

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA



Niveles de contaminación con cadmio en cinco suelos fertilizados con compuestos fosforados en la zona agrícola de Barranca, Lima

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

AUTORA

Deisy Stephany Muñoz Albornoz

ASESOR

Honorio Eloy Munive Jáuregui

Huaura, Perú

2022

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos del autor

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

Datos del asesor

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

Datos del Jurado

Datos del presidente del jurado

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

Datos del segundo miembro

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

Datos del tercer miembro

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

Datos de la obra

Materia*	
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado:	
Idioma (Normal ISO 639-3)	
Tipo de trabajo de investigación	
País de publicación	
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	
Grado académico o título profesional	
Nombre del programa	
Código del programa Consultar el listado:	

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

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 033- 2022/UCSS/FIA/DI

Siendo las 02:00 p. m. del día 23 de marzo de 2022 - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- | | |
|---------------------------------|-----------------|
| 1. Fredy Román Paredes Aguirre | presidente |
| 2. Mario Antonio Anaya Raymundo | primer miembro |
| 3. Geomar Vallejos Torres | segundo miembro |
| 4. Honorio Eloy Munive Jáuregui | asesor |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada **Niveles de contaminación con cadmio en cinco suelos fertilizados con compuestos fosforados en la zona agrícola de Barranca, Lima** que presenta la bachiller en Ciencias Ambientales, **Deysy Stephany Muñoz Albornoz** cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

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

APROBAR

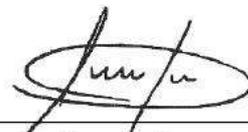
DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **BUENA** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare **EXPEDITA** para conferirle el **TÍTULO** de **INGENIERO AMBIENTAL**.

Lima, 23 de marzo de 2022.



Fredy Román Paredes Aguirre
PRESIDENTE



Mario Antonio Anaya Raymundo
1°MIEMBRO



Geomar Vallejos Torres
2°MIEMBRO



Dr. Honorio Eloy Munive Jáuregui
ASESOR

DEDICATORIA

A Dios, por darme salud, fe y fortaleza para terminar este trabajo.

A mi padre, Mariano Muñoz, por cuidarme e iluminarme desde donde se encuentra; a mi madre, Irma Albornoz, por asumir la responsabilidad de instruirme y brindarme el apoyo necesario, siempre confiando en mí.

A mis hermanos, por darme los sobrinos que tengo, que son el motor y motivo para salir adelante.

A Marcos, por ser la persona que día a día me ha impulsado a salir adelante; por sus buenos consejos, su paciencia y su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

De manera especial, agradezco al Dr. Eloy Munive Jáuregui, por ser más que un docente, mi maestro; por tener la capacidad y paciencia necesarias para que logre ejecutar y culminar esta investigación, destinada a la obtención de mi título profesional.

A las autoridades y docentes de la Facultad de Ingeniería Agraria, Programa de Estudios en Ingeniería Ambiental, por ser parte de mi formación.

Mi agradecimiento al Prof. Armando Chiclla, por su colaboración y ayuda invaluable al momento de realizar los análisis en el laboratorio de la Universidad Católica Sedes Sapientiae.

Al señor José Solís Mejía, por permitirme realizar esta investigación en el fundo de su propiedad y brindarme la información necesaria para poder lograrlo; también a su hijo Julio Solís, por ser el intermediario con su padre y apoyar investigaciones de este tipo.

A mis mejores amigas, Luisa Loayza y Hettel Calero, por su amistad incondicional y el amor brindado en todo el tiempo que compartimos un vínculo sincero.

A todas las personas que, de una manera u otra, me brindaron su apoyo y fueron parte de la realización de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL.....	vii
INDICE DE TABLAS.....	ix
INDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICES DE APÉNDICES.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Antecedentes del estudio	4
1.2. Bases teóricas especializadas.....	17
1.2.1. Contaminación ambiental.....	17
1.2.2. Tipos de contaminación.....	19
1.2.3. Contaminación agroquímica.....	21
1.2.4. Contaminación por metales pesados.....	23
1.2.6. Toxicidad y efecto del cadmio en las plantas	30
1.2.7. Factores que afectan la disponibilidad de los metales pesados en los suelos.....	32
1.2.8. Estándares de calidad ambiental (ECA)	34
1.2.9. Compuestos fosfatados	35
1.2.10. El Suelo	37
1.2.11. Necesidades edáficas de los cultivos	38
1.2.12. Fertilizantes	45
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS.....	50
2.1. Diseño de la investigación.....	50

2.2. Lugar y fecha.....	50
2.3. Población y muestra	51
2.4. Materiales	52
2.5. Descripción de la investigación.....	53
2.5. Técnicas e instrumentos	55
2.6. Identificación de las variables y su mensuración (Metodología)	56
2.7. Análisis de datos.....	57
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	58
3.1. Resultados de la caracterización de los suelos en estudio	58
3.1.1. Análisis físico químico de los suelos.....	58
3.2. Niveles de cadmio en los suelos	60
3.2.1. Contenido de cadmio en los suelos en estudio	60
3.2.2. Relación de los niveles de cadmio en los suelos con las dos profundidades	61
Efecto de la interacción profundidad-suelo con diferentes cultivos.....	63
CAPÍTULO IV: DISCUSIONES.....	70
4.1. Resultados de la caracterización de los suelos	70
4.1.1. Análisis textural.....	70
4.1.2. Análisis químico de los suelos	70
4.2. Contenido de cadmio en los suelos en estudio	72
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....	78
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES.....	80
REFERENCIAS.....	81
TERMINOLOGÍA.....	90
APÉNDICES.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Estándares de calidad ambiental de los suelos</i>	34
Tabla 2. <i>Concentración de cadmio en las rocas</i>	35
Tabla 3. Plan de fertilización orientativo en los primeros cuatro años	43
Tabla 4. <i>Parcelas en estudio</i>	51
Tabla 5. <i>Puntos de muestreo</i>	52
Tabla 6. <i>Tratamientos en estudio</i>	56
Tabla 7. Variables en estudio, su mensuración y métodos para su determinación	57
Tabla 8. <i>Clases texturales</i>	58
Tabla 9. Cantidades de pH, CE, CaCO ₃ , MO, P y K disponibles	59
Tabla 10. CIC, cationes cambiabiles y porcentaje de saturación de bases	59
Tabla 11. <i>Contenido de cadmio en los suelos: 0-20 cm</i>	60
Tabla 12. Contenido de cadmio en los suelos: 20-60 cm	60
Tabla 13. Análisis de varianza del contenido de Cd a nivel de las profundidades del suelo	61
Tabla 14. Prueba de Tukey para los suelos con cultivos en estudio	61
Tabla 15. Prueba de significación de Tukey para profundidad	62
Tabla 16. Prueba de Tukey para la interacción profundidad por tipo de cultivo	63
Tabla 17. <i>Prueba de t para comparación de medias del contenido de cadmio a dos profundidades. Cultivo de mandarina</i>	64
Tabla 18. <i>Prueba de t para comparación de medias del contenido de cadmio a dos profundidades. Cultivo de maracuyá</i>	65
Tabla 19. <i>Prueba de t para comparación de medias del contenido de cadmio a dos profundidades. Cultivo de caña de azúcar</i>	65
Tabla 20. <i>Prueba de t para comparación de medias del contenido de cadmio a dos profundidades. Cultivo de palto</i>	66
Tabla 21. <i>Prueba de t para comparación de medias del contenido de cadmio a dos profundidades. Cultivo de mandarina</i>	67
Tabla 22. Resultados del análisis de correlación (0-60: 0-20 y 20-60 cm de profundidad)	68

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Flujo del cadmio en el medio ambiente. Fuente: Sánchez (2016).	26
<i>Figura 2.</i> El pH y la concentración de metales en el suelo.	33
<i>Figura 3.</i> Elaboración de fertilizantes fosfatados a partir de la fosforita.	36
<i>Figura 4.</i> Contenido de cadmio en el suelo según profundidad. Fuente:	62
<i>Figura 5.</i> Contenido de cadmio en el suelo según profundidad. Fuente:	62
<i>Figura 6.</i> Interacción profundidad y contenido de cadmio en el suelo.	63
<i>Figura 7.</i> Contenido de cadmio en el suelo con cultivo de mandarina..	64
<i>Figura 8.</i> Contenido de cadmio en el suelo con cultivo de maracuyá.	65
<i>Figura 9.</i> Contenido de cadmio en el suelo con cultivo de caña de azúcar.	66
<i>Figura 10.</i> Contenido de cadmio en el suelo con cultivo de palto, según profundidad.	66
<i>Figura 11.</i> Contenido de cadmio en el suelo con cultivo de maíz, según profundidad.	67
<i>Figura 12.</i> Regresión y correlación entre fertilización fosfatada y el contenido de cadmio. Profundidad de 0 – 60 cm.	68
<i>Figura 13.</i> Regresión y correlación de los niveles de fertilización fosfatada y contenido de cadmio. 0 - 20 cm.	69
<i>Figura 14.</i> Regresión y correlación niveles de fertilización fosfatada y contenido de cadmio. 20 – 60 cm.	69

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Plano de ubicación y puntos de muestreo del área en estudio	92
Apéndice 2. Resultados originales del contenido de cadmio en los suelos en estudio	93
Apéndice 3. Resultados de las entrevistas a agricultores sobre los niv de fertilización fosfatada	95
Apéndice 4. Resultados del análisis de los suelos de Barranca	96
Apéndice 5. Tablas para la interpretación de los análisis de suelos	98
Apéndice 6. Vistas del desarrollo de la investigación en el campo y laboratorio	101
Apéndice 7. Modelo de la encuesta aplicada a los pobladores de la zona aplicada	104

RESUMEN

El trabajo se ejecutó en los terrenos agrícolas del Fundo Tutumo-El Mirador, ubicado en la localidad de Barranca, con una extensión de 23,9 ha, cuyas coordenadas geográficas son las siguientes: 208540,50 a 209051,06 E y 8800570,34 a 8800404,78 N, con una altitud de 120 m s. n. m. El objetivo fue determinar los niveles de cadmio en cinco parcelas con “mandarina”, “maracuyá”, “caña de azúcar”, “palta” y “maíz”, donde se utilizaron fertilizantes fosforados por muchos años. El estudio consideró las siguientes fases: preliminar, campo, laboratorio y gabinete. Fue una investigación no experimental y se inició con la caracterización y la determinación del contenido de cadmio en dos profundidades: de 0-20 cm y de 20-60 cm de cada uno de los perfiles de los cinco suelos. Para la observación del contenido de cadmio en relación con las profundidades, fue utilizado el análisis de varianza mediante el diseño completamente al azar con arreglo factorial 2×5 , y las medias fueron comparadas con la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). También fueron analizadas las regresiones y correlaciones entre el contenido de cadmio asimilable con el uso de la prueba de significación de t-Student. Los resultados mostraron que las clases texturales fueron arena; arena franca y arena franco arenosa. Las características químicas de estas son pH ligero a moderadamente básico; baja conductividad eléctrica; contenido de carbonatos, de materia orgánica, baja a mediana concentración de fósforo; potasio disponible; baja capacidad de intercambio catiónico; y alta saturación de bases. La concentración de cadmio demostró que los suelos con “mandarina” y “maíz” sobrepasaron el límite máximo permisible ($1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$), mientras que los suelos cultivados con “caña de azúcar”, “maracuyá” y “palta” estuvieron por debajo de este límite, pero cerca de alcanzarlo. Las correlaciones entre del cadmio en ambas profundidades tuvieron una relación estadísticamente significativa, pues indicaron que hubo diferencias entre el cadmio presente en la capa superficial y el de la capa subyacente.

Palabras clave: degradación de suelos, contaminación del medio ambiente, metales pesados, fertilización fosfatada, perfil del suelo.

ABSTRACT

The work was carried out on the agricultural land of the Fundo "Tutumo-El Mirador" located in the town of Barranca, with an area of 23.9 ha whose geographical coordinates are the following: 208540.50 to 209051.06 E and 8800570.34 to 8800404.78 N, with an altitude of 120 m sea level. The objective was to determine the levels of cadmium in five plots with "mandarin", "passion fruit", "sugar cane", "avocado" and "corn", where they were used phosphorous fertilizers for many years. The study considered the phases: preliminary, field, laboratory and cabinet, in a non-experimental investigation, starting with the characterization and determination of the cadmium content in two depths: 0-20 and 20-60 cm of each of the profiles of the five soils. For cadmium content in relation to depths, analysis of variance was used by design completely random with 2x5 factorial arrangement and the means were compared with the Tukey test ($p \leq 0.05$). The regressions and correlations between the assimilable cadmium content were also analyzed using the t-Student significance test. The results showed that the textural classes were sand, frank sand and sandy loam, slightly to moderately basic pH, low electrical conductivity, content of carbonates and organic matter and from low to medium in phosphorus and potassium available, low cation exchange capacity and high base saturation. The cadmium concentration showed that soils with "mandarin" and "maize" exceeded the maximum permissible limit ($1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$), while soils cultivated with "sugarcane", "passion fruit" and "avocado" were below this limit, but close to reaching it. The correlations between cadmium at both depths had a statistically significant relationship, indicating that there were differences between the cadmium present in the surface layer and the underlying layer.

Keywords: soil degradation, environmental pollution, heavy metals, phosphate fertilization, soil profile correlations

INTRODUCCIÓN

Recientemente, los niveles de cadmio en los suelos agrícolas y los riesgos de su ingreso a los principales alimentos de consumo humano han originado una atención especial a nivel mundial, en razón de la toxicidad de este metal pesado sobre los seres vivos. Es deber de la ciudadanía prevenir, con base en la investigación, el deterioro de las tierras dedicadas a la producción agrícola, para dejar a las poblaciones futuras suelos con alta capacidad productiva. En las labores agrícolas convencionales del pasado no se tenía en cuenta la adición de ninguna clase de vertidos, y solamente la materia orgánica en forma de estiércoles era adicionada para mejorar las propiedades y los niveles de fertilidad de los suelos (Llanos, 2018). Cada año, una gran cantidad de subproductos industriales, domésticos, agrícolas y otros materiales de desecho potencialmente tóxicos son incorporados en los suelos del mundo. Una vez en el suelo, estos compuestos se vuelven parte de los ciclos biológicos de muchos organismos, lo cual afecta seriamente a todas las formas de vida. Asimismo, toneladas de residuos orgánicos son descompuestos anualmente por los microorganismos del suelo y grandes cantidades de productos químicos inorgánicos son fijados o enlazados por los minerales que constituyen el suelo, pero aún se desconocen los límites de la capacidad que tiene un determinado suelo para adsorber significativamente estos compuestos químicos que finalmente afectarán al medio ambiente, especialmente cuando exceden los límites tolerables o permisibles, tanto en el suelo como en su entorno ambiental (Weil y Brady, 2016).

En los suelos agrícolas, las principales fuentes de cadmio provienen de la fertilización fosfatada, uso de lodos y residuos industriales. El uso continuo de las sales fosforadas para mejorar el rendimiento de las cosechas produce la acumulación de cadmio en los suelos destinados a la agricultura. Además, con el hallazgo y la producción en serie de insecticidas y herbicidas, que tienen como componente al fósforo y sirven para la protección de cultivos, también se están incrementando los niveles de cadmio en el suelo (Valenzuela, 2001). Sin embargo, Ulrich (2018) señala que desde hace muchos años se dio paso a un alarmismo infundado con relación al uso a largo plazo de la roca fosfórica en la fabricación de los fertilizantes minerales. Este enfoque fue ampliado con el fin de hacer un mejor manejo del fosfato (P), incluyéndose los aspectos ambientales, de salud y de calidad de los alimentos

en Europa. Se resaltó el efecto de los metales pesados presentes en los fertilizantes, en particular del cadmio (Cd). En consecuencia, la regulación del uso de los diferentes agroquímicos es materia de una normativa que cada vez debe ser más estricta, lo cual tendría un efecto sumamente importante sobre las importaciones de los fertilizantes que se producen desde países en donde se deja de lado, al momento de la fabricación, los aspectos relacionados con el incremento de metales pesados, como sucede con los fertilizantes fosfatados (Porta *et al*, 2008).

Teniéndose en cuenta que en la provincia de Barranca, región Lima, existen diversos cultivos para la producción de alimentos tanto para el consumo local como para la exportación y/o la actividad agroindustrial, los productores, para asegurar altos rendimientos, consideran la aplicación de planes de fertilización de alta técnica con elevadas fórmulas para la aplicación de nitrógeno, fósforo y potasio con acompañamiento de materia orgánica, sin tener en cuenta la posibilidad de que los fertilizantes fosfatados, tales como la roca fosfórica, el superfosfato triple de calcio y el fosfato diamónico, podrían aumentar la disponibilidad del Cd en los suelos. Sin embargo, la presencia de Cd en el suelo y el medio ambiente puede incrementarse, también, por la actividad industrial, el uso del carbón y de los combustibles fósiles, la minería, etc., lo cual significaría un grave peligro para la salud al acumularse en la cadena alimenticia con el potencial de ser la causa de muchas enfermedades crónicas, aunque la acumulación del cadmio en el suelo por el uso de fertilizantes es un proceso sumamente escaso y lento (Dharma-wardana, 2018).

Por tales razones se planteó la realización de este trabajo en los suelos del fundo Tutumo-El Mirador, ubicado en el distrito de Barranca de la región Lima, que tiene cuatro cultivos de frutales con más de cinco años de establecimiento: el “palto” *Persea americana* Mill, la “mandarina” *Citrus reticulata* B., la “caña de azúcar” *Saccharum officinarum* L. y el “maracuyá” *Passiflora edulis* Sims. Además, tiene un cultivo anual de “maíz” *Zea mays* L. Estos han sido fertilizados con compuestos fosfatados durante muchos años, por lo cual existe la necesidad de conocer los niveles de contaminación con cadmio que estaría produciéndose debido al uso de los fertilizantes fosfatados.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar los niveles de contaminación con cadmio en cinco suelos intensamente fertilizados con compuestos fosforados en la zona agrícola de Barranca, Lima.

Objetivos específicos

- a. Caracterizar los suelos con cultivos de “mandarina”, “maracuyá”, “palto”, “caña de azúcar” y “maíz” de la zona agrícola de Barranca, Lima, con la finalidad de conocer sus propiedades física y químicas.
- b. Determinar los niveles de cadmio presentes en los suelos cultivados con “mandarina”, “maracuyá”, “palto”, “caña de azúcar” y “maíz” sometidos a una fertilización fosfatada por muchos años en la zona de Barranca, Lima.
- c. Correlacionar los niveles de cadmio disponible con las dos profundidades en estudio (de 0 a 20 cm y de 20 a 60 cm) en los suelos cultivados con “mandarina”, “maracuyá”, “caña de azúcar”, “palto” y “maíz” en la zona de Barranca, Lima.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes del estudio

Internacionales

Muñoz (2017) desarrolló una investigación titulada “Determinación de cadmio en fertilizantes, plantas de *Oryza sativa* L. y suelos de la provincia del Guayas: Propuesta de saneamiento”. El objetivo fue detectar la presencia de cadmio (Cd) en plantas de “arroz” *Oryza sativa* L., “en suelos agrícolas” y en “fertilizantes” en “los cantones Daule y Nobol”, de la provincia del Guayas, Guayaquil, Ecuador (p. 6). De acuerdo a la metodología, fueron tomadas muestras de plantas y de suelos por triplicado en seis estaciones en ambos cantones, así como nueve muestras de fertilizantes inorgánicos. Para el análisis estadístico de la concentración de metales fue utilizado un ANOVA de una vía ($p \leq 0,05$) y una prueba posterior de Tukey, mientras que las relaciones de los componentes de “arroz” y los minerales contaminantes fueron diferenciados mediante los coeficientes de correlación de Pearson. Todas las pruebas fueron ejecutadas con el programa estadístico Minitab versión 17. Los resultados mostraron que la máxima concentración de cadmio en el suelo fue de $41,30 \text{ mg.kg}^{-1}$, los cuales superaron en 41 veces a lo recomendado por el Departamento de Ecología de Washington ($1 \text{ mg de Cd.kg}^{-1}$ de suelo) (p. 6). Para el suelo, raíz, hoja y granos de “arroz”, las mayores cantidades fueron de 2,59; 0,50; 0,44 y $0,19 \text{ mg de Cd.kg}^{-1}$, respectivamente. En el suelo, la acumulación del Cd fue cinco veces más de lo que fue establecido en el Texto Unificado del Ministerio de Ambiente de Ecuador ($0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$). En el caso del “arroz”, estuvo por debajo del límite permitido para cadmio por la Unión Europea ($0,2 \text{ mg.kg}^{-1}$). El análisis de los componentes predominantes y la aplicación de la prueba de Pearson indicaron una relación entre la concentración de cadmio que había en el grano y la que había en la raíz del “arroz”. En cuanto a acumulación de metal en las muestras de fertilizantes F1, F2, F3, en cada caso sobrepasó el límite. Además, no hubo muestra que estuviera por debajo del valor recomendado por el Departamento de Ecología del Estado de Washington (1 mg.kg^{-1}). No obstante, los fertilizantes no sobrepasaron lo sugerido en la

normativa de Costa Rica (80 mg.kg^{-1}). Al compararse las concentraciones de Cd en las muestras de suelo y de plantas extraídas en los diferentes cantones, fue demostrado que en los terrenos del Nobol han sido los menos contaminados y las plantas del cantón Daule resultaron las más contaminadas. Concluyó que la cantidad de Cd en los granos de “arroz” no fue mayor que el límite permitido a nivel internacional. La concentración de Cd en los granos y la acumulación de este metal en las hojas estuvo relacionada con lo que el suelo tenía, tanto en Cd total como en lo disponible. En los fertilizantes, las concentraciones de Cd fueron mayores que lo establecido en la norma de Canadá. Asimismo, en todas las muestras analizadas fue superior a lo recomendado por el Departamento de Ecología del Estado de Washington. Sin embargo, los fertilizantes contenían menos Cd que el límite máximo permisible establecido en el reglamento de Costa Rica.

Rodríguez (2017) realizó el estudio “Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de ‘cacao’ de Nilo y Yacopí, Cundinamarca”, en Colombia, con el objetivo de determinar la dinámica del metal en sistemas productivos de “cacao”. La metodología consistió en un muestreo exploratorio para encontrar la relación de la variabilidad espacial del Cd con los contenidos en el suelo, hojarasca, almendras y hojas de la planta de “cacao”, teniendo en cuenta las propiedades químicas del suelo. Asimismo, fueron considerados de 6 a 12 árboles a diferentes distancias y en plena fase productiva. Asimismo, fueron tomadas muestras de suelo seco y con un estado fitosanitario adecuado, para luego ser analizadas en el laboratorio. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis con métodos estadísticos para determinar el nivel de uniformidad en la distribución de las variables, así como para definir si los datos fueron simétricos o asimétricos. Además, fueron calculadas las matrices de correlación para determinar las relaciones lineales, lo que permitió establecer las variables explicativas relacionadas con el Cd en las almendras del “cacao”. Los resultados mostraron que las acumulaciones más altas de Cd fueron encontradas en la zona de Yacopí, en la parte septentrional del municipio, y fueron menores en el sur (El Nilo); en la zona nororiental y noroccidental había más cantidad de Cd en las almendras. Asimismo, en el centro también resultó ser menor. En esta parte, fue resaltante la presencia del metal en las hojas y en la hojarasca. En la segunda etapa, que consistió en el recojo de muestras de las fincas donde había elevada presencia de Cd en las almendras del “cacao”, fue determinado el Cd en dos profundidades del suelo (0-30 y 60-100 cm). Se halló una relación entre las cantidades de Cd disponible, Cd total y pH de la capa superficial, y

entre el Cd de las almendras y el de la hojarasca. Los resultados obtenidos permitieron concluir que en ambas etapas fue encontrada una alta variabilidad espacial de los niveles de Cd en suelo y en la planta de “cacao”, a nivel municipal y en el interior de las fincas particulares que fueron estudiadas. La extracción secuencial de las formas de Cd disponible en los suelos demostró que las fracciones estuvieron asociadas a la materia orgánica, a los carbonatos y a los óxidos de manganeso, los mismos que mostraron los porcentajes más elevados de Cd total en los terrenos de ambos municipios. Al ser comparada con la zona del Nilo, Yacopí mostró porcentajes mayores de Cd en la fracción carbonatos procedente de las fincas que tuvieron los mayores niveles de Cd total. Las acumulaciones de Cd total en el suelo fueron producto, principalmente, de las fracciones de Cd asociadas a carbonatos. Estas también estuvieron vinculadas a niveles elevados de cadmio encontrados en la fracción pedregosa del suelo, lo cual demostró el aporte del elemento hecho por el material parental.

Chavez *et al.* (2015) realizaron la investigación “Concentración del cadmio en los granos de ‘cacao’ y su relación con el cadmio contenido en el suelo en la zona sur de Ecuador”, con el objetivo de determinar el estado del Cd tanto en suelos como en plantas de “cacao”, en el sur de Ecuador. La metodología consistió en evaluar el contenido de cadmio (Cd) en los granos de “cacao” por encima de un nivel crítico ($0,6 \text{ mg.kg}^{-1}$) como una consecuencia de las preocupaciones en el consumo de chocolate obtenido en base al procesamiento del “cacao”, por no tener una información disponible con respecto a la concentración de cadmio en el suelo y el “cacao”, para lo cual fueron recolectadas muestras de suelo de 19 granjas a profundidades de 0-5 (M1), 5-15 (M2), 15-30 (M3) y 30-50 (M4) cm. También se tomaron muestras de plantas de “cacao” de cuatro árboles cercanos. Se midió el Cd total recuperable y extraíble en las diferentes profundidades del suelo. El Cd total recuperable varió de 0,88 a 2,45 y de 0,06 a 2,59, con un promedio de 1,54 y $0,85 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente, en los suelos superficiales y subterráneos, mientras que los valores correspondientes para el Cd extraíble en M3 fueron de 0,08 a 1,27 y de 0,02 a 0,33 con valores medios de 0,40 y $0,10 \text{ mg.kg}^{-1}$. El suelo superficial en todos los sitios de muestreo almacenó Cd recuperable total por encima del nivel crítico de la norma de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) para suelos agrícolas ($0,43 \text{ mg.kg}^{-1}$), lo cual indicó que existía contaminación por Cd. Dado que tanto el Cd total recuperable como el extraíble en M3 disminuyeron significativamente en cuanto a profundidad, las actividades antropogénicas fueron probablemente la fuente de contaminación. El cadmio en los tejidos de “cacao” disminuyó

en el orden siguiente: granos > cáscara > hojas. El contenido de cadmio en los granos de “cacao” varió de 0,02 a 3,00 y su promedio fue 0.94 mg.kg⁻¹. Además, 12 de los 19 sitios tuvieron un contenido de Cd de grano por encima del nivel crítico. La concentración de Cd en los granos fue altamente significativa en cuanto al Cd extraíble y las profundidades de 0–5 y 5–15 cm ($r^2 = 0,80$ y $0,82$ para M3 ($P < 0,01$)). Estos resultados indicaron que la acumulación de Cd en las capas superficiales resulta en un exceso de Cd en los granos de “cacao” y apuntan a que los niveles de cadmio extraíble fueron adecuados para predecir el Cd disponible en los suelos estudiados.

