona la INTAGRI (2017), la presencia de potasio en la solución del suelo es pequeña y es absorbida de manera rápida por las plantas por estar inmediatamente disponible, cuando las plantas absorben y extraen este potasio, es cambiado y repuesto rápidamente por la cesión de formas que son menos fáciles para acceder, se les puede ubicar en las zonas de adsorción de los coloides minerales y orgánicos del suelo. Cuando la concentración potásica de la solución ha bajado y está en un mínimo (potasio intercambiable mínimo), este es liberado de las interláminas de las arcillas (potasio fijado) para restaurar el potasio de la solución del suelo. Al darse la fuerte extracción de potasio por los cultivos, el potasio no intercambiable jugaría un papel esencial en la alimentación potásica cuando la forma intercambiable es escasa, pero es significativo explicar que el potasio no intercambiable pasa a la solución con mucho menos velocidad que el intercambiable.

Respecto al nivel de capacidad de intercambio catiónico (CIC), se aplicó el método del acetato de amonio 1N - pH 7, determinándose la cantidad de cationes intercambiables encargados de neutralizar las cargas negativa; según Benzing (2001) los suelos de los T₁, T₄ y T₆, se clasifican de “nivel bajo”, los suelos de los T₂, T₃ y T₅ de “nivel medio”, Arvildo (2009) refiere que los cationes que tienen relación directa con el crecimiento de las plantas de cacao son el calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+), amonio (NH_4^+), sodio (Na^+) e hidrógeno (H^+); por esto, es importante el equilibrio de la CIC debido a que aumenta la disponibilidad del fósforo, del calcio y del magnesio; por otro lado, mejora la disponibilidad del nitrógeno a través de la fijación biológica y también para las bacterias nitrificadoras. Los resultados encontrados en los suelos en estudio, demuestra que no existe el potencial capaz para retener e intercambiar nutrientes.

La Figura 4, detalla el análisis de correlación entre las variables: pH y la capacidad de intercambio catiónico ($\text{Cmol}(+)/\text{kg}$) de los suelos en estudio, del cual se registra un coeficiente de Pearson de $r = -0,0312$; lo que significa que, existe una casi nula relación entre los datos, su comportamiento detalla que a nivel que el pH aumenta, decrece mínimamente el

nivel de la CIC, este decrecimiento se comporta de acuerdo a la ecuación: $y = -0,2736x + 13,23$; $R^2 = 0,001$.

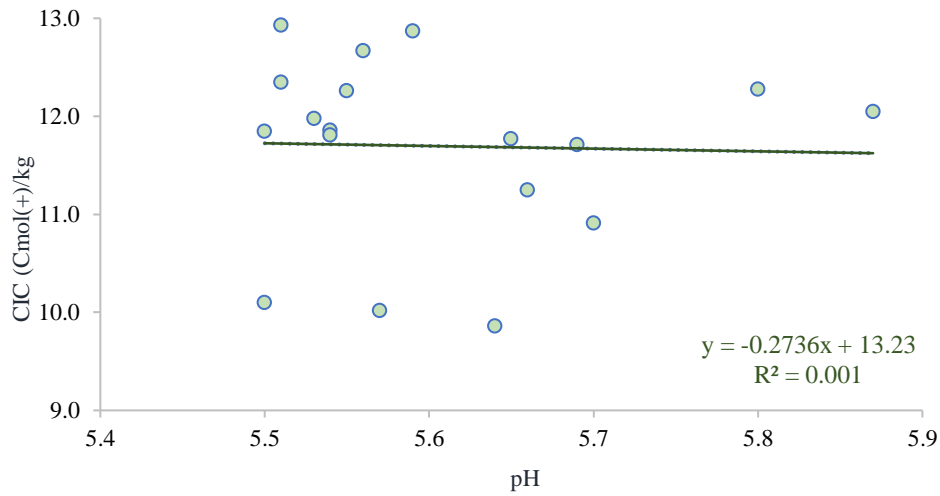


Figura 4. Nivel de relación entre las variables pH y CIC de los suelos en estudio

La correlación de las variables: materia orgánica (%) en comparación a la CIC de los suelos en estudio arroja un coeficiente de Pearson de $r = 0,689$; es decir, existe una considerable relación entre los datos, esto permite inferir que el crecimiento en el valor de las variables es casi lineal, teniéndose que a medida que aumenta la materia orgánica, la CIC aumento en función a la ecuación: $y = 2,8726x + 6,2716$; $R^2 = 0,4745$ (Figura 5).

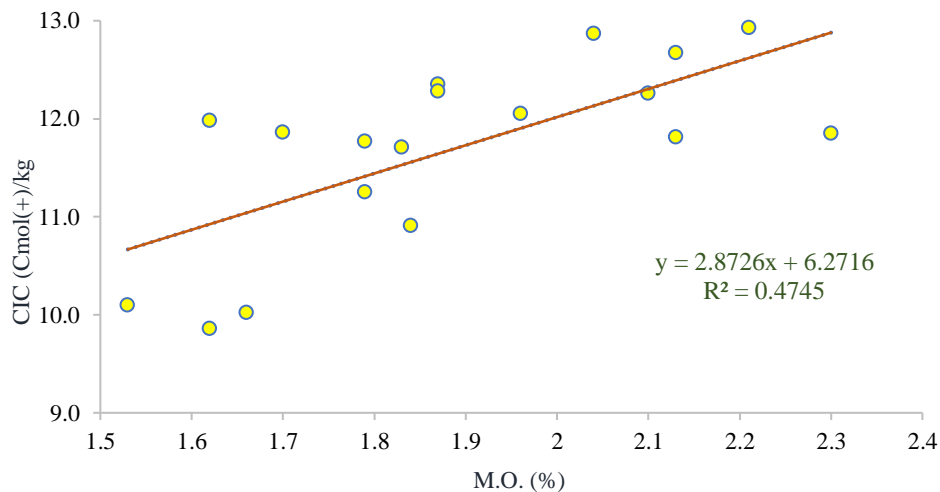


Figura 5. Nivel de relación entre las variables materia orgánica (%) y CIC de los suelos en estudio

Respecto al nivel de metales pesados, en los suelos en estudio se registraron los niveles de cadmio y plomo, teniéndose en el primer caso, el mayor registro en el suelo del T₆

con 2,27 ppm, estos niveles resultaron ligeramente inferiores al valor inicial el cual fue de 2.74 ppm, teniéndose la mayor diferencia de concentración en el T₂ (*T. cacao*) el cual registra 1,91 ppm; por otro lado, el mayor registro para el plomo se dio en el T₃ con 3,16 ppm (Figura 6). Esto confirma la toxicidad que representa aún estos niveles de cadmio y plomo en los suelos, dado que su presencia mínima resulta perjudicial, coincidiendo con Huaynates (2013), quienes refieren que debido a su movilidad en los ecosistemas y su toxicidad, y a pesar que se encuentran en cantidades mínimas e indetectables, su permanencia en el suelo, involucra que a través de procesos naturales como la meteorización de la roca madre, esta consideración podría alcanzar a ser tan alta que empieza a ser toxica.

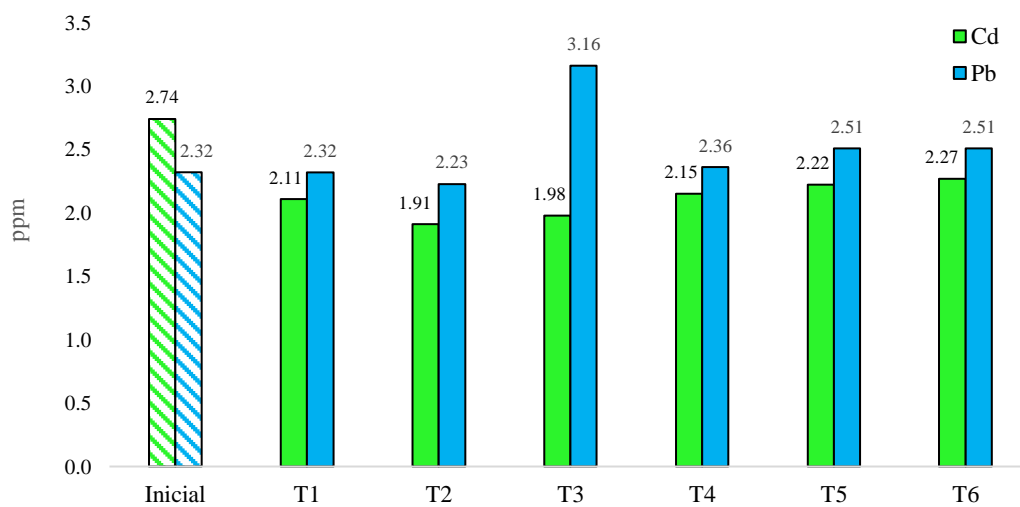


Figura 6. Concentración de cadmio y plomo (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio

Leyenda:

T₁: *Pavonia fruticosa*

T₂: *Theobroma cacao*

T₃: *Xanthosoma sagittifolium*

T₄: *Theobroma cacao* + *Xanthosoma sagittifolium*

T₅: *Theobroma cacao* + *Pavonia fruticosa*

T₆: *Theobroma cacao* + *Xanthosoma sagittifolium* + *Pavonia fruticosa*

Por otro lado, se detalla la diferencia de los promedios de cada parámetro químico respecto al valor inicial; esto considerándose que no se evidenció cambios significativos en la textura del suelo. Así, se tiene que el pH disminuye ligeramente al sembrarse las especies estudiadas, teniéndose las máximas disminuciones en el T₂ (*T. cacao*) y T₄ (*T. cacao* + *X. sagittifolium*) donde se disminuye 0,32 en ambos casos al valor inicial. La materia orgánica se mantuvo casi constante, teniéndose disminuciones ínfimas en el T₁, T₂ y T₆; en contraste, los T₃, T₄ y T₅ mostraron ligeros aumentos, siendo los más notorios en el T₃ (*X. sagittifolium*) y T₄ (*T. cacao* + *X. sagittifolium*) donde se registra +0,27% y +0,32% respectivamente (Figura 7).

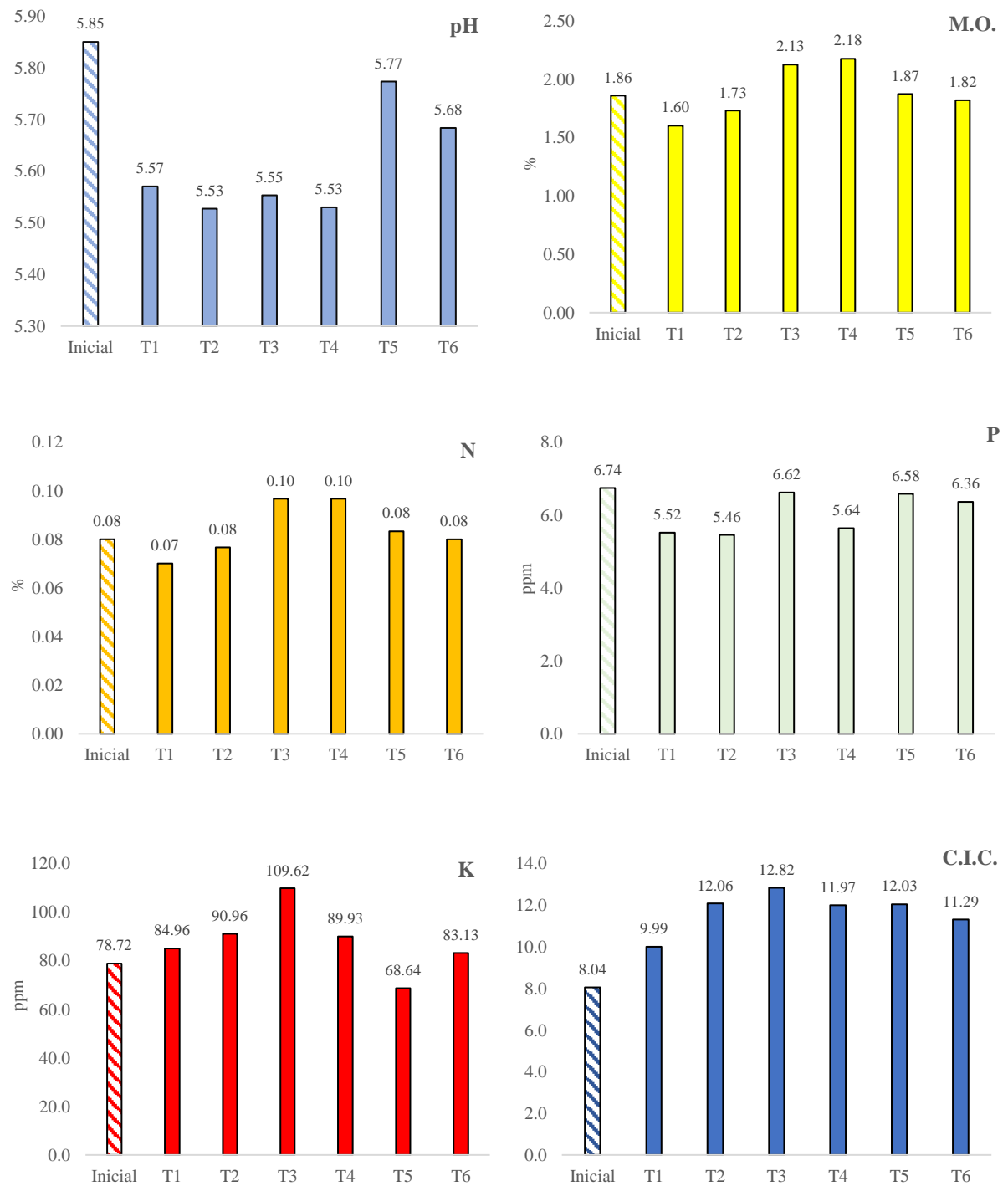


Figura 7. Niveles de los parámetros químicos de los suelos por tratamiento y del suelo inicial

Leyenda:

T₁: *Pavonia fruticosa*

T₂: *Theobroma cacao*

T₃: *Xanthosoma sagittifolium*

T₄: *Theobroma cacao* + *Xanthosoma sagittifolium*

T₅: *Theobroma cacao* + *Pavonia fruticosa*

T₆: *Theobroma cacao* + *Xanthosoma sagittifolium* + *Pavonia fruticosa*

Respecto al nivel de nitrógeno (%) se mantuvo casi constante teniéndose valores de crecimiento en el T₃ y T₄; por otro lado, respecto al nivel de fósforo (ppm) las especies vegetales provocaron disminuciones pequeñas siendo las más notorias en los T₂ y T₃ donde se registraron -1,22 ppm y de -1,28 ppm respectivamente. Para el nivel de potasio (ppm), los suelos después del crecimiento de las especies mostraron valores superiores al del suelo inicial a excepción del T₅ (*T. cacao* + *P. fruticosa*) donde se registra un valor que se diferencia de la inicial en -10,08 ppm. En contraste el mayor valor que se encuentra en el T₃ (*X. sagittifolium*) donde se muestra una diferencia de +30,9 ppm. Finalmente, la siembra de especies aumenta evidentemente la capacidad de intercambio catiónico del suelo, con valores superiores al inicial en todos los casos, teniéndose la mayor diferencia en el T₃ donde se registra una diferencia de 4,78 respecto al suelo previo al experimento (Figura 7).