Tello (2015) realizó el estudio “Evaluación del riesgo toxicológico de plomo y cadmio en suelos del entorno del parque industrial de la ciudad de la Cuenca” con el objetivo de evaluar el riesgo toxicológico por la presencia de cadmio y plomo en los suelos cercanos al parque industrial de las cuencas Abdón Calderón y Uncovía del Ecuador. El muestreo realizado fue aleatorio simple. Fueron utilizadas cinco muestras con 16 submuestras de cada suelo y ciudadela con distancias de 200 m a 700 m en cada una de ellas, con tres repeticiones para que fueran representativas. La información de campo fue recolectada a través de encuestas a pobladores que fueron seleccionados aleatoriamente, con distintas edades y sexos, y solo fueron excluidas las personas no residentes permanentes. Los datos recolectados tanto en el campo como en el análisis de los suelos y los valores referenciados en base a normativas internacionales fueron analizados y almacenados utilizando los paquetes Excel 2013 y SPSS. El método usado para la determinación de los metales pesados fue el de digestión ácida y absorción atómica. Al compararse los valores de cadmio y plomo con las normas de calidad ambiental de Ecuador y de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), fueron observadas diferencias significativas debido a que sobrepasaron ligeramente los límites máximos permisibles de acuerdo con la norma nacional del Ministerio del Ambiente del Ecuador. Sin embargo, con las normas internacionales, como las de la EPA, los valores estuvieron dentro del margen autorizado. En cuanto a la evaluación del riesgo toxicológico para la población de niños y adultos que vivían en las zonas de estudio, fueron analizadas las dosis de exposición (DE) al plomo y cadmio. No encontró riesgo debido al cadmio y solo detectó un riesgo mínimo por la presencia del plomo. Los valores de riesgo cancerígeno por plomo, tanto individual como poblacional, fueron pequeños. Con respecto a las encuestas realizadas, los valores obtenidos indicaron riesgos toxicológicos mínimos, particularmente por el plomo. Concluyó que los valores promedios de los metales pesados

estudiados fueron someramente mayores a los límites máximo-tolerables según la normativa ecuatoriana. Luego de correlacionar los niveles de concentración de Cd y de Pb, las encuestas y los valores de los parámetros calculados para la evaluación del riesgo, fueron detectados riesgos toxicológicos mínimos para la población infantil en relación con el contenido de plomo.

Hernández (2014) realizó el estudio “Determinación del cadmio (Cd) en suelos agrícolas dedicados a la producción de “alfalfa” *Medicago sativa* L. irrigados con aguas residuales”, con el objetivo de conocer la presencia del cadmio en los suelos agrícolas dedicados a la producción de “alfalfa” con aguas residuales en el ejido San Luis del municipio de Torreón, México. Utilizó la metodología de la espectrofotometría de absorción atómica para el análisis de las muestras, que fueron tomadas al azar con cuatro repeticiones en una parcela de 2250 m², dividida en nueve bloques de 15 m de ancho por 16 m de largo, en los cuales fueron delimitados subbloques de 4 m², de donde fueron tomadas muestras de suelos a las profundidades de 0 a 30 cm (bloques 1, 4 y 7), de 30 a 60 cm (bloques 2, 5 y 8) y de 60 a 90 cm (bloques 3, 6 y 9). Las muestras de suelos fueron secadas durante cuatro días a una temperatura de 35 °C y luego de ser tamizadas fueron analizadas en el laboratorio mediante el método de extracción con ácido nítrico (HNO₃); y la lectura de la caracterización del cadmio del suelo fue hecha en el fotómetro de absorción atómica (Perkins Elmer) en condiciones de operación estándar. Los promedios de los resultados obtenidos en el laboratorio con referencia a la presencia del cadmio en las nueve muestras de suelos tomadas en las tres profundidades fueron los siguientes: bloque 1: 11,825 mg.kg⁻¹; bloque 2: 11,9 mg.kg⁻¹, bloque 3: 11,9 mg.kg⁻¹; bloque 4: 11,7 mg.kg⁻¹; bloque 5: 11,85 mg.kg⁻¹, bloque 6: 11,75 mg.kg⁻¹, bloque 7: 11,925 mg.kg⁻¹; bloque 8: 11,9 mg.kg⁻¹; y bloque 9: 11,65 mg.kg⁻¹. Estos contenidos mostraron una distribución uniforme del cadmio en el área estudiada y que, al ser sometidos al análisis de varianza en relación con el contenido de cadmio en el suelo, no fueron significativos estadísticamente a nivel de bloques y de muestras. Del mismo modo, los resultados de la comparación de las medias de las concentraciones del cadmio en las tres profundidades y en los 9 bloques mediante la prueba de significación de DLS (p=0,05) fueron estadísticamente iguales. Concluyó que los resultados, tanto en bloques como en profundidades, fueron similares. Siguiendo la norma mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA) para metales pesados, las concentraciones de cadmio estuvieron por debajo de los 37 mg.kg⁻¹ que señala, pero por encima de norma norteamericana (USA 1992),

que fue más estricta y que consideró como límite máximo permisible 10 mg.kg^{-1} . Finalmente, agregó que la principal causa de la contaminación por cadmio es la actividad antropogénica, especialmente la actividad industrial y el parque automotor del sector urbano. Bravo *et al.* (2014) ejecutaron el estudio “Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio, en sistemas altoandinos de Colombia” con el objetivo de conocer el factor que causa el movimiento del cadmio en suelos de la subcuenca del río Las Piedras, departamento del Cauca (Colombia). La metodología consideró la selección de tres parcelas de muestreo, teniéndose en cuenta la utilización de los siguientes suelos: a) sistemas de bosque con presencia de varias especies forestales, b) cultivo de la “papa” *Solanum tuberosum* L., y c) pastura de “kikuyo” *Pennisetum clandestinum*. Cada parcela comprendió 400 m^2 en donde de cada 5 m fueron tomadas submuestras de suelo a las profundidades de 0-10 cm y 10-20 cm, considerando el tipo uso, para la obtención una muestra compuesta de 1 kg de peso, aproximadamente. Para conocer la capacidad de retención de cadmio, fueron utilizadas seis concentraciones suministradas en soluciones de 0; 0,5; 1; 1,5; 2; y 3 mg.L^{-1} . Estas fueron incubadas durante 12 horas a una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, con tres repeticiones para cada una. Las muestras compuestas fueron tamizadas con una malla de 2 mm de diámetro, previo al análisis de la clase textural (método del hidrómetro), reacción del suelo (pH, método del potenciómetro), contenido de materia orgánica para deducir (Método de Walkey y Black), capacidad de intercambio de cationes e iones cambiabiles (método del acetato de amonio y espectrofotometría de absorción atómica), Al^{+3} (Método volumétrico) y fósforo disponible (método de Bray II). Los resultados fueron procesados estadísticamente mediante el análisis de varianza, para después, mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$), comparar las medias de los tratamientos y la correlación de estos obtenidos por la prueba Pearson. Asimismo, fueron evaluados los niveles del componente orgánico del suelo en base a los diferentes porcentajes del humus. Para determinar los estados químicos del Cd y conocerse la movilidad de estas formas dentro del suelo, fue aplicada la extracción de manera ordenada considerándose 10 g de las muestras obtenidas en los tres tipos de uso del suelo. También se buscó conocer las cantidades de Cd intercambiable y soluble (F1), Cd adherido en los carbonatos (F2), Cd retenido por los óxidos (F3), Cd adsorbido por la materia orgánica (F4) y Cd residual (F5). Estas fracciones de cadmio sirvieron para determinar el factor de movimiento (FM). De acuerdo con los resultados obtenidos, concluyó que la adsorción y la movilidad del cadmio en los suelos altos de la zona andina de la cuenca del río Las Piedras tuvieron una relación directa con las propiedades físico-químicas, en particular con la textura, el pH, el carbono

orgánico (CO), el Al intercambiable y las bases de cambio de Ca y Mg. Hubo un efecto significativo en dichos procesos debido a la calidad de la materia inorgánica. Una menor movilidad del Cd significa una mejor calidad, lo que previene que se contamine el agua subterránea y evita los efectos tóxicos producidos por acumulación biológica. Los ácidos húmicos que son parte de la fracción orgánica húmica desempeñan un rol importante en la retención de Cd. Por otro lado, la movilización del cadmio mediante fenómenos de complejación y solubilización es consecuencia de la actividad de los ácidos fenólicos. La intensa acidez favoreció para un mayor efecto tóxico producido por la acumulación biológica del cadmio en el suelo. Este efecto es disminuido por el aumento en la calidad de la materia orgánica y de la reacción del suelo. Los niveles de Cd hallados en los suelos fueron bajos en comparación con los niveles referenciales para suelos agrícolas. La utilización de estos terrenos de cultivo con una gestión adecuada que abarque corrección de la acidez y el suministro de nutrientes permitirá una merma en un periodo corto de los niveles de contaminación producidos por el Cd. Sin embargo, la aplicación de fertilizantes fosfatados disminuirá la capacidad del suelo para retener este metal pesado. Las pasturas de “kikuyo” no fueron favorables para la contención de Cd en estos suelos.

Contreras *et al.* (2005) realizaron la investigación “Efecto de dos fuentes de carbonato de calcio (Ca CO₃) sobre la disponibilidad del cadmio para plantas de “cacao” *Theobroma cacao* L. en suelos de Barlovento, estado Miranda, Venezuela”. El objetivo de la investigación fue determinar por el medio del análisis foliar cómo la presencia del carbonato de calcio (CaCO₃) afecta la absorción del cadmio (Cd) por las plantas de “cacao”. La metodología fue desarrollada mediante la selección de los suelos para el estudio considerándose una prueba de incubación y un ensayo con plantas de “cacao” en condiciones de invernadero. Los suelos fueron seleccionados tomándose en cuenta las zonas más importantes en cuanto a la producción del cultivo de “cacao” en la región de Barlovento. La primera zona fue Agua Clara, una localidad situada en las cercanías del río Tuy que se caracterizó por tener unos 1300 mm anuales de precipitación. Está ubicada en una zona de vida de bosque seco tropical, cuyos suelos fueron de la clase Vertic ustifluvents. La segunda fue Capaya, ubicada en el río del mismo nombre con 2400 mm de precipitación media anual, asentada en la zona de vida de bosque húmedo tropical, y con suelos de la clase Aeríc tropaquepts. Asimismo, la localidad de Cumbo, con un promedio anual de precipitación de

2300 mm de lluvias anuales, fue la tercera ubicada en la zona de vida de bosque húmedo tropical, que tiene suelos de la clase Troprothents. En cuarto lugar, fue considerada la localidad de Curiepe, ubicada en la margen derecha del río del mismo nombre y con una precipitación de 1800 mm de promedio anual de precipitación, ubicada en la zona de vida bosque seco tropical, y clasificada como Typic ustifluents. Por último, escogieron la zona de Tapipa, ubicada en las cercanías del río Tuy, con 2600 mm de precipitación media anual, ubicada en la zona de vida bosque húmedo tropical con suelos de la clase Typic dystrochrepts. De cada localidad fueron recolectadas cuatro submuestras. Luego de ser mezcladas fueron tomadas las muestras que fueron enviadas al laboratorio. Después de evaluarse la dinámica del calcio (Ca) en las plantas, fueron calculados el Cd total y el Cd intercambiable presentes en los suelos para ser comparados con la acumulación registrada inicialmente. Los resultados mostraron una reducción en la absorción del cadmio por las plantas con la aplicación de CaCO_3 . Las hojas mostraron una mayor presencia de Cd con la administración de carbonato de calcio. El nivel de Cd intercambiable del suelo fue menor en relación con el testigo de los suelos de la clase Typic dystrochepts. Concluyó que los tratamientos con carbonato de calcio (CaCO_3) en ambos suelos permitieron una reducción de las acumulaciones de Cd en las hojas de las plantas de “cacao”. Cuando fue aplicado al suelo un mayor nivel de CaCO_3 , también generó un efecto superior. De igual forma, el nivel de calcio en las hojas aumentó al incrementarse la proporción de calcio añadido a los suelos y al aumentarse el tiempo del ensayo. Con la aplicación de CaCO_3 , fue reducido el Cd intercambiable de los dos tipos de suelos en relación con el testigo y aumentó el efecto en la medida en que se aplicaron más dosis. El CaCO_3 aumentó el peso de la materia seca de las plantas de “cacao” en comparación con el tratamiento testigo, y se notó más en el suelo de la zona de Cumbo, donde el pH inicial fue menor.

Bonomelli *et al.* (2003) desarrollaron el estudio “Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile”. El objetivo fue evaluar las consecuencias de la fertilización fosforada en la acumulación del cadmio disponible en cuatro tipos de suelos de uso agrícola. Dentro de la metodología fueron considerados los siguientes órdenes de suelos: Alfisol, Inceptisol, Ultisol y Andisol. Los dos primeros estuvieron localizados en la zona central y los otros dos, al sur del Chile. De cada orden de suelo fueron colectadas muestras de 0-20 cm de profundidad y luego estas fueron analizadas con relación al pH, materia orgánica, fósforo disponible, bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K), aluminio

extractable, (Al^{3+}), micronutrientes (Cu, Zn, Fe, Mn) y Cd disponible. Para la determinación de contenido de cadmio disponible, fueron tomadas muestras de 250 g de los cuatro suelos, y fueron mantenidas en incubación por 90 días a una temperatura constante de 25 °C. Los tratamientos considerados fueron un testigo y tres tratamientos fertilizados con diferentes niveles de superfosfato simple de calcio para cada suelo, con tres repeticiones, dispuestos en un diseño completamente al azar. El pH fue determinado con el método del potenciométrico en una mezcla de suelo y agua (1:2.5). La materia orgánica fue analizada con el método de Walkey y Black; el P, con el método de Olsen. El Al^{3+} fue extraído con el acetato de amonio y luego medido con el espectrofotómetro de absorción atómica. Las bases cambiabiles fueron analizadas mediante la extracción del Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ con el acetato de amonio. En el caso de los micronutrientes del suelo (Cu, Fe, Mn y Zn), fue mediante la extracción con DTPA, y en el extracto fueron medidos los micronutrientes mediante EAA. La cantidad de Cd disponible en el suelo fue cuantificada mediante el método EDTA 0,05M a pH 7,0. El contenido de Cd en los cuatro tipos de suelos y en el testigo fue analizado a 1, 2, 7, 14, 21, 36, 49, 63, 77 y 90 días luego de la administración del fertilizante fosforado en el inicio de la incubación. Los datos obtenidos mostraron que los niveles de P-Olsen iniciales fueron entre bajo y muy bajo. El Alfisol tuvo un pH cerca del neutro con bajo nivel de materia orgánica. Asimismo, el Inceptisol, también con bajo contenido de material orgánico, fue caracterizado como un suelo alcalino, y destacó por una elevada acumulación de Ca. En el caso del Ultisol y el Andisol, ambos mostraron pH ácido. El Al extractable resultó ser un mejor indicador con respecto a la retención o fijación de P en el suelo, en una relación estrecha con la mineralogía de las arcillas. En este caso, fueron detectados menores valores en el Alfisol e Inceptisol, un valor medio en el Ultisol y muy alto en el Andisol debido a que este suelo contiene arcillas alófanas que tuvieron una mayor superficie específica con mayor capacidad de absorción del P. Químicamente, los suelos fueron distintos. La concentración de Cd inicial fue estadísticamente diferente en los cuatro terrenos y, al realizarse la comparación, el mayor contenido de Cd inicial fue observado en el Inceptisol. El suelo Andisol posee una notable capacidad de retención de fósforo, por lo que le corresponde la mayor dosis de fertilizante. En todos los suelos, el nivel de cadmio fue mayor al final de la incubación en los tratamientos fertilizados con fósforo con respecto al testigo sin fertilización fosforada ($p < 0,01$). En las incubaciones no fueron encontrados efectos estadísticamente significativos con relación al tiempo; es decir, el Cd liberado desde el inicio por la fertilización continuó disponible hasta el final de la medición. Concluyeron que una porción considerable de cadmio queda disponible para las plantas en los suelos Alfisol,

Inceptisol, Ultisol y Andisol (que se halla en varias regiones de Chile) cuando se añaden dosis de fertilizantes fosforados que tienen este metal. El Cd que permaneció disponible luego de que el fertilizante fosforado reaccionara con el suelo no disminuyó por lo menos después de los 90 días de la incubación. Para la producción agrícola, los Andisoles de Chile requieren altas dosis de fertilizante debido a que tienen una elevada capacidad de retención de P. De esta manera, al emplear con frecuencia fertilizantes fosforados que contienen cadmio, fueron añadidas significativas cantidades de este elemento.

Villanueva (2001) hizo una investigación titulada “Evaluación del impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en suelos cultivados con “maíz” *Zea mays* L.”, con el cual tuvo el objetivo de evaluar el impacto ambiental negativo producido por la acumulación de cadmio en la capa arable de los suelos como consecuencia del uso de fertilizantes fosfatados comercializados en Chile. Para tal efecto, fueron utilizados tres submodelos para evaluación de un posible riesgo por el uso de fertilizantes portadores de cadmio. El submodelo de acumulación fue utilizado en el cultivo del “maíz” en ocho series de suelos diferentes de la VI Región de Chile. Considerando las características de los suelos y los parámetros requeridos para el modelo, fueron tomadas en cuenta 48 parcelas de análisis, con un plazo de 50 años. Los resultados indicaron que las zonas donde había menores tasas de extracción de Cd por el cultivo del “maíz” (Kp) y de lixiviación del metal desde el suelo (Kl) presentaron una mayor acumulación de Cd. Por otro lado, también hubo una tendencia general de mayor concentración del metal pesado en la raíz cuando el suelo tuvo una elevada acumulación inicial de Cd, mientras que las tasas de lixiviación (Kl) y de extracción del cultivo (Kp) fueron bajas. La contaminación fue detectada en áreas cultivadas entre 30 a 48 años en cuatro de las áreas estudiadas. Esto ocurrió debido a la utilización de superfosfato mexicano, que tiene elevada proporción de Cd (55,5 mg kg⁻¹ de fertilizante), con la máxima tasa de fertilización sugerida para el cultivo del “maíz”. Asimismo, los estudios recientes vinculados con los modelos de exposición y de evaluación del riesgo fueron importantes para tener una aproximación sobre lo que causaría el Cd en la salud de las personas. Concluyó que los fertilizantes fosfatados, sean importados o comercializados, poseen una cantidad de cadmio que permite el ingreso del metal en los terrenos (Kfer). Los fertilizantes fosfatados con mayores niveles de Cd fueron importados desde México y representaron el 83 % del superfosfato importado. La proporción de Cd en los suelos de la VI Región, proyectados a periodos de 50 años con una continua aplicación de fertilizantes fosfatados,

fue tolerable según las normas de otros países y no representó un riesgo o peligro para la salud. La utilización de fertilizantes fosfatados con elevada concentración de Cd podría incrementar la contaminación de las tierras agrícolas en un periodo de 38 a 40 años, teniéndose como referencia que la concentración máxima es de Cd de $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ en suelo seco. Este metal fue acumulándose en el suelo debido a una baja tasa de extracción por el cultivo con relación a un bajo porcentaje de lixiviación y una alta proporción de incorporación al suelo. Para reducir la presencia del Cd en el terreno es necesario tener en cuenta otras vías del metal en la gestión del ambiente. De esta manera podría evitarse o prevenirse el desgaste de los recursos hídricos en el área y también un posible paso del cadmio al cuerpo humano en cantidades riesgosas para la salud.

Nacionales

Huaynates (2013) hizo una investigación llamada “Efecto de la materia orgánica en la absorción de cadmio por el suelo en la localidad de Supte”. El objetivo fue evaluar el efecto de la materia orgánica en la disminución del contenido de Cd en el terreno. La investigación fue desarrollada en el sector de Supte en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, Región Huánuco, donde los suelos estuvieron contaminados con cadmio, según el resultado de los análisis que fueron realizados con anterioridad ($3,6 \text{ mg.kg}^{-1}$). La metodología consistió en la cuantificación del cadmio en el suelo, la administración de dos fuentes de materia orgánica para la merma de la concentración de este metal y la determinación de la sinergia existente entre los mismos. Los tratamientos fueron cuatro niveles de compost (A): $a_0 = 0$, $a_1 = 250$, $a_2 = 500$ y $a_3 = 750 \text{ kg.parcela}^{-1}$ de 25 m^2 , y cuatro niveles de guano de islas (B): $b_0=0$, $b_1 = 0,5$, $b_2 = 1,0$ y $b_3 = 1,5 \text{ kg.parcela}^{-1}$ de 25 m^2 . Esta selección tuvo por finalidad determinar un mejor efecto de los niveles de compost y de guano de islas, ya sea independientemente o cuando fueron combinados. Para el diseño estadístico de los tratamientos fue tomado en cuenta el diseño de bloques completos al azar con un arreglo factorial 4×4 , con 3 repeticiones con un total de 48 unidades experimentales. Los resultados demostraron que la concentración de cadmio total en el suelo disminuyó cuando fueron adicionados los abonos. Al ejecutarse el análisis de varianza (ANOVA) fue encontrado que las cantidades de compost y de guano de islas agregadas para la reducción de Cd en el suelo tenían una interacción significativa; no obstante, no existió significación estadística para los bloques en relación con el experimento. Asimismo, fue evidenciada una sinergia positiva entre el compost y el guano de islas en relación con la reducción del Cd del

suelo. La concentración del cadmio en el suelo fue variable de 3,5 a 0,3 mg.kg⁻¹ en los tratamientos a1b3, a1b1 y a2b1. Concluyó que la materia orgánica tuvo efecto positivo en la reducción del metal en el terreno. Los niveles de compost próximos a 500 g (b1) por planta fueron mucho más efectivos en la disminución del Cd en suelos contaminados con este metal. Las cantidades de guano de islas en el rango de 500 (a1) a 1500 g por planta (a2) provocaron también la reducción del cadmio. Asimismo, el compost y el guano de islas mostraron un trabajo conjunto para la reducción del Cd del suelo. Destacaron las interacciones de sus menores concentraciones, ya que ofrecieron mejores resultados.

Cárdenas (2012) realizó la investigación “Presencia de cadmio en algunas parcelas de ‘cacao’ orgánico *Theobroma cacao* L. en la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo - Tingo María - Perú”. El objetivo de la investigación fue evaluar la presencia del cadmio en los suelos, hojas, almendras y cascarillas del “cacao”. La metodología consideró la selección de 20 parcelas en la Cooperativa Agraria Industrial Naranjillo, en la Región Huánuco, y la recolección de muestras de suelo, parte foliar, almendras y cascarilla del “cacao”, las mismas que fueron enviadas al laboratorio para el análisis físico, químico y biológico según los métodos establecidos. Los datos obtenidos fueron procesados y evaluados por medio del análisis de correlación con el programa SPSS 15. Los resultados mostraron deficiencias de potasio solo en ciertas parcelas. El análisis foliar reveló que, en los contenidos de N, P, K, y Cu había deficiencias generalizadas. En cuanto a las almendras, no fueron encontradas deficiencias, con excepción del Fe y Zn. El valor promedio de Cd disponible en los suelos fue de 0,66 mg.kg⁻¹. A nivel foliar, el promedio de Cd total fue de 2,84 mg.kg⁻¹. En las almendras y cascarillas, los valores promedio del metal total fueron de 1,55 y 2,04 mg.kg⁻¹, respectivamente. La densidad promedio de la macrofauna fue de 373,53 individuos.m⁻². El orden *Hymenoptera* resultó ser predominante (49 %). Al ser evaluada la actividad microbiana del suelo fue encontrado un valor promedio de 1,47 mg.100g⁻¹ de suelo. Finalmente, concluyó que el valor promedio de cadmio disponible en los suelos fue de 0,66 mg.kg⁻¹, lo cual sobrepasó con claridad los límites permisibles. El promedio de cadmio total a nivel foliar fue de 2,84 mg.kg⁻¹, promedio que también sobrepasó los niveles tolerables. En cuanto a las almendras y las cascarillas, los valores promedio de cadmio totales fueron de 1,55 y 2,04 mg.kg⁻¹, respectivamente, por lo que resultaron ser mayores que los límites permitidos. La cantidad de Cd disponible en el terreno correlacionó de manera positiva y con alta significación estadística (***) con el nivel de Cd total foliar; en cambio, en las

almendras no hubo alta significación estadística ($r^2 = 0,857$ y $0,737$). Concluyó que los suelos presentaron condiciones físico químicas adecuadas, a excepción de algunas parcelas que mostraron bajos niveles de K_2O . El valor promedio de cadmio disponible en el suelo estuvo por encima de los límites permisibles y correlacionó positivamente y con alta significación estadística con los contenidos de Cd total foliar y en las almendras. Los valores promedio de Cd total en almendras y en cascarillas sobrepasaron los límites permitidos. En cuanto a la macrofauna del suelo, la densidad promedio fue de $373,53 \text{ ind.m}^{-2}$ y el orden *Hymenoptera* fue el más abundante con $182,13 \text{ individuos.m}^{-2}$. La actividad microbiana originó un promedio de liberación del CO_2 de $2,064 \text{ mg.100 g}^{-1}$ y con un mínimo de $0,037 \text{ mg.100 g}^{-1}$ de suelo. Además, hubo correlación positiva entre el Cd disponible en el terreno y la respiración microbiana, pero sin significación estadística.

Regionales

Abanto (2016) desarrolló el estudio “Fuentes fosfatadas en dos suelos y la concentración de cadmio foliar en “maíz” *Zea mays* L., bajo condiciones de invernadero”. El experimento tuvo como objetivo determinar el efecto del Cd en las plantas de “maíz” con diferentes fuentes de fertilizantes fosfatados con distintas dosis, y evaluar la interacción en dos suelos distintos. De acuerdo con la metodología, el trabajo experimental fue ejecutado en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Los tratamientos considerados fueron los siguientes: a) dos fuentes de fósforo (fosfato diamónico y roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico) aplicadas en tres dosis ($50, 100$ y 200 mg.kg^{-1}) en interacción con los tipos de suelo franco arenoso y arenoso. El “maíz” fue elegido como planta indicadora porque puede crecer en varios tipos de suelos y genera materia seca de forma rápida. Esto posibilitó la visualización de los efectos de la fertilización y de la absorción de cadmio. Además, para la interpretación de los resultados fue tomado en cuenta un análisis de varianza para el diseño completo aleatorio (DCA) con arreglo factorial $2 \times 3 + 2$ con la inclusión de dos testigos adicionales. La comparación de las medias de los tratamientos fue analizada con una prueba de Tukey ($p \leq 0,05$), y fueron procesadas con el programa SAS versión 9.4. Los resultados mostraron que, a medida que era añadido más fósforo, la materia seca aumentaba. Esta fue producida en mayor cantidad con la aplicación de 200 mg.kg^{-1} de P. La fuente fosfato diamónico fue la que más acumulación de materia seca provocó cuando el suelo fue arenoso. Sobre la extracción total de cadmio, fue observada una relación directa con la proporción de fertilizante fosfatado que

fue administrado. Hubo una menor extracción de Cd por el cultivo tanto en el tratamiento sin P como en el que fue utilizada roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico como fuente de fósforo. La mayor extracción total de Cd en plantas de “maíz” fue lograda con la administración de fosfato diamónico. Asimismo, el cadmio aumentó en los tejidos del cultivo cuando el suelo arenoso fue utilizado como sustrato. Concluyó que los efectos en la producción de materia seca fueron negativos cuando el cadmio aplicado tuvo una menor concentración en el fertilizante fosfatado. El fosfato diamónico mostró mejores resultados en la producción de materia seca en el suelo arenoso. Además, la absorción de Cd por parte de la planta en la parte foliar fue mayor cuando fueron aplicadas dosis altas; la absorción de cadmio en la parte radicular fue mayor con la dosis de 200 mg.kg^{-1} y teniendo como fuente al fosfato diamónico. Las plantas de “maíz” acumularon más Cd en la parte foliar en el suelo arenoso, más aún cuando se utilizó la dosis más alta de fosfato diamónico, y también, segundo lugar, cuando se usó la roca fosfórica. Este resultado no fue similar en la zona radicular, ya que la extracción fue mayor cuando el cultivo fue en un suelo franco arenoso.

1.2. Bases teóricas especializadas

1.2.1. Contaminación ambiental

Es la generación, descarga o presencia en el medioambiente de diversas sustancias en forma química o física que, al ser incorporadas al aire, medio edáfico, subsuelo, recursos hídricos y comunidad biótica (fauna y flora), afectan a los componentes naturales modificando la conformación natural de los seres vivos como resultado de la alteración del sistema ecológico. Por otro lado, las normas sobre la conservación del medioambiente (Ley General sobre el Ambiente N.º 28611, 2005, p. 3) definen a la contaminación ambiental de la siguiente manera:

La acción y estado que resulta de la introducción por el hombre de contaminantes al ambiente por encima de las cantidades o concentraciones máximas permitidas tomando en consideración el carácter acumulativo o sinérgico de los contaminantes en el ambiente. La contaminación ambiental está relacionada con la presencia de agentes externos de origen físico, químico o biológico, que afectan a la naturaleza de manera integral, llegando a afectar tanto al ambiente, como a los seres vivos que habitan en éste. Del mismo modo, cuando la contaminación ambiental se produce perjudica el desarrollo de la población, llegando, en muchos casos, a tener niveles perjudiciales no solamente para la vida del ser humano, sino como también para la vida de los animales y la permanencia de varias especies vegetales.

Los contaminantes mayormente tienen relación con los subproductos o residuos en diferentes estados de la materia. Estos se originan al extraer, procesar, convertir en productos o usar un recurso natural. Las emisiones de energía no deseadas o en cantidades excesivas también están consideradas como contaminantes y dentro de este grupo están el ruido excesivo y las variaciones del calor o la radiación. La contaminación se produce, de manera general, por la intervención del ser humano. También es posible que se genere a partir de fenómenos naturales, como sucede con las erupciones volcánicas. Los elementos contaminantes no solo afectan a las zonas donde se han provocado, sino que llegan a otros espacios por acción del viento o el agua. Los que provienen de fuentes únicas e identificables son llamados contaminantes puntuales. También existen fuentes no puntuales, cuyos contaminantes producidos están dispersos por varias partes y es muy difícil ubicarlos. Así sucede con los fertilizantes y plaguicidas usados en la agricultura, estadios y áreas destinadas para la práctica del golf, o en parques y jardines. Esos productos terminan en los ríos y océanos por el drenaje. Los pesticidas también llegan a la atmósfera producto de su liberación al momento de usarse y por la fuerza del viento. Como consecuencia, esta contaminación ambiental es la responsable de las alteraciones en el medio ambiente, que es dañado de manera leve o grave, lo cual causa su destrucción (Orellana, 2005).

Orellana (2005) agrega que la contaminación que se produce de manera natural es difícil de controlar o prevenir, salvo algunas excepciones, en las que los seres humanos solo desempeñan el papel de ser simples espectadores en muchos casos, aunque tienen la tendencia de hacer algo para remediar el daño producido. Por el contrario, en la contaminación producida por el ser humano se debe y se tiene que participar con la finalidad de eliminarla, de ser posible, o en todo caso disminuir sus efectos hasta lograr que sean compatibles con la capacidad de autodepuración que tiene el medio ambiente. El medio ambiente tiene la capacidad de autodepuración o biodegradación para la eliminación de los contaminantes que le afectan, hasta cierto nivel. Esta capacidad es variable y tiene características diferentes para cada tipo y condición del medio ambiente. Por ejemplo, no se puede comparar la capacidad de autodepuración que tiene con las condiciones de un río, ni tampoco se puede igualar la capacidad de un lago con la de una laguna, debido a que sus mecanismos biológicos son muy distintos. Por estas razones, se considera que la capacidad de carga del medio ambiente para soportar los contaminantes no es homogénea.

1.2.2. Tipos de contaminación

Los principales tipos de contaminación son la contaminación del agua, la del aire y la del suelo. La contaminación afectará al entorno medioambiental, actuando indistintamente y afectando a las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, el agua y el medio ambiente en general. Estos componentes pueden ser reconocidos mediante los estudios específicos dedicados a cada uno de ellos (Barrio, 2015).

Contaminación del suelo

La contaminación del suelo ocurre debido a la incorporación de compuestos que no son parte natural del suelo y que llegan a este en forma sólida, produciendo toxicidad y causando una alteración notoria en las propiedades del suelo, para convertirse en un serio peligro para las plantas y, por ende, para la vida. Con relación a este tema, Kabata-Pendias (2011) señala la llamada revolución verde, que es reconocida como el proceso histórico de modernización de los procesos productivos en la agricultura y que inició a mediados del siglo pasado. Aquella produjo un cambio radical en el sector agrícola y estaba basada en la utilización de especies o variedades reconocidas como organismos genéticamente modificados (OGM), a la par del perfeccionamiento ante los riegos, el mejoramiento de la eficiencia de la maquinaria agrícola y el mayor uso de los fertilizantes producidos químicamente de manera artificial, conjuntamente con los pesticidas para el control de las plagas que con el transcurso del tiempo han causado la acumulación en el suelo de muchos minerales tóxicos, especialmente aquellos que son hoy reconocidos como elementos traza o elementos pesados. Nava y Méndez (2011) agregan que estos compuestos pueden generar riesgo sobre la salud pública de acuerdo con el grado de transferencia de estos metales a los productos agroalimentarios, tal como está sucediendo más acentuadamente en los países en vías de desarrollo, donde las medidas de control de la calidad de los productos alimenticios no son estrictas.

Alloway (2013) explica que una fuente importante no puntual de contaminación con metales pesados son los sistemas de producción agrícola, porque, al mismo tiempo que origina la acumulación de estos en el suelo, también son causantes de la transferencia en la cadena suelo-planta-consumidor de estos elementos contaminantes, especialmente en las regiones donde los cultivos alimenticios se realizan de manera intensiva sin tener en cuenta periodos de descanso ni un plan de rotación de cultivos. La presencia de ciertos metales pesados está

relacionada de manera directa con fuentes específicas, como los fertilizantes, que incrementan los contenidos de Cd, Cr, Mo, Pb, Zn; los plaguicidas, con respecto al Cu, As, Hg, Pb, Mn, Zn; el compost producido a partir de residuos sólidos convencionales, que puede incrementar los contenidos de Cd, Cu, Ni, Pb, Zn; y el estiércol, que puede aportar Cu, As, Zn. Mahecha *et al.* (2015) explican que los fertilizantes fosforados constituyen una fuente de Cd, porque al contener apatita, además de ser portador de fósforo, contiene Cd entre 8 y 500 mg.kg⁻¹. Por otro lado, las aguas utilizadas en el riego que son tomadas de fuentes previamente contaminadas o de sistemas de tratamiento agregan metales pesados al suelo y dentro de estos está el cadmio.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2019) indica que los procesos de ingreso de los contaminantes al sistema suelo se debe a la incorporación de sustancias o compuestos químicos que se hallan en niveles altos y superan los límites de la normalidad. Estos son la causa de diversas reacciones adversas y afectan negativamente a los organismos que viven en el suelo. La mayor parte de la contaminación es originada por acción del hombre, aunque algunos componentes están presentes naturalmente al descomponerse; además, son parte de la composición de los minerales que están dando origen al suelo. Estos materiales pueden producir toxicidad cuando los niveles llegan a porcentajes altos. Por ello, la presencia de los metales pesados tiene origen antropogénico. Puede ocurrir que algunos contaminantes sean difíciles de ser observados de forma directa. Por esta razón, se considera que la presencia de los metales pesados significa un peligro constante que no se puede ver.

Contaminación del agua

La contaminación del agua se origina con el ingreso a este recurso de compuestos extraños, incluyendo los microorganismos, desechos químicos, residuos industriales, así como aguas residuales que ocasionan el deterioro del agua, dejándola sin calidad de purificación, inservible para el consumo humano y otros usos. La contaminación con estas características puede entenderse de varias formas. Una manera de explicarla es la que hace referencia a la acumulación de sustancias extrañas en el agua. Estas partículas ajenas provocan muchas consecuencias visibles. Entre estas se incluye el desequilibrio en el ecosistema y la afectación a personas susceptibles a distintas enfermedades. Cabe resaltar que la

contaminación del agua alcanza no solo a los océanos, sino también a los ríos y otras zonas donde este líquido tiene presencia, sea dulce o salado (Cumbre Pueblos, 2017).

Contaminación del aire

Según Cumbre Pueblos (2017), la contaminación del aire es un tipo de contaminación muy especial que consiste en la alteración de los gases que se encuentran suspendidos en la atmósfera. Cada uno de los inconvenientes que se producen van dejando efectos no solo en el medio ambiente, sino también en las personas y los ecosistemas. Las sustancias químicas que se alojan en la atmósfera se incrementan al aumentar las fuentes contaminantes. En el aire que se respira, la contaminación está presente en las diferentes sustancias que alteran la capa natural y a los componentes que están dentro de esta. Las causas que originan estos resultados en la capa atmosférica son muchas y son las que actúan constantemente para que el aire contenga impurezas y deje de ser puro o limpio, tal como se lo necesitan los seres vivos que habitan el planeta. El aire contaminado afecta seriamente la calidad de vida de todos los seres y al mismo tiempo está contribuyendo con el desequilibrio del clima, y origina distintos eventos meteorológicos que son negativos y causan daños permanentes.

1.2.3. Contaminación agroquímica

La FAO (2019) señala que los pesticidas son moléculas sintéticas orgánicas o inorgánicas que están clasificadas con base en sus estructuras químicas, el tipo de acción, la forma de penetración al organismo contaminado. En el caso de los plaguicidas, el efecto toxicológico sobre las plagas está en función de su composición química, pero con una estrecha relación con los componentes del suelo que al mismo tiempo también son afectados. De acuerdo con la estructura química, los plaguicidas de uso agrícola están clasificados en 12 grupos distintos, tal como se señala a continuación:

- a. Compuestos organoclorados. Dentro de estos compuestos, que tienen como elemento básico al cloro, están los siguientes productos: DDT, metoxicloro, clordano, dicofol, BHC/ HCH, aldrin, endosulfan, heptacloro, metoxicloro, clordano.
- b. Compuestos organofosforados. En este grupo, que tiene como el ingrediente activo al fósforo, están los siguientes plaguicidas: paratión, malatión, monocrotofós, clorpirifos, quinalfos, forato, diazinon, fenitrotión, acefato, dimetoato, fentiión, isofenfos, fosfamidón, temefos, triazophos.

- c. Carbamatos. Se trata de sustancias orgánicas de síntesis formadas por un átomo de nitrógeno enlazado a un grupo lábil, el ácido carbámico. En este grupo están los siguientes productos: aldicarb, oxamilo, carbarilo, carbofuran, carbosulfán, metomilo, metiocarb, propoxur, primicarb.
- d. Piretroides. Obtenidas por síntesis con estructura similar a las piretrinas. Funcionan como insecticidas para plantas, animales y seres humanos. En este grupo está: Aletrina, deltametrina, resmetrina, cipermetrina, permetrina, fenvalerato, piretro, neonicotinoides: Acetamiprid, imidacloprid, nitenpiram, tiametoxan.
- e. Compuestos de órgano-estaño. Compuestos químicos a base de estaño y con sustituyentes hidrocarbonados, que tienen enlaces químicos entre átomos de carbono y estaño. En este grupo están el acetato de trifenilestaño, cloruro de trivenilestaño, hidróxido de tricilohehexilestaño, azociclotina.
- f. Compuestos órgano-mercuriales. Los compuestos orgánicos de mercurio, en ocasiones llamados órgano-mercuriales, son aquellos que contienen enlaces covalentes entre el carbono y el mercurio. Entre ellos se tiene al cloruro de etilmercúrico y bromuro de fenil mercurio.
- g. Fungicidas ditiocarbamados. Son compuestos orgánicos de mercurio que contienen enlaces covalentes entre el carbono y el mercurio. Los compuestos más importantes de este grupo son zineb, maneb, mancozeb, ziram.
- h. Compuestos de benzimidazol. Son hidrocarburos aromáticos y heterocíclicos, caracterizados por la fusión del benceno y el imidazol. En este grupo de plaguicidas se tiene a los siguientes: benomil, carbendazim, tiofanato de metilo.
- i. Compuestos de clorfenoxi: Son usados en la agricultura para el control de malezas de hoja ancha; también son utilizados como defoliante. Los principales productos de este grupo son 2,4-D, TCDD, DCPA, 2, 4,5-T, 2,4-DB, MCPA, MCPP.
- j. Dipiridilios. Son herbicidas sólidos, insípidos e incoloros, muy solubles en el agua. En este grupo está paraquat, diquat, y diversos: DNOC, bromoxilo, simazina, triazamato.

Ciertos plaguicidas que están citados arriba son conocidos como contaminantes orgánicos persistentes (COP); otros están asociados a los metales pesados que contaminan al suelo. El informe del Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos (GTIS), al referirse al impacto causado por los insumos destinados a la protección de plantas sobre las cualidades y funciones del suelo y los servicios ecosistémicos, resalta el grave efecto que están produciendo los fungicidas cúpricos en gusanos y en la biomasa microbiana del suelo. Estos

fungicidas tienen un uso muy amplio en la viticultura orgánica para controlar las enfermedades fungosas en las plantaciones de la “vid” *Vitis vinifera* (Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2019).

1.2.4. Contaminación por metales pesados

Los metales pesados, al convertirse en un elemento contaminante, pueden ser la causa de muchos riesgos y peligros para la humanidad y para el ecosistema natural. Afectan mediante la ingestión o el contacto que se tiene con el medio contaminado, o también a través de la cadena alimenticia por medio de la relación suelo-planta-ser humano o suelo-planta-animal-ser humano; el uso del agua subterránea para consumo que está contaminada; o la reducción de la calidad de los alimentos (inocuidad) que han adquirido un nivel significativo de reacciones. Esto produce una merma en el uso de la tierra destinada a la producción de alimentos y causa, en consecuencia, la inseguridad alimentaria y serios problemas relacionados con la tenencia de la tierra (Muñoz, 2017).

El cadmio es uno de los metales pesados más dañinos para los seres vivos. Se incorpora en el medio ambiente a través de fuentes de origen natural o debido a actividades antropogénicas. Diversas investigaciones han demostrado que el cadmio, al igual que otros metales pesados, es capaz de acumularse biológicamente en los componentes de la cadena alimenticia y bioincrementarse progresivamente en relación con la ingesta continua de alimentos que están contaminados. Una notoria deficiencia de otros metales importantes, como el hierro, cobre, zinc y calcio, en el cuerpo humano incentiva la absorción de cadmio, lo cual ocasiona un ataque serio en diversos órganos. Los más afectados son los riñones, el hígado, los pulmones, los huesos y la placenta. También puede ser la causa de otras enfermedades, tales como la diabetes y la hipertensión (Gallagher y Meliker, 2010). Además, está señalado que tiene la capacidad de generar diferentes tipos de cáncer, como el de la próstata, pulmones, páncreas y leucemia.

Según Orellana (2005), la presencia de los metales pesados en los suelos debe estar únicamente en relación con la composición de las rocas y con los procesos edafogenéticos que ocurren durante la formación del suelo, con lo cual quedaría establecida la presencia de

los metales pesados solo de forma natural. Sin embargo, con las diversas actividades humanas, los niveles de estos metales originados naturalmente han aumentado en el suelo y se han convertido en la causa principal de los efectos tóxicos reconocidos en la actualidad. Barraza *et al.* (2017). Asimismo, se sabe que hay una preocupación internacional reciente relacionada con la presencia de los metales traza en los tejidos de algunos vegetales, como es el caso del “cacao”, ya que en estudios recientes se ha demostrado que el arsénico, el bismuto, el cromo, el cadmio y el plomo se estarán acumulando en los suelos para luego llegar a la cadena alimenticia (Chavez *et al.*, 2015). Entre estos elementos pesados, el cadmio (Cd), que es un oligoelemento no esencial, parece que se está acumulando en las partes comestibles del “cacao”, lo cual significa riesgos potenciales para la salud humana por la ingestión de productos contaminados con este metal. También se tiene información de que los granos de “cacao” tienen diferentes concentraciones de Cd dependiendo no solo de la variedad, sino también del sitio geográfico y de los tipos de prácticas de manejo de los suelos, los mismos que estarían alcanzando concentraciones medias de $1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$ en América del Sur, $0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ en África Oriental y América Central, $0,3 \text{ mg.kg}^{-1}$ en Asia, y $0,09 \text{ mg.kg}^{-1}$ en África Occidental (Chavez *et al.*, 2015)

1.2.5. Contaminación con cadmio

El elemento químico cadmio (Cd) se localiza en el grupo 12 de la tabla periódica. Es blando cuando se encuentra como metal puro, maleable, dúctil, adopta un color plateado claro y se disuelve fácilmente en un medio ácido. Además, cuando se calienta se combina con el oxígeno, fósforo, azufre y halógenos. Greenwood y Earnshaw (2012) mencionan que el Cd naturalmente presenta de manera estable ocho isótopos, aunque también están considerados 11 radioisótopos artificiales. Asimismo, los halogenuros, el NO_3^- y el SO_4^{2-} , son solubles, mientras que el CO_3^{2-} , OH^- y el CdO son insolubles.

El cadmio (Cd), por su condición de ser un elemento pesado sumamente tóxico, tiene una baja afinidad por los compuestos adsorbentes y puede ser más soluble y móvil (Bravo *et al.*, 2014). Tiene un comportamiento parecido a los compuestos catiónicos divalentes, como son los casos del calcio (Ca^{2+}), hierro (Fe^{2+}), manganeso (Mn^{2+}) y zinc (Zn^{2+}) (Uraguchi *et al.*, 2009), cuya probabilidad de ser transferido está en función del vegetal, tipo de suelos y eficiencia en el uso y manejo de este recurso (Programa de las Naciones Unidas para el

Medio Ambiente [PNUMA], 2008). Los suelos que tienen contenidos suficientes de material orgánico u óxidos ferrosos tienen la capacidad de adsorber mayor cantidad de Cd en comparación con suelos que disponen de suficientes cantidades de partículas arcillosas del tipo 2:1 (Lofts *et al.*, 2005). El traslado y la disponibilidad biológica aumenta en suelos descalcificados, y en aquellos que son calcáreos es menor (Lora y Bonilla, 2010), donde el aumento en el suelo es producido por la excesiva utilización de los fertilizantes fosfatados como consecuencia de la actividad humana, así como por la intemperización del material parental, que probablemente sea la causa de la transferencia del metal hacia la cadena alimenticia (Bonomelli *et al.*, 2003). La Figura 1 indica cómo el cadmio que procede de la atmósfera, fertilizantes, lodos residuales, enmiendas, residuos industriales y agrícolas ingresa en las especies vegetales, a los organismos humano y animal, y las formas como se encuentran en la solución del suelo y en los componentes minerales y la materia orgánica del suelo.

Existen diversas investigaciones que consideran al cadmio como un elemento que tiene un efecto negativo para la salud humana por ser tóxico, longevo y tener la capacidad de acumularse en los riñones y el hígado de los humanos ocasionando el mal funcionamiento de los primeros, afecciones en los huesos, y actuando positivamente en las enfermedades cancerígenas (Bravo *et al.*, 2014). Kabata-Pendias (2011) agrega que la contaminación por cadmio (Cd) representa una amenaza para la seguridad alimentaria, para los seres humanos y para la salud en el mundo. Resultados de la ingesta de exceso de Cd en alimentos contaminados produce daños severos en diversos órganos, como los pulmones y el hígado, que eventualmente conducen a la aparición de cáncer y otros trastornos mortales. La Figura 1 muestra el flujo del cadmio en el medio ambiente (Sánchez, 2016).

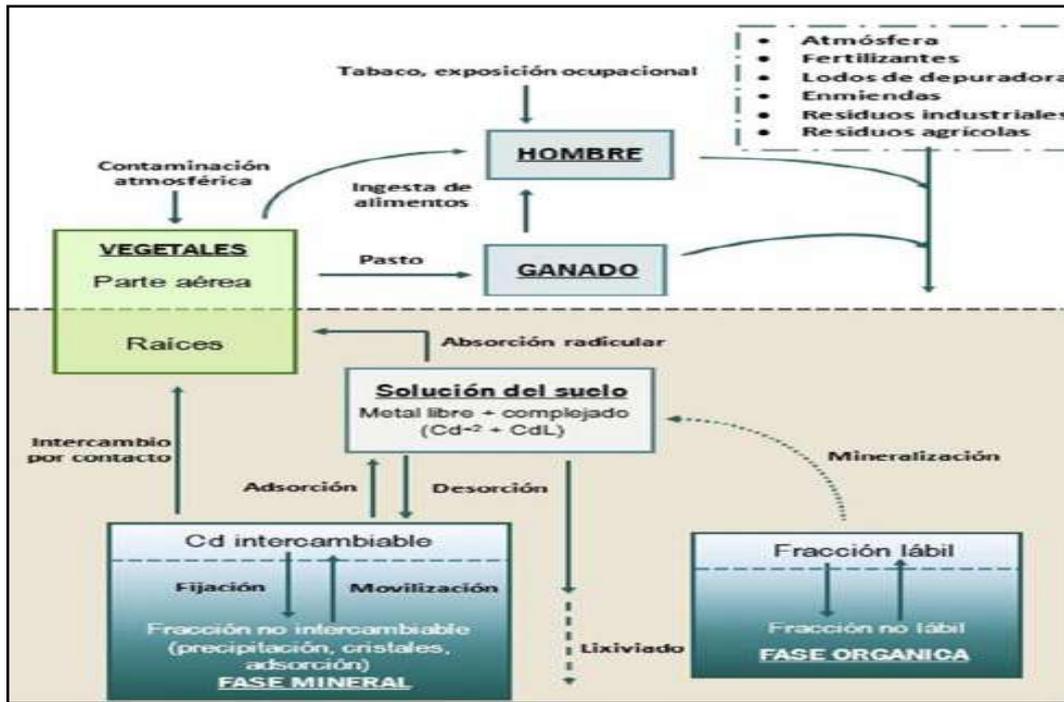


Figura 1. Flujo del cadmio en el medio ambiente. Fuente: Sánchez (2016).

La presencia de los metales pesados, incluido el cadmio, que afectan a la salud humana es consecuencia de los procesos de meteorización de las rocas existentes. Este material intemperizado que tiene un origen geogénico es el contaminante de las áreas de producción agrícola, a lo que se suman los elementos pesados de origen antropogénico producidos por la actividad de extracción de minerales, la acumulación de residuos industriales, la quema de la basura y el uso descontrolado de los insumos químicos en la agricultura (Pozo *et al.*, 2011).

Fuentes naturales del cadmio

El cadmio está distribuido de manera amplia en la corteza terrestre, con una concentración de $0,1 \text{ mg.kg}^{-1}$ como promedio. El contenido de Cd en las rocas sedimentarias e ígneas no supera el $0,3 \text{ mg.kg}^{-1}$, proporciones que son similares a lo que se encuentra en los depósitos arcillosos y en las rocas metamórficas. Las altas proporciones de cadmio en los suelos tienen una relación directa con la contaminación; por lo tanto, pueden ser originadas litológicamente. Los hallazgos de cantidades significativas de este elemento en rocas calizas de Francia que posiblemente se formaron en periodos geológicos del Jurásico y el Cretácico justifican este concepto (Sánchez, 2016).

El cadmio es un metal común que se encuentra en muchos compuestos del zinc y puede llegar a concentraciones que varían de 0,1 a 0,3 %; también puede estar presente en compuestos de plomo y cobre, pero en concentraciones muy bajas. Las fuentes de zinc que tienen una clara asociación con el cadmio son los depósitos de esfalerita o blenda de zinc (ZnS). Compuestos minerales como el llamado sulfuro de cadmio o greenockita (CdS), el óxido de cadmio (CdO) y el carbonato de cadmio conocido como otavita (CdCO₃) tienen una menor importancia económica con relación a la cantidad de cadmio que poseen (Badillo, 1980, citado por Sánchez 2016, p. 7). Un porcentaje significativo de la propagación del cadmio en el medio ambiente es originado por la descomposición y la erosión de las rocas, lo cual genera el movimiento de este metal que luego será depositado en los océanos, con contenidos en promedio de 0,1 µg.kg⁻¹. Asimismo, los volcanes, incluyendo al vulcanismo subterráneo, son otras fuentes naturales que liberan cantidades importantes del cadmio que contamina a la atmósfera (Sánchez, 2016). Las emisiones de cadmio originadas en la producción de CdO significan solo una pequeña parte de las emisiones totales de cadmio. Las emisiones más importantes de cadmio son producidas por la industria del CdO y sus usuarios comunes (incluyendo plantas de reciclaje). Han reducido las emisiones significativamente en la Unión Europea en un periodo de casi 20 años, pero permanece como fuente de entrada neta del cadmio el uso de fertilizantes fosfatados, así como la producción de hierro y la combustión de aceites (Kabata-Pendias, 2011).

Fuentes antropogénicas

Según Galvao y Corey (1987), el cadmio aún es un elemento inusual en la litosfera. La emisión antropogénica de cadmio a mediados del siglo pasado se incrementó considerablemente y se comprobó así que los procesos naturales de liberación del cadmio no son significativos para producir contaminación en comparación con las actividades humanas señaladas de la forma siguiente:

- a. Minería y metalurgia: La extracción minera de metales no ferrosos es considerada como la fuente principal de la liberación del cadmio (subproducto de la obtención de zinc, por ejemplo). La contaminación se origina por el drenaje de las aguas de las minas, aguas residuales producidas durante el procesamiento de los minerales y los derrames de los depósitos de desechos (C).

- b. **Industria:** Las actividades industriales que producen contaminación son la fabricación de baterías, cables, células fotoeléctricas, PVC, fusibles, soldaduras, colorantes de cadmio, y otros (Galvao y Corey, 1987).
- c. **Producción y uso de fertilizantes fosfatados:** La presencia de Cd en los fertilizantes es variable dependiendo del origen geográfico de las rocas utilizadas en la fabricación de estos insumos. El cadmio puede sustituir al calcio en las rocas del tipo de la apatita. Con el fin de mejorar la producción agrícola se ha desarrollado una variedad de productos químicos. Estos sirven para suministrar el volumen de nutrientes que necesitan las plantaciones y que no se halla en el suelo. Entre estos están los que contienen concentraciones de cadmio, como los fertilizantes fosfatados. Rodríguez *et al.* (2008) agregan que los fertilizantes fosfatados originan el 34 % de la contaminación por metales pesados; el 21 % es causado por la descomposición de los componentes naturales; el 12 % es consecuencia de la combustión de fósiles; otro 12 % es por la producción metalúrgica; y otra 12 % es por la actividad agrícola, la quema de residuos y por el parque automotor.
- d. **Otras fuentes:** En estas fuentes están consideradas la quema de restos de madera y plásticos, uso de carburantes fósiles, producción de cementos y acumulación de residuos sólidos en terrazas. El cadmio y los compuestos producidos se distribuyen y están presentes de diferente manera de acuerdo con las características del medio. La eliminación y/o utilización de desechos, tales como aguas residuales, estiércol, compost y/o lodos, puede aumentar los niveles de Cd en los suelos. Las concentraciones de cadmio en el compost y los lodos residuales varían de 0 a 16 mg.kg⁻¹, dependiendo de la materia prima y la tecnología empleada en la producción de las enmiendas orgánicas (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2013). Otra fuente no puntual de la presencia del Cd puede ser el transporte de fosfatos por las aguas de riego, pero las cantidades de Cd y de otras toxinas metálicas transportadas de la misma manera serían bastante insignificantes al estar presentes en partes por millón en comparación con los macronutrientes (Dharma-wardana, 2018).

Toxicidad y vías de exposición del cadmio

La exposición y sobreexposición ambiental, así como laboral, a los metales pesados es la causa de muchas enfermedades en los seres humanos, debido a que tienen efectos tóxicos que afectan especialmente a los riñones y a los huesos en las personas que son más vulnerables porque tienen bajas reservas de hierro. Todos los seres humanos están expuestos al efecto

peligroso del cadmio mediante la contaminación de los principales recursos, como son el aire, el agua y el suelo. Por estas razones, es la dieta una de las importantes fuentes de riesgo ante este metal. El ingreso de este metal vía la ingesta de alimentos varía entre 8 y 25 $\mu\text{g}\cdot\text{día}^{-1}$, cantidad que es mucho mayor a los volúmenes recomendados por los organismos internacionales, como es el caso del Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA), que estableció como un máximo de ingesta tolerable mensual de 25 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ de peso. Otra fuente importante con respecto al cadmio es el tabaco, debido a que esta planta acumula de forma natural en sus hojas concentraciones altas de cadmio, y un cigarrillo contiene entre 1 a 2 μg de cadmio (Jarup y Akesson, 2009).