4.2. Índice de bioconcentración y de translocación de cadmio de las especies en estudio

Los valores utilizados para determinar el factor de bioconcentración (BCF) consideraron los niveles de cadmio en el suelo y en la parte aérea y radicular de las especies vegetales del presente estudio. En ese sentido, la Tabla 12 detalla los niveles de cadmio en la estructura vegetal teniéndose que, respecto a la especie *P. fruticosa*, se registraron mayores niveles de cadmio cuando se desarrolló aisladamente, teniéndose un valor ligeramente mayor (4,59 ppm) en comparación con su asociación a *T. cacao*, donde registra 4,48 ppm, al asociarse a las otras dos especies se tiene el menor valor de concentración (4,36 ppm). En relación a la especie *X. sagittifolium*, se registraron mayores valores de cadmio al asociarse con las otras dos especies (7,29 ppm), seguido de su concentración al asociarse con *T. cacao* (4,57 ppm) y de su desarrollo aislado (3,54 ppm). La especie *T. cacao*, es la especie que más cadmio absorbe, teniéndose una menor concentración durante su crecimiento aislado con 5,1 ppm, seguido de su concentración al asociarse con *X. sagittifolium* con 5,11 ppm; su asociación con *P. fruticosa* denota un registro importante con 7,94 ppm de cadmio, de igual manera, la asociación con las otras dos especies, mostró el valor promedio de concentración del experimento con 7,95 ppm. Existe una mayor concentración de cadmio en la parte radicular que en la parte aérea de las especies; con excepción en *X. sagittifolium* donde se detalla una diferencia ínfima entre ambos niveles y donde al asociarse con las otras dos especies se denota que la parte aérea concentra mayor nivel de cadmio que la radicular.

Tabla 10. Concentración de cadmio (ppm) en la estructura vegetal de las especies, suelos en estudio y clasificación de acuerdo al índice de bioconcentración (BCF) por tratamientos

Clave	Especie	Concentración media de cadmio (ppm)			BCF aérea	Clasificación BCF (aérea)	BCF radicular	Clasificación BCF (raíz)
		Parte aérea	Parte radicular	Suelo				
T ₁	<i>Pavonia fruticosa</i>	1,52	3,07	2,11	0,72	Exclusora	1,45	Acumuladora
T ₂	<i>Theobroma cacao</i>	1,53	3,57	1,91	0,73	Exclusora	1,69	Acumuladora
T ₃	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	1,83	1,71	1,98	0,87	Exclusora	0,81	Exclusora
T ₄	<i>Theobroma cacao</i>	1,57	3,54	2,15	0,74	Exclusora	1,68	Acumuladora
	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	2,09	2,48	2,15	0,99	Exclusora	1,18	Acumuladora
T ₅	<i>Theobroma cacao</i>	1,53	6,41	2,22	0,73	Exclusora	3,04	Acumuladora
	<i>Pavonia fruticosa</i>	1,5	2,98	2,22	0,71	Exclusora	1,41	Acumuladora
T ₆	<i>Theobroma cacao</i>	1,57	6,38	2,27	0,74	Exclusora	3,02	Acumuladora
	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	3,93	3,36	2,27	1,86	Acumuladora	1,59	Acumuladora
	<i>Pavonia fruticosa</i>	1,5	2,86	2,27	0,71	Exclusora	1,36	Acumuladora

Respecto al índice de bioconcentración (BCF) se tiene que, en condiciones de aislamiento, para el BCF (aéreo) todas las especies se clasifican como “excluseras”, lo que indica que no tienen una concentración efectiva en esta parte de la planta; para el BCF (raíz), las especies *P. fruticosa* y *T. cacao* se clasifican como “acumuladoras” ($1 < \text{BCF}_{\text{raíz}} < 10$) lo que confirma su capacidad de fitoestabilizar el cadmio en su estructura radicular, lo que resulta conveniente para el cacao, debido a que se busca disminuir las concentraciones de su zona aérea; por otro lado, *X. sagittifolium* registra una $\text{BCF}_{\text{raíz}} < 1$ por lo que se denota como “exclusera”, es decir, de baja capacidad de concentrar cadmio en sus raíces. Durante el crecimiento asociado, para el BCF (aéreo) todas las especies se clasificaron como “excluseras” ($\text{BCF}_{\text{aéreo}} < 1$), a excepción del *X. sagittifolium*, la cual en el T6 se clasifica como “acumuladora” de acuerdo a su $1 < \text{BCF}_{\text{aéreo}} < 10$.

Respecto al BCF “raíz” todas las especies se clasificaron como “acumuladoras”, debido a que en todas las formas se registraron valores $1 < \text{BCF}_{\text{raíz}} < 10$ denotando su buena capacidad de concentrar cadmio en su tejido radicular. Sin embargo, a pesar que se requiere, según Diez (2008), que se acumule el contaminante en la parte aérea de la planta (parte de fácil extracción), otros autores piensan que en determinadas situaciones, el extraer las raíces sería una opción igualmente factible, esto teniendo consideración del método y de los recursos que involucraría.

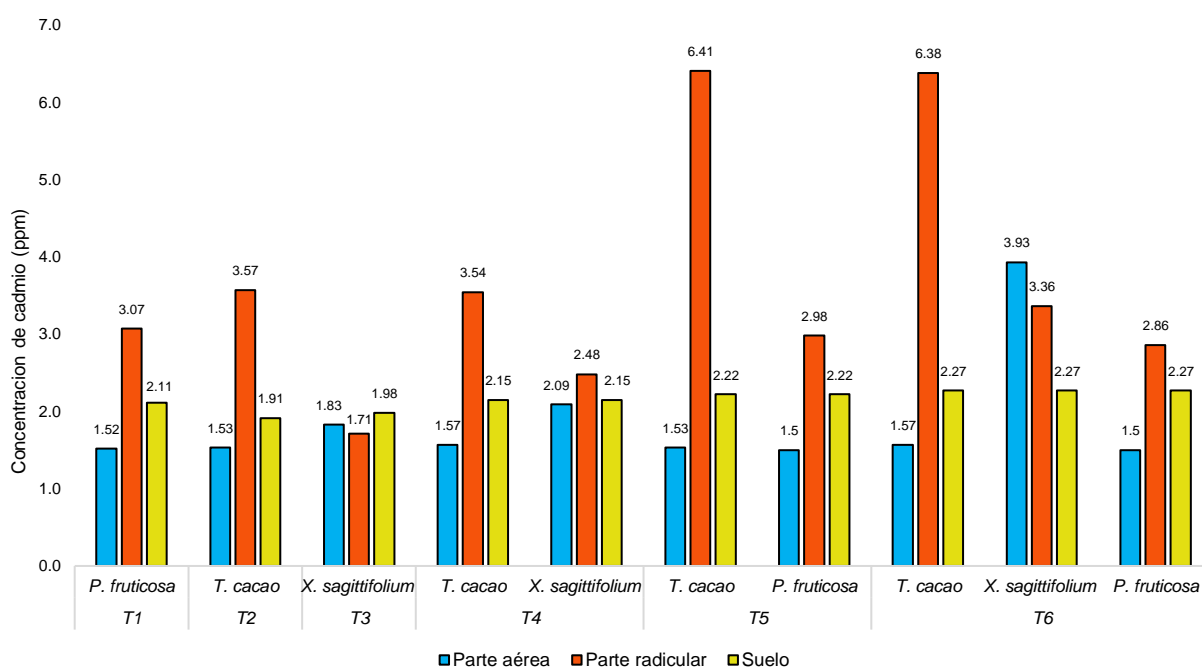


Figura 8. Concentración de cadmio (ppm) por tratamiento en la estructura vegetal y en el suelo

La especie muestreada *T. cacao*, comparándola con otras especies, presentó la mayor acumulación de cadmio en la parte radicular en todos los tratamientos, Herrera (2011), indica que el contenido de cadmio seguiría una sucesión descendente en las estructuras (raíz, tallo, hoja y fruto) del cacao, lo que se asemejaría con esta investigación, esto podría deberse al flujo de este metal dentro de la estructura de la planta, donde la raíz es el primer elemento de contacto dentro del suelo. Para esta especie, sin asociación se obtuvo 1,91 ppm en la parte aérea (hojas + tallos), valores que superan a los obtenidos por Huamaní *et al.* (2012) en el tejido foliar del cacao donde encontraron valores promedio de 0.210 mg.kg^{-1} de cadmio, valor menor a los hallados en esta investigación; a esto se resalta los diversos factores en los que se produjeron, además, se debe considerar que las unidades del presente estudio, se produjeron en envases establecidos y en condiciones de vivero controladas; a pesar de ello, las diferencias podrían deberse también al material genético y a la disponibilidad del metal en el suelo previo a la medición. Asimismo, es importante mencionar la efectividad de la especie +

En este contexto, los factores de bioconcentración (BCF) y el factor de translocación (TF) se utilizan para conocer el potencial de una planta para la fitorremediación de suelos contaminados. La capacidad de las especies para acumular el cadmio del suelo se estimó utilizando el BCF, que se define como la relación de la concentración de metal en las raíces y/o parte aérea respecto al suelo; teniéndose que se encuentran concentraciones

superiores en la especie *T. cacao*, donde los mayores valores se observan al asociarse con la especie *P. fruticosa*, la cual disminuye su capacidad de concentración al asociarse. La especie *X. sagittifolium* mejoró sus niveles de concentración de cadmio al asociarse con individuos de otras especies, teniéndose en condiciones de aislamiento un valor de 0,8 para su BCF, aumentando su nivel a 1,18 al asociarse solo con *T. cacao* y hasta 1,59 al asociarse con ambas especies. Por otro lado, para medir la capacidad de trasladar metales desde las raíces a su parte aérea en las especies se utilizó el índice de translocación (TF), que se definiría como la relación de la concentración del metal en la parte aérea en relación a las raíces. Así, los valores utilizados para determinar el factor de translocación (TF) consideraron los niveles de cadmio en la parte del sistema aéreo y radicular de las especies vegetales del presente estudio (Tabla 13).

Tabla 11. Concentración de cadmio (ppm) en la estructura vegetal de las especies, índice de translocación (TF) y clasificación de acuerdo al índice de translocación (TF) por tratamiento.

Clave	Especie	Concentración media de cadmio (ppm)		TF	Clasificación TF
		Parte aérea	Parte radicular		
T ₁	<i>Pavonia fruticosa</i>	1,52	3,07	0,50	Exclusora
T ₂	<i>Theobroma cacao</i>	1,53	3,57	0,43	Exclusora
T ₃	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	1,83	1,71	1,07	Acumuladora
T ₄	<i>Theobroma cacao</i>	1,57	3,54	0,44	Exclusora
	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	2,09	2,48	0,84	Exclusora
T ₅	<i>Theobroma cacao</i>	1,53	6,41	0,24	Exclusora
	<i>Pavonia fruticosa</i>	1,50	2,98	0,50	Exclusora
T ₆	<i>Theobroma cacao</i>	1,57	6,38	0,25	Exclusora
	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	3,93	3,36	1,17	Acumuladora
	<i>Pavonia fruticosa</i>	1,50	2,86	0,52	Exclusora

Tal como lo menciona Baker y Brooks (1979), si el TF > 1 significa que la planta trasladaría eficazmente los metales pesados de la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que posee un potencial para la hiperacumulación de metales en esta zona de la planta, como es el caso de *X. sagittifolium*, el cual aisladamente registró un valor de 1,07 y en asociación un valor de 1,17 por lo que se trata de una especie que concentra el cadmio eficazmente en su parte aérea; por otro lado, si el TF < 1, la planta no traslada eficazmente los metales pesados de la

raíz a la parte aérea de la planta, por lo que su potencial es la de fitoestabilizar metales en sus raíces, como es el caso de *P. fruticosa* y *T. cacao*. Así, es de importancia mencionar que, *T. cacao* al asociarse con las especies en estudio, aumentó su capacidad de concentración de cadmio, teniendo proporciones que van desde el 69,35% hasta casi el 81% pertenecientes a la parte radicular de la planta, lo que representa una alternativa para disminuir los niveles de cadmio de la parte aérea si son las almendras el producto de interés. Por otro lado, la clasificación de las especies *P. fruticosa* y *T. cacao* es como “excluseras” ($TF < 1$) al desarrollarse aisladamente y en asociación; a diferencia de la especie *X. sagittifolium* donde se registra una $TF > 1$ por lo que se la clasifica como “acumuladora” durante su desarrollo en aislamiento y en la asociación (T_6).