Sobre la exposición ocupacional, la principal vía es la inhalación del cadmio, y en menor proporción ocurre la entrada por vía cutánea. Las partículas de cadmio son inhaladas en forma de polvo y de humo. Estos son considerados como posibilidades de difusión del cadmio desde los pulmones hacia la sangre; de la sangre son esparcidos a los diferentes órganos y tejidos, especialmente hacia los riñones y el hígado porque estos órganos son los responsables de la retención aproximada del 30 % al 50 % de la presencia corporal del cadmio con una semivida de 10 a 30 años. El tejido óseo también posee una significativa importancia como lugar de acumulación de este metal pesado. Además, aunque el mecanismo del proceso tóxico no está claramente explicado, se asume que el cadmio tiene una alta afinidad con radicales nucleofílicos que se encuentran en las proteínas. De ser así, estaría produciendo la inhibición de muchas enzimas por la fuerte unión del Cd con los grupos de estas. Asimismo, el Cd compite con otros metales, como Fe, Zn, Cu, y Ca, que se trasladan de sus sitios de unión con las enzimas, lo cual produce una alteración de las rutas bioquímicas. Algunos de los procesos afectados es el metabolismo del calcio, que al unirse al cadmio da origen a la calmodulina (Jarup y Akesson, 2009).

Consecuencias de la exposición al cadmio y patologías asociadas

Jarup y Akesson (2009) también explican que la ingesta de alimentos con alto contenido de cadmio produce irritaciones graves en el estómago, originando vómitos y diarreas. A niveles más bajos, el órgano más afectado es el riñón. La acumulación de este metal puede ocurrir durante muchos años y producir fallas en la función renal al atrofiar los túbulos de este órgano. Asimismo, también tiene un efecto negativo mediante la osteoporosis, la fractura de

los huesos, el dolor en las articulaciones y en la formación de cálculos renales a causa de una alteración en el metabolismo del calcio y en la resorción ósea.

La inhalación del cadmio puede ser la causa de una neumonitis aguda, edema pulmonar, y si la inhalación es prolongada en el tiempo produce cambios estructurales en los pulmones y en las enfermedades pulmonares con obstructiva crónica. Galvao y Corey (1987) manifiestan que el cadmio es el factor principal del cáncer de tipo I en humanos. El cáncer pulmonar ha sido el más estudiado y comprobado, aunque se tienen indicios encontrados en pruebas *in vitro* que correlación el cadmio con el cáncer de próstata. No obstante, a la fecha no se dispone de suficiente evidencia científica a través de estudios epidemiológicos en poblaciones expuestas a este metal, pero ha sido demostrado que el cadmio puede provocar respuestas estrogénicas, como la hiperplasia e hipertrofia del endometrio, además de incrementar el riesgo de cáncer de este tejido.

1.2.6. Toxicidad y efecto del cadmio en las plantas

Clemens *et al.* (2002) explican que el cadmio, por no ser un metal esencial, no cuenta con mecanismos específicos de entrada al sistema planta. Sin embargo, se destaca al transportador específico de calcio LCT1 y a la proteína IRTI como responsables de la entrada de cadmio a la célula. Algunas moléculas relacionadas al proceso de la quelación del cadmio son las proteínas ricas en cisteína llamadas también metalotioneínas. En la planta, el metal se acumula principalmente en la raíz y se encuentra encerrada en la vacuola de las células. Solo una mínima proporción es llevada a la parte aérea de la planta, y se concentra en orden decreciente en tallos, hojas, frutos y semillas. El cadmio, una vez en la raíz, puede llegar a la xilema con intervención del apoplasto o del simplasto, lo que dará lugar a diversos complejos.

La ruta más importante para la absorción de los metales es a través de las raíces, existiendo tres mecanismos diferentes que son la causa del movimiento de los iones contaminantes, estas son: a) La intercepción radicular, b) El flujo de masas, y c) La difusión. En la intercepción radicular, el volumen radicular aumenta conforme crece, a su vez, el sistema de raíces de la planta. Por este motivo, la planta tendrá la capacidad de interceptar cada vez más

cantidad de solución del suelo. La raíz entra en un contacto más cercano con los iones que están unidos debido a la presencia de cargas electrostáticas unidas a la materia orgánica. Este mecanismo es relevante para la absorción de los nutrientes de baja actividad iónica, es decir, aquellos elementos nutritivos que tienen menos solubilidad en el agua. La dinámica del agua y de los nutrientes de la solución en el suelo es la que determina el flujo de masas. Esto ocurre por la fuga de agua en el proceso de transpiración de la planta, causando una potencia de absorción producida como consecuencia de diferencias de presión del agua tanto en el interior así como el exterior de la especie vegetal, pero, en este tipo de difusión repentino provoca el desplazamiento de los iones se da por la gradiente potencial de naturaleza química producida por una solución de superior concentración hacia una de menos concentración y este proceso es de mayor importancia para los iones que poseen alta energía (Clemens *et al.*, 2002).

Chan y Hale (2004) explican que no se conoce proceso alguno por el cual las plantas puedan eliminar el cadmio porque los vegetales, al tomar el cadmio, tienen la capacidad de retener este metal como parte de sus tejidos, modificando el proceso metabólico normal y produciendo una disminución de la actividad fotosintética y de la transpiración debido a un aumento en la respiración al sufrir modificaciones estomáticas por estar creciendo en suelos muy contaminados con cadmio. Por otro lado, el Cd dificulta la absorción, movimiento y metabolismo de los nutrientes esenciales, especialmente del N (NO_3^-), Ca, Mg, P y K, y produce una inestable nutrición y desbalance hídrico en las plantas. Por esta razón, se debe tener en cuenta qué tipo de planta se está cultivando, porque no todas las plantas pueden acumular Cd de la misma manera. Se debe tener en cuenta que algunas especies son sensibles, pero otras resisten más al Cd. Del mismo modo, Romero *et al.* (2002) agregan que el almacenamiento del cadmio aún en menores concentraciones produce el acortamiento del eje caulinar con una clorosis amarillenta muy intensa en las hojas como causa de la falta de Fe, PO_4^{3-} , disminución en el traslado del Mn causada por una reacción entre los metales y el Fe que está ubicado en las hojas, o incluso por la merma en la actividad fotosintética por falta de la clorofila.

El Cd en altas concentraciones también produce marchitez y necrosis debido a que bloquea la fotosíntesis y la fijación de dióxido de carbono. Asimismo, ante estas alteraciones

fisiológicas por la presencia intoxicante del Cd, las plantas tienen la capacidad de desarrollar diversos tipos de reacciones para poder sobrevivir hasta un límite determinado. En primer lugar, está el cambio hormonal producido por la síntesis del ácido abscísico (ABA) y el etileno con la alteración de otros reguladores del crecimiento. Como consecuencia, estas hormonas vegetales causan otras reacciones, tales como el aumento en el desarrollo caulinar, la senescencia de las hojas, la apertura y el cierre de estomas, la alteración en las formas de las hojas, el reajuste osmótico, las modificaciones en los procesos del crecimiento de las raíces, etc.

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

Según Kabata-Pendias (2011), los factores de los cuales depende la disponibilidad del cadmio son el potencial de hidrógeno (pH), la materia orgánica (MO), calcio, etc., pero estos factores varían según el ambiente. Normalmente, el cadmio se incorpora a la cadena trófica al ser absorbido por las plantas que luego se convierten en la materia orgánica del suelo.

Potencial de hidrógeno (pH)

Aunque es muy fácil de obtener la medida del pH, esta propiedad es una de las más importantes mediciones químicas que se pueden realizar en el suelo, porque no solamente indica el grado de acidez, neutralidad o de la alcalinidad, también es importante para conocer el potencial agrícola de los suelos, conocer la disponibilidad de los nutrientes esenciales y determinar la toxicidad de algunos elementos esenciales para la nutrición de las plantas. Asimismo, el pH del suelo es una característica principal que regula los procesos de adsorción en el suelo y la actividad de otras características que afectan la adsorción del cadmio. Por lo tanto, la adsorción de los metales pesados está condicionada de manera significativa por el pH del suelo. Además, los metales yacen normalmente en el suelo a pH básico, mientras que a pH ácido los metales pesados están más solubles y ocasionan una mayor disponibilidad para las plantas, con excepción de algunos metales, como el arsénico, selenio y cromo hexavalente, que son más biodisponibles a pH básico. El pH afecta de forma significativa la dinámica del cadmio en todos los suelos. En terrenos ácidos, la solubilidad del metal depende de la acción de la materia orgánica y los sesquióxidos (Kabata-Pendias, 2011). Esta condición se puede observar claramente en la Figura 2 sobre la influencia del pH en la distribución del cadmio, zinc, cobre y plomo, los mismos que tienen diferentes comportamientos con relación al pH del suelo. La Figura 2 muestra la influencia del pH en

la concentración y disponibilidad de distintos metales (cadmio, cobre, plomo y zinc) que están presentes en la solución del suelo.

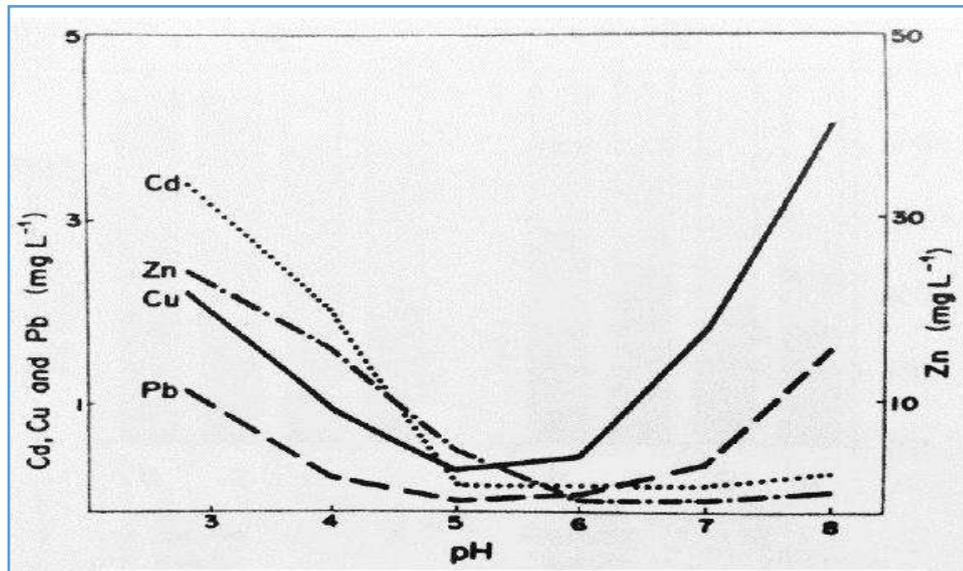


Figura 2. El pH y la concentración de metales en el suelo. Fuente: Kabata-Pendias (2011).

Materia orgánica

La materia orgánica (MO) presente en el suelo indica la cantidad de restos de plantas y animales que al descomponerse liberan elementos nutritivos aumentando el contenido de los nutrientes esenciales para las plantas que se encuentra en el suelo; además, tienen la capacidad de mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo. Este mejorador es expresado en porcentaje o en g.kg^{-1} de suelo. La materia orgánica posee una alta capacidad de intercambio catiónico, que le permite tener una significativa capacidad para retener cationes en el suelo. Además, mejora la microestructura del suelo, que es un factor muy útil para determinar en forma indirecta la fertilidad de un suelo (Huaynates, 2013). Hay una mayor fijación de los elementos nutritivos en los suelos con un alto contenido de materia orgánica, textura más fina, mayor capacidad de intercambio catiónico y menor saturación de Al^{3+} que será no disponible para el suelo y para las plantas. Las plantas que crecen en áreas con abundante materia orgánica muestran carencia de muchos elementos, como es el caso del cadmio, plomo y zinc. Asimismo, la infiltración de los metales pesados en el suelo está condicionada por la textura de este. Ello es notorio en la arcilla, que tiene la capacidad de adsorber metales pesados, que permanecen retenidos en las posiciones de cambio. De otra manera ocurre con los suelos arenosos, que no pueden fijar los metales pesados, condición que permite el movimiento acelerado de estos, los cuales son trasladados rápidamente al

subsuelo, con el peligro subsecuente de producir contaminación en la napa freática (Huaynates, 2013).

Calcio

La absorción de metales pesados, como el Cd y el Cu, por las plantas les afectará significativamente por las acumulaciones de calcio en los suelos. Esto produce una competencia iónica entre ellos. Asimismo, una concentración significativa de metales probablemente reduce la absorción de calcio y genera una mejor presencia en la raíz, las hojas y los frutos. En la mayoría de los suelos donde está presente el calcio no solamente está en una condición de calcio libre, sino que puede estar conformando carbonatos y fosfatos de calcio. En esta situación, el cadmio puede ser controlado por la alcalinización del suelo que produce la inmediata precipitación del metal pesado (Contreras *et al.*, 2005).

1.2.8. Estándares de calidad ambiental (ECA)

Es un instrumento de gestión ambiental con medidas establecidas para evaluar el estado de la calidad del ambiente que no representa riesgos significativos para la salud humana ni para el medio ambiente (Tabla 1).

Tabla 1

Estándares de calidad ambiental de los suelos

Parámetros en mg.kg ⁻¹ en peso seco	Usos del suelo			Métodos de ensayo
	Agrícola	Residencial / Parques	Comercial, industrial, extractivo	
Inorgánicos:				
Arsénico	50	50	140	EPA 3050-3051
Bario total	750	500	2000	EPA 3050-3051
Cadmio disponible	1,4	10	22	EPA 3050-3051
Cromo disponible	0,4	400	1000	EPA 3050-3051

Fuente: Decreto Supremo 0011 – Ministerio del Ambiente [MINAM] (2017).

1.2.9. Compuestos fosfatados

Roca fosfórica

El fosfato de calcio (roca fosfórica) es un material que está formado por varios minerales de origen natural. Contiene una significativa proporción de componentes fosforados que fueron formados de las rocas fosfóricas que están compuestas por casi la totalidad de los elementos químicos presentes en la tabla periódica. De acuerdo con su origen, hay dos tipos de rocas fosfóricas: rocas ígneas y rocas sedimentarias. Estas poseen diferencias significativas con respecto a sus características mineralógicas, texturales y químicas (Tabla 2).

Tabla 2

Concentración de cadmio en las rocas

TIPO DE ROCA	RANGO (mg kg ⁻¹)	PROMEDIO (mg kg ⁻¹)
ROCAS ÍGNEAS		
Riolitas	0,03-0,57	0,230
Granitos	0,01-1,60	0,200
Basaltos	0,01-1,60	0,130
ROCAS METAMÓRFICAS		
Gneises	0,007-0,26	0,040
Esquistos	0,005-0,87	0,020
ROCAS SEDIMENTARIAS		
Esquistos y arcillas	0,017-11	-
Esquistos negros	0,30-219,0	-
Piedras areniscas y conglomerados	0,019-0,4	-
Carbonatos	0,007-12	0,065
Fosforitas	<10-980	-
Carbón	0,01-300	-
YACIMIENTOS MI DE AZUFRE		
Esfalerita (ZnS)	0,2-0,4(<5 %)	-
Galena (PbS)	<0,5 %	-
Tetrahedrita-Tennartita	<0,24 %	-
Metacinnabar (HgS)	11,70 %	-

Fuente: Alloway (2013).

Procesos de fabricación y tipos de fertilizantes fosfatados

Los minerales de fósforo predominantes en la fosforita (roca fosfórica sedimentaria de origen marino) son fluorapatita ($3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaF}_2$) e hidroxiapatita ($3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{OH})_2$) (Besoain *et al.*, 1999). La Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial

(ONUDI) (1980) agrega que estos compuestos son los que aportan la mayor cantidad de P a nivel mundial para la fabricación de los fertilizantes fosfatados. Sin embargo, la fosforita en polvo no funciona como un fertilizante debido a que el fósforo contenido en este compuesto mineral no se encuentra en la forma soluble, lo cual impide la fácil absorción por parte de los vegetales. Al producirse la reacción de este mineral con el ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3) o ácido clorhídrico (HCl), se producen los ácidos ortofosfórico y superfosfórico, que son dos intermediarios de suma importancia en la producción de fertilizantes fosfatados, y la que la reacción con ácido sulfúrico es la que más se utiliza en la industrial de los fertilizantes (Figura 3).

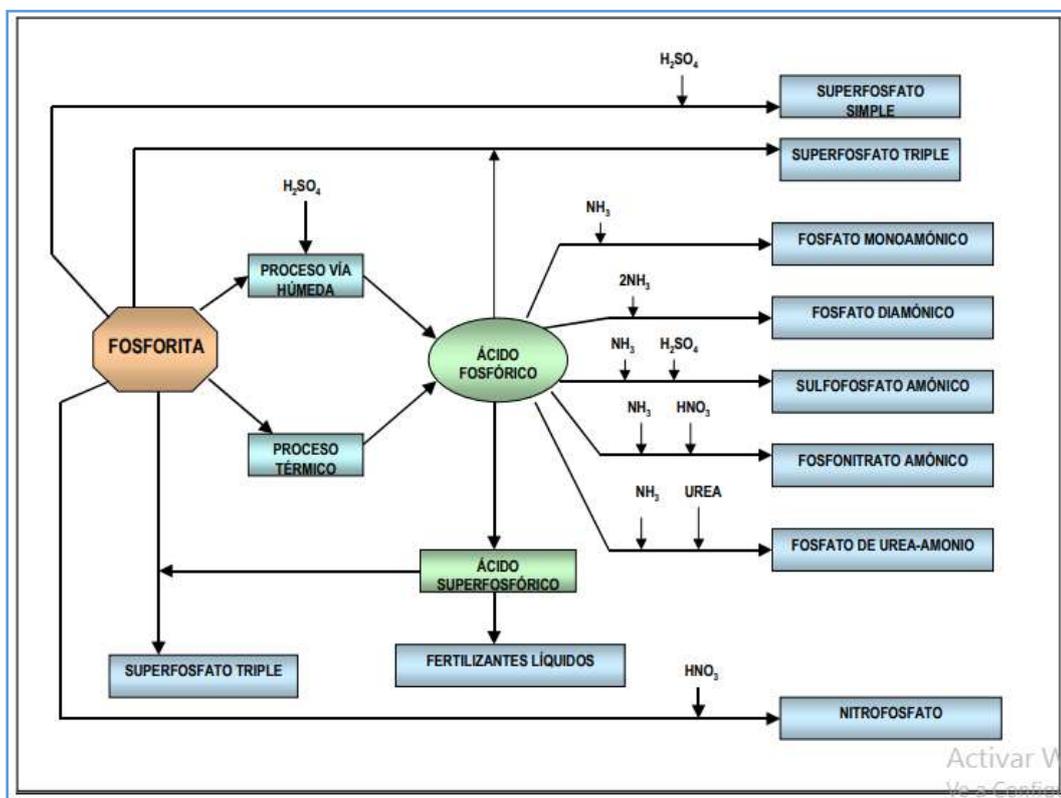


Figura 3. Elaboración de fertilizantes fosfatados a partir de la fosforita. Fuente: ONUDI (1980).

La fosforita en polvo no puede ser usada como fertilizante porque el fósforo que contiene no está en estado soluble que haga posible la absorción por las plantas. Importantes intermediarios en la producción de fertilizantes son los fosfatados ácido fosfórico (ácido ortofosfórico y superfosfórico), los mismos que al reaccionar con el ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3) o ácido clorhídrico (HCl) dan origen a los fertilizantes fosfatados para el uso en la agricultura. La reacción con ácido sulfúrico es la más usada para obtener los

superfosfatos. La fosforita puede ser tratada con ácido sulfúrico, ácido fosfórico o ácido superfosfórico mediante dos vías (proceso por vía húmeda y proceso térmico). Da como resultado la formación del ácido fosfórico y la obtención del resto de los fosfatos con un tratamiento previo que comprende el uso de amoníaco, ácido sulfúrico o urea, dependiendo de cada tipo. También, a partir de la fosforita natural, se obtiene el nitrofosfato cuando es tratada con ácido nítrico (Besoin *et al.*, 1999).

1.2.10. El Suelo

El suelo es un componente importante del medio ambiente, fundamental en el ecosistema terrestre, donde inician muchas cadenas tróficas que soportan al medio urbano e industrial. El suelo tiene muchas funciones y actúa como un tampón para controlar el movimiento de los elementos químicos que sirven como nutrientes de las plantas y de otras sustancias que se incorporan a otros sistemas, como la atmósfera, hidrosfera y biosfera. Sin embargo, este puede verse afectado por las diversas actividades del hombre. Generalmente, las partículas finas del suelo están formando agregados o grumos, muchas veces por la acción de la materia orgánica. Se conocen como poros los espacios entre estos agregados. A través del espacio poroso transitan el aire y el agua, que constituyen el 50 % del volumen del suelo en conjunto. Constantemente, el aire se encuentra en la mayoría de los poros grandes, mientras que el agua se filtra en los de menor tamaño. Los agregados, además, se reúnen en grupos mayores. Esta forma de organización de las partículas es conocida como estructura, la cual, junto con la textura del suelo, influye de manera significativa en las cualidades del suelo, como son la permeabilidad, la compactación, la aireación, entre otras (Kabata-Pendias, 2011).

Pineda (2004) aclara que el suelo se divide en tres fases: sólida, líquida y gaseosa. Según el autor, la primera es dominante y consiste en una mezcla de partículas minerales y orgánicas de variado tamaño que están rodeadas por agua y gases en proporción y constitución que son cambiantes a través del espacio y los años. Los componentes mayores del sistema suelo están agrupados de esta forma: un 45 % de material inorgánico, de 20 % a 30 % de agua, de 20 a 30 % de aire y 5 % de materia orgánica. También existe un continuo intercambio de iones y compuestos moleculares entre las tres fases, que es producto de reacciones físicas, químicas y biológicas. Estos procesos, debido a que tienen un balance dinámico, influyen de forma importante en la conservación y la calidad del suelo.

Efecto de los metales pesados en los suelos

El suelo es el colector de una gran proporción de residuos generados por la actividad humana, lo cual causa impactos negativos y contaminación en otros recursos, como el hídrico y las plantas mismas (cadena alimenticia). Cuando los metales pesados en el suelo adquieren niveles que sobrepasan los límites máximos permisibles, ocasionan consecuencias desfavorables, como impedimento al desarrollo natural en las plantas. También altera el ambiente al disminuir las poblaciones microbianas del suelo; esta clase de contaminación es denominada polución de suelos (Martin, 2000). El efecto de los metales pesados sobre los seres vivos se produce mediante el bloqueo de los procesos biológicos, es decir, la falta de activación de las enzimas debido a la generación de enlaces entre el metal y los grupos sulfhidrilos (SH) de las proteínas. Ello produce daños irreversibles e irreparables en los organismos. Cierta propiedad de los suelos facilita la infiltración y el proceso de contaminación con metales pesados. Por ejemplo, la arcilla tiene la capacidad de adsorber los metales pesados que están retenidos en las zonas de intercambio; por el contrario, los suelos arenosos no tienen la capacidad de fijación, por lo que el elemento contaminante pasa rápidamente al subsuelo y contamina a la napa freática (Pineda, 2004).

1.2.11. Necesidades edáficas de los cultivos

a. Cultivo de la “caña de azúcar”

La “caña de azúcar” *Saccharum officinarum* L. es una especie que forma parte de la familia de las gramíneas, específicamente del género *Saccharum*. Las variedades que se han cultivado son híbridos de la especie *officinarum*. Procede de Extremo Oriente, desde donde llegó a España (concretamente a las regiones de Málaga y Motril) en el siglo IX. Posteriormente, se expandió por América en el siglo XV. Actualmente, muchos países latinoamericanos se encuentran como grandes productores de caña de azúcar. El cultivo de la “caña de azúcar” es una alternativa para corregir los problemas del agricultor porque le da la oportunidad de ejecutar otros trabajos para conseguir mayores ingresos económicos. La utilidad obtenida depende del potencial genético de la variedad seleccionada, ya que los precios varían de acuerdo con el porcentaje de sacarosa que tiene la caña molida. Asimismo, el precio de la bolsa de azúcar se determina en función del mercado nacional (Información Técnica Agrícola [INFOAGRO] 2014).

La fertilización es una labor de mucha importancia en el cultivo de la “caña de azúcar” porque es determinante para lograr un buen rendimiento. La primera fertilización se realiza entre los 30 y 45 días después de la siembra, dependiendo de la estación del año. La urea se usa como fuente de nitrógeno para toda la campaña, y se llega a administrar hasta un total de seis bolsas de 50 kg al momento de la siembra. Sin embargo, existen agricultores que aplican NPK, o aquellos que utilizan solamente N-K, como es el caso de la empresa Agroindustrial Paramonga S. A. El segundo abonado se puede aplicar entre los 60 y 90 días, y en algunos casos hasta los 120 días luego de la siembra. Para completar la fertilización nitrogenada se requieren seis sacos de 50 kg de urea (Marcelo y Aldana, 2011). INFOAGRO (2014) indica que en la actualidad es necesaria la aplicación de estiércol a razón de 60 a 100 t.ha⁻¹, seguida de la siguiente fertilización:

- a. 100 kg de P₂O₅, 250 kg de K₂O y N de acuerdo con la cantidad de estiércol que se ha utilizado. Si no se hizo aplicación alguna de materia orgánica, se debería utilizar 100 kg de N como fertilización de fondo.
- b. 200 kg a 300 kg de N dividido en tres aplicaciones, que están consideradas como fertilización de mantenimiento adicionadas en el período de verano u otoño.
- c. Con base en los resultados obtenidos por medio de ensayos de campo y en concordancia con el análisis del suelo, se pueden rebajar los niveles de fósforo y potasio.

b. Cultivo del “palto”

La “palta” *Persea americana* L. tiene un origen muy disperso. Se ha encontrado las zonas tropicales y subtropicales, desde el Perú antiguo hasta México. La “palta” ha sido representada en ornamentos de los cementerios en Chimbote y Trujillo, que tienen 8000 años de antigüedad. Al año se producen dos millones de toneladas alrededor del mundo, con cultivos en diversas regiones tropicales y subtropicales. Investigaciones científicas en las universidades de Europa y Estados Unidos sostienen que se trata de una fruta beneficiosa para la salud por sus cualidades nutricionales. Contiene grasa que oscila entre 8 % y 30 % según la variedad, y alto contenido de luteína, proteína que protege ante la enfermedad ocular en ancianos (Lao, 2013).

Existen muchas variedades de “palta”, pero pocas se ajustan al mercado local o a la exportación. Las más conocidas son las variedades Fuerte, Hass y Nabal. Estas se venden durante todo el año con una notable demanda, y se siembran en diferentes estaciones. El análisis de la fertilidad del suelo permite evaluar las condiciones para alcanzar altos rendimientos por hectárea (Lao, 2013). Los “paltos” pueden sembrarse a nivel del mar y hasta los 2500 m s. n. m. La temperatura y la lluvia son los factores a tener en cuenta en el cultivo. En la región andina se necesitan 1200 mm de lluvia distribuida durante todo el año, ya que las sequías prolongadas afectan significativamente. El exceso de lluvia en la floración o en el cuajado de los frutos causa pérdidas en los rendimientos y se acentúan las enfermedades. Requiere de suelos franco arenosos profundos, de textura liviana con pH entre 5,6 y 6,5; los suelos franco arcillosos, que tienen un buen drenaje, son los más adecuados (Lao, 2013).

Para la aplicación de un plan de fertilización, se debe considerar la necesidad nutricional del cultivo en relación con los niveles de fertilidad del suelo, evaluada mediante el análisis de suelos. Cada elemento nutritivo tiene un rol importante en el proceso de desarrollo y crecimiento del palto, que es un cultivo muy susceptible a las diferentes propiedades y características del suelo, que no permiten considerar cantidades específicas de fertilizantes. Se han hecho muchas investigaciones relacionadas con la fertilización y se han encontrado muchas diferencias que se deben a las condiciones del suelo y a la zona donde se desarrolla el cultivo. Los elementos nutricionales considerados para el normal desarrollo de las plantas cultivadas son 16, dentro de los cuales están el nitrógeno, carbono, oxígeno, hidrógeno, calcio, magnesio, potasio, fósforo, azufre (grupo de los macroelementos o elementos mayores), y el hierro, manganeso, zinc, cobre, molibdeno, níquel y boro (grupo de los elementos menores o microelementos) (Herrera y Narrea, 2011). Los estudios sobre el cultivo del “palto” indican que es un cultivo no muy exigente con las necesidades de nutrientes. Sin embargo, las exigencias nutricionales del “palto” son muy variables, dependiendo de las etapas de desarrollo y de la variedad de la planta (Lao, 2013).

c. Cultivo de “maracuyá”

Según Amaya (2009), el “maracuyá” es una fruta tropical que crece de manera enredadera, es originaria de la región amazónica de Brasil y forma parte de la familia de las *pasifloras* (más de 400 variedades). Otro centro de origen de esta planta es el Perú, y tiene dos

variedades o formas diferentes: la púrpura o morada (*Passiflora edulis* Sims) y la amarilla (*Passiflora edulis* Sims forma *flavicarpa*). La primera se consume fresca, generalmente, y logra gran presencia en lugares semicálidos y en zonas altas. La segunda crece en regiones cálidas y se cultiva hasta los 1000 m s. n. m. Esta es más preferida por la industria debido a su mayor acidez. Ambas variedades de maracuyá se siembran en el Perú. Sin embargo, la amarilla ha tenido más acogida por un néctar ácido y aromático, el cual se obtiene del arilo. Este tejido envuelve a la semilla y contiene vitamina A, niacina, riboflavina y ácido ascórbico. Asimismo, tanto la cáscara como las semillas son empleadas en la industria por sus componentes.

El “maracuyá” puede sembrarse en distintos tipos de suelos, pero deben ser profundos y fértiles. Los suelos más adecuados son los sueltos, secos y sin inconvenientes de salinidad. No es recomendable acudir a terrenos pesados o poco permeables o susceptibles a generar acumulaciones de agua, ya que esto puede dar lugar a enfermedades. Entre estas está la *fusariosis*, también llamada pudrición seca, del cuello de la raíz. En última instancia se puede recurrir a terrenos con pendiente hasta del 10 % para el trabajo. Los suelos óptimos para la siembra del “maracuyá” son los francos arenosos, que poseen notable capacidad para retener la humedad y un pH entre 5,5 y 7,0. El tamaño y peso del fruto serán producto, en parte, de la textura del suelo (Amaya, 2009).

Uno de los aspectos más relevantes del cultivo del maracuyá es la fertilización, ya que de ella depende el nivel de productividad, la calidad del producto, los costos para su producción y, por ende, la rentabilidad. Para la fertilización del “maracuyá” será necesario tomar en cuenta el resultado obtenido mediante el análisis del suelo o del follaje, así como las exigencias de los cultivos. La adición de la fertilización edáfica debe efectuarse en periodos de uno o dos meses, en dosis moderadas y considerando los resultados de los análisis del suelo. Los tejidos pueden volverse más susceptibles al ataque de la *Phytophthora sp.* con los excesos de fertilización con urea. Una situación distinta ocurre si se administra prudentemente el calcio y óxido de zinc. Estos cambian el pH y refuerzan las paredes externas de la célula y evitan los ataques del *Fusarium sp.* (Amaya, 2009). Los datos conseguidos sobre el “maracuyá” amarillo han permitido fijar la exigencia de nutrientes por parte de la planta, en el orden decreciente que se muestra a continuación: N > K > Ca > S >

$P > Mg > Fe > B > Mn > Zn > Cu$. Cada uno es importante para la calidad de la planta y del fruto. Con la ausencia de alguno podría comprometerse el desarrollo de la plantación y la producción de frutos. Micronutrientes como el Mn, Fe, B y Zn también tienen un rol influyente, ya que el fruto o el rendimiento pueden resultar afectados ante sus deficiencias. Se calcula que el cultivo para generar 15 toneladas de fruta por hectárea necesita, en un año del ciclo productivo, 150-200 kg de N, 30 kg de fósforo (P), 200 kg de potasio (K) 140 kg y 30 kg de azufre (S). Al empezar el cultivo se debe aplicar abonos orgánicos y, posteriormente, abonos con alto contenido de fósforo y potasio (Amaya, 2009).

d. Cultivo de la “mandarina”

Actualmente, los cítricos son los frutos de mayor producción en el mundo y son preferidos por su agradable sabor y no tener semillas, lo que hace que sean muy atractivos para el consumidor. En las áreas subtropicales (30-40° de latitud N y S) han alcanzado su máximo desarrollo y en las semitropicales (23-24 a 30° de latitud N y S) los frutos suelen ser muy jugosos. Además, tienen alto contenido de azúcares y se pueden consumir en fresco o usar en la elaboración de zumo (Información Técnica Agrícola [INFOAGRO], 2020). Tienen más resistencia al frío y toleran más la sequía, a diferencia del naranjo. Sin embargo, los frutos son más sensibles. Estos no toleran las temperaturas inferiores a 3 °C. La planta también necesita suelos con buena permeabilidad y sin excesos de material calizo, así como una buena disponibilidad de la humedad en el suelo y en el entorno atmosférico. Es recomendable que el suelo tenga cierta profundidad efectiva con fin de que la planta se fije correctamente y que se haga un análisis amplio para asegurar una nutrición y crecimiento adecuados. Debe haber un balance entre las partículas gruesas y finas con el fin de lograr una óptima aireación, se mejore el movimiento del agua y que, además, se propicie una estructura que permita un suficiente nivel de humedad, así como una capacidad de cambio catiónico ideal. Estas plantas no toleran la presencia de sales que se manifiesta de manera muy sensible en forma de una asfixia del sistema radicular (INFOAGRO, 2020).

El cultivo del “mandarino” demanda de dosis suficientes de abono para disponer de los elementos mayores y menores que requiere, lo cual significa un incremento de los costos de producción. Asimismo, esta especie frecuentemente es susceptible a las deficiencias de Mg, especialmente cuando los niveles de potasio y calcio son altos. Esta deficiencia del magnesio

se controla mediante aspersiones de tipo foliar. También suele haber una deficiencia de Zn, la cual puede solucionarse mediante la aplicación del sulfato de zinc al 1 %. Asimismo, suele presentarse deficiencia de Fe especialmente en suelos calizos, pero la adición de quelatos corregirá esta carencia. El inconveniente radica en que los quelatos son soluciones escasas y con precios muy altos. En los “mandarinos” es común que produzca una separación de la cáscara de la pulpa del fruto (bufado del fruto), que es producido por el exceso de nitrógeno. Por esta razón, es necesario tener ciertas consideraciones para aplicar un plan de abono correcto.

La Tabla 3 muestra que no es prudente aplicar el abonamiento antes del inicio del segundo brotamiento de la plantación. Una mejor posibilidad es la aplicación del abono en cada riego con el fin de no excederse en la salinidad.

Tabla 3

Plan de fertilización orientativo en los primeros cuatro años

TIPOS Y CANTIDAD DE FERTILIZANTE (en g.año⁻¹ por árbol)		1er año	2do año	3er año	4to año
SÓLIDOS	Nitrato amónico	150	190	270	350
	Nitrato potásico		70	120	160
	Fosfato monoamónico		40	75	100
	Nitrato magnésico		30	60	115
LÍQUIDOS	N – 20	250	100	60	50
	12-4.6		500	850	1150
	Nitrato magnésico		30	60	115
QUELATOS DE HIERRO		6	10	15	20

Fuente: INFOAGRO (2020)

Asimismo, se abonará desde marzo hasta septiembre distribuyendo el abono en marzo al 5 %, en abril al 10 %, en mayo al 10 %, en junio al 15 %, en julio al 20 %, en agosto al 20 % y en septiembre el restante (20 %). Los quelatos de hierro serán añadidos en 2 o 3 aplicaciones, principalmente durante la brotación de la temporada de primavera. Se aconseja aportarlos con ácidos húmicos. Para algunas variedades se requiere la administración de ácido giberélico durante la caída de pétalos para la mejora del cuajado. En otras, especialmente en los híbridos, se aplica el rayado. Por otro lado, la técnica de suministrar

auxinas de síntesis tras la caída natural de los frutos, con el fin de mejorar el tamaño final de estos, también se ha extendido (INFOAGRO, 2020).

e. Cultivo del “maíz”

Según Injante y Joyo (2010), el “maíz amarillo” duro es un cultivo muy importante en el Perú. Se cultiva en la costa y la selva en una mayor extensión. Lambayeque, La Libertad, Áncash, Lima y San Martín son las principales regiones de producción. Todas estas conforman el 55 % del área cultivada a nivel nacional. El área de Lima (Cañete, Chancay, Huaral, Huacho y Barranca) se ubica en el primer lugar al producir el 20 % del total de este cultivo, seguida por La Libertad con 15 %. Actualmente, los agricultores asentados en el litoral usan distintas tecnologías en la gestión del cultivo de “maíz” amarillo duro. Cabe resaltar que algunas no resultan adecuadas para las diferentes áreas maiceras, lo que genera pérdidas, bajos rendimientos y altos costos en su producción. Esto impide al cultivo mostrar todo su potencial. El cultivo del “maíz” incluye fases en las que se extraen algunos nutrientes más que en otras. De esta manera, se nota que entre los 30 y 60 días después de la siembra hay una demanda mayor de nutrientes. Este periodo es el más idóneo para la fertilización de los elementos móviles, como el N en los 30 días iniciales. Al finalizar los 90 días se ha satisfecho cerca del 88 % de sus necesidades de N, 74 % de P, 100 % de K y el 90 % de Mg (Injante y Joyo, 2010).

En la primera fertilización, el agricultor puede trabajar con una máquina en el momento de la siembra, o con palana si la planta tiene cuatro hojas completamente extendidas. Por lo general, esto se lleva a cabo 8 días después de la siembra. No es adecuado que la fertilización nitrogenada exceda de 80 unidades. Además, es importante usar como mínimo una t.ha⁻¹ de guano de pollo o compost, combinada con los fertilizantes químicos. En una segunda fertilización se completa toda la dosis requerida del N (cuando la planta tiene las ocho hojas completamente extendidas). Los fertilizantes se colocan sobre una manta y se mezclan continuamente para que haya uniformidad. Las cantidades de fertilizantes sugeridas por Injante y Joyo (2010) son las siguientes: 240-300 kg.ha⁻¹ de nitrógeno, 80-120 kg.ha⁻¹ de fósforo, 80-140 kg.ha⁻¹ de potasio, 35-50 kg.ha⁻¹ de magnesio y 40-50 kg.ha⁻¹ de azufre.

1.2.12. Fertilizantes

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2002), los fertilizantes son materiales naturales o sintéticos que contienen como mínimo 5 % de más de uno de los nutrientes primarios (N, P₂O₅, K₂O). Los fertilizantes hechos industrialmente, son denominados fertilizantes minerales y estos son muy variados. Sin embargo, la mayoría de los fertilizantes se encuentran en forma sólida. Principalmente en América del Norte, son fundamentales los fertilizantes en suspensión y líquidos. La densidad y el peso específico también son importantes para el transporte, almacenamiento y aplicación en el campo. Por eso, la bolsa de urea de 50 kg es la más utilizada por los pequeños agricultores, debido a que posee un volumen más grande por unidad de peso, y por su flexibilidad, seguridad y simplicidad en comparación con la mayoría de los fertilizantes.

El Ministerio de Agricultura y de Desarrollo Rural de Colombia (2012) ha establecido regulaciones, como el tipo de bolsa, forma de etiquetado, la información de etiqueta (nutrientes primarios, secundarios y micronutriente), los contenidos de fertilizantes, el peso de la bolsa, el nombre del comerciante, recomendaciones para la correcta manipulación y almacenamiento. Asimismo, incluyen el grado que deben de llevar los fertilizantes. Normalmente, los nutrientes primarios son expresados en una fórmula 17-17-17, en la cual el primer número es de N, el segundo de P₂O₅ y el tercero de K₂O, todo en porcentajes.

a. Fertilizantes nitrogenados

Un fertilizante nitrogenado representa la forma más importante para incorporar nitrógeno o compuestos derivados de este como nutrientes para las plantas. Las principales fuentes de fertilización nitrogenada son las siguientes:

Urea

Es una de las principales fuentes de fertilización nitrogenada y las ventajas frente a otros fertilizantes es que el mayor contenido de N puede incorporarse al suelo previo a la siembra. Además, al ser un fertilizante de reacción ácida, puede utilizarse en suelos ligeramente alcalinos o suelos neutros. (Trenkel, 2010; Cantarella et al., 2018, citado por Morales et al., 2019). Las principales fuentes nitrogenadas son estas:

Nitrato de amonio

El nitrato de amonio con fórmula NH_4NO_3 , es una sal formada por iones de nitrato y de amonio muy soluble en el agua. En su composición tiene un 33 % de nitrógeno y hasta un 3 % de fósforo, con un índice de salinidad de 105 y de acidificación de 60. Tiene un índice bajo de acidificación, pero a largo plazo tiende a acidificar el suelo. El nitrato es de disponibilidad y absorción rápida debido a que es aprovechado directamente por las plantas. A diferencia del amonio, la disponibilidad es lenta porque necesita ser oxidado por microorganismos disponibles en el suelo a nitrito o nitrato, por lo cual sirve de abono por un prolongado tiempo (Guerrero, 1990).

Urea full top

Este fertilizante tiene compuestos muy similares a la urea con un 46 % de Nitrógeno y 2 % de polímero. Asimismo, presenta una novedad debido a que tiene como ingrediente activo al nitrógeno en forma polimerizada, por lo que es capaz de retener cationes que activan los sistemas enzimáticos, los cuales son responsables de transformar el nitrógeno ureico en formas asimilables (Tecnología Química y Comercio [TQC], 2012).

b. Fertilizantes potásicos

La FAO (2002) indica que son fertilizantes simples con mayor concentración de potasio (K). Debido a las variadas funciones vitales de este fertilizante potásico, son numerosos los efectos positivos de la fertilización. Los cultivos absorben cuantiosas cantidades de potasio, a veces más que el nitrógeno, capital para el crecimiento y desarrollo en muchos de los procesos metabólicos, como la actividad fotosintética. Asimismo, tiene la capacidad de activar algo más de 60 sistemas enzimáticos, la síntesis de compuestos, el traslado y acumulación de hidratos de carbono, con lo cual optimiza la distribución del agua en los órganos de las plantas, promociona el desarrollo del sistema radicular, aumenta la soportabilidad ante la falta de agua y los cambios bruscos de temperatura, y disminuye el efecto destructivo de plagas y enfermedades. Estos efectos benéficos permiten explicar la importancia que tiene el potasio en el incremento de los rendimientos y el nivel cualitativo de las cosechas. Los fertilizantes potásicos más usados son los siguientes:

Muriato o cloruro potásico (KCl)

Este fertilizante contiene hasta 60 % de K_2O y es el más usado en la nutrición potásica de la mayoría de los cultivos. La mayor parte del K_2O es aplicado en la forma de NPK y PK. En los cultivos sensibles al cloro o en aquellos donde el azufre es necesario, se utiliza el sulfato potásico con el 50 % de K_2O y 18 % de azufre.

Sulfato potásico (K_2SO_4)

El sulfato potásico, magnésico o sulfato potásico de magnesio es la fuente de potasio común en cultivos sensibles al agregado de cloruros. Su origen es del refinado de minerales como langbeinita, kieserita, alunita, etc. También provee fácilmente suministros disponibles del 6 % de magnesio (Mg) y 16–22 % de azufre (S).

c. Fertilizantes fosfatados

Las fuentes de fósforo se agrupan en fuentes orgánicas e inorgánicas: Las orgánicas están vinculadas a los purines, estiércol animales, restos orgánicos, y las inorgánicas están vinculadas con todos los fertilizantes fosfatados derivados de la roca fosfórica, cuyos principales yacimientos se encuentran en Jordania, Marruecos, Rusia, Túnez, Estados Unidos de América, Brasil y China. Los fertilizantes fosforados se clasifican en solubles e insolubles: Los solubles en agua liberan rápidamente al fósforo que está disponible para la absorción por la planta desde la solución del suelo; además, son los más consumidos a nivel mundial, aunque industrialmente tienen un alto costo debido a que en su producción se usan combustibles fósiles. Por otro lado, en los insolubles, la liberación de fósforo es lenta y estará disponible a través del tiempo, por lo cual es una alternativa de aplicación directa de fósforo al suelo que permite lograr un costo acorde al mercado.

Las reacciones químicas que los fertilizantes fosfatados producen dependen de las características físicas y químicas del suelo y de las características químicas del fertilizante. Al emplear un fertilizante fosfatado soluble, es disuelto de inmediato y pasa desde la solución del suelo a ser parte de la fracción del fósforo lábil; luego se precipita y siguen las reacciones de adsorción con el aluminio y óxidos de hierro, formando así a largo plazo compuestos poco solubles y de menor disponibilidad para las plantas. En cambio, los fertilizantes fosfatados insolubles tienen que estar disueltos por el ácido generado en los

suelos; por tal motivo, este fertilizante insoluble es recomendado para suelos ácidos con un pH menor a 5,8, y se continúa con el mismo proceso que el fertilizante soluble (Vistoso y Sandaña, 2016). Los principales fertilizantes fosfatados son los siguientes:

Roca fosfórica acidulada con ácido sulfúrico

Es un fertilizante sólido granulado, de color blanco arena, no inflamable, no corrosivo ni explosivo, y con una estabilidad de cinco años. Tiene mayor concentración en fósforo, bajo la forma de superfosfato simple, rico en calcio (Ca), azufre (S), y enriquecido con microelementos, como boro, cobre zinc, hierro, magnesio, manganeso, etc. Las plantas asimilan el fósforo en forma iónica que se halla en la solución del suelo y este es aplicado en el distal radicular. Los ingredientes activos de este fertilizante son 20 % de fósforo (P_2O_5), 50 % de sulfato de calcio ($CaSO_4$), 1 % de sulfato ferroso ($FeSO_4$), 2 % de sulfato de magnesio ($MgSO_4$), 0,4 % de sulfato de zinc ($ZnSO_4$), 0,6 % de sulfato de manganeso ($MnSO_4$), 0,2 % de sulfato de cobre ($CuSO_4$), 0,2 % y 0,1 % de boro (Abanto, 2016).

Fosfato diamónico (FDA)

Es un fertilizante complejo granulado con fórmula química $(NH_4)_2HPO_4$. El FDA posee mayor concentración en fósforo, además de un 18 % de nitrógeno amoniacal, 46 % de P_2O_5 . Tiene una solubilidad en agua de 588 g.L^{-1} a 20°C y con un pH de 7,5 a 8,0. Al diluir granos de FDA, este libera amonio y probablemente el amoniaco volátil es dañino para las raíces y plántulas cercanas y esto es más común cuando el pH es mayor a 7. El FDA posee una reacción alcalina: por consiguiente, es adecuado para suelos alcalinos o neutros, pero tiene una reacción residual ácida. Debido al amonio presente es una excelente fuente de nitrógeno, convertido a nitrato por las bacterias del suelo, lo cual es ideal para cultivos extensivos, especialmente para cultivos que requieren este nutriente en la etapa inicial. El FDA es un producto muy soluble en agua; por tanto, se disuelve rápidamente en el suelo para liberar fosfato y amonio disponible en las plantas, lo que asegura una rápida fertilización (Abanto, 2016).

Superfosfato triple (SFT)

Conocido también como fosfato diácido de calcio y como fosfato monocálcico, disponible en forma granulada y no granulada, es un fertilizante con mayor concentración en fósforo, pero no contiene nitrógeno (N). Su fórmula química es $Ca(H_2PO_4)_2$ y cuenta con un 44 % a 48 % de P_2O_5 , un 13 % a 15 % de Ca, una solubilidad en agua mayor al 90 % y un pH

solución de 1 a 3. A medida que la humedad del suelo disuelve los gránulos, la solución se vuelve ácida; por eso, es recomendada para aplicaciones al voleo o al costado de la línea de siembra (FAO, 2002).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Diseño de la investigación

La investigación fue de tipo no experimental, descriptiva y estratificada (Hernández *et al.*, 2010), toda vez que no se manipularon variables (Ato *et al.*, 2013). Las variables de medición, tales como suelos y Cd, fueron observadas y medidas tal como se encontraron en su ambiente, y luego fueron analizadas de acuerdo a los datos tomados en un momento y tiempo únicos en los suelos con los cultivos de “mandarina”, “maracuyá”, “caña de azúcar”, palto y maíz en el Fundo Tutumo-El Mirador, ubicado en la zona agrícola de Barranca, lugar donde se estudiaron cinco perfiles de suelos, que fueron evaluados de acuerdo con el Manual para la Descripción de Perfiles de Suelos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2009).

2.2. Lugar y fecha

El trabajo de investigación se ejecutó en los terrenos agrícolas del Fundo Tutumo-El Mirador, de propiedad del señor José Solís Mejía, ubicado en la localidad de Barranca, con una extensión de 23,9 ha (ver Apéndice 1). En esta área se ubicaron las parcelas de estudio, las cuales tenían cultivos de “mandarina” *Citrus reticulata* Bueno., “maracuyá” *Passiflora edulis* Sims, “caña de azúcar” *Saccharum officinarum* L., “palto” *Persea americana* Mill. y “maíz” *Zea mays* L. (Tabla 4). El fundo en mención está ubicado en la provincia de Barranca, perteneciente a la Región Lima, Perú.

La provincia de Barranca limita por el noreste y norte con los distritos de Supe Puerto y Barranca. Los límites por el suroeste van desde Punto El Áspero hasta la intersección de la divisoria de aguas de las cuencas de los ríos Pativilca y Supe con el límite provincial. A partir de allí, prosigue por límite provincial hasta la cumbre del Cerro Pacryhuaín, limita

por el este con la provincia de Ocros, con el distrito de Ámbar y Huaura, por el sur con el distrito de Végueta, por el oeste con el océano Pacífico.

La mayor actividad de los pobladores de Barranca es la agricultura, produciendo frutales como “palta” *Persea americana*, “fresa” *Fragaria vesca*, “caña de azúcar” *Saccharum officinarum*, “lúcuma” *Pouteria lucuma*, “maíz” *Zea mays* y “manzana” *Malus doméstica*. También cultivan otros productos como “papa” *Solanum tuberosum* y diversas hortalizas como “lechuga” *Lactuca sativa* L, “zanahoria” *Daucus carota* L y “repollo” *Brassica oleracia* L., entre otros. Todos los cultivos son desarrollados con tecnología media donde la fertilización juega un papel importante para conseguir rendimientos rentables.

La ubicación geográfica de los puntos de muestreo en cada parcela en estudio está indicada en la tabla siguiente:

Tabla 4

Parcelas en estudio

CULTIVO	UTMS	
	Este	Norte
Mandarina	208540,50	8800570,34
Maracuyá	208594,51	8800572,83
Palto	208481,64	8800488,35
Caña de azúcar	208997,06	8800531,60
Maíz (monocultivo)	209051,06	8800404,78

Fuente: Elaboración propia.

El trabajo de investigación tuvo una duración de 12 meses; se inició en agosto del año 2019 y concluyó en el mes de julio del año 2020.

2.3. Población y muestra

Población

La población está constituida por las tierras agrícolas del sector norte del sector nororiental del distrito y provincia de Barranca, de la Región Lima, de Barranca, cuyos terrenos están siendo cultivados continuamente con caña de azúcar, diversos frutales y hortalizas. El sector

tiene una superficie aproximada de 321 ha, que pertenecen individualmente a 28 agricultores.

Muestra

La muestra estuvo constituida por cada una de las parcelas del fundo Tutumo-El Mirador, cuyas parcelas de producción con sus respectivas áreas y ubicación geográfica de los puntos centrales de cada una de ellas están mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5

Puntos de Muestreo

PARCELA	EXTENSIÓN (ha)	CONDICIÓN DEL CULTIVO
01: Cultivo de mandarina	2,0	Cultivo en periodo de cosecha
02: Cultivo de maracuyá	3,6	Plantaciones ya cosechas
03: Cultivo de caña de azúcar	3,9	Cultivo en pleno desarrollo
04: Cultivo de palta	6,0	Cultivo en su fase inicial
05: Cultivo de maíz (chala)	8,4	Cultivo en periodo de cosecha

Fuente: Elaboración propia.

2.4. Materiales

Los materiales utilizados en la investigación fueron los siguientes:

Materiales de campo

Etiquetas de identificación de muestras, bolsas de plástico de 1 kg de capacidad, lápices, plumones de punta gruesa y delgada, borrador, mapa base de la zona en estudio, GPS, reglas de madera de 1,20 m de longitud, guantes descartables, cámara fotográfica, letreros para identificar las calicatas, calculadora, cinta métrica. Movilidad contratada.

Materiales de laboratorio

Muestras de suelos de los cinco perfiles, jeringas, alcohol, calculadora, embudos, pinzas, papel aluminio, papel filtro, guantes, mandil, mascarilla, vasos de vidrio, vasos de plástico descartables, algodón, probeta, rejilla, pipeta, micropipeta, placas de Petri, rejilla portaobjetos, agitador magnético, matraces, embudos, pinzas, papel aluminio, crisol de porcelana, balanza analítica, test para en análisis de cadmio, fotómetro, cápsula de porcelana,

espátula, estufa, mortero, potenciómetro, pinza de madera, pizeta de plástico, probeta graduada, rejilla de asbesto, vaso de precipitación, cuentagotas, escobilla, tamiz, cooler, libreta de apuntes, ácido nítrico, gasa, plumón indeleble de color negro, cinta métrica, agua destilada.

Materiales de gabinete

Equipo de computación, programas estadísticos Excel, Word, Power Point, Minitab, impresora, escáner, USB, papeles bond A4, lapiceros, calculadora.