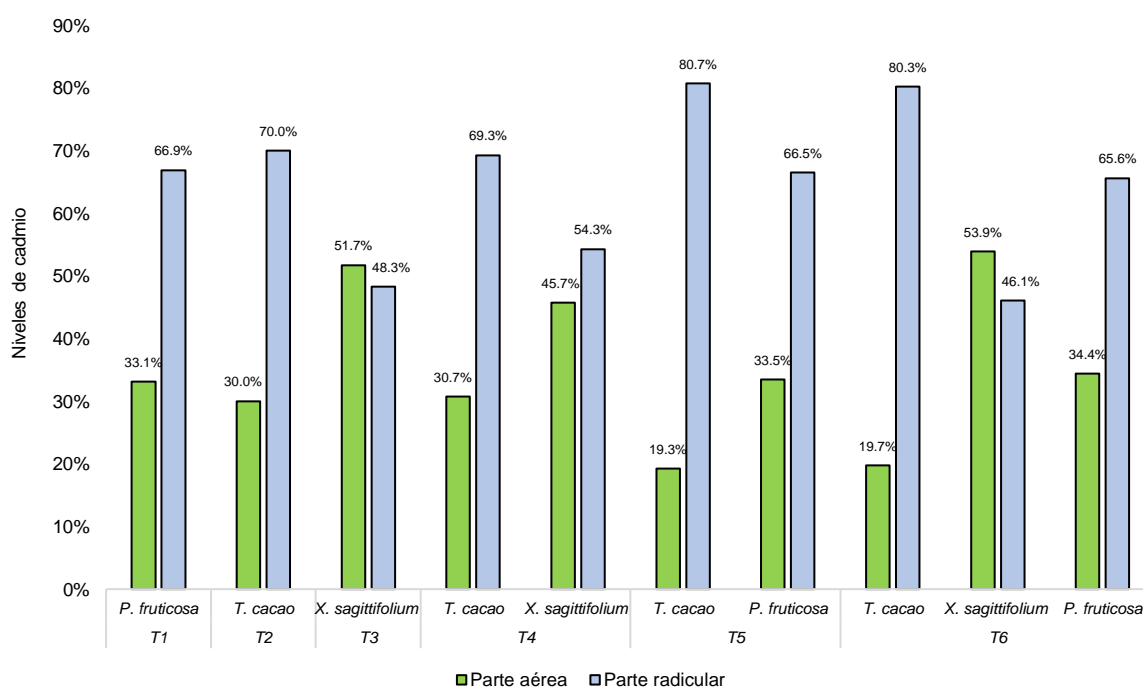


Figura 9. Proporción de cadmio (%) por tratamiento en la estructura vegetal de las especies en estudio.

En la presente investigación, ninguna de las especies de planta acumuló concentraciones de cadmio que superen los 100 mg/kg^{-1} ; por lo que ninguna de ellas se puede clasificar como hiperacumuladora de cadmio, esto considerando la mención de Baker y Brooks (1989). Se evidencia, una capacidad para tolerar y acumular el cadmio, resultando factible su empleo durante la fitoestabilización del metal en la estructura radicular de las plantas, lo que resulta beneficioso en el *T. cacao*. Las plantas que presentan tolerancia suelen restringir las transferencias suelo - raíz y raíz - parte aérea, por lo que presentan menos acumulación en su

biomasa, por otro lado, las hiperacumuladoras participarían de una forma activa y translocarían los metales en su biomasa aérea. Las plantas que muestran valores de TF, especialmente FBC menores de uno, no serían adecuadas para la fitoextracción (Fitz y Wenzel, 2002). Esto permite inferir que la asociación propuesta del T₆ resulta beneficiosa, debido que, al disminuir el TF, se supone que existirán menores niveles de concentración de cadmio en la parte aérea (tallos, hojas) de *T. cacao*, al mismo tiempo al incrementarse el TF en *P. fruticosa* y *X. sagittifolium* se estabiliza los niveles de cadmio en la rizósfera lo que resulta ideal si se requiere disminuir la presencia de este metal en la parte aérea del cacao.

En términos generales, respecto a la eficiencia de la fitoextracción, autores como Diez (2008) y Volke *et al.* (2005), mencionan que es importante que la acumulación se dé en la parte aérea de la planta, debido a que es más viable la cosecha y la extracción del metal concentrado en la biomasa; considerando esta premisa se tiene que la especie *X. sagittifolium* resulta viable; sin embargo, los resultados podrían estar asociados a situaciones como la biodisponibilidad del cadmio en el suelo, la biomasa total de una cosecha, cantidad de cosechas por año y de la concentración del cadmio en la biomasa cosechada. Asimismo, la fitoextracción se debe considerar como un modelo tecnológico de largo plazo, que sugiere varios ciclos de cultivo hasta lograr registrarse niveles permisibles por la legislación, Volke *et al.* (2005) mencionan que este proceso puede llegar a durar hasta 20 años. Finalmente, debido a que no existen trabajos similares en las especies consideradas, no es posible la comparación cuantitativa de los resultados registrados, los mismos que servirán de premisa para futuras evaluaciones.

A todo esto, es importante resaltar que el cadmio es un contaminante altamente estable y no degradable, con un alto grado de movilidad, toxicidad y capacidad de bioacumularse en diversos organismos vivos (Beltrán, 2001). En la actualidad, este contaminante está ampliamente distribuida en zonas agrícolas y forestales, debido a la masificación de actividades antrópicas negativas y/o por fenómenos naturales; por esto, la presencia de este contaminante en cultivos agrícolas; según Furcal y Torres (2020) la presencia del cadmio genera disminución en el crecimiento y fotosíntesis de la especie afectada, teniendo como principal efecto clorosis como consecuencia de su intoxicación. A esto, se confirma que especies como *T. cacao*, tiene una alta capacidad de tolerar este contaminante, accionando su bioacumulación en sus diferentes órganos vegetales.

V. CONCLUSIONES

- La concentración (ppm) de cadmio en el sustrato, en la raíz y en la parte aérea de las especies *Pavonia fruticosa*, *Xanthosoma sagittifolium* y *Theobroma cacao* aisladamente y en asociación, mostraron diferencias significativas ($\alpha=0,05$) entre los tratamientos a los 90 días de cultivo.
- En la estructura vegetal (raíz+tallo), aisladamente, *T. cacao* presentó los mayores valores de concentración ($T_2 = 5,10$ ppm), seguido de *P. fruticosa* ($T_1 = 4,59$ ppm) y de *X. Sagittifolium* ($T_3 = 3,54$ ppm); de manera asociada los mayores registros son en el T_6 (Theobroma+Xanthosoma+Pavonia) con 19,59 ppm, seguido del T_5 (Theobroma+Pavonia) con 12,42 ppm y de T_4 (Theobroma+Xanthosoma) con 9,68 ppm.
- De acuerdo a la concentración de cadmio en el suelo, el T_6 presento mayor concentración de cadmio con 2,27 ppm, el menor registro se dio en el T_2 con 1,91 ppm.
- En el BCF (aéreo) todas las especies son clasificadas como “excluseras”, para el BCF (raíz), las especies *P. fruticosa* y *T. cacao* son clasificadas como “acumuladoras” , mientras que la *X. sagittifolium* es clasificada como “exclusera”. Durante el crecimiento asociado, de acuerdo al BCF (aéreo) todas las especies se clasifican como “excluseras”, a excepción del *X. sagittifolium*, la cual en el T_6 se clasifica como “acumuladora”; respecto al BCF “raíz” todas las especies son clasificadas como “acumuladoras”, demostrando ser muy buenos para concentrar cadmio en la raíz.
- De acuerdo al (TF) en suelos contaminados con cadmio; se clasifican como “excluseras” las especies *P. fruticosa* y *T. cacao* tanto al desarrollarse aisladamente como en asociación; es clasificada como “acumuladora” *X. sagittifolium* durante su crecimiento en aislamiento y en la asociación (T_6).

VI. RECOMENDACIONES

- Efectuar la caracterización taxonómica especializada de las especies vegetales antes del inicio de cualquier proyecto de investigación.
- Realizar estudios sobre *Xanthosoma sagittifolium* y *Pavonia fruticosa* para identificar sus principales hábitats, su ciclo fenológico, sus roles ecosistémicos y el periodo en el cual tienen mayor acción fitoextractora.
- A través de pruebas piloto, identificar la eficiencia fitorremediadora de *Xanthosoma sagittifolium* y *Pavonia fruticosa* en fase de campo, de manera aislada y en asociación a *Theobroma cacao*, desde la propagación por semilla hasta su exposición a metales pesados.
- Estudiar las interacciones de *Xanthosoma sagittifolium* y *Pavonia fruticosa* con organismos fúngicos, bacterias entre otros seres vivos presentes en el suelo, los cuales pueden contribuir a la retención y mejora de rendimientos respecto a la concentración de cadmio.
- Para casos como el de la provincia de Leoncio Prado, donde la cantidad de cadmio disponible en el suelo es relativamente baja (menor a 100 mg/Kg), se recomienda el uso de la fitoextracción con especies cuya producción representan bajos costos y una fácil implementación.
- En suelos de amplia disponibilidad del cadmio, se recomienda implementar un vivero con énfasis en la producción de especies fitoextractoras, lo cual sugiere un programa de investigación local.

VII. REFERENCIAS

- Adriano, D.C. (1986). Trace Elements in the Terrestrial Environments, Biogeochemistry, bioavailability and risks of heavy metals. Editorial Springer-Verlag, New York. 1st ed. <https://books.google.co.cr/books?id=H17Tw8NujfYC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Adriano, D.C. (2001). Trace Elements in the Terrestrial Environments, Biogeochemistry, bioavailability and risks of heavy metals. Editorial Springer-Verlag, Nueva York. 2nd ed.
- Aguirre, K. (2020). Estudio del contenido del cadmio (Cd) en el cultivo de cacao. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Piura]. Repositorio UNP. <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/2485>
- Alcalde, P., Béjar, F., Quesquén, M., Torres, M. (2017). Impacto de las exportaciones en el Perú, de no ceñirse a la modificación del Reglamento Europeo N° 488/2014, que establece límites de cadmio para el chocolate y el cacao en polvo, apto para el consumo al por menor. [Proyecto de investigación, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/621771>
- Arévalo, E., Zúñiga, L., Arévalo, C., Adriaola, J. (2004). Cacao: Manejo integrado del cultivo y transferencia de tecnología en la Amazonía peruana. Instituto de Cultivos Tropicales, San Martín, Perú, 184 p. https://books.google.com.pe/books/about/Cacao.html?id=IVIXGwAACAAJ&redir_esc=y
- Argüello, D., Chávez, E., Lauryssen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans : A nationwide survey in Ecuador. Science of the Total Environment, 649: 120–127 p.
- Arthur, E., Rice, P., Rice, P., Anderson, T., Baladi, S., Henderson, K., Coats, J. (2005). Phytoremediation: an overview. Critical Reviews in Plant Sciences. 24(2): 109-122 p.
- Avelino, C. (2013). Eficacia de la fitoextracción para la remediación de suelos contaminados en Villa de Pasco. [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio UNAC. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/459>

- Baker, A.J.M., Brooks, R.R. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements-a review of their distribution, ecology and phytochemistry. https://www.researchgate.net/publication/247713966_Terrestrial_Higher_Plants_Which_Hyperaccumulate_Metallic_Elements_A_Review_of_Their_Distribution_E
- Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 229: 950–963 p.
- Barrientos, P., Cortez, G., Macines, R., R., Sanabria, C., Lama, A., Huamaní, C., Rodríguez, N. (2014). La producción de cacao y su efecto en la comercialización internacional, (Ponencia). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, XVII Seminario Taller de Investigación Económica, Lima, Perú. 28 p. https://economia.unmsm.edu.pe/org/arch_doc/PBarrientosF/publ/ProduccionCacaoEfecto-CI.pdf
- Beltrán, M. (2001). Fitoextracción en suelos contaminados con Cadmio y Zinc usando especies vegetales comestibles. [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma Metropolitana]. Repositorio UAM. <https://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/185/Fitoextraccion%20en%20suelos%20contaminados.pdf?sequence=1>
- Benavides, M., Gallego, S., Tomaro, M. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Braz, J, Plant, Physiol*, 17(1): 21 – 34 p.
- Benzing, A. (2001). Agricultura orgánica: Fundamentos para la Región Andina. Neekar – Verlag, Postfach, Alemania. 682 p.
- Bhatia, M., Goyal, D. (2014). Analyzing remediation potential of wastewater through wetland plants: a review. *Environ, Prog, Sustain, Energy* 33 (1): 9–27 p.
- Cala, V., Rodríguez, J., Guerra, Y.A. (1985). Contaminación de metales pesados en suelos de la Vega de Aranjuez, (I) Pb, Cd, Cu, Zn, Ni y Cr. *Anal, Edaf, Agrobiol.* 32: 1595-1608 p.
- Cárdenas, A. (2012). Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico en la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo - Tingo María – Perú. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/153>

- Chávez, E, He, Z.L., Stoffella, P.J., Mylavarapu, R.S., Li, Y.G., Moyano, B., Bagilar, V.C. (2015). Concentration of cadmium in cocoa beans and its relationship with soil cadmium in Southern Ecuador, *Sci. Total Environ*, 533: 205-214 p.
- Chin, L. (2007). Investigations into Lead (Pb) Accumulation in *Symphytum officinale* L.: A Phytoremediation Study. [Tesis doctoral, University of Canterbury]. https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/2592/thesis_fulltext.pdf?sequence=1
- CODEX (2014). Norma para el cacao en pasta (licor de cacao/chocolate) y torta de cacao. CODEX STAN 141-1983. Rev. 1-2001 p.
- Condezo, O. (2011). Polifenoles totales, antocianinas y actividad antioxidante, (DPPH y peroxilo) en granos de cacao (*Theobroma cacao*) comercial en Tingo María y Tocache. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio CONCYTEC. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNAS_fdb229f4f1f177eeb98fd28bfe0dee41
- CONSUMER (2001). Metales pesados, toda una amenaza. *Consumer Digital* 34, Barcelona, España. <https://revista.consumer.es/portada/toda-una-amenaza.html>
- Contreras, F., Herrera, T., Izquierdo, A. (2002). Efecto de dos fuentes de carbonato de calcio (CaCO₃) sobre la disponibilidad de cadmio para plantas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en suelos de Barlovento, Estado Miranda. *Venezuelos* N° 13: 52-63 p. http://190.169.30.98/ojs/index.php/rev_venes/article/view/979
- Deng, H., Ye, Z., Wong, M. (2004). Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China. *Environmental pollution*, 132(1), 29-40 p.
- Díez, L. F. (2008). Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas, Santiago de Compostela: Universidade, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, ISBN 978-84-9887-202-6. <https://minerva.usc.es/xmlui/handle/10347/2540>
- Dos Santos, V., Varón, J., Fonsêca, C., Lopes, P., Siqueira, J., De Souza, F. (2016). Biological attributes of rehabilitated soils contaminated with heavy metals. *Environmental Science and Pollution Research* 23: 6735-6748 p.