2.5. Descripción de la investigación

El estudio fue desarrollado teniéndose en cuenta las pautas sugeridas por Mejía (2019) y en concordancia con el Reglamento de Tesis del Departamento de Investigación de la Facultad de Ingeniería Agraria de la Universidad Católica Sedes Sapientiae (2018). Se consideraron cuatro fases, que fueron ejecutadas de la siguiente manera:

a. Fase preliminar

En esta fase se realizaron las siguientes actividades:

- Reconocimiento de las zonas en estudio para la ubicación de las parcelas de acuerdo con los cultivos en estudio, que reunieron las condiciones requeridas para la investigación.
- Acopio de la información necesaria referentes a la zona en estudio, con respecto a la historia de las formas y tipos de fertilizaciones que se han aplicado desde hace varios años atrás.
- Obtención de la información bibliográfica y material informativo requeridos para este estudio, mediante la revisión de archivos, informes y entrevistas con los productores de la zona en estudio.
- Elaboración del mapa base con la ubicación de los puntos centrales de muestreo, y con el acopio de las principales características de las parcelas elegidas para la presente investigación.

b. Fase de campo

En esta fase se realizaron las siguientes actividades:

- Construcción de tres calicatas en cada una de las cinco parcelas previamente ubicadas en el Fundo Tutumo-El Mirador. Las calicatas fueron construidas tomándose el punto central de cada una de las parcelas, a las que se le agregó dos calicatas más ubicadas a 25 m antes y después de la calicata central, con base en el norte magnético mediante una línea imaginaria de acuerdo al mapa base previamente establecido.
- Luego se procedió a la descripción morfológica de las calicatas, teniendo en cuenta que el estudio se hizo con base en dos profundidades: de 0 a 20 y de 20 a 60 cm.
- Se tomaron muestras de cada una de las profundidades y en cada calicata. De las tres calicatas de cada parcela se recolectaron muestras individuales de 300 g para proceder con los análisis del contenido de cadmio. El restante de las muestras individuales de cada una de las parcelas fue mezclado uniformemente y luego se tomó una muestra compuesta de cada una de las combinaciones. Tenían un peso aproximado de 1 kg. Estas fueron identificadas debidamente para luego ser enviadas al laboratorio para los análisis de caracterización.
- Posteriormente, se diseñaron y aplicaron encuestas de 13 preguntas de tipo abiertas y cerradas (el modelo de encuesta se encuentra en el Apéndice 7). Los colaboradores fueron elegidos aleatoriamente en el que participaron varones y mujeres con edades entre 18 a 85 años. Se encuestaron a 20 agricultores, esto debido a factores como la pandemia de la covid – 19, la falta de empatía de los pobladores y la desconfianza de los mismos y se hicieron consultas a las casas comerciales agropecuarias para conocer los niveles de fertilización fosfatada que están recibiendo los cultivos considerados en este estudio.

c. Fase de laboratorio

En esta fase se realizaron los análisis respectivos de las muestras colectadas en la fase de campo. Estos análisis se realizaron de la siguiente manera:

- Los análisis de caracterización de los suelos cinco suelos en estudio se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Fertilizantes del Departamento de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

- Los análisis de Análisis del cadmio (Cd) en mg.kg-1 de suelo ejecutado en el Laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Facultad de Ingeniería Agraria, de la Universidad Católica Sedes Sapientiae:

Se preparó una solución líquida de la muestra de suelo a una temperatura de 10 – 40 °C, con agua desionizada con una conductividad eléctrica menor a 0,05 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, se adicionó en una cubeta de reacción (solución preparada por laboratorio especializado “OZ/PERÚ”) 5,0 ml de muestra y luego se añadió con una pipeta 0,20 ml de la solución Cd-1k, posterior a ello se le adicionó una microcuchara de Cd-2k y se agitó vigorosamente. Se dejó reposar por 2 minutos (tiempo de reacción) luego se colocó la muestra preparada en el fotómetro de absorción atómica modelo PU 9100 para la lectura de los niveles de Cd respectivas (Liva, *et al.*, 2013).

d. Fase de gabinete

En esta fase, luego del ordenamiento y tabulación de los datos obtenidos, se hicieron los análisis estadísticos correspondientes; luego se procedió con la redacción del informe final del trabajo de investigación.

2.5. Técnicas e instrumentos

La investigación fue desarrollada por medio de la observación directa en el campo de los perfiles de suelos fijados en los puntos de muestreo, cuya descripción fue realizada con base en la “Guía para la descripción de perfiles” de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2009). Asimismo, para la interpretación de los resultados de los análisis de los suelos se utilizó el manual de campo para la descripción y muestreo de suelos (Schoeneberger *et al.* 2012). Para la interpretación de las correlaciones entre los contenidos de cadmio de los cinco suelos en relación con las dos profundidades en estudio, se tomó en cuenta el análisis de varianza mediante el diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 (profundidades) por 5 (suelos), la prueba de significación de Tukey (Little y Hills, 2002), procesados con el programa estadístico Minitab 16. Para evaluar los contenidos de cadmio en cinco perfiles de suelos estudiados con relación a las dos profundidades (0-20 y 20-60 cm), los resultados fueron ordenados tal como está mostrado en la Tabla 6.

Tabla 6*Tratamientos en estudio*

N°	Cultivo	Profundidad (cm)	Características
1	Mandarina	0-20	Suelo cultivado con mandarina: 0-20 cm
2	Mandarina	20-60	Suelo cultivado con mandarina: 20-60 cm
3	Maracuyá	0-20	Suelo cultivado con maracuyá: 0-20 cm
4	Maracuyá	20-60	Suelo cultivado con maracuyá: 20-60 cm
5	Caña de azúcar	0-20	Suelo cultivado con caña de azúcar: 0-20 cm.
6	Caña de azúcar	20-60	Suelo cultivado con caña de azúcar: 20-60 cm.
7	Palto	0-20	Suelo cultivado con palto: 0-20 cm.
8	Palto	20-60	Suelo cultivado con palto: 20-60 cm
9	Maíz	0-20	Suelo cultivado con maíz: 0-20 cm.
10	Maíz	20-60	Suelo cultivado con maíz: 20-60 cm.

Fuente: Elaboración propia.

2.6. Identificación de las variables y su mensuración (Metodología)

Las variables tomadas en cuenta fueron la caracterización del suelo para conocer el estado de las propiedades físico-químicas de este recurso y además se analizó el contenido de cadmio disponible en las profundidades de 0-20 y 20-60 cm en los suelos cultivados con “mandarina”, “maracuyá”, “caña de azúcar”, “palto” y “maíz”. Además, fueron ejecutadas las regresiones y correlaciones para comparar los contenidos del cadmio en ambas profundidades. Las mismas están mostradas en la Tabla 7.

Tabla 7*Variables en estudio, su mensuración y métodos para su determinación*

Característica	Unidades de expresión	Método
1. Análisis de caracterización		
Reacción del suelo	Rangos de pH	Potenciómetro
Conductividad eléctrica	dS.m ⁻¹	Conductímetro
Carbonatos de calcio	%	Gas volumétrico
Materia orgánica	g.kg ⁻¹	Walkey y Black
Fósforo disponible	mg.kg ⁻¹	Olsen modificado
Potasio disponible	mg.kg ⁻¹	Acetato de amonio pH 7
Textura del suelo	%	Método del hidrómetro
Capacidad de intercambio catiónico	cmol(+).m ⁻¹	Acetato de amonio pH 7
Cationes cambiabiles	cmol(+).m ⁻¹	Fotómetro de llama
Porcentaje de saturación de bases	%	Fotómetro de llama
2. Profundidades de muestreo		
0-20	Cm	Regla graduada
20-60	Cm	Regla graduada
3. Niveles de cadmio disponible		
Suelo cultivado con mandarina	mg.kg ⁻¹	Laboratorio FIA/UCSS
Suelo cultivado con maracuyá	mg.kg ⁻¹	Laboratorio FIA/UCSS
Suelo cultivado con caña de azúcar	mg.kg ⁻¹	Laboratorio FIA/UCSS
Suelo cultivado con palto	mg.kg ⁻¹	Laboratorio FIA/UCSS
Suelo cultivado con maíz	mg.kg ⁻¹	Laboratorio FIA/UCSS

Fuente: Elaboración propia.

2.7. Análisis de datos

La interpretación de los resultados de la caracterización de las muestras de los cinco suelos considerados en el estudio fue realizada mediante las tablas sugeridas por Schoeneberger *et al.* 2012 (ver Apéndice 4). Los contenidos de cadmio en ambas profundidades fueron analizados en el Laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Facultad de Ingeniería Agraria de la Universidad Católica Sedes Sapientiae (ver Apéndice 3) y para conocer las diferencias entre los contenidos de cadmio en los cinco suelos con relación a las dos profundidades se realizó un análisis de varianza de dos vías (diseño completamente al azar con arreglo factorial 2x5). Por último, para comparar las medias se utilizó la prueba de distribución de t-Student (Little y Hills, 2002), mediante el programa estadístico Minitab 16.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Resultados de la caracterización de los suelos en estudio

3.1.1. Análisis físico-químico de los suelos

Los análisis físico-químicos de los suelos en estudio fueron realizados en el Laboratorio de Suelo de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) (2019). Los resultados se muestran de la siguiente manera:

a. Análisis físico-mecánico y clase textural de los suelos

La textura de los cinco suelos en estudio muestra que las clases texturales encontradas fueron las siguientes: arena, arena franca y franca arenosa. Estos resultados están representados en la Tabla 8.

Tabla 8

Clases texturales

Cultivo	Profundidad (cm)	Componentes texturales (%)			Clase textural (Sistema Americano)
		Arena	Limo	Arcilla	
- Mandarina	0-20	97	1	2	Arena
	20-60	97	1	2	Arena
- Maracuyá	0-20	85	9	6	Arena franca
	20-60	89	3	8	Arena franca
- Caña de azúcar	0-20	87	5	8	Arena franca
	20-60	91	3	6	Arena
- Palta	0-20	65	27	6	Franco arenosa
	20-60	89	5	6	Arena
- Maíz	0-20	63	23	14	Franco arenosa
	20-60	57	29	14	Franco arenosa

Fuente: Universidad Nacional Agraria La Molina [UNALM] (2019).

b. Análisis químico de los suelos

Los resultados obtenidos con respecto al pH, la conductividad eléctrica, el contenido de carbonatos de calcio y de materia orgánica, así como el fósforo y potasio disponibles, que en todos los casos son variables, están representados en la Tabla 9.

Tabla 9

Cantidades de pH, CE, CaCO₃, MO, P y K disponibles

Cultivo	Profundidad (cm)	pH	CE (dS.m ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	M.O. (g.kg ⁻¹)	P disp. (mg.kg ⁻¹)	K disp. (mg.kg ⁻¹)
Mandarina	0-20	8,74	0,19	1,00	0,20	9,1	108
	20-60	8,83	0,14	1,00	0,20	4,7	105
Maracuyá	0-20	7,79	1,99	1,10	0,30	15,3	179
	20-60	7,92	1,65	1,10	0,21	11,2	118
Caña de azúcar	0-20	8,35	0,81	0,90	5,20	6,6	177
	20-60	8,48	0,15	0,60	2,00	4,2	93
Palta	0-20	8,22	1,46	1,30	6,90	11,2	136
	20-60	8,53	0,30	1,50	3,30	6,8	67
Maíz	0-20	7,66	2,51	1,70	7,80	19,8	138
	20-60	7,92	2,40	1,60	9,20	16,0	185

Fuente: UNALM (2019).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es moderadamente baja por estar en niveles que varían de 3,20 a 6,72 cmol.kg⁻¹. Con respecto a los cationes cambiabiles, es el calcio el catión dominante, seguido por el magnesio y el sodio. Las relaciones entre los cationes cambiabiles están dentro de normal para los suelos cultivados. El porcentaje de saturación de bases (% SB) muestra un valor equivalente al 100 % en todos los perfiles. Estos resultados su observan en la Tabla 10.

Tabla 10

CIC, cationes cambiabiles y porcentaje de saturación de bases

Cultivo	Profundidad (cm)	CIC (cmol.kg ⁻¹)	Cationes cambiabiles (cmol.kg ⁻¹)					% SB
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ +H	
- Mandarina	0-20	4,00	3,35	0,30	0,16	0,18	0,00	100
	20-60	3,20	2,51	0,32	0,17	0,20	0,00	100
- Maracuyá	0-20	4,16	1,76	0,98	0,93	0,49	0,00	100
	20-60	4,16	2,17	0,90	0,64	0,45	0,00	100

Continuación

- Caña de azúcar	0-20	4,80	3,16	0,83	0,35	0,45	0,00	100
	20-60	4,80	3,98	0,47	0,15	0,21	0,00	100
- Palta	0-20	5,12	2,67	1,57	0,26	0,62	0,00	100
	20-60	4,16	3,20	0,57	0,09	0,30	0,00	100
- Maíz	0-20	6,72	3,98	1,22	0,74	0,78	0,00	100
	20-60	6,40	3,45	1,55	0,77	0,63	0,00	100

Fuente: UNALM (2019).

3.2. Niveles de cadmio en los suelos

3.2.1. Contenido de cadmio en los suelos en estudio

El contenido de cadmio disponible en los suelos fue analizado en el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, tomando en cuenta las dos profundidades: de 0 a 20 y de 20 a 60 cm, tal como se muestra en las Tablas 11 y 12. Fue notorio que el contenido de cadmio era muy variable: de 0,98 mg.kg¹ (caña de azúcar) hasta 1,79 mg.kg¹ (maíz) a la profundidad de 0 a 20 cm, y de 0,95 mg.kg¹ (caña de azúcar) hasta 1,83 mg.kg¹ a la profundidad de 20 a 60 cm.

Tabla 11

Contenido de cadmio en los suelos: 0-20 cm

Bloques	Profundidad (cm)	Contenido de cadmio (mg.kg ⁻¹) en los suelos				
		Mandarina	Maracuyá	Caña de azúcar	Palto	Maíz
I	0-20	1,55	1,35	1,21	1,39	1,79
II	0-20	1,38	1,45	0,98	1,32	1,66
III	0-20	1,45	1,37	1,09	1,35	1,76

Fuente: Laboratorio de Biotecnología y Microbiología FIA/UCSS (2019).

Tabla 12

Contenido de cadmio en los suelos: 20-60 cm

Bloques	Profundidad (cm)	Contenido de cadmio (mg.kg ⁻¹) en los suelos				
		Mandarina	Maracuyá	Caña de azúcar	Palto	Maíz
I	20-60	1,60	1,30	1,18	1,31	1,83
II	20-60	1,48	1,36	0,95	1,26	1,77
III	20-60	1,52	1,28	0,93	1,33	1,81

Fuente: Laboratorio de Biotecnología y Microbiología FIA/UCSS (2019).

3.2.2. Relación de los niveles de cadmio en los suelos con las dos profundidades

En la Tabla 13 se muestra el análisis de varianza del contenido de cadmio con relación a los cinco suelos cultivados con “mandarina”, “maracuyá”, “caña de azúcar”, “palto” y “maíz”, para el cual se utilizó en diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 5×2 .

Tabla 13

Análisis de varianza del contenido de Cd a nivel de las dos profundidades del suelo

F.V.	SC	GL	CM	Fc	p-valor
Repeticiones	0,042	2	0,021	5,457	0,0140
Suelos con cultivos	1,631	4	0,408	104,891	<0,0001
Profundidades	0,001	1	0,001	0,310	0,5848
Suelos x profundidades	0,035	4	0,009	2,230	0,1064
Error	0,070	18	0,004		
Total	1,779	29			

Fuente: Elaboración propia.

Efecto del factor suelo

En la Tabla 14 y la Figura 4 se observan los resultados de la prueba de Tukey con relación al factor suelo. En notorio que el suelo con “maíz” ocupa el primer lugar en cuanto a la mayor cantidad de cadmio acumulado, seguido por el suelo cultivado con “mandarina”, el suelo con “maracuyá”, el suelo con “palto” y, finalmente, el suelo con “caña de azúcar”.

Tabla 14

Prueba de Tukey para los suelos con cultivos en estudio

O.M.	Cultivo	Cd (mg.kg ⁻¹)	Significación
1	3: Suelo con caña de azúcar	1,770	A
2	4: Suelo con palto	1,497	B
3	2: Suelo con maracuyá	1,352	B
4	1: Suelo con mandarina	1,327	C
5	5: suelos con maíz	1,057	D

ALS (T) 0,05 = 0,10885

Fuente: Elaboración propia.

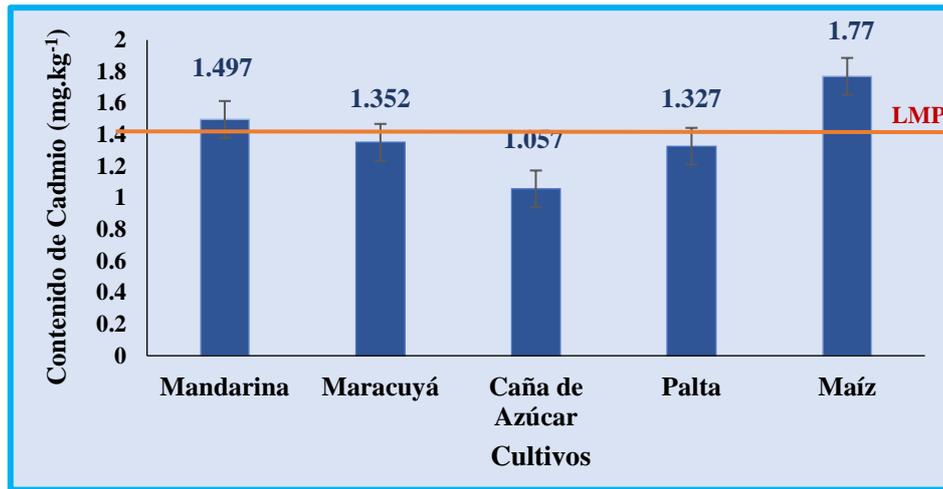


Figura 4. Contenido de cadmio en el suelo según cultivo. Fuente: Elaboración propia.

Efecto del factor profundidad

El efecto del factor profundidad se puede observar en la Tabla 15 y la Figura 5, donde se observa que tanto la profundidad de 0-20 cm como la de 20-60 cm no son estadísticamente diferentes con respecto al contenido de cadmio, aunque en la profundidad de 20-60 cm se ha encontrado ligeramente una mayor disponibilidad del metal pesado.

Tabla 15

Prueba de significación de Tukey para profundidad

O.M.	Profundidad (cm)	Cd (mg.kg ⁻¹)	Significación
1	0-20	1,407	A
2	20-60	1,394	A

ALS (T) 0,05 = 0,04783

Fuente: Elaboración propia.

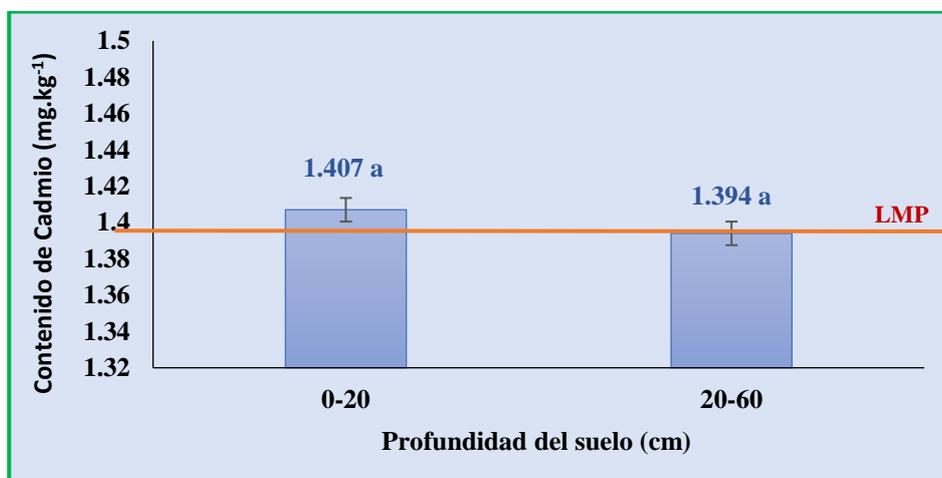


Figura 5. Contenido de cadmio en el suelo según profundidad. Fuente: Elaboración propia.

Efecto de la interacción profundidad-suelo con diferentes cultivos

El efecto de la interacción profundidad y los cinco suelos en estudio se puede observar en la Tabla 16 y la Figura 6, en los cuales se nota claramente que las interacciones de los suelos cultivados con “maíz” y con “mandarina”, en ambas profundidades, son estadísticamente superiores al resto de tratamientos, porque que tienen mayor cantidad de cadmio disponible.

Tabla 16

Prueba de Tukey para la interacción profundidad por tipo de cultivo

O.M.	Cultivo x Profundidad (cm)	Cd (mg.kg ⁻¹)	Significación
1	Maíz x 20-60 cm	1,803	A
2	Maíz x 0-20 cm	1,737	A
3	Mandarina x 20-60 cm	1,533	B
4	Mandarina x 0-20 cm	1,460	B
5	Maracuyá x 0-20 cm	1,390	B C
6	Palto x 0-20 cm	1,353	B C
7	Maracuyá x 20-60 cm	1,313	B C
8	Palto x 20-60 cm	1,300	C
9	Caña de azúcar x 0-20 cm	1,093	D
10	Caña de azúcar x 20-60 cm	1,020	D

ALS (T) 0,05 = 0,18252

Fuente: Elaboración propia.

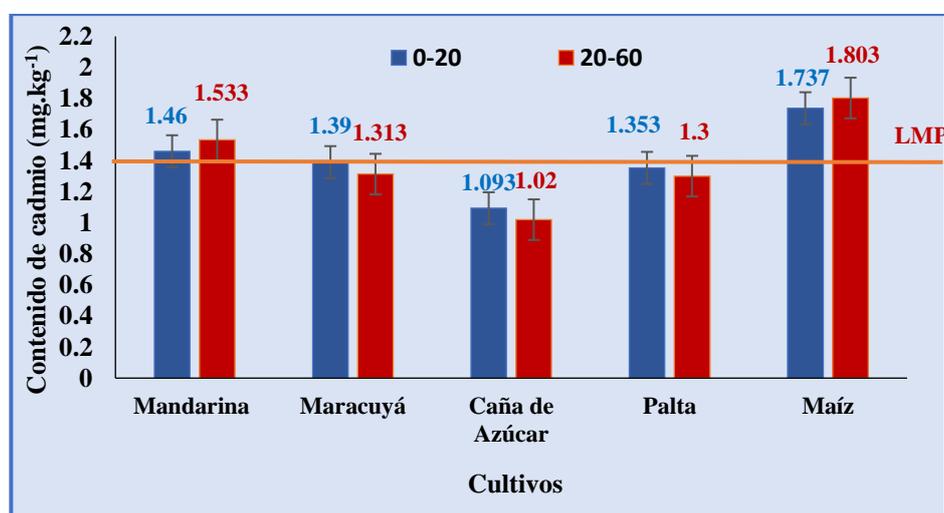


Figura 6. Interacción profundidad y contenido de cadmio en el suelo. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Correlación entre el contenido de cadmio en lo suelo y las profundidades

La prueba de significación de t (Student) fue utilizada para conocer la relación entre las dos profundidades de los cinco suelos y la disponibilidad de cadmio.

3.3.1. Suelo cultivado con “mandarina”

En la Tabla 17 y la Figura 7 se observan la prueba de t y la comparación entre las dos cantidades de cadmio halladas a diferentes profundidades en el suelo cultivado con “mandarina”. Se observa que los niveles de Cd en ambos casos son estadísticamente iguales.

Tabla 17

Prueba de t para comparación de medias del contenido de cadmio a dos profundidades. Cultivo de “mandarina”

Profundidad	Media	Diferencia de medias	T	p-valor
0-20	1,406	-0,073	-1,209	0,2932
20-60	1,533			

Fuente: Elaboración propia

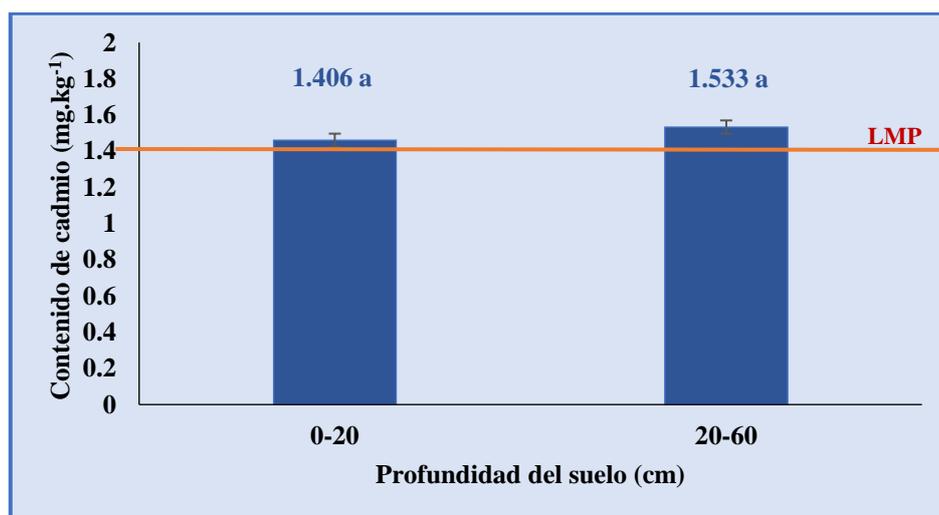


Figura 7. Contenido de cadmio en el suelo con cultivo de “mandarina”. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Suelo cultivado con “maracuyá”

En la Tabla 18 y la Figura 8 se observa la misma comparación, pero esta vez en el suelo cultivado con “maracuyá”. Se observa que los contenidos de Cd de ambas profundidades son estadísticamente iguales.

Tabla 18

Prueba de t para comparación de medias del contenido de cadmio a dos profundidades. Cultivo de “maracuyá”

Profundidad	Media	Diferencia de medias	T	p-valor
0-20	1,390	0,077	1,972	0,1199
20-60	1,313			

Fuente: Elaboración propia.

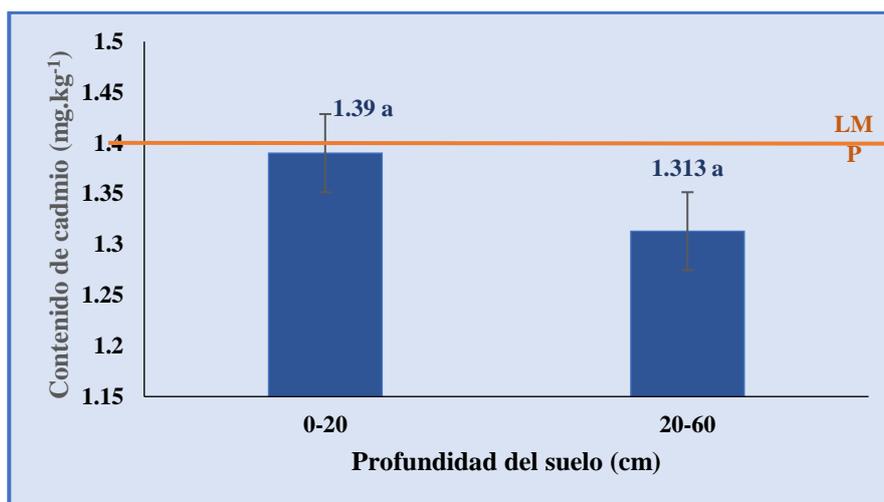


Figura 8. Contenido de cadmio en el suelo con cultivo de “maracuyá”. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Suelo cultivado con “caña de azúcar”

En la Tabla 19 y la Figura 9 se observa nuevamente la comparación, pero en el suelo cultivado con “caña de azúcar”. Aunque los promedios no son iguales matemáticamente, son estadísticamente iguales en las profundidades de 0-20 cm y de 20-60 cm.

Tabla 19

Prueba de t para comparación de medias del contenido de cadmio a dos profundidades. Cultivo de “caña de azúcar”

Profundidad	Media	Diferencia de medias	T	p-valor
0-20	1,093	0,043	0,551	0,6017
20-60	1,020			

Fuente: Elaboración propia.

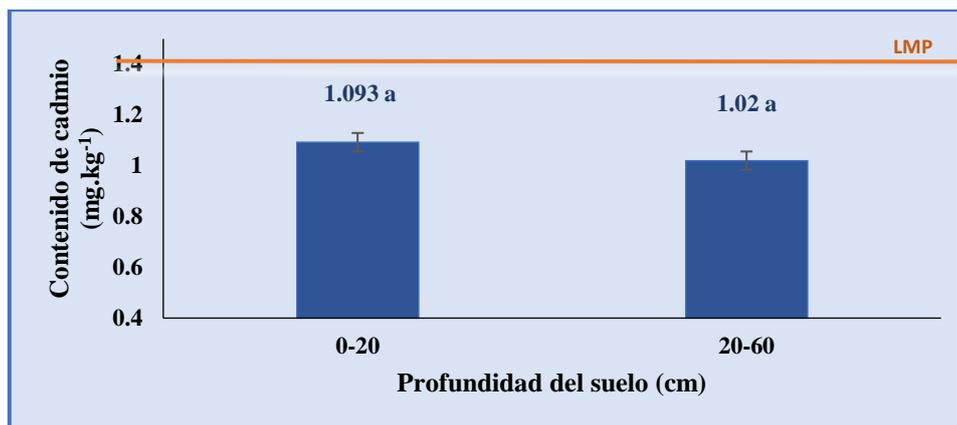


Figura 9. Contenido de cadmio en el suelo con cultivo de “caña de azúcar”. Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. Suelo cultivado con “palta”

La Tabla 20 y la Figura 10 muestran la comparación una vez más, pero con respecto al suelo cultivado con “palta”.

Tabla 20

Prueba de t para comparación de medias del contenido de cadmio a dos profundidades. Cultivo de “palto”

Profundidad	Media	Diferencia de medias	T	p-valor
0-20	1,737	-0,067	-1,548	0,1966
20-60	1,803			

Fuente: Elaboración propia.

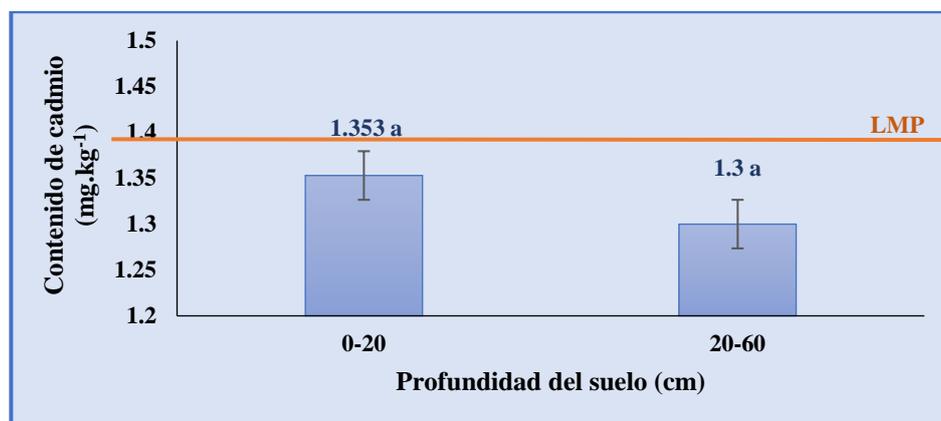


Figura 10. Contenido de cadmio en el suelo con cultivo de “palto”, según profundidad. Fuente: Elaboración propia.

3.3.5. Suelo cultivado con “maíz”

En la Tabla 21 y la Figura 11 se observa la comparación del cadmio contenido en el suelo cultivado con “maíz”. En este caso no se encontraron diferencias estadísticas al comparar las dos profundidades, aunque numéricamente el contenido de Cd fue mayor en la profundidad de 20 a 60 cm.

Tabla 21

Prueba de t para comparación de medias del contenido de cadmio a dos profundidades. Cultivo de “maíz”

Profundidad	Media	Diferencia de medias	T	p-valor
0-20	1,737	-0,067	-1,548	0,1966
20-60	1,803			

Fuente: Elaboración propia.

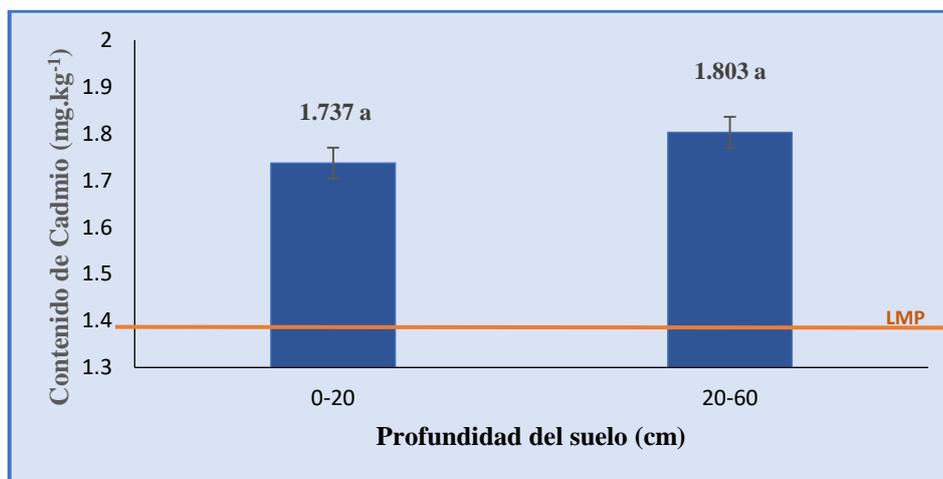


Figura 11. Contenido de cadmio en el suelo con cultivo de “maíz”, según profundidad. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Correlaciones

Los análisis de la correlación entre el efecto de los tipos de fertilizaciones sobre el contenido de cadmio en los suelos con diferentes cultivos a la profundidad total de 0-60 cm se muestra en la Tabla 22 y la Figura 12, en las cuales se aprecia una alta significación entre el cadmio y la fertilización fosfatada en la profundidad total.

Tabla 22

Resultados del análisis de correlación (0-60: 0-20 y 20-60 cm de profundidad)

Variables	r calculado	r tabulado		Sign.
		0,05	0,01	
Y = Cadmio en el suelo (mg.kg ⁻¹): 0 - 60 cm X = Nivel de fertilización fosfatada	0,888	0,361	0,463	**
Y = Cd en el suelo (mg.kg ⁻¹): 0 - 20 cm X = Nivel de fertilización fosfatada	0,863	0,482	0,606	**
Y = Cd en el suelo (mg.kg ⁻¹): 20 - 60 cm X = Nivel de fertilización fosfatada	0,919	0,482	0,606	**

Fuente: Elaboración propia. **: Alta significación estadística ($r_{\text{calculado}} > r_{\text{tabulado}}$ a $P=0,05$ y $P=0,01$).

En la Tabla 22 y la Figura 12 se muestra el análisis de varianza y la curva de la regresión sobre el efecto de los niveles de fertilización en relación con el contenido de Cd en la profundidad total de 0-60 cm.

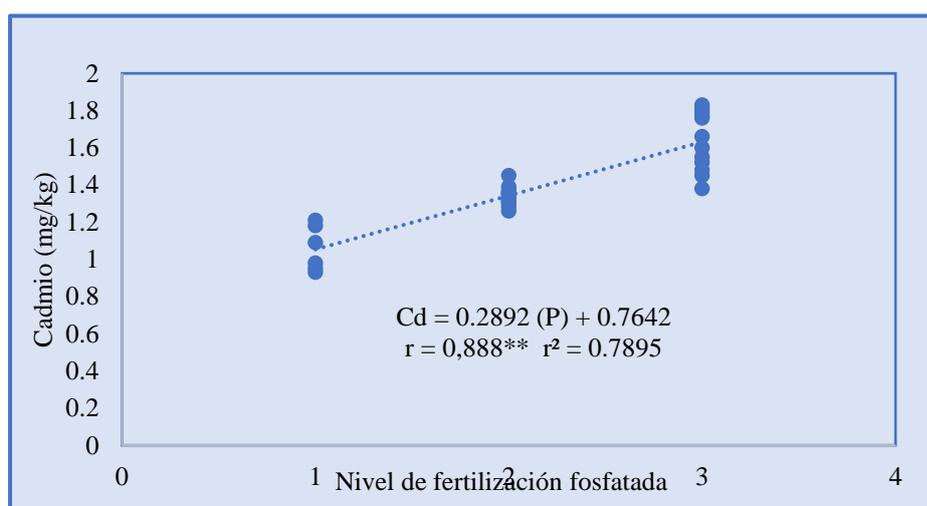


Figura 12. Regresión y correlación entre fertilización fosfatada y el contenido de cadmio. Profundidad de 0 – 60 cm. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 22 y la Figura 13 se muestra el análisis de la varianza y la curva de la regresión con respecto al efecto de los niveles de fertilización en relación con el contenido de Cd en la profundidad de 0-20 cm.

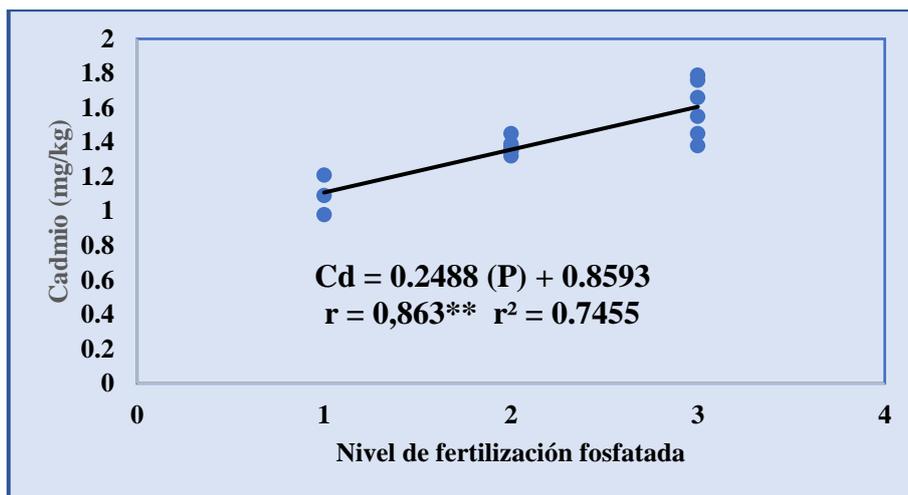


Figura 13. Regresión y correlación de los niveles de fertilización fosfatada y contenido de cadmio. 0 - 20 cm. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 22 y la Figura 14 se muestra el análisis de varianza y la curva de la regresión muestra con respecto al efecto de los niveles de fertilización en relación con el contenido de Cd en la profundidad total de 20-60 cm.

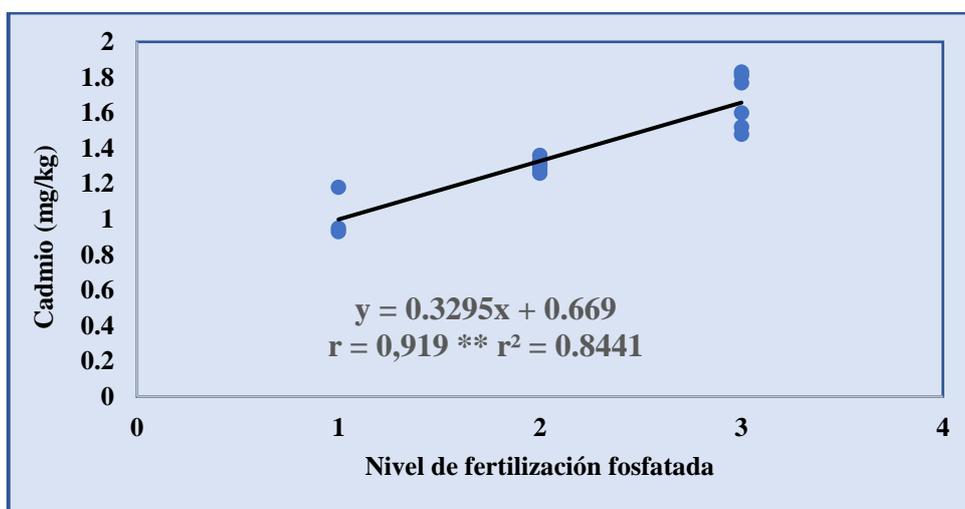


Figura 14. Regresión y correlación niveles de fertilización fosfatada y contenido de cadmio 20 – 60 cm. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: DISCUSIONES

4.1. Resultados de la caracterización de los suelos

4.1.1. Análisis textural

Según la Tabla 8, las clases texturales son variables en los suelos cultivados con las cinco especies de plantas en la zona de Barranca. Con respecto a las partículas texturales, se observa el predominio de la fracción arena sobre el contenido de limo y de arcilla. Estos dos componentes están en porcentajes muy bajos, especialmente en el suelo cultivado con “mandarina” (1 % y 2 %, respectivamente), considerado en la clase textural arena. Los cultivos de “maracuyá” y “caña de azúcar” se están desarrollando en suelos de la clase textural arena franca, que es ligeramente mejor que la anterior. Los cultivos del “palto” y del “maíz” están en suelos de mejor calidad por tener una textura franca arenosa, de acuerdo con las tablas para la interpretación de las características de los suelos propuesta por Schoeneberger *et al.* (2012). Estas clases texturales tendrán un gran efecto sobre la disponibilidad del cadmio en el suelo, teniendo en cuenta lo señalado por Bravo *et al.* (2014) quienes consideran que en la presencia del cadmio en el suelo juegan un papel importante las propiedades del suelo, entre estas principalmente la textura. Además, Abanto (2016) sostiene que la adición de los fertilizantes fosfatados puede incrementar los niveles de cadmio disponible en el suelo cuando la textura es gruesa (arena o arena franca).

4.1.2. Análisis químico de los suelos

Con respecto al pH de los suelos (Tabla 9), se ha encontrado que esta propiedad es muy variable. Los cultivos de “maracuyá” y “maíz” se ubican en una zona con pH ligeramente básico (7,40 a 7,80) y los de “palto” y “caña de azúcar” están en suelos con pH moderadamente básicos (7,81 a 8,40). La mandarina se encuentra en suelo fuertemente básico (8,41 a 9,00). Estos resultados permiten tener un criterio más claro sobre la disponibilidad del cadmio, sobre todo teniendo en cuenta lo reportado por Kabata-Pendias

(2011), quien asegura que el pH del suelo es el factor principal que condiciona la actividad de los metales en el suelo. Asimismo, Bravo *et al.* (2014) agregan que una alta acidez del suelo contribuye a un mayor efecto contaminante y acumulación del cadmio. Es muy distinto el caso de los suelos de Barranca, que tienen problemas de pH alto. Sin embargo, otros autores, como como Barraza *et al.* (2017); Bravo *et al.*, (2014), indican que hay una relación indirecta entre el pH del suelo y la fitodisponibilidad de Cd en los suelos. Cuanto mayor sea el nivel de pH del suelo mayor será la retención, y menor será la disponibilidad del cadmio. En este estudio, los suelos con cultivo de “mandarina” y “maíz” mostraron mayor Ph, consecuentemente, mayor contenido de cadmio disponible, superior al límite máximo permisible ($1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$)

En cuanto a la conductividad eléctrica (Tabla 9), al estar por debajo de 2 dS.m^{-1} se puede inferir que en los cinco suelos no existen problemas de salinidad, lo que quiere decir que el cultivo de “mandarina”, “maracuyá”, “caña de azúcar”, “palto” y “maíz” no sufrirán efecto negativo alguno que afecte al normal desarrollo. Del mismo modo, el contenido de carbonatos, por estar en valores que no superan el 2 %, no tendrá efecto negativo con respecto a los cultivos. Asimismo, la disponibilidad del cadmio no será afectada por la calidad ni por el contenido de carbonatos. Cuando los carbonatos superan el 5 % pueden producir la fijación de algunos elementos, especialmente el P (Schoeneberger *et al.* (2012). Con respecto al contenido de materia orgánica, en ninguno de los cinco suelos excede los 20 g.kg^{-1} , lo cual indica que los niveles de la M. O. son bajos y que, como consecuencia, la disponibilidad del cadmio estará en función de lo que existe en la solución del suelo o en el coloide arcillo húmico en forma lábil. Sobre este punto, cabe tener en cuenta lo afirmado por Lofts *et al.*, (2005), quienes aseguran que suelos con altos contenidos de materia orgánica adsorben más Cd que los que tienen grandes cantidades de arcillas. A esto se suma el criterio de Huaynates (2013), quien agrega que niveles altos de materia orgánica disminuyen la presencia de cadmio disponible en el suelo. También es necesario tener en cuenta que la concentración y movilidad del cadmio están influenciadas por el porcentaje de arcilla, la presencia y el tipo de materia orgánica, tal como señalan Bravo *et al.* (2014).

De acuerdo con la Tabla 10, los resultados en relación con la CIC muestran que esta propiedad se encuentra mayormente en niveles bajos en los suelos con cultivos de “caña de

azúcar”, “maracuyá”, “palto” y “maíz” (4, a 8,0 cmol.kg⁻¹), con excepción del suelo con “mandarina”, donde hay muy baja CIC (<4,0 cmol.kg⁻¹). Estos niveles son características de los suelos arenosos pobres en contenido de arcilla y de materia orgánica. Asimismo, las bases cambiables están en niveles bajos con un predominio notorio de Ca⁺² sobre los cationes Mg⁺², K⁺ y Na⁺, cuyas relaciones muestran lo siguiente: la relación Ca/Mg indica una posible deficiencia de Ca en los suelos con cultivos de “maracuyá” y “palto” (Ca/Mg<2), la relación Ca/K confirma la deficiencia de Ca⁺² en el suelo con cultivo de “palto” (Ca/K <3) y la relación Mg/K indica una deficiencia de Mg en los suelos con “mandarina” “maracuyá” y “maíz” (Mg/K<1), Estos resultados están en función del tipo de extracción que tienen los cultivos, especialmente en sus requerimientos de calcio y de magnesio. Con respecto a los cationes acidificantes Al⁺³ + H⁺, estos no están presentes en los cinco suelos estudiados, lo cual indica la ausencia de acidez intercambiable, razón por la cual el porcentaje de saturación de bases es igual a 100 %, que es un alto porcentaje de saturación de bases.

Finalmente cabe recalcar lo indicado por Bravo *et al.* (2014) en el sentido de que las propiedades físicas y químicas, como la textura, el pH, el contenido de carbono orgánico, el Al³⁺ y las bases cambiables Ca²⁺ y Mg²⁺ de los suelos, juegan un rol importante en la presencia del cadmio en los suelos, especialmente la materia orgánica humificada que retiene al cadmio haciéndolo menos disponible.

4.2. Contenido de cadmio en los suelos en estudio

En la Tabla 11 se muestran los resultados del contenido de cadmio en los cinco suelos en estudio a la profundidad de 0-20 cm. En ella es notorio que en algunos puntos de muestreo las cantidades de cadmio han excedido el límite de 1,4 mg de Cd.kg⁻¹ de suelo, pero los promedios de los tres puntos de muestreo para cada suelo indican que los terrenos con cultivo de “mandarina” tuvieron 1,46 mg de Cd.kg⁻¹, y aquellos con “maíz” tuvieron 1,74 mg de Cd.kg⁻¹. Así, superan los límites máximos permisibles señalados por el MINAM (2017). Estos resultados tienen un vínculo a que plantas como el maíz retienen el Cadmio por ser plantas biorremediadores. Por otro lado, el suelo cultivado con “caña de azúcar” tiene el más bajo nivel de cadmio, con 1,09 mg de Cd.kg⁻¹, y los suelos cultivados con “maracuyá” y “palto” tienen contenidos muy cercanos al límite permisible, con 1,39 y 1,35 mg de Cd.kg⁻¹, respectivamente, niveles que incluso lograrían superarlo si no se toman las medidas más

convenientes. Estos resultados tendrían una relación con los niveles de materia orgánica que fueron aplicados en los suelos cultivados con “maracuyá”, “y “palta”, a lo que se sumaría el pH y la textura. La disminución de la disponibilidad del cadmio tiene relación con lo señalado por Lofts *et al.* (2005) en el sentido de que al agregarse materia orgánica y de hierro abundante habrá una retención mayor del Cd, que se acumulará en el complejo de reserva.

Los resultados del contenido de cadmio en los cinco suelos en estudio mostraron que a la profundidad de 20-60 cm (Tabla 12), en la mayoría de puntos de muestreo, las cantidades fueron superiores al cadmio encontrado a la profundidad de 0-20 cm. Los suelos con cultivo de “mandarina” (1,53 mg de Cd.kg⁻¹ de suelo) y con cultivo de “maíz” (1,80 mg de Cd.kg⁻¹) superaron el límite máximo permisible de 1,4 mg de Cd.kg⁻¹ señalado por el MINAM (2017), mientras que el suelo cultivado con “caña de azúcar” dio el más bajo nivel, con 1,02 mg de Cd.kg⁻¹ de suelo, y los suelos cultivados con “maracuyá” y “palto” tienen contenidos muy cercanos al límite permisible con 1,31 y 1,30 mg de Cd.kg⁻¹ de suelo. Es posible que la materia orgánica aplicada en mayores cantidades en estos tres últimos suelos, a lo que se sumaría el pH, hayan mitigado la disponibilidad del cadmio, tal como lo señalan Lofts *et al.* (2005). Asimismo, Rodríguez (2017) agrega que la mayor cantidad de cadmio que se encuentra en la capa superficial tiene relación con el cadmio presente en la hojarasca y los granos de muchas especies sembradas en suelos con alto contenido de cadmio. Además, el horizonte superficial o capa arable es la zona donde se depositan los fertilizantes requeridos por plantas que se cultivaron (Villanueva 2001). Sin embargo, en este caso se trata de la capa de 20 a 60 cm de profundidad, la misma que es parte de la profundidad efectiva del suelo y donde el cadmio acumulado podría ser producto del lavaje de la capa superficial.

La Tabla 13 muestra el análisis de varianza del contenido de Cd a nivel de los cinco suelos en relación con las dos profundidades. Indica una alta significación estadística ($p \leq 0,05$) en las fuentes de variabilidad repeticiones, suelos cultivados, profundidades y en la interacción suelos por profundidades. Estos resultados indican que hubo diferencias estadísticas notorias entre las fuentes de variabilidad consideradas en el estudio. Del mismo modo, en la Tabla 14 y la Figura 4, sobre el contenido de cadmio en los cinco suelos y la prueba de significación de Tukey ($p \leq 0,05$) para las medias del contenido de cadmio en los suelos estudiados, se muestra que el suelo con cultivo de “caña de azúcar” es el que tiene la menor disponibilidad

de cadmio, con $1,057 \text{ mg.kg}^{-1}$, seguido por los suelos con cultivo de “palto” y de “maracuyá”, con $1,327$ y $1,353 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente. Luego se ubican los suelos cultivados con “mandarina” y “maíz” con $1,497$ y $1,770 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente. Así, estos se convierten en los dos suelos que han sobrepasado el límite máximo permisible de cadmio de acuerdo con el MINAM (2017). Los resultados obtenidos indican que el cadmio está en diferentes proporciones en cada uno de los suelos estudiados. Estas variaciones podrían ser el resultado de las diferentes cantidades de fertilizantes usados en la producción y que fueron adicionados al suelo de acuerdo a la importancia y necesidades de cada cultivo, sobre todo con respecto a la formulación de los fertilizantes fosfatados que podrían originar una mayor entrada de cadmio al suelo (Villanueva, 2001).

La Tabla 15 y la Figura 5, con respecto a la prueba de significación de Tukey sobre el efecto de las dos profundidades en el contenido de cadmio en los suelos, se observa que los niveles de Cd en las profundidades de 0-20 cm y de 20-60 cm son iguales estadísticamente, aunque se aprecia una ligera superioridad en la parte de arriba con $1,407$ con respecto a la segunda profundidad, de 20-60, que tiene un promedio de $1,394 \text{ mg.kg}^{-1}$. Al respecto, Bravo *et al.* (2014) indican que la disponibilidad del cadmio en los suelos agrícolas depende de las características físicas y químicas del suelo, especialmente la textura, el pH y el nivel de carbono orgánico, que en este caso están presentes en mejores niveles en la capa superficial (0-20 cm); por lo tanto, esta tendrá en general un promedio mayor concentración de cadmio.

La prueba de significación de Tukey para la interacción profundidad \times suelo con diferentes tipos de cultivos (Tabla 16 y Figura 6) muestra que las interacciones del suelo con “caña de azúcar” \times la profundidad de 20-60 ($1,02 \text{ mg.kg}^{-1}$) y de 0-20 cm ($1,09 \text{ mg.kg}^{-1}$) son tratamientos estadísticamente iguales y tienen menos cadmio disponible, seguido por las combinaciones suelo con cultivo de “palto” \times la profundidad de 20-60 cm ($1,30 \text{ mg.kg}^{-1}$), suelo con “maracuyá” \times profundidad de 20-60 cm ($1,31 \text{ mg.kg}^{-1}$), suelo con “palto” \times profundidad de 0-20 cm ($1,35 \text{ mg.kg}^{-1}$), suelos con “maracuyá” \times profundidad de 0-20 cm y suelo con “mandarina” \times profundidad de 0-20 cm, que también son estadísticamente iguales. Luego, la combinación suelo con “mandarina” \times 20-60 cm de profundidad ($1,53 \text{ mg.kg}^{-1}$) y finalmente los suelos con cultivo de “maíz” en combinación con las dos profundidades (0-20 y 20-60 cm) son los tratamientos que tienen mayor cantidad de cadmio disponible ($1,73$

a $1,80 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente) y que incluso, conjuntamente con la combinación suelo con “mandarina” \times la profundidad de 20-60 cm, con $1,53 \text{ mg.kg}^{-1}$, son los tratamientos que superan el límite máximo permisible establecido por el MINAM (2017). A ello se suma el criterio de Bravo *et al.* (2014) en el sentido de que controlando el pH para aumentar la acidez del suelo y a la vez suministrar técnicamente los fertilizantes se disminuirá el riesgo de la presencia del cadmio en los suelos estudiados.

La prueba de significación de t sobre el contenido de cadmio en las dos profundidades estudiadas (0-20 y 20-60 cm) en el suelo cultivado con “mandarina”, mostrada en la Tabla 17 y la Figura 7, indica que no existió diferencias estadísticas entre las dos profundidades, cuyas medias fueron de $1,406$ y $1,533 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente, con un ligero predominio a la profundidad de 20-60 cm. De igual manera ocurrió en el suelo cultivado con “maracuyá” (Tabla 18 y Figura 8), con promedios de cadmio de $1,39 \text{ mg.kg}^{-1}$ (0-20 cm) y $1,313 \text{ mg.kg}^{-1}$ (20-60 cm), y tampoco fueron diferentes estadísticamente, con un ligero predominio en la segunda profundidad. Asimismo, en el suelo cultivado con “caña de azúcar” (Tabla 19 y Figura 9) no se encontraron diferencias estadísticas entre ambas profundidades, pero hubo un ligero predominio en la capa de 0-20 cm ($1,093 \text{ mg.kg}^{-1}$) sobre la profundidad de 20-60 cm. Del mismo modo, en el suelo cultivado con “palto” (Tabla 20 y Figura 10) no se encontraron diferencias estadísticas entre las dos profundidades al realizarse las pruebas de t y de Tukey, pero se encontró un contenido mayor de Cd en la profundidad de 0-20 cm ($1,53 \text{ mg.kg}^{-1}$) con respecto a la de 20-60 cm ($1,3 \text{ mg.kg}^{-1}$).

Finalmente, en suelo cultivado con “maíz”, los resultados de las pruebas a las que fueron sometidos (Tabla 21 y Figura 11) también se determinó que la profundidad de 0-20 cm ($1,737 \text{ mg.kg}^{-1}$) fue inferior a la profundidad de 20-60 cm ($1,803 \text{ mg.kg}^{-1}$) en cuanto a la cantidad de Cd, pero no fueron estadísticamente diferentes. Se notó claramente que los suelos cultivados con “mandarina” y con “maíz” fueron los que tuvieron mayores contenidos de cadmio disponible: en ambas profundidades superan el límite máximo permisible (MINAM, 2017), con una mayor cantidad de cadmio en la profundidad de 0-20 cm. Los otros tres suelos restantes, con cultivos de “maracuyá”, “caña de azúcar” y “palto”, tienen contenidos de cadmio por debajo del límite máximo permisible (MINAM, 2017), con mayor cantidad en la capa superficial (0-20 cm).

La regresión y correlación entre los niveles de fertilización fosfatada y el contenido de cadmio a la profundidad de 0-60 cm (Figura 12) explican que los datos analizados muestran un ajuste al modelo lineal para describir la relación entre Cd y la fertilización fosfatada en el suelo. La ecuación del modelo ajustado es la siguiente: $Cd = 0,7642 + 0,2892 (P)$. En esta, el valor-P indica que existe una relación estadísticamente significativa entre Cd y la fertilización fosfatada, con un nivel de confianza del 95 %. Según el estadístico r^2 (coeficiente de determinación), el modelo ajustado explica que el 78,95 % de la variabilidad del Cd puede deberse al nivel de fertilización. El coeficiente de correlación igual a 0,888 indica una relación moderadamente fuerte entre las variables.