- Dwivedi, S.K., Swarup, D., Dey, S. (2011). Lead poisoning in cattle and buffalo near primary leadzinc smelter in India. *Veterinary Toxicol*, 2(1): 74-75 p.
https://www.researchgate.net/publication/12026719_Lead_poisoning_in_cattle_and_buffalo_near_primary_lead-zinc_smelter_in_India
- European Food Safety Authority. (2011). Cadmium in food: Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. *EFSA Journal*, 9(2): 19 p.
<https://www.efsa.europa.eu/es/efsajournal/pub/980>
- Fichet, D., Boucher, G., Radenac, G., Miramand, P. (1999). Concentration and mobilisation of Cd, Cu, Pb and Zn by meiofauna populations living in harbour sediment: their role in the heavy metal flux from sediment to food. *Sci, Total, Environ*: 243/244: 263-272 p.
- Fincheira, P., Martínez, M., Ortega, R., Janssens, M., Parada, M. (2018). Soil quality indicators in table grape (*Vitis vinifera* cv, Thompson seedless) crops under integral nutrition management. *Scientia Agropecuaria* 9(2): 17-24 p,
<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20193359604>
- Fitz, W.J., Wenzel, W.W. (2002). Arsenic transformation in the soil–rhizosphere– plant system, fundamentals and potential application of phytoremediation. Vol. 99: 259-278 p.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168165602002183>
- Furcal, P., Torres, J. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 33(1): 122-137 p.
- García, I., Dorronsoro, C. (2005). Contaminación por metales pesados. En: *Tecnología de Suelos*, Universidad de Granada. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema15/introd.htm>
- García, J., Méndez, J., Pásaro, E., Laffon, B. (2012). Genotoxic effects of lead: An updated review. *Environment International*, 2(4): 623–636 p,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20466424/>
- Godbold, D.L., Hüttermann, A. (1985). Effect of zinc, cadmium and mercury on root elongation of *Picea abies* (Karst.) seedlings, and the significance of these metals to forest die-back. *Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological*. 38(4): 375-81 p.
- Gomero, L., Velásquez, H. (1999). *Manejo Ecológico de Suelos*. Edición RAA. Lima- Perú. 230 p.

- González, M., Carrillo, R., Sánchez, A. (2017). Definiciones y problemática en la investigación científica en aspectos de fitoremediación de suelos. *Agroproductividad*. 10(4): 3-7p, <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/987/845>
- Gottlieb, S. (1998). Sustained fall in UK blood lead levels reported, *Brit Med J* 317: 99 p,
- Gracia, J. (2012). Efectos de los compost sobre las propiedades del suelo: suelo evaluación comparativa de compost con separación en origen y sin separación en origen. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio UPCT. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/3123>
- Guerrini, A.C. (2008). Biotechnology and sustainable development. *Estud Avançados*. 24:7-17 p. https://www.panna.org/sites/default/files/GMOBriefFINAL_2.pdf
- Gutiérrez, E., León, C. (2017). Investigación en Cadmio en Colombia: Cadena de cacao. CORPOICA, FEDECACAO, MINAGRICULTURA, Taller Científico Internacional sobre Metales Pesados en Cacao. Lima Julio 17 a 21 de 2017. Ministerio de Agricultura y Riego de Perú, Organización Internacional del Cacao (ICCO).
- Han, F., Banin, A., Kingery, W., Triplett, G., Zhou, L., Zheng, S., Ding, W. (2003). New approach to studies of heavy metal redistribution in soil. *Advances in Environmental Research*. 8(1): 113-120 p. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1093019102001429>
- Hardman, J.G., Limbrid, L.E., Molinoff, P.B., Ruddon, R., Goodman, A., Gilman, A. (2011). *The Pharmacological Basis of Therapeutics*. Edit. Mc Graw-Hill. Nueva York (USA). 9nd edición, 532 p
- Hernández, S. (2004). *Metodología de la investigación científica*. 3ra ed. México D.F. Mc Graw-Hill. 706 p.
- Herrera, T. (2000). La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. *Universidad Central de Venezuela*. Venesuelos N° 8: 42-47 p. https://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/1112
- Herrera, T. 2011. La Contaminación Con Cadmio en Suelos Agrícolas. *Venesuelos* N° 8: (1 y 2): 42–47 p.

- Holdridge, L. (1982). Ecología basada en zonas de vida, Centro Tropical de Investigación y Enseñanza, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura – IICA, San José, Costa Rica
- Huamaní, H., Huauya, M., Mansilla, L., Florida, N., Neira, G. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. Acta agronómica. 61 (4): 339 – 344 p. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-28122012000400006&lng=e&nrm=iso&tlng=es
- Huaynates, J. (2013). Efecto de la materia orgánica en la absorción de cadmio por el suelo, en la localidad de Supte. Tesis [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio UNAS. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/451>
- INTAGRI. (2017). Fijación de Potasio en el Suelo. Serie Suelos Núm. 31. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 3 p. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/fijacion-de-potasio-en-el-suelo>
- Jacobo, S., Gonzales, F., Pérez, E., Rojas, R. (2013). Fundamentos teóricos y metodológicos para la investigación científica en ciencias agrarias. Mercurio Marketing, Publicidad & Negocios. Huánuco, Perú. 209 p.
- Jiménez, M.; Granados, L.; Oliva, J.; Quiróz, J., Barrón, M. (2010). Calidad nutritiva de *Brachiaria humidicola* con fertilización orgánica e inorgánica en suelos ácidos. Arch. Zootec. 59 (228): 561-570.
- Kabata, A. (1995). Agricultural problems related to excessive trace metal contents of soils. En: W, Salomons, U, Förstner and P, Mader, (eds.). Heavy metals, problems and solutions. Springer-Verlag. 3–18 p.
- Kabata, A. (2004). Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue. Geoderma.122: 143-149 p. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.004>
- Kabata, A., Pendias, H. (2000). Trace elements in soils and plants. 3th Edition. CRC Press, Boca Raton, EE.UU. 413 p. <http://base.dnsgb.com.ua/files/book/Agriculture/Soil/Trace-Elements-in-Soils-and-Plants.pdf>
- Kumar, N., Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, I. (1995). Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. Environmental Science & Technology, 29:(5), 1232-1238, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es00005a014>

- Lanphear, B.P., Dietrich, K.N., Auinger, P.C. (2000). Cognitive deficits associated with blood lead concentration $<10 \mu\text{g/dL}$ in: U.S. children and adolescents. *Pub Health*, 4(1): 521-529 p. <https://www.jstor.org/stable/4598586>
- Laperche, V., Logan, T.J., Gaddam, P., Traina, S.J. (1997). Effect of apatite amendment on plant uptake of Pb from contaminated soil. *Environmental Science Technology*. 31:2745-2753 p. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es961011o>
- Lasat, M. M. (2000). *The use of Plants for the Removal of Toxic Metals From Contaminated Soils*.
- Londoño, L., Londoño, P., Muñoz, F. (2016). Risk of heavy metals in human and animal health. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 14(2): 145-153 p.
- López, Y.M., Cunias, M.Y., Carrasco, Y.L. (2020). El cacao peruano y su impacto en la economía nacional. *Revista Universidad y Sociedad*. 12(3): 344-352 p. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v12n3/2218-3620-rus-12-03-344.pdf>
- Lösch, R., (2004). Plant mitochondrial respiration under the influence of heavy metals. In: *Heavy Metal Stress in Plants*, Springer: 182-200 p. <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.springer-2b6c3d07-80bd-3998-9efb-4960f80fd01e>
- Lux, A., Martinka, M., Vaculík, M., White, P.J. (2010). Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. *Journal of experimental botany*. 62(1): 21-37 p. <https://academic.oup.com/jxb/article/62/1/21/514644>
- Magnusson, B., Örnemark, U. (2014). *The Fitness for Purpose of Analytical Methods – A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics*. Eurachem Guide, 2nd ed., ISBN 978-91-87461-59-0. https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV_guide_2nd_ed_EN.pdf
- Martínez, A., Pérez, E., Pinto, J., Gurrola, B., Osorio, A. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(3), 241-252 p. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000300009&lng=es&tlng=es

- McLaughlin, M. (2016). Heavy metals in agriculture with a focus on Cd. Ecuador Soil Congress, CSIRO Land and Water. Fertilizer Technology Research Centre, Waite Research Institute, University of Adelaide. 55 p.
<https://sciences.adelaide.edu.au/fertiliser/system/files/media/documents/2020-01/pres-heavy-metals-in-agriculture-with-a-focus-on-cadmium-ecuador.pdf>
- McLean, J., Bledsoe, B. (1992). Behavior of metals in soils. Environmental Protection Agency. 18: 1-25 p. <https://www.semanticscholar.org/paper/Behavior-of-metals-in-soils-Bledsoe-McLean/f0f1e95e43c8f97af9ee66a0bd7edec072cba9c2>
- Medina, K., Montano, Y. (2014). Determinación del factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en el *Juncus arcticus* Willd. y *Cortaderia rudiusscula* Stapf, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero Alianza - Ancash 2013. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio UPC.
<http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1775>
- Meers, E. (2005). Phytoextraction of heavy metals from contaminated dredged sediments, Ph.D. Thesis. Ghent University. Ghent, Bélgica, 345 p.
https://www.researchgate.net/publication/292609592_Phytoextraction_of_heavy_metals_from_contaminated_dredged_sediments
- Meers, E., Tack, F. (2004). The potential of foliar treatments for enhanced phytoextraction of heavy metals from contaminated soil. Wiley Interscience.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/rem.20025>
- Mendieta, C., Taisigüe, K. (2014). Acumulación y translocación de metales, metaloides y no metales en plantas nativas de la zona minera de Chontales: implicaciones para el potencial de fito-remediación. APPEAR, Managua, 2(1): 19-31 p.
https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/methods/Accumulation-and-Translocation-metals-in-native-plants_Extended-abstract.pdf
- Mendoza, D.G., Butko, E., Springer, F., Torpey, J.W., Komives, E.A., Kehr, J.K., Schroeder, J. (2008). Identification of high levels of phytochelatins, glutathione and cadmium in the phloem sap of *Brassica napus*, A role for thiol-peptides in the long-distance transport of cadmium and the effect of cadmium on iron translocation. The Plant. 54(2): 249-59 p.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18208526/>

- Mendoza, D.G., Jobe, T.O., Hauser, F., Schroeder, J. (2011). Long-distance transport, vacuolar sequestration, tolerance, and transcriptional responses induced by cadmium and arsenic. *Current Opinion in Plant Biology*. 14(5): 554-62 p. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21820943/>
- Meter, A., Atkinson, R., Laliberte, B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe. Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación. *Bioversity International* 2019, Roma. 84 p. https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1505/Cadmio_en_el_cacao_de_America_Latina_y_el_Caribe.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Micó, C. (2005). Estudio de metales pesados en suelos agrícolas con cultivos hortícolas de la provincia de Alicante. Tesis de doctorado, Universidad de Valencia. Valencia, España, 508 p. <https://www.tesisenred.net/handle/10803/9503?show=full>
- Ministerio de la Agricultura y Riego – MINAGRI. (2019). Observatorio Commodities: Cacao. Dirección de Estudios Económicos e Información Agraria, Dirección General de Políticas Agrarias. Lima, Perú, https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/440890/commodities_cacao_marzo2019.pdf
- Ministerio del Ambiente – MINAM. (2017). Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el Suelo. Decreto Supremo N°011-2017-MINAM, Normas Legales 491497. El Peruano. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-011-2017-minam/>
- Mysliwa, B., Prasad, M.N.V., Strzaltka, K. (2004). Photosynthesis in Heavy Metal Stressed Plants, In: Prasad MNV, editor, *Heavy Metal Stress in Plants: From Biomolecules to Ecosystems*, Berlin, Heidelberg: Springer: 146-181 p. https://www.researchgate.net/publication/289128171_Photosynthesis_in_Heavy_Metal_Stressed_Plants
- NATURLAND (2000). *Agricultura Orgánica en el Trópico y Subtrópico. Guía de 18 cultivos, Cacao*, 1ra Edición, Alemania, 24 p. <http://www.naturland.de>
- Noriega, B. (2016). Identificación de especies vegetales asociadas a jales del distrito minero de Guanajuato. *IEEG – Guanajuato*. 26(2): 71-77 p.

- Oc, W., Gonza, C., Guzmán, W., Pariente, E. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao*) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 33 (1): 63 – 75 p. https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/view/1156/pdf_29
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO. (2018). FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO. (s.f.). Suelos ácidos. Portal de Suelos de la FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-acidos/es/>
- Organización Mundial de la Salud – OMS. (1987). Food standards programme; Codex alimentarius commission. 20 ed. Geneva 123 p.
- Ósteras, A., Greger, M. (2006). Interactions between calcium and copper or cadmium in Norway spruce. *Biología Plantarum*. 50: 64 7652 p. https://www.researchgate.net/publication/225136233_Interactions_between_calcium_and_copper_or_cadmium_in_Norway_spruce
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V., Toro, L. (2004). Sequential Extraction of Heavy Metals in River Sediments of an Abandoned Pyrite Mining Area: Pollution Detection and Affinity Series. *Environmental Pollution* 132:189-201 p. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749104001861>
- Pérez, C., Martínez, M.J., García, M.L., Bech, J. (2008). Uptake of Cd and Pb by natural vegetation in soils polluted by minning activities. *Fresenius Environmental Bulletin*. 17: 1666-1671 p. https://www.researchgate.net/publication/260594147_Uptake_of_Cd_and_Pb_by_natural_vegetation_in_soils_polluted_by_mining_activities
- Peris, M.M. (2006). Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellón (España). [Tesis doctoral, Universidad de Valencia]. Repositorio UV. <https://roderic.uv.es/handle/10550/15104>
- Pilon, E. (2005). Phytoremediation, *Annual Review of Plant Biology*. Biol. 56:15-39 p. <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>
- Prieto, J., González, C., Román, A., Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelo y agua. *Tropical and Subtropical*

Agroecosystems. Yucatán, 10(1): 29-44 p.
<https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente – PNUMA. (2008). Interim Review of Scientific Information on Cadmium. Geneva: United Nations Environment Program.

Rahman, M.A., Hasegawa, H. (2011). Aquatic arsenic: phytoremediation using floating macrophytes. Chemosphere. 83 (1): 633–646 p.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653511001913>

Rodríguez, J.A., López, M., Grau, J.M. (2009). Metales pesados, materia orgánica y otros parámetros de los suelos agrícolas y pastos de España. Ministerio de Economía y Competitividad, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), ISBN 978-84-491-0980-5, Madrid, España.

Rodríguez, M. (1991). Fisiología Vegetal. Editorial Los Amigos del Libro. Cochabamba – La Paz. 187 - 191 ,343 p.

Romero, K. (2009). Contaminación por metales pesados. Revista Científica Ciencia Médica, 12(1): 45-46 p. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1817-74332009000100013

Rossi, G., Figliolia, R., Socciairelli, S., Pennelli, B. (2002). Capability of *Brassica napus* to accumulate Cadmium, Zinc and Copper from soils. Act Biotechnol. Vol. 22: 1-2, 133-140 p.

Rubio, C. (2002). Ingesta dietética de contaminantes metálicos (Hg, Pb, Cd, Fe, Cu, Zn y Mn) en la Comunidad Autónoma Canaria, Evaluación toxicológica. Universidad de la Laguna. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/10794>

Sánchez, G. (2016). Ecotoxicología del cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. Trabajo de fin de grado, Universidad Complutense. 23 p. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/50902/>

Sánchez, I. (2003). Determinación de metales pesados en suelos de Medina del Campo (Valladolid): contenidos extraíbles, niveles de fondo y de referencia. Biblioteca virtual Miguel de Cervantes. 275 p. <http://www.cervantesvirtual.com/obra/determinacion-de-metales-pesados-en-suelos-de-medina-del-campo-valladolid-contenidos-extraibles-niveles-fondo-y-de-referencia--0/>

- Sánchez, V., Zambrano, J.L., Iglesias, C. (2019). La cadena de calor del cacao en América Latina y el Caribe. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, FONTAGRO, Quito, Ecuador, 104 p.
https://www.fontagro.org/new/uploads/adjuntos/Informe_CACAO_linea_base.pdf
- Sauquillo, A., Rigol, A., Rauret, G. (2003). Overview of the use of Leaching Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments. *Trends in Analytical Chemistry*. 22: 152-159 p.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165993603003030>
- Schwab, A.P., Zhu, D.S., Banks, M.K. (2008). Influence of organic acids on the transport of heavy metals in soil. *Chemosphere*. 72: 986–994 p.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18482743/>
- Seregin, I.V., Ivanov, V.B. (1997). Is the endodermal barrier the only factor preventing the inhibition of root branching by heavy metal salts? *Russian Journal of Plant Physiology*, 44(6):797-800 p.
- Shahid, M., Pinelli, E., Dumat, C. (2012). Review of Pb availability and toxicity to plants in relation with metal speciation; role of synthetic and natural organic ligands. *Journal of Hazardous Materials*, 219-220: 1–12 p.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438941200091X>
- Sharma, S., Singh, B., Manchanda, V.K. (2015). Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water. *Environ, Sci, Pollut, Res*. 22 (1): 946–962 p.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-014-3635-8>
- Sik Ok, Y., Usman, A., Lee, S., Abd, S., Choi, B., Hashimoti, Y., Yang, J. (2011). Effects of rapeseed residue on lead and cadmium availability and uptake by rice plants in heavy metal contaminated paddy soil. *Chemosphere*, 85: 677–682 p.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653511007314>
- Song, Y., Jin, L., Wang, X. (2017). Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International journal of phytoremediation*. 19(2):133-41 p.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27409403/>

- Tseng, C. (2008). The Effects of Photosynthetic Bacteria and Mycorrhizae on Phytoremediation for Soils Contaminated by Heavy Metals (Cd, Cu, Pb and Zn). National Sun Yat-sen University, Ph.D. Thesis. Kaohsiung, Taiwan. 242 p. https://clu-in.org/meetings/phyto2009/presentations/2-C/Lei_Yang_Effects_of_Phytosynthetic_Bacteria.pdf
- Unión Europea – UE. (2021). Reglamento (UE) 2021/1323 de la comisión, que modifica el Reglamento (CE) N° 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en determinados productos alimenticios. Diario Oficial de la Unión Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1323&from=EN>
- Valipour, A., Ahn, Y.H. (2016). Constructed wetlands as sustainable ecotechnologies in decentralization practices: a review. *Environ, Sci, Pollut, Res.* 23 (1): 180–197 p. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-015-5713-y>
- Vijayaraghavan, K., Balasubramanian, R. (2015). Is biosorption suitable for decontamination of metalbearing wastewaters? A critical review on the state-of-the-art of biosorption processes and future directions. *J. Environ, Manage,* 160 (1): 283–296 p. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26143501/>
- Volke, T., Velasco, A. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología, Ciudad de México. México, 62 p, <http://www.ecopuerto.com/Bicentenario/informes/TecnologiasRemediacion.pdf>
- Wong, M.H. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* Vol. N° 50: 775-780 p. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653502002321>
- Yakabi, K. (2014). Estudio de las propiedades edáficas que determinan la fertilidad del suelo en el sistema de andenería de la comunidad campesina San Pedro de Laraos, provincia de Huarochirí, Lima. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/5836>
- Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., Ma, L. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the total environment.* 368(2): 456-464 p. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969706000945>

Zhang, Q., Yu, R., Fu, S., Wu, Z., Chen, H.Y.H., Liu, H. (2019). Spatial heterogeneity of heavy metal contamination in soils and plants in Hefei, China. *Scientific Reports* 9(1): 1–8 p.
https://www.researchgate.net/publication/330759808_Spatial_heterogeneity_of_heavy_metal_contamination_in_soils_and_plants_in_Hefei_China

ANEXOS

Anexo 1. Datos obtenidos en las evaluaciones

Tabla 12. Datos generales del análisis de laboratorio realizado a las especies vegetales en estudio

DATOS DE LA MUESTRA					ANÁLISIS PROXIMAL					RESULTADOS EN BASE SECA										
					Humedad (%)	EN BASE HUMEDA		EN BASE SECA		PORCENTAJE (%)				PARTES POR MILLON (ppm)						
Código de muestra	Trat.	Rep.	Especie	Parte		MATERIA SECA		Materia orgánica (%)	Cenizas (%)	Materia orgánica (%)	Cenizas (%)	Ca	Mg	K	Na	Pb	Cd	Cu	Fe	Zn	Mn
1086	T1	R1	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Aérea	4.64	86.63	8.73	90.84	9.16	1.18	0.81	12.26	3.77	8.48	1.52	13	214	12	105	
1085	T1	R2	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Aérea	4.31	85.93	9.76	89.8	10.2	1.24	0.67	14.99	3.91	8.99	1.51	8	2	155	73	
1087	T1	R3	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Aérea	4.65	84.96	10.37	89.13	10.87	1.27	0.69	16.34	5.11	11.49	1.52	18	139	14	101	
1116	T1	R1	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Raíz	14.5	76.43	9.08	89.39	10.61	0.44	1.9	2.92	4.98	2.49	1.69	25	166	66	205	
1115	T1	R2	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Raíz	14.88	76.5	8.62	89.87	10.13	1.13	6.08	11.45	10.37	14.36	3.26	52	343	198	301	
1117	T1	R3	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Raíz	14.93	75.54	9.52	88.8	11.2	0.94	5.24	9.39	8.4	7.51	4.27	134	507	200	354	
1088	T2	R1	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	5	88.3	6.7	92.95	7.05	0.44	0.18	0.93	2.65	1.5	1.52	9	239	2	21	
1090	T2	R2	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	6.33	87.39	6.28	93.3	6.7	0.34	0.07	9.05	4.01	5.49	1.54	22	99	23	247	
1089	T2	R3	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	4.91	86.9	8.19	91.39	8.61	0.82	0.85	0.89	2.51	1	1.52	0	3	1	5	
1118	T2	R1	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	13.17	79.41	7.43	91.45	8.55	0.74	4.22	6.08	5.82	7.54	2.8	20	288	37	257	
1120	T2	R2	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	11.99	82.16	5.85	93.35	6.65	0.67	3.57	11.88	6.98	3.02	2.49	10	39	21	191	
1119	T2	R3	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	12.27	80.47	7.27	91.72	8.28	1.28	4.67	11.66	10.85	8.22	5.43	10	1966	12	178	
1106	T3	R1	<i>Pavonia fruticosa</i>	Aérea	2.94	85.83	11.23	88.43	11.57	0.69	4.51	38.7	6.56	20.52	1.98	66	1062	67	393	
1105	T3	R2	<i>Pavonia fruticosa</i>	Aérea	5.47	80.38	14.15	85.03	14.97	2.35	3.07	57.27	7.06	23.28	2.04	49	509	29	338	
1104	T3	R3	<i>Pavonia fruticosa</i>	Aérea	2.31	86.39	11.29	88.44	11.56	1.24	2.63	11.7	3.89	9.98	1.48	15	115	18	204	
1137	T3	R1	<i>Pavonia fruticosa</i>	Raíz	11.52	67.53	20.95	76.33	23.67	0.46	1.85	12.43	6.77	19.63	1.84	16	264	69	395	

1136	T3	R2	<i>Pavonia fruticosa</i>	Raíz	13.72	72.96	13.31	84.57	15.43	0.45	1.73	24.2	5.66	6.97	1.67	11	274	33	253
1135	T3	R3	<i>Pavonia fruticosa</i>	Raíz	12	68.63	19.37	77.99	22.01	0.45	2.1	9.87	5.2	6.34	1.61	16	175	44	341
1111	T4	R1	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	11	82.33	6.67	92.51	7.49	0.6	2.76	7.16	4.23	5.48	1.62	11	68	20	211
1110	T4	R2	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	8.89	84.73	6.38	93	7	0.59	1.67	10.11	4.98	5.97	1.58	9	158	20	241
1107	T4	R3	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	3.96	89.89	6.16	93.59	6.41	0.5	2.33	7.63	3.19	5.49	1.51	13	174	21	242
1112	T4	R1	<i>Pavonia fruticosa</i>	Aérea	13.65	74.81	11.53	86.64	13.36	1.09	5.17	41.76	8.88	19.54	2.62	31	319	30	356
1109	T4	R2	<i>Pavonia fruticosa</i>	Aérea	10.8	77.8	11.4	87.22	12.78	0.63	2.95	24.36	3.85	10.98	1.62	14	50	24	199
1108	T4	R3	<i>Pavonia fruticosa</i>	Aérea	4.61	84.03	11.35	88.1	11.9	0.79	5.07	57.56	5.08	25.22	2.02	38	481	30	
1143	T4	R1	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	13.04	79.87	7.09	91.85	8.15	0.56	3.23	10.07	8.39	4.7	2.24	29	49	22	262
1142	T4	R2	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	12.11	79	8.89	89.88	10.12	0.82	3.29	5.82	12.02	2.45	4.04	1	10	23	221
1139	T4	R3	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	12.38	80.73	6.89	92.13	7.87	0.97	7.1	8.36	13.25	9.19	4.35	18	70	19	244
1144	T4	R1	<i>Pavonia fruticosa</i>	Raíz	11.41	75.82	12.77	85.59	14.41	0.87	3.38	8.2	10.75	10.52	3.83	15	76	23	365
1141	T4	R2	<i>Pavonia fruticosa</i>	Raíz	12.29	68.35	19.36	77.92	22.08	0.52	3.15	18.52	6.03	17.95	1.98	26	1689	89	512
1140	T4	R3	<i>Pavonia fruticosa</i>	Raíz	11.21	70.48	18.31	79.38	20.62	0.43	2.54	10.16	4.03	13.92	1.62	14	1522	38	357
1096	T5	R1	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Aérea	5.23	85.59	9.18	90.31	9.69	1.23	0.7	7.74	5.64	8.49	1.53	10	2	5	97
1098	T5	R2	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Aérea	3.65	87.32	9.03	90.63	9.37	1.28	0.74	9.56	4.32	7.98	1.5	14	126	11	104
1093	T5	R3	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Aérea	2.42	87.98	9.6	90.17	9.83	1.29	0.87	10.75	4.5	9.47	1.48	17	156	14	59
1094	T5	R1	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	5.29	89	5.71	93.97	6.03	0.79	0.77	5.9	3.89	4.49	1.53	12	222	15	200
1097	T5	R2	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	6.1	87.66	6.24	93.35	6.65	0.84	0.9	5.14	4.17	3.99	1.54	14	32	13	240
1092	T5	R3	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	4.31	89.36	6.33	93.39	6.61	0.87	0.75	8.76	4.93	7.49	1.51	8	566	21	234
1124	T5	R1	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	13.63	78.98	7.39	91.45	8.55	3.05	4.13	10.51	26.76	10.07	11.28	29	191	28	239
1128	T5	R2	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	14.26	80.09	5.64	93.42	6.58	1.07	4.39	5.49	8.5	3.51	3.96	15	66	17	163
1122	T5	R3	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	12.13	80.88	6.99	92.04	7.96	1.6	8.14	64.9	13.7	30.7	3.99	49	853	36	489
1126	T5	R1	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Raíz	14.75	72.67	12.59	85.24	14.76	0.91	4.61	8.02	15.31	6.91	3.36	46	661	99	372
1129	T5	R2	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Raíz	11.47	76.52	12.01	86.43	13.57	0.77	3.35	6.84	9.42	7.78	2.32	52	473	109	443
1123	T5	R3	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Raíz	12.82	76.75	10.44	88.03	11.97	1.02	4.61	7.11	11.12	5.9	3.27	52	492	77	447

1102	T6	R1	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Aérea	3.68	86.82	9.5	90.14	9.86	1.24	0.7	11.53	3.45	10.49	1.5	16	66	14	124
1101	T6	R2	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Aérea	3.16	87.69	9.15	90.56	9.44	1.34	0.84	8.42	3.31	7.98	1.49	16	1	9	115
1095	T6	R3	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Aérea	3.65	88.7	7.66	92.05	7.95	1.22	0.82	7.29	5.04	9.47	1.5	12	119	11	86
1113	T6	R1	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	11.91	82.45	5.63	93.6	6.4	0.51	2.52	6.44	5.09	6.49	1.64	10	14	11	180
1091	T6	R2	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	5.86	88.68	5.46	94.2	5.8	0.72	0.07	6.96	3.34	9.99	1.54	10	414	17	203
1100	T6	R3	<i>Theobroma cacao</i>	Aérea	4.8	89.48	5.71	94	6	0.75	0.83	7.49	4.04	4	1.52	10	44	21	181
1114	T6	R1	<i>Pavonia fruticosa</i>	Aérea	14.73	75.6	9.68	88.65	11.35	0.7	3.03	4.68	5.13	4.59	2.6	9	2424	11	179
1099	T6	R2	<i>Pavonia fruticosa</i>	Aérea	5.82	83.7	10.48	88.88	11.12	2.34	2.27	31.08	10.32	1.49	3.05	32	87	25	338
1103	T6	R3	<i>Pavonia fruticosa</i>	Aérea	6	82.23	11.78	87.47	12.53	3.28	2.34	46.68	15.93	17.87	6.13	161	800	21	265
1146	T6	R1	<i>Pavonia fruticosa</i>	Raíz	12.92	73.83	13.25	84.78	15.22	1.04	5.09	30.11	10.21	8.73	3.23	2	1	26	457
1134	T6	R2	<i>Pavonia fruticosa</i>	Raíz	13.51	70.82	15.67	81.89	18.11	0.96	3.78	31.75	9.29	19.73	3.01	24	776	43	485
1132	T6	R3	<i>Pavonia fruticosa</i>	Raíz	13.4	58.92	27.68	68.04	31.96	1.02	3.81	12.9	9.69	16.02	3.83	33	787	43	572
1133	T6	R1	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Raíz	11.82	73.5	14.67	83.36	16.64	0.54	2.24	7.16	6.91	9.15	2.15	31	173	104	433
1131	T6	R2	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Raíz	11.63	68.18	20.19	77.15	22.85	0.89	4.79	11.24	10.6	12.11	3.31	54	2174	152	944
1125	T6	R3	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	Raíz	11.95	71.39	16.65	81.09	18.91	0.98	4.44	9.57	10.09	36.16	3.13	59	395	134	650
1145	T6	R1	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	11.84	77.26	10.9	87.64	12.36	0.91	4.4	18.6	10.71	13.97	3.53	18	131	28	444
1121	T6	R2	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	12.84	76.83	10.33	88.15	11.85	2.13	6.51	5.86	13.69	12.56	5.22	30	645	21	456
1130	T6	R3	<i>Theobroma cacao</i>	Raíz	13.39	75.34	11.27	86.98	13.02	2.41	8.32	11.15	19.53	6.21	10.4	34	236	419	439

Tabla 13. Datos generales del análisis de laboratorio realizado a los suelos de los sustratos

Trat.	Rep.	ANALISIS MECANICO				pH	M.O.	N	P	K	Cd	Pb	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg.						%	%	%			
		Arena	Arcilla	Limo	Textura									Ca	Mg	k	Na	Al	H				Bas. Camb	Ac. Camb	Sat. Al
		%	%	%																					
1	R1	33	24	43	Franco	5.64	1.62	0.07	5.52	81.92	2.11	2.36	9.86	7.45	1.78	0.22	0.41	...	...	100	0	0	
1	R2	39	18	43	Franco	5.5	1.53	0.07	5.43	86.01	2.09	2.2	10.1	7.62	1.86	0.23	0.39	...	...	100	0	0	
1	R3	35	18	47	Franco	5.57	1.66	0.07	5.61	86.96	2.12	2.4	10.02	7.52	1.9	0.22	0.38	...	...	100	0	0	
2	R1	35	24	41	Franco	5.51	1.87	0.08	5.61	89.46	1.91	2.36	12.35	9.78	1.92	0.27	0.38	...	...	100	0	0	
2	R2	35	24	41	Franco	5.54	1.7	0.08	5.52	88.96	1.92	2.16	11.86	9.29	1.87	0.26	0.44	...	...	100	0	0	
2	R3	35	24	41	Franco	5.53	1.62	0.07	5.24	94.46	1.9	2.16	11.98	9.39	1.94	0.25	0.39	...	...	100	0	0	
3	R1	37	22	41	Franco	5.56	2.13	0.1	6.65	100.46	1.98	3.2	12.67	9.81	2.1	0.32	0.44	...	...	100	0	0	
3	R2	41	22	37	Franco	5.51	2.21	0.1	6.46	123.95	1.96	3.16	12.93	9.97	2.13	0.35	0.48	...	...	100	0	0	
3	R3	39	22	39	Franco	5.59	2.04	0.09	6.74	104.45	2	3.12	12.87	9.96	2.16	0.29	0.46	...	...	100	0	0	
4	R1	33	24	43	Franco	5.55	2.1	0.09	5.61	87.96	2.2	2.44	12.26	9.86	1.95	0.16	0.29	...	...	100	0	0	
4	R2	33	24	43	Franco	5.5	2.3	0.1	5.52	92.96	2.17	2.4	11.85	9.53	1.88	0.17	0.27	...	...	100	0	0	
4	R3	35	24	41	Franco	5.54	2.13	0.1	5.8	88.87	2.08	2.24	11.81	9.48	1.89	0.17	0.27	...	...	100	0	0	
5	R1	35	22	43	Franco	5.65	1.79	0.08	6.27	64.97	2.23	2.48	11.77	9.41	1.9	0.22	0.23	...	...	100	0	0	
5	R2	33	22	45	Franco	5.8	1.87	0.08	6.55	70.97	2.2	2.52	12.28	9.87	1.94	0.2	0.27	..	..	100	0	0	
5	R3	33	22	45	Franco	5.87	1.96	0.09	6.92	69.97	2.24	2.52	12.05	9.69	1.93	0.21	0.23	..	..	100	0	0	
6	R1	35	22	43	Franco	5.66	1.79	0.08	6.08	82.46	2.27	2.48	11.25	9.15	1.86	0.14	0.11	...	...	100	0	0	
6	R2	33	22	45	Franco	5.69	1.83	0.08	6.36	81.46	2.26	2.56	11.71	9.49	1.98	0.13	0.11	...	...	100	0	0	
6	R3	35	22	43	Franco	5.7	1.84	0.08	6.64	85.46	2.27	2.48	10.91	8.85	1.82	0.14	0.11	...	...	100	0	0	

Tabla 14. Prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) para la concentración de cadmio (ppm) en la estructura vegetal de las especies en estudio a los 90 días de la siembra

Clave	Tratamientos *	Concentración de cadmio (ppm)	Sig. **
T ₃	Xanthosoma	3,54	a
T ₁	Pavonia	4,59	a
T ₂	Theobroma	5,10	a
T ₄	Theobroma+Xanthosoma	9,68	ab
T ₅	Theobroma+Pavonia	12,42	b
T ₆	Theobroma+Xanthosoma+Pavonia	19,59	c

*Los términos usados en el cuadro de los tratamientos corresponden al género taxonómico de las especies en prueba

**Los valores de las columnas representados por la misma letra no presentan diferencias significativas

Tabla 15. Prueba de Duncan ($\alpha=0,05$) para la concentración de cadmio (ppm) en el suelo de cada tratamiento en estudio a los 90 días de la siembra

Clave	Tratamientos *	Concentración de cadmio (ppm)	Sig. **
T ₂	Theobroma	1,91	a
T ₃	Xanthosoma	1,98	a
T ₁	Pavonia	2,11	b
T ₄	Theobroma+Xanthosoma	2,15	bc
T ₅	Theobroma+Pavonia	2,22	cd
T ₆	Theobroma+Xanthosoma+Pavonia	2,27	d

*Los términos usados en la descripción de los tratamientos corresponden al género taxonómico de las especies en prueba

**Los valores de las columnas representados por la misma letra no presentan diferencias significativas

Anexo 2. Panel fotográfico**Foto 1.** Vivero ubicado en las instalaciones del IIAP (Castillo Grande)**Foto 2.** Unidad experimental del T₁ (*Pavonia fruticosa*)



Foto 3. Unidad experimental del T₂ (*Theobroma cacao*)



Foto 4. Unidad experimental del T₃ (*Xanthosoma sagittifolium*)



Foto 4. Unidad experimental del T₄ (*T. cacao* + *X. sagittifolium*)



Foto 5. Unidad experimental del T₅ (*T. cacao* + *P. fruticosa*)



Foto 7. Unidad experimental del T₆ (*T. cacao* + *X. sagittifolium* + *P. fruticosa*)



Foto 8. Raíces para medir el cadmio en *Pavonia fruticosa*



Foto 6. Raíces para medir el cadmio en *Theobroma cacao*

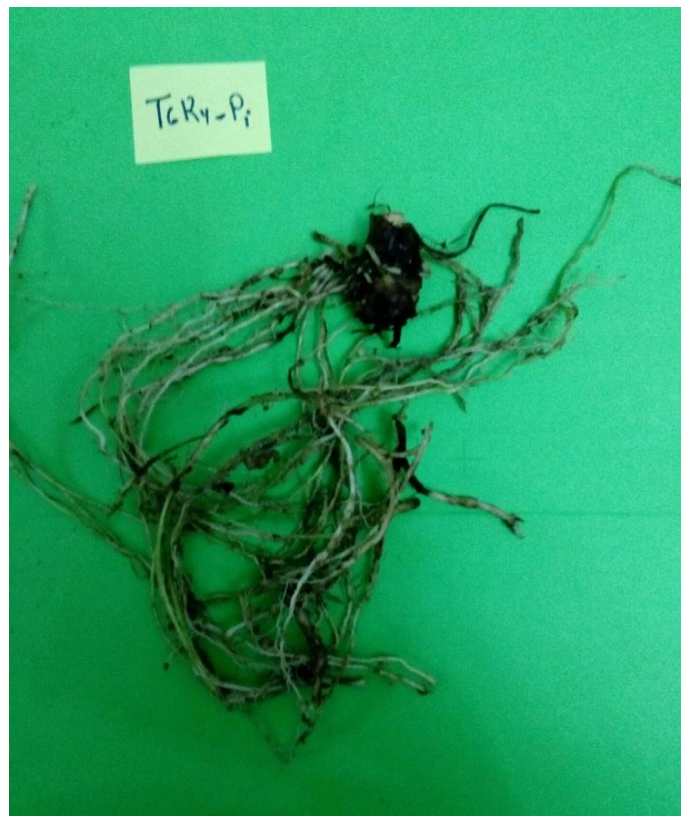


Foto 10. Raíces para medir el cadmio en *Xanthosoma sagittifolium*



Foto 11. Estructura vegetal aérea de *Pavonia fruticosa*

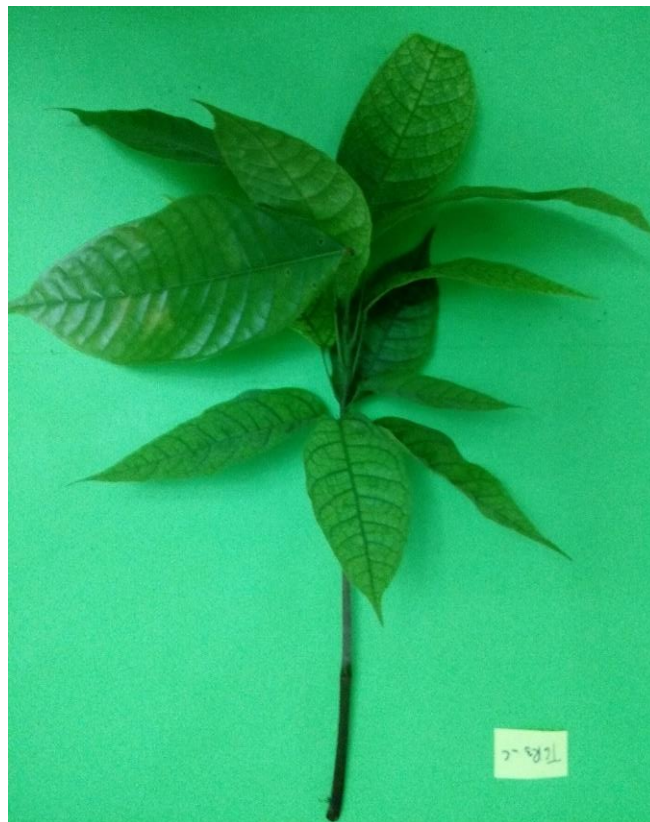


Foto 12. Estructura vegetal aérea de *Theobroma cacao*



Foto 13. Estructura vegetal aérea de *Xanthosoma sagittifolium*



Foto 7. Medición de variables biométricas

Anexo 3. Resultados de los análisis

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología
Carretera Central Km 1.21 - Celular 941531359
analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:					INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONIA PERUANA														
DATOS DE LA MUESTRA					ANALISIS PROXIMAL						RESULTADOS EN BASE SECA								
					Humedad Hd (%)	EN BASE HUMEDA		EN BASE SECA		PORCENTAJE (%)				PARTES POR MILLON (ppm)					
Código	Referencia			Materia Organica (%)		Cenizas (%)	Materia Organica (%)	Cenizas (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Pb ppm	Cd ppm	Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm	
1085	T1	R2		V	4.31	85.93	9.76	89.80	10.20	1.24	0.67	14.99	3.91	8.99	1.51	8	2	155	73
1086	T1	R1		V	4.64	86.63	8.73	90.84	9.16	1.18	0.81	12.26	3.77	8.48	1.52	13	214	12	105
1087	T1	R3		V	4.65	84.98	10.37	89.13	10.87	1.27	0.69	16.34	5.11	11.49	1.52	18	139	14	101
1088	T2	R1		V	5.00	88.30	6.70	92.95	7.05	0.44	0.18	0.93	2.65	1.50	1.52	9	239	2	21
1089	T2	R3		V	4.91	86.90	8.19	91.39	8.61	0.82	0.85	0.89	2.51	1.00	1.52	0	3	1	5
1090	T2	R2		V	6.33	87.39	6.28	93.30	6.70	0.34	0.07	9.05	4.01	5.49	1.54	22	99	23	247
1091	T6	R3	C	V	5.86	88.68	5.46	94.20	5.80	0.72	0.07	6.96	3.34	9.99	1.54	10	414	17	203
1092	T5	R4	C	V	4.31	89.36	6.33	93.39	6.61	0.87	0.75	8.76	4.93	7.49	1.51	8	566	21	234
1093	T5	R3	PE	V	2.42	87.98	9.60	90.17	9.83	1.29	0.87	10.75	4.50	9.47	1.48	17	156	14	59
1094	T5	R1	C	V	5.29	89.00	5.71	93.97	6.03	0.79	0.77	5.90	3.89	4.49	1.53	12	222	15	200
1095	T6	R4	Pe	V	3.65	88.70	7.66	92.05	7.95	1.22	0.82	7.29	5.04	9.47	1.50	12	119	11	86
1096	T5	R1	Pe	V	5.23	85.59	9.18	90.31	9.69	1.23	0.70	7.74	5.64	8.49	1.53	10	2	5	97
1097	T5	R3	C	V	6.10	87.66	6.24	93.35	6.65	0.84	0.90	5.14	4.17	3.99	1.54	14	32	13	240
1098	T5	R2	Pe	V	3.65	87.32	9.03	90.63	9.37	1.28	0.74	9.56	4.32	7.98	1.50	14	126	11	104
1099	T6	R4	Pi	V	5.82	83.70	10.48	88.88	11.12	2.34	2.27	31.08	10.32	1.49	3.05	32	87	25	338
1100	T6	R4	C	V	4.80	89.48	5.71	94.00	6.00	0.75	0.83	7.49	4.04	4.00	1.52	10	44	21	181

Ing. Luis G. Mansilla Minaya

Figura 15. Análisis de plantas (parte aérea y raíz)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología
Carretera Central Km 1.21 - Celular 941531359
analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:					INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONIA PERUANA														
DATOS DE LA MUESTRA					ANALISIS PROXIMAL						RESULTADOS EN BASE SECA								
					Humedad Hd (%)	EN BASE HUMEDA		EN BASE SECA		PORCENTAJE (%)				PARTES POR MILLON (ppm)					
Código	Referencia			Materia Organica (%)		Cenizas (%)	Materia Organica (%)	Cenizas (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Pb ppm	Cd ppm	Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm	
1101	T6	R3	Pe	V	3.16	87.69	9.15	90.56	9.44	1.34	0.84	8.42	3.31	7.98	1.49	16	1	9	115
1102	T6	R2	Pe	V	3.68	86.82	9.50	90.14	9.86	1.24	0.70	11.53	3.45	10.49	1.50	16	66	14	124
1103	T6	R2	Pi	V	6.00	82.23	11.78	87.47	12.53	3.28	2.34	46.68	15.93	17.87	6.13	161	800	21	265
1104	T3	R4		V	2.31	86.39	11.29	88.44	11.56	1.24	2.63	11.70	3.89	9.98	1.48	15	115	18	204
1105	T3	R3		V	5.47	80.38	14.15	85.03	14.97	2.35	3.07	57.27	7.06	23.28	2.04	49	509	29	338
1106	T3	R1		V	2.94	85.83	11.23	88.43	11.57	0.69	4.51	38.70	6.56	20.52	1.98	66	1062	67	393
1107	T4	R4	C	V	3.96	89.89	6.16	93.59	6.41	0.50	2.33	7.63	3.19	5.49	1.51	13	174	21	242
1108	T4	R3	Pi	V	4.61	84.03	11.35	88.10	11.90	0.79	5.07	57.56	5.08	25.22	2.02	38	481	30	342
1109	T4	R2	Pi	V	10.80	77.80	11.40	87.22	12.78	0.63	2.95	24.36	3.85	10.98	1.62	14	50	24	199
1110	T4	R2	C	V	8.89	84.73	6.38	93.00	7.00	0.59	1.67	10.11	4.98	5.97	1.58	9	158	20	241
1111	T4	R1	C	V	11.00	82.33	6.67	92.51	7.49	0.60	2.76	7.16	4.23	5.48	1.62	11	68	20	211
1112	T4	R1	Pi	V	13.65	74.81	11.53	86.64	13.36	1.09	5.17	41.76	8.88	19.54	2.62	31	319	30	356
1113	T6	R1	C	V	11.91	82.45	5.63	93.60	6.40	0.51	2.52	6.44	5.09	6.49	1.64	10	14	11	180
1114	T6	R1	Pi	V	14.73	75.60	9.68	88.65	11.35	0.70	3.03	4.68	5.13	4.59	2.60	9	2424	11	179
1115	T1	R2		R	14.88	76.50	8.62	89.87	10.13	1.13	6.08	11.45	10.37	14.36	3.26	52	343	168	301
1116	T1	R1		R	14.50	76.43	9.08	89.39	10.61	0.44	1.90	2.92	4.98	2.49	1.69	25	166	66	205

Ing. Luis G. Mansilla Minaya

Figura 16. Análisis de plantas (parte aérea y raíz)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo Maria
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología
Carretera Central Km 1.21 - Celular 941531359
analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:				INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONIA PERUANA														
DATOS DE LA MUESTRA				ANALISIS PROXIMAL						RESULTADOS EN BASE SECA								
				Humedad Hd (%)	EN BASE HUMEDA		EN BASE SECA		PORCENTAJE (%)				PARTES POR MILLON (ppm)					
					Materia Organica (%)	Cenizas (%)	Materia Organica (%)	Cenizas (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Pb ppm	Cd ppm	Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm
Código	Referencia																	
1117	T1	R3	R	14.93	75.54	9.52	88.80	11.20	0.94	5.24	9.39	8.40	7.51	4.27	134	507	200	354
1118	T2	R1	R	13.17	79.41	7.43	91.45	8.55	0.74	4.22	6.08	5.82	7.54	2.80	20	288	37	257
1119	T2	R3	R	12.27	80.47	7.27	91.72	8.28	1.28	4.67	11.66	10.85	8.22	5.43	10	1966	12	178
1120	T2	R2	R	11.99	82.16	5.85	93.35	6.65	0.67	3.57	11.88	6.98	3.02	2.49	10	39	21	191
1121	T6	R3	C	12.84	76.83	10.33	88.15	11.85	2.13	6.51	5.86	13.69	12.56	5.22	30	645	21	456
1122	T5	R4	C	12.13	80.88	6.99	92.04	7.96	1.60	8.14	64.90	13.70	30.70	3.90	49	853	36	489
1123	T5	R3	Pe	12.82	76.75	10.44	88.03	11.97	1.02	4.61	7.11	11.12	5.90	3.27	52	492	77	447
1124	T5	R1	C	13.63	78.98	7.39	91.45	8.55	3.05	4.13	10.51	26.76	10.07	11.28	29	191	28	239
1125	T6	R4	Pe	11.95	71.39	16.65	81.09	18.91	0.98	4.44	9.57	10.09	36.16	3.13	59	395	134	650
1126	T5	R1	Pe	14.75	72.67	12.59	85.24	14.76	0.91	4.61	8.02	15.31	6.91	3.96	46	661	99	372
1128	T5	R3	C	14.26	80.09	5.64	93.42	6.58	1.07	4.39	5.49	8.50	3.51	3.96	15	86	17	163
1129	T5	R2	Pe	11.47	76.52	12.01	86.43	13.57	0.77	3.35	6.84	9.42	7.78	2.32	52	473	109	443
1130	T6	R4	C	13.39	75.34	11.27	86.98	13.02	2.41	8.32	11.15	19.53	6.21	10.40	34	236	419	439
1131	T6	R3	Pe	11.63	68.18	20.19	77.15	22.85	0.89	4.79	11.24	10.60	12.11	3.31	54	2174	152	944
1132	T6	R3	Pi	13.40	58.92	27.68	68.04	31.96	1.02	3.81	12.90	9.69	16.02	3.83	33	787	43	572
1133	T6	R2	Pe	11.82	73.50	14.67	83.36	16.64	0.54	2.24	7.16	6.91	9.15	2.15	31	173	104	433

Figura 17. Análisis de plantas (parte aérea y raíz)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo Maria
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología
Carretera Central Km 1.21 - Celular 941531359
analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANALISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:				INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONIA PERUANA														
DATOS DE LA MUESTRA				ANALISIS PROXIMAL						RESULTADOS EN BASE SECA								
				Humedad Hd (%)	EN BASE HUMEDA		EN BASE SECA		PORCENTAJE (%)				PARTES POR MILLON (ppm)					
					Materia Organica (%)	Cenizas (%)	Materia Organica (%)	Cenizas (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Pb ppm	Cd ppm	Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm
Código	Referencia																	
1134	T6	R2	Pi	13.51	70.82	15.67	81.89	18.11	0.96	3.78	31.75	9.29	19.73	3.01	24	776	43	485
1135	T3	R4	R	12.00	68.63	19.37	77.99	22.01	0.45	2.10	9.87	5.20	6.34	1.61	16	175	44	341
1136	T3	R3	R	13.72	72.96	13.31	84.57	15.43	0.45	1.73	24.20	5.66	6.97	1.67	11	274	33	253
1137	T3	R1	R	11.52	67.53	20.95	76.33	23.67	0.46	1.85	12.43	6.77	19.63	1.84	16	264	69	395
1138	T3	R2	R	12.32	71.27	16.41	81.29	18.71	1.11	4.69	13.79	12.80	24.67	4.53	24	718	46	570
1139	T4	R3	C	12.38	80.73	6.89	92.13	7.87	0.97	7.10	8.36	13.25	9.19	4.35	18	70	19	244
1140	T4	R3	Pi	11.21	70.48	18.31	79.38	20.62	0.43	2.54	10.16	4.03	13.92	1.62	14	1522	38	357
1141	T4	R2	Pi	12.29	68.35	19.36	77.92	22.08	0.52	3.15	18.52	6.03	17.95	1.98	26	1689	89	512
1142	T4	R2	C	12.11	79.00	8.89	89.88	10.12	0.82	3.29	5.82	12.02	2.45	4.04	1	10	23	221
1143	T4	R1	C	13.04	79.87	7.09	91.85	8.15	0.56	3.23	10.07	8.39	4.70	2.24	29	49	22	262
1144	T4	R1	Pi	11.41	75.82	12.77	85.59	14.41	0.87	3.38	8.20	10.75	10.52	3.83	15	76	23	365
1145	T6	R1	C	11.84	77.26	10.90	87.64	12.36	0.91	4.40	18.60	10.71	13.97	3.53	18	131	28	444
1146	T6	R1	Pi	12.92	73.83	13.25	84.78	15.22	1.04	5.09	30.11	10.21	8.73	3.23	2	1	26	457

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE
TINGO MARIA, 11 DE FEBRERO DEL 2019
FACTURA Nro F001-00000456

VND: VALOR NO DETECTABLE

Figura 18. Análisis de plantas (parte aérea y raíz)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 AV. UNIVERSITARIA S/N - CARRETERA CENTRAL KM 1.21 - TINGO MARIA - CELULAR 941531359
 Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos
 analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONIA PERUANA				PROCEDENCIA										RIO NEGRO															
N°	COD. LAB.	DATOS	ANÁLISIS MECÁNICO				pH	M.O.	N	P	K	Cd	Pb	CIC	CAMBIABLES Cmol(+) / kg						C/Ce	%	%	%					
			Arena	Arcilla	Limo	Textura									Ca	Mg	K	Na	Al	H					Bas. Camb.	Ac. Camb.	Sat. Al		
			%	%	%	1:1	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm																	
1	S4471	T1R1	33	24	43	Franco	5.64	1.62	0.07	5.52	81.92	2.11	2.36	9.86	7.45	1.78	0.22	0.41	--	--	--	100.00	0.00	0.00					
2	S4472	T1R2	39	18	43	Franco	5.50	1.53	0.07	5.43	86.01	2.09	2.20	----	7.62	1.86	0.23	0.39	--	--	--	100.00	0.00	0.00					
3	S4473	T1R3	35	18	47	Franco	5.57	1.66	0.07	5.61	86.96	2.12	2.40	10.02	7.52	1.90	0.22	0.38	--	--	--	100.00	0.00	0.00					
4	S4474	T1R4	35	24	41	Franco	5.58	1.64	0.07	5.80	84.56	2.20	2.32	9.96	7.42	1.83	0.24	0.46	--	--	--	100.00	0.00	0.00					
5	S4475	T2R1	35	24	41	Franco	5.51	1.87	0.08	5.61	89.46	1.91	2.36	----	9.78	1.92	0.27	0.38	--	--	--	100.00	0.00	0.00					
6	S4476	T2R2	35	24	41	Franco	5.54	1.70	0.08	5.52	88.96	1.92	2.16	11.86	9.29	1.87	0.26	0.44	--	--	--	100.00	0.00	0.00					
7	S4477	T2R3	35	24	41	Franco	5.53	1.62	0.07	5.24	94.46	1.90	2.16	11.98	9.39	1.94	0.25	0.39	--	--	--	100.00	0.00	0.00					
8	S4478	T2R4	39	24	37	Franco	5.52	1.89	0.08	5.14	90.96	1.90	2.12	12.24	9.74	1.88	0.26	0.37	--	--	--	100.00	0.00	0.00					
9	S4479	T3R1	37	22	41	Franco	5.56	2.13	0.10	6.65	100.46	1.98	3.20	12.67	9.81	2.10	0.32	0.44	--	--	--	100.00	0.00	0.00					
10	S4480	T3R2	41	22	37	Franco	5.51	2.21	0.10	6.46	123.95	1.96	3.16	----	9.97	2.13	0.35	0.48	--	--	--	100.00	0.00	0.00					
11	S4481	T3R3	39	22	39	Franco	5.59	2.04	0.09	6.74	104.45	2.00	3.12	12.87	9.96	2.16	0.29	0.46	--	--	--	100.00	0.00	0.00					

Figura 19. Análisis de suelo final de los diferentes tratamientos

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
 AV. UNIVERSITARIA S/N - CARRETERA CENTRAL KM 1.21 - TINGO MARIA - CELULAR 941531359
 Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos
 analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONIA PERUANA				PROCEDENCIA										RIO NEGRO														
N°	COD. LAB.	DATOS	ANÁLISIS MECÁNICO				pH	M.O.	N	P	K	Cd	Pb	CIC	CAMBIABLES Cmol(+) / kg						C/Ce	%	%	%				
			Arena	Arcilla	Limo	Textura									Ca	Mg	K	Na	Al	H					Bas. Camb.	Ac. Camb.	Sat. Al	
			%	%	%	1:1	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm																
12	S4482	T3R4	31	24	45	Franco	5.68	2.08	0.09	6.64	101.46	1.94	2.88	12.99	10.13	2.14	0.27	0.45	--	--	--	100.00	0.00	0.00				
13	S4483	T4R1	33	24	43	Franco	5.55	2.10	0.09	5.61	87.96	2.20	2.44	12.26	9.86	1.95	0.16	0.29	--	--	--	100.00	0.00	0.00				
14	S4484	T4R2	33	24	43	Franco	5.50	2.30	0.10	5.52	92.96	2.17	2.40	----	9.53	1.88	0.17	0.27	--	--	--	100.00	0.00	0.00				
15	S4485	T4R3	35	24	41	Franco	5.54	2.13	0.10	5.80	88.87	2.08	2.24	11.81	9.48	1.89	0.17	0.27	--	--	--	100.00	0.00	0.00				
16	S4486	T4R4	37	22	41	Franco	5.53	2.04	0.09	5.80	88.46	2.30	2.56	11.28	8.92	1.90	0.17	0.28	--	--	--	100.00	0.00	0.00				
17	S4487	TSR1	35	22	43	Franco	5.65	1.79	0.08	6.27	64.97	2.23	2.48	11.77	9.41	1.90	0.22	0.23	--	--	--	100.00	0.00	0.00				
18	S4488	TSR2	33	22	45	Franco	5.80	1.87	0.08	6.55	70.97	2.20	2.52	12.28	9.87	1.94	0.20	0.27	--	--	--	100.00	0.00	0.00				
19	S4489	TSR3	33	22	45	Franco	5.87	1.96	0.09	6.92	69.97	2.24	2.52	12.05	9.69	1.93	0.21	0.23	--	--	--	100.00	0.00	0.00				

Ing. Luis G. Mansilla Minaya
JEFE

Figura 20. Análisis de suelo final de los diferentes tratamientos



Figura 21 Análisis de suelo final de los diferentes tratamientos

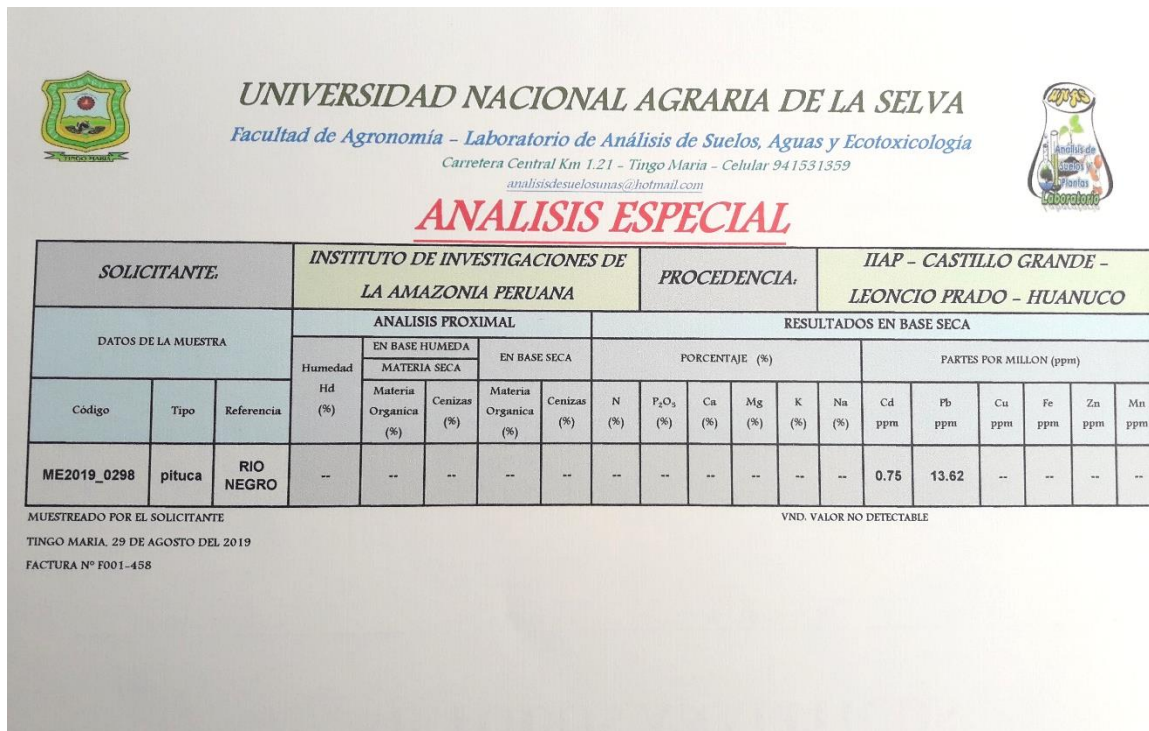


Figura 22. Análisis de la raíz de *Xanthosoma sagittifolium*.

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología
Carretera Central Km 1.21 - Tingo María - Celular 941531359
analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANÁLISIS ESPECIAL

SOLICITANTE			INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE LA AMAZONIA PERUANA					PROCEDENCIA			IIAP - CASTILLO GRANDE - LEONCIO PRADO - HUANUCO									
DATOS DE LA MUESTRA			ANÁLISIS PROXIMAL																	
			Humedad Hd (%)	EN BASE HUMEDA		EN BASE SECA		% m/m	g P ₂ O ₅ / L biol	miligramos / Litro de AGUA										
Código	Tipo	Referencia		Materia Orgánica (%)	Cenizas (%)	Materia Orgánica (%)	Cenizas (%)			N (%)	Ca	Mg	K	Na	Cd	Pb	Cu	Fe	Zn	Mn
ME2019_0299	AGUA	CASTILLO GRANDE	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.09	2.20	--	--	--		

MUESTREO POR EL SOLICITANTE
TINGO MARIA, 25 DE AGOSTO DEL 2019
FACTURA N° F001-457

VND. VALOR NO DETECTABLE

Figura 23. Análisis del agua de Castillo grande

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas y Ecotoxicología
Av. Universitaria s/n Telef. (062) 562342 - Celular 941531359 Aptdo. 156
analisisdesuelosunas@hotmail.com

ANÁLISIS ESPECIAL

SOLICITANTE:		IIAP			PROCEDENCIA:			RIO NEGRO									
DATOS DE LA MUESTRA		ANÁLISIS PROXIMAL				PORCENTAJE (%) EN BASE SECA						PARTES POR MILLON (PPM) EN BASE SECA					
		Cenizas en base seca (%)	Materia Orgánica en base Secca (%)	Materia Secca (%)	Humedad Hd (%)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Cd ppm	Pb ppm	Cu ppm	Fe ppm	Zn ppm	Mn ppm
M0366	pega pega	12	88	88	12	3.35	0.41	2.03	1.26	2.22	0.49	0.51	5.09	0.90	6.22	9.95	42.47
M0367	pituquilla	13	87	86	14	3.97	0.50	1.04	1.38	4.50	0.13	3.54	4.64	3.42	2.90	28.69	174.85

MUESTREO POR EL SOLICITANTE
TINGO MARIA, 31 DE MAYO DEL 2018
TRANSFERENCIA BANCARIA

Ing. Luis G. Mansilla Maza
JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS
TINGO MARIA - HUANUCO

Figura 24. Análisis de reconocimiento de *Pavonia fruticosa* y *Xanthosoma sagittifolium* (plantas adultas).

Figura 25. Análisis de reconocimiento del suelo.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

AV. UNIVERSITARIA S/N - TINGO MARIA - CELULAR 941531359

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos

analisisdesuelosunsa@hotmail.com



ANÁLISIS DE SUELOS

SOLICITANTE		IIAP					PROCEDENCIA							RIO NEGRO - LUYANDO										
N°	COD. LAB.	DATOS CULTIVO	ANÁLISIS MECÁNICO			pH 1:1	M.O. %	N %	P ppm	K ppm	Cd ppm	Pb ppm	CIC	CAMBIABLES Cmol(+)/kg						CICe	Bas. Camb. %	Ac. Camb. %	Sat. Al %	
			Arena %	Arcilla %	Limo %									Textura	Ca	Mg	K	Na	Al					H
1	S2919	CACAO	23.2	28.4	48.4	Franco Arcillo Limoso	5.72	3.01	0.14	6.74	134.19	1.21	2.60	10.14	7.98	1.83	0.23	0.11	--	--	--	100.00	0.00	0.00

MUESTREADO POR EL SOLICITANTE

FECHA: 07 DE MAYO DEL 2018

RECIBO N° 001-0543578



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
C. B. ANÁLISIS DE SUELOS

Ing. Luis G. Mansilla Miraya
JEFE





"Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad"

CONSTANCIA Nº 338-USM-2019

LA JEFA (e) DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM) DEL MUSEO DE HISTORIA NATURAL, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, DEJA CONSTANCIA QUE:

La muestra vegetal (planta estéril), recibida de Gris Rosario Taype Camarena; estudiante de la Universidad Nacional Agraria de la Selva; ha sido estudiada y clasificada como: ***Pavonia fruticosa* (Mill.) Fawc. & Rendle**; y tiene la siguiente posición taxonómica, según el Sistema de Clasificación de Cronquist (1988):

DIVISION: MAGNOLIOPHYTA

CLASE: MAGNOLIOPSIDA

SUB-CLASE: DILLENIIDAE

ORDEN: MALVALES

FAMILIA: MALVACEAE

GENERO: *Pavonia*

ESPECIE: *Pavonia fruticosa* (Mill.) Fawc. & Rendle

Nombre vulgar: "pega pega".

Determinado por: Mg. Hamilton Beltrán Santiago

Se extiende la presente constancia a solicitud de la parte interesada, para los fines que estime conveniente.

Lima, 06 de noviembre de 2019

Dra. Mónica Arakaki Makishi
JEFEFA DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM)

MAM/ddb.

Figura 26. Constancia de reconocimiento de *Pavonia fruticosa* (pega pega) emitido por el herbario de la UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN MARCOS.



"Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad"

CONSTANCIA N° 339- USM-2019

LA JEFA (e) DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM) DEL MUSEO DE HISTORIA NATURAL, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, DEJA CONSTANCIA QUE:

La muestra vegetal (tubérculo con hojas), recibida de **Gris Rosario Taipe Camarena**, estudiante de la Universidad Agraria de la Selva, ha sido estudiada y clasificada como: ***Xanthosoma sagittifolium*** (L.) Schott; y tiene la siguiente posición taxonómica, según el Sistema de Clasificación de Cronquist (1988):

DIVISION: MAGNOLIOPHYTA

CLASE: LILIOPSIDA

ORDEN: ARALES

FAMILIA: ARACEAE

GENERO: *Xanthosoma*

ESPECIE: *Xanthosoma sagittifolium* (L.) Schott

Nombre vulgar: "chaku"

Determinada por: Dra. Joaquina Albán Castillo y Blgo. José Campos

Se extiende la presente constancia a solicitud de la parte interesada, para fines de estudios.

Lima, 28 de noviembre de 2019



Joaquina Albán Castillo
 Dra. JOAQUINA ALBAN CASTILLO
 JEFA (e) DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM)

JAC/ddb

Figura 27. Constancia de reconocimiento de *Xanthosoma sagittifolium* (chaku) emitido por el herbario de la UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN MARCOS