La regresión y correlación entre los niveles de fertilización fosfatada y el contenido de cadmio a la profundidad de 0-20 cm (Figura 13) explican que los datos analizados muestran un ajuste al modelo lineal para describir la relación entre Cd y la fertilización fosfatada en el suelo. La ecuación del modelo ajustado es la siguiente: $Cd = 0,8593 + 0,249 (P)$. Puesto que el valor-P en la tabla del análisis de varianza es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Cd y nivel de fertilización fosfatada, con un nivel de confianza del 95 %. El estadístico r^2 (coeficiente de determinación) indica que el modelo ajustado explica el 74,55 % de la variabilidad del Cd; se debería a la fertilización fosfatada. El coeficiente de correlación es igual a 0,863, lo cual indica una relación moderadamente fuerte entre las variables.

La regresión y correlación de la regresión entre los niveles de fertilización fosfatada y el contenido de cadmio a la profundidad de 20-60 cm (Figura 14) explican que los datos analizados muestran un ajuste al modelo lineal para describir la relación entre Cd y la fertilización fosfatada en el suelo. La ecuación del modelo ajustado es la siguiente: $Cd = 0,669 + 0,3295 (P)$. Puesto que el valor-P en la tabla del análisis de varianza es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Cd y nivel de fertilización fosfatada, con un nivel de confianza al 95 %. El estadístico r^2 (coeficiente de determinación) indica que el modelo ajustado explica el 84,41 % de la variabilidad del Cd; se debería a la fertilización fosfatada. El coeficiente de correlación es igual a 0,919, lo cual indica una relación relativamente fuerte entre las variables.

Con respecto a las regresiones y correlaciones, es de importancia tener en cuenta, con relación al cadmio disponible en los suelos, lo señalado por Bonomelli *et al.* (2003) y Muñoz (2017). Los investigadores explican que la fertilización fosforada tiene influencia sobre la presencia de este elemento en el suelo, las raíces de las plantas, las hojas y los granos. Villanueva (2001) reporta que los fertilizantes fosfatados importados, como es el caso del superfosfato triple de calcio, incrementan la disponibilidad del cadmio en los suelos. Abanto (2016) agrega que cuando se aumentan las dosis en la fertilización fosfatada existe la posibilidad de incrementarse el contenido de cadmio en el suelo.

Con la comparación de las medias de las dos profundidades y los cultivos no se encontraron diferencias estadísticas en el suelo cultivado con “caña de azúcar”, suelo cultivado con “palto” y suelo cultivado con “maracuyá”; al contrario, en los suelos cultivados con “mandarina” y con “maíz” se encontraron los mayores contenidos de cadmio disponible en los 20-60 cm de profundidad, y en ambas profundidades superan el límite máximo permisible (MINAM, 2017). Los suelos con cultivos de “maracuyá”, “caña de azúcar” y “palto” tienen contenidos de cadmio por debajo del límite máximo permisible, con mayor cantidad en la capa superficial (0-20 cm).

Por lo tanto, en la calendarización de los cultivos se debe evitar el monocultivo de las especies que requieren mayores cantidades de fertilización fosfatada. También se debe tener en cuenta el fertilizante, que no debe tener cadmio en su composición; la aplicación correcta de la materia orgánica y el eficiente control de los riegos, con el fin de evitar que la disponibilidad del Cd aumente y adquiera niveles perjudiciales que afecten a la cadena alimenticia y se conviertan en un peligro para la salud humana y animal.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

1. Los suelos estudiados en este trabajo de investigación se caracterizaron por tener una textura variable con un predominio de la fracción arena, por lo que fueron agrupados en las clases texturales arena (cultivo de “mandarina”), arena franca (cultivo de “maracuyá” y “caña de azúcar”) y franco arenoso (cultivo de “palto” y “maíz”). Estas clases texturales tendrán un efecto significativo en la disponibilidad del cadmio, especialmente en los suelos de textura franco arenosa que representan la mejor clase textural entre los cinco suelos estudiados.
2. El pH es muy variable. Los suelos cultivados con mandarina tienen un pH fuertemente básico; los suelos con maracuyá y maíz tienen un pH ligeramente básico; y los suelos con los cultivos de “palto” y “caña de azúcar” tienen un pH moderadamente básico. En consecuencia, los pH encontrados en los suelos de Barranca no son aparentes para una alta disponibilidad del cadmio, metal que abunda mucho más cuando el pH es ácido. El contenido de carbonatos de calcio en los cinco suelos está en un nivel que no sobrepasa el 5 %; por lo tanto, no tiene efecto marcado sobre la disponibilidad del cadmio. Del mismo modo, el bajo contenido de materia orgánica en todos los suelos indica que este mejorador del suelo puede fijar temporalmente al cadmio.

La capacidad de intercambio catiónico se encuentra en niveles moderadamente altos en los suelos con cultivo de “caña de azúcar”, “maracuyá”, “palto” y “maíz”, y es bajo en el suelo cultivado con “mandarina”, lo cual es el reflejo del material aplicado en el proceso productivo de acuerdo con las exigencias del cultivo. Esto indica una mínima retención de cadmio intercambiable. Los niveles de la CIC tienen relación con los cationes cambiabiles que están en niveles bajos, sobre todo el Ca^{+2} y el Mg^{+2} , lo cual indica que no habrá fijación del cadmio disponible. Los cationes $\text{Al}^{+3} + \text{H}^{+}$ están prácticamente ausentes, lo cual influye para que los suelos tengan una reacción por encima de la neutralidad y para que el porcentaje de saturación de bases tenga un valor del 100 % con

ausencia total de la acidez cambiante, que es característica de los suelos de las zonas áridas.

3. Las medias de los contenidos de cadmio con relación a las dos profundidades estudiadas demostraron que los suelos cultivados con “maíz” y con “mandarina” sobrepasaron el límite máximo permisible, seguidos por los suelos con “palto” y “maracuyá”, que tuvieron contenidos de cadmio disponible por debajo pero muy cerca del límite máximo permisible. Por otra parte, el suelo cultivado con “palto” es el que menos cadmio tiene. Asimismo, al comparar las dos profundidades (0-20 y 20-60 cm), no se encontraron diferencias estadísticas significativas con relación al contenido de cadmio, pero hubo una ligera superioridad en la capa superior de 0-20 cm.
4. La interacción profundidad y suelos con diferentes cultivos mostró que la relación de las dos profundidades (0-20 y 20-60 cm) de los suelos cultivados con “maíz” y “mandarina” fue estadísticamente superior sobrepasando el límite máximo permisible para el cadmio ($1,4 \text{ mg.kg}^{-1}$). Las siguen las combinaciones de las dos profundidades con los suelos cultivados con “palto”, “maracuyá” y “caña de azúcar”.
5. Las regresiones y correlaciones entre los niveles de fertilización fosforada con los niveles de cadmio disponible en relación con la suma total de las dos profundidades (60 cm) indicaron que con una mayor fertilización fosfatada aumentaron los niveles de cadmio, aunque los niveles encontrados no son demasiado elevados. Solo los suelos cultivados con “mandarina” y “maíz” recibieron una mayor fertilización fosfatada durante varios años en forma continua, por lo cual superaron el límite máximo permisible. Existió una relación estadísticamente significativa entre el cadmio y el nivel de la fertilización fosfatada.
6. Del mismo modo, la regresiones y correlaciones entre los niveles de la fertilización fosfatada y el contenido de cadmio, en la profundidad de 0-20 cm y de 20-60 cm, tienen una relación estadística significativa ($p=0,05$). Al aumentarse el nivel de la fertilización fosfatada podría, aunque ligeramente, aumentar el contenido de cadmio disponible en los cinco suelos estudiados.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

1. Al haberse encontrado que los niveles de cadmio disponible en los suelos cultivados con “mandarina” y “maíz” superaron el límite máximo permisible, se recomienda tener en cuenta estos resultados para evitar que los suelos estudiados sufran mayores incrementos en su contenido de cadmio, para lo cual sería conveniente hacer un estudio detallado de los fertilizantes fosfatados más utilizados en la producción de los cultivos estudiados, teniéndose en cuenta la procedencia de estos insumos.
2. Se recomienda que dentro los planes de rotación de cultivos se incluya la siembra de especies fitorremediadoras con capacidad de absorber el cadmio presente en los suelos. Dentro de ellas se puede considerar a la alfalfa. Asimismo, en los planes de mejoramiento de la calidad productiva de los suelos se debe tener en cuenta la adición de materia orgánica en niveles moderados para que pueda retener el cadmio disponible evitando de esta manera que la contaminación por este metal pesado se traslade a los productos obtenidos en las cosechas y a la cadena alimenticia.
3. Es sumamente importante realizar un estudio mucho más detallado y en otros cultivos con referencia a los niveles de cadmio y otros metales pesados, que puedan estar contaminando los suelos agrícolas de la zona de Barranca. Además, las instituciones públicas y privadas del sector agropecuario deben tomar cartas en el asunto para evitar el deterioro de los suelos y la contaminación de los insumos alimenticios producidos en esta importante zona del país.

REFERENCIAS

- Abanto, M. A. (2016). *Fuentes fosfatadas en dos suelos en la concentración de cadmio foliar en maíz bajo condiciones de invernadero*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1949/F04-A23-T.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Agencia de Protección Ambiental [EPA]. (2017). *Ingredientes utilizados en productos pesticidas*. Estados Unidos.
<https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/basic-information-about-pesticide-ingredients#main-content>
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils, Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Third Edition. 614P. Dordrecht, Netherlands, United Kingdom.
<https://trove.nla.gov.au/version/185827190>
- Amaya, J. E. (2009). *Cultivo de maracuyá*. Gerencia Regional Agraria La Libertad. Trujillo, Perú.
http://www.agrolalibertad.gob.pe/sites/default/files/MANUAL%20DEL%20CULTIVO%20DE%20MARACUYA_0.pdf
- Ato, M., López, J. J. y Benavente, A. (2013). Un sistema de clasificación de los diseños de investigación en psicología. *Anales de Psicología*, vol. 29, núm. 3. pp. 1038-1059. Universidad de Murcia. Murcia, España.
<https://www.redalyc.org/pdf/167/16728244043.pdf>
- Barraza, F., Schreck, E., Leveque, T., Uzu, G., Lopez, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A. y Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution* 229: 950-963. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>
- Barrio, N. (2015). *Metales pesados en suelos y sus efectos sobre la salud*. (Tesis de grado). Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
<https://eprints.ucm.es/55568/1/NOELIA%20BARRIO%20VEGA.pdf>
- Besoain, E., León L., Chien, S., Van Kauwenbergh, S. y Amberger, A. (1999). *Las rocas fosfóricas y sus posibilidades de uso agrícola en Chile*. INIA La Platina. Chile. pp. 41-43.

- Bonomelli, C.; Bonilla, C. y Valenzuela, A. (2003). Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de Cadmio en cuatro suelos de Chile. *Pesquisa. Aqropecuária. Brasileira*, 38 (10) 1179-1186.
- Bravo I., Arboleda, C. y Martín, F. J. (2014). Efecto de la calidad de la materia orgánica asociada con el uso y manejo de suelos en la retención de cadmio en sistemas altoandinos de Colombia. Universidad de Cauca - Universidad de Granada. DOI:10.15446/acag.v63n2.39569
- Cárdenas, A. A. (2012). *Presencia de cadmio en algunas parcelas de cacao orgánico en la Cooperativa Agraria industrial Naranjillo - Tingo María - Perú*. (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/153/AGR-596.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chan, D. Y. y Hale, B. A. (2004). Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslation as sources of variation. *Journal of Experimental Botany*, 55, 2571-2579. doi: 10.1093/jxb/erh255
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B. y Alegar, V. C. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Sci. Total Environ.* 533, 205-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>.
- Clemens, S.; Palmgreen, M. G. y Krämer, U. (2002). A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*, 7, 309-315. doi: 10.1016/S1360-1385(02)02295-1
- Contreras, F., Herrera, T. e Izquierdo, A. (2005). *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*. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Estado Aragua, Venezuela. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/viewFile/979/908
- Cumbre Pueblos (2017). *Contaminación ambiental: Qué es, tipos de contaminación, causas, consecuencias y soluciones*. <https://cumbrepuebloscop20.org/medioambiente/contaminacion/ambiental>
- Dharma-wardana, M.W.C. (2018). Fertilizer usage and cadmium in soils, crops and food. National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, K1A 0R6 and Department of Physique, Université de Montreal. Quebec, Canada.

file:///D:/Fertilixer%20usage%20and%20cadmiun%20in%20soils.

Gallagher, C. M. y Meliker, J. R. (2010). *Blood and Urine Cadmium, Blood Pressure, and Hypertension: A Systematic Review and Meta-analysis*. Environmental Health Perspectives, 118(12). State University of New York at Stony Brook. New York, USA. <http://doi.org/10.1289/ehp.1002077>

Galvao, L. y Corey, G. (1987). *Salud*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Organización Panamericana. Metepec; 75 p. (ECO serie Vigilancia, 4). <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/eco/004663.pdf>

Greenword, N. N. y Earshow, A. (2012). *Chemistry of the elements*. School of Chemistry. University of Leeds. Elsevier. United Kingdom. https://books.google.com.pe/books?id=EvTIouH3SsC&pg=PR3&hl=es&source=gbs_selected_pages&cad=3#v=onepage&q&f=false

Guerrero, A. (1990). *El suelo, los abonos y la fertilización de los cultivos*. Ediciones Mundi-prensa. Bilbao, Madrid, España. 206p. www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=401768&pid=S0568-2517200800040000200009&lng=es

Hernández, F. J. (2014). *Determinación de Cadmio (Cd) en suelos agrícolas dedicados a la producción de alfalfa Medicago sativa irrigado con aguas residuales*. (Tesis de grado). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Torreón, Coahuila, México. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/101>

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. 6ta. Edición. Mc Graw Hill Educación. México. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/etodología-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>

Herrera, M. y Narrea, M. (2011). *Curso Taller: Manejo Integrado del Palto*. Agrobanco. Universidad Nacional Agraria la Molina, Oficina Académica de Extensión y Proyección Social. Moquegua, Perú.

Huaynates, J. L. (2013). *Efecto de la materia orgánica en la absorción de cadmio por el suelo, en la localidad de Supte"*. (Tesis de grado). Universidad Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. <http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/451/T.CSA-84.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Información Técnica Agrícola [INFOAGRO] (2014). *Cultivo de la caña de azúcar*. <http://www.infoagro.com/herbaceos/industriales/canaazucar.htm>
- Información Técnica Agrícola [INFOAGRO] (2020). *El cultivo de las mandarinas*. Primera parte. Productos Agrinova. <https://www.infoagro.com/citricos/mandarina.htm>
- Injante, P. y Joyo, G. (2010). *Curso Taller manejo integrado de Maíz Amarillo Duro*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Oficina Académica de Extensión y Proyección Social –Agrobanco, Ascope. La Libertad, Perú
- Jarup, L. y Akesson, A. (2009). Current status of cadmium as an environmental health problem. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238. Doi: 10.1016/j.taap.2009.04.020
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants*, 4th. ed. CRC Press, Boca Raton. Florida. USA.
- Lao, C. P. (2013). *Fertilización en el cultivo de palto*. Guía técnica. Agrobanco. Universidad Nacional Agraria la Molina. Rinconada, Recuay, Ancash. <https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/031-g-palto.pdf>
- Ley General del Ambiente N° 28611 (2005). *Ministerio del Ambiente*. 15 de octubre del 2005, 0 a 75. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/.../ley-general-del-ambiente.pdf>
- Little, T. M. y Hills, F. J. (2002). *Métodos Estadísticos para la Investigación en la Agricultura*. Editorial Trillas. Cuarta Reimpresión. México D. F., México.
- Liva, M., Alleyne, S., de Armas, T., Collazo, O., Jiménez, J., Castro, D., Álvarez, M., Rodríguez, A., y González, R. (2013). Procedimiento analítico para la determinación de metales pesados en zanahoria y espinaca cultivadas en organopónicos urbanos. Instituto de Ciencia y Tecnología. Universidad de la Habana. *Revista de Ciencias Técnicas y Agropecuarias Suelo y Agua*. Vol. 22, N° 1. La Habana, Cuba.
- Llanos, E. K. (2018). *Efecto de la aplicación de microorganismos eficaces en el contenido de cadmio y propiedades fisicoquímicas de un suelo contaminado del distrito de Orcotuna, Concepción, 2017* (Tesis de grado). Universidad Continental, Huancayo, Perú.

- Lofts, S.; Spurgeon, D. y Svendsen, C. (2005). Fractions affected and probabilistic risk assessment of Cu, Zn, Cd, and Pb in soils using the free ion approach. *Environmental Science Technology*, 39(21), 8533-8540.
- Lora, R. y Bonilla, H. (2010). Remediación de un suelo de la cuenca alta del río Bogotá contaminado con los metales pesados cadmio y cromo. *Actualidad & Divulgación Científica*, 13(2), 61-70.
<http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v13n2/v13n2a08.pdf>
- Mahecha, J. D., Trujillo, J. M., y Torres, M. A. (2015). Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta. *Orinoquia*, 19(1), 118-122.
- Marcelo, D. y Aldana, M. (2011). *Cultivo de la Caña de Azúcar*. Oficina Académica de Extensión y Proyección Social. Agrobanco-Universidad Nacional Agraria la Molina. La Libertad, Perú.
- Martin, C. W. (2000). Heavy metal trends in floodplain sediments and valley fill, River Lahn, Germany. *Catena*, 39(1), 53-68.
[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00080-6)
- Mejía, D. C. (2019). *Estructura de un proyecto de investigación*.
<https://www.youtube.com/watch?v=mScO6ojcC8I>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2012). Reglamento para la producción primaria, procesamiento, empaquetado, etiquetado, almacenamiento, certificación, importación y comercialización. Colombia.
https://www.minagricultura.gov.co/tramitesservicios/Documents/Reglamento_para_la_produccion_Organica.pdf
- Ministerio del Ambiente (2017). *Estándares de Calidad Ambiental para Suelo*. Decreto Supremo N°011-2017. Lima, Perú. [MINAM].
<http://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-011-2017-minam>
- Morales, E., Rubí, M., López, J., Martínez, A. y Rosales, E. (2019). Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10 (8), 1875-1886.
<file:///C:/Users/HP/Downloads/DialnetUreaNBPTUnaAlternativaEnLaFertilizacionNitrogenada-7230619.pdf>

- Muñoz, J. D. (2017). *Determinación de Cadmio en fertilizantes, plantas de Oryza sativa L. y suelos de la provincia del Guayas: Propuesta de saneamiento*. (Tesis de grado). Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/17569/1/TESIS%20JORGE%20MU%20C3%2091OZ%202017.pdf>
- Nava, C. y Méndez, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Archivos de Neurociencias*, 16(3), pp.140–147. <https://1library.co/document/nzwxejvy-efectos-neurotxicos-metales-pesados-cadmio-plomo-arsnico-talio.html>
- Orellana, J. A. (2005). *Contaminación*. Unidad Temática N° 2. Facultad Regional Rosario. Universidad Tecnológica Nacional. Argentina. https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_02_Contaminacion.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (1980). Tecnologías de procesos para la fabricación de fertilizantes fosfatados. *Serie Desarrollo y transferencia de tecnología* N° 8. [ONUUDI]. [https://open.unido.org/api/documents/4690482/download/PROCESS%20TECHNOLOGIES%20FOR%20PHOSPHATE%20FERTILIZERS.%20DEVELOPMENT%20AND%20TRANSFER%20OF%20TECHNOLOGY%20SERIES,%20NO%208%20\(08431s.es\)](https://open.unido.org/api/documents/4690482/download/PROCESS%20TECHNOLOGIES%20FOR%20PHOSPHATE%20FERTILIZERS.%20DEVELOPMENT%20AND%20TRANSFER%20OF%20TECHNOLOGY%20SERIES,%20NO%208%20(08431s.es))
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2002). Los fertilizantes y su uso. *Manual. Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes*. Paris. [FAO]. <http://www.fao.org/3/a-x4781s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). *Guía para descripción de suelos*. Cuarta edición. Roma, Italia. [FAO].
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2019). *Qué es la contaminación del suelo*. Universidad de Saskatchewan. Roma. [FAO]. <http://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>.
- Pineda, H. R. (2004). *Presencia de hongos micorrícicos arbusculares contribución de glomus intraradices en la absorción y translocación de zinc y cobre en girasol (Helianthus Annuus) crecido en un Suelo contaminado con residuos de mina*. (Tesis doctoral). Universidad de Colima. Tecomán, Colima, México.

- Plaster, E. (2005). *La Ciencia del Suelo y su Manejo*. Thompson Editores. 2da. Reimpresión. Madrid, España 419 pp.
- Porta, J., López-Acevedo, M., y Poch. M. R. (2008). *Introducción a la Edafología. Uso y protección del suelo*. Departamento de Medioambiente y Ciencias del Suelo. Universidad de Lleida. Cataluña España.
<https://es.scribd.com/document/358917134/Introducciona-a-La-Edafologia-Porta>
- Pozo, W., Sanfeliu, T. y Carrera, G. (2011). Metales pesados en humedales de arroz en la cuenca baja del río Guayas. *Maskana*, 2(1), 17–30.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] (2008). *Interim Review of Scientific Information on Cadmium*. United Nations Environmental Programme. Geneva.
http://www.chem.unep.ch/Pb_and_CD/SR/Files/Interim_reviws/
- Rodríguez, M., Martínez, N., Romero, M. C., Del Río, L. A., y Sandalio, L. M. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, 17(3), 139-146.
<http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=558>
- Rodríguez, H. S. (2017). *Dinámica del cadmio en suelos con niveles altos del elemento, en zonas productoras de cacao de Nilo y Yacopí, Cundinamarca*. (Tesis de postgrado). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
<http://bdigital.unal.edu.co/62280/352/1019048469.2017.pdf>
- Romero, M. C-, Palma, J. M., Gómez, M., Del Río, M.D., y Sandalio, L. M. (2002). Cadmium causes the oxidative modification of proteins in pea plants. Wiley online library.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1365-3040.2002.00850.x>
- Ruíz, J., Luque, M. y Luque, A. (2003). *Dynamic ultrasound-assisted extraction of cadmium and lead from plants prior to electrothermal atomic absorption spectrometry*. Elsevier, 231-237.
- Sánchez, G. (2016). *Riesgos para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio*. (Tesis de grado). Universidad Complutense. Madrid, España.
<http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA%20SANCHEZ%20BARRON.pdf>

- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., y Soil Survey Staff. (2012). *Field book for describing and sampling soils, Version 3.0*. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln. Nebraska, USA.
https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052523.pdf
- Tello, M. A. (2015). *Evaluación del riesgo toxicológico de plomo y cadmio en suelos del entorno del Parque Industrial de la ciudad de Cuenca*. (Tesis de postgrado). Universidad Estatal de Cuenca. Cuenca, Ecuador.
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/22973>
- Tecnología Química y Comercio [TQC]. (2012). *Tecnología Química y Comercio S.A. Boletín técnico comercial*, pp. 84. Lima, Perú.
- Toirac, C. J. (2012). Caracterización granulométrica de las plantas productoras de arena en la república dominicana, su impacto en la calidad y costo del hormigón. *Ciencia y Sociedad*, (3),293-334.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024622003>
- Uraguchi, S.; Mori, S.; Kuramata, M.; Kawasaki, A.; Arao, T. y Ishikawa, S. (2009). Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice. *Journal of Experimental Botany*, 60(9), 2677-2688.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19401409>
- Universidad Católica Sedes Sapientiae (2018). Reglamento de Tesis. Facultad de Ingeniería Agraria. (UCSS/FIA). Lima, Perú.
- Valenzuela, A. (2001). *Determinación de cadmio en fertilizantes fosforados y su efecto en cuatro de suelos de Chile*. (Tesis de Postgrado). Universidad Pontificia Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Vázquez, V. M. (2016). *Estudio cinético de la interacción de complejos de metales de transición con moléculas biológicamente relevantes*. (Tesis de grado). Universidad de Barcelona. Barcelona, España.
- Villanueva, L. R. (2001). *Evaluación del impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en suelos cultivados con maíz (Zea mays)*. (Tesis de postgrado). Universidad de Chile. Chile.
<http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Villanueva%20Liliana.pdf>
- Ulrich, A. E. (2018). Cadmium governance in Europe's phosphate fertilizers: Not so fast? *Science of the Total Environment Journal* 650 541-546. Elsevier.

file:///C:/Users/user/Downloads/1-s2.0-S0048969718334326-main.

Vistoso, E., y Sandaña, P. (2016). *Reacción de los fertilizantes fosfatados en el suelo*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias [INIA].

<http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/informativos/NR40728.pdf>

Weil, R. R. y Brady, N. C. (2016). *The nature and properties of Soils*. 15th edition. Pearson Education Publisher. Harlow, England.

https://www.researchgate.net/publication/301200878_The_Nature_and_Properties_of_Soils_15th_edition

TERMINOLOGÍA

Absorción atómica

Técnica que se basa en determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos del sistema periódico. Por lo tanto, es eficaz para el estudio de muestras de suelo; la medición de los metales pesados se da por absorción a una longitud de onda particular, para ello primero se atomiza la muestra con absorción atómica, la muestra nebulizada se disemina como aerosol en una llama de aire-acetileno u óxido nitroso-acetileno (Ruíz *et al.*, 2003).

Adsorción específica

La adsorción específica es un fenómeno de los coloides del suelo mediante enlaces covalentes o iónicos. Esta definición es considerada para explicar el por qué algunos suelos adsorben a algunos cationes en concentraciones muy superiores a su capacidad de intercambio catiónico (Alloway, 2013).

Bioacumulación

Este término se refiere al resultado de la concentración acumulada en el ambiente o tejidos de organismos a partir de la incorporación, distribución y eliminación de contaminantes obtenidos por todas las rutas de exposición (MINAM,2017)

Complejación

La complejación de metales son reacciones en las que un ion central o metal se une con sustancias llamadas ligandos, formando complejos o compuestos de coordinación. Al número de ligandos que rodean al ion central se le llama número de coordinación (Vázquez, 2016).

Composición granulométrica de los suelos

Es la composición en porcentaje de las variedades de tamaños de suelos en una muestra. Esta proporción se suele indicar de mayor a menor tamaño por una cifra que representa, en peso, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición. Asimismo, tiene relevancia en el proceso de retención de metales por medio de las arcillas (Toirac, 2012).

Fertilizante fosforado

Es un compuesto que puede tener origen natural o artificial, que al agregarse aumenta la productividad de los cultivos. Es fuente de fósforo aprovechable por las plantas con capacidad de proporcionar el elemento nutritivo fósforo que favorece al crecimiento y desarrollo de las plantas. De acuerdo con su composición tiene diferentes porcentajes de fósforo y recibe diversas denominaciones (Villanueva, 2001).

Perfil del suelo

Sección vertical de un suelo a través de todos sus horizontes, terminando en el material madre, en el cual se hace la descripción morfológica del suelo (Plaster, 2006).

Pesticidas

El término pesticida se puede utilizar para designar compuestos que sean herbicidas, fungicidas, insecticidas o algunas otras sustancias utilizadas para controlar plagas. Puede tratarse de una sustancia química, agente biológico (tal como un virus o una bacteria), antimicrobiano y desinfectante utilizado en contra de plagas tales como insectos, para eliminar patógenos vegetales o microorganismos (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [EPA] (2017).

Propiedades físicas

Características del suelo producidas por fuerzas físicas que se pueden describir a través de medios físicos o ecuaciones. Los ejemplos incluyen la textura del suelo, la estructura y la densidad aparente (Plaster, 2005).

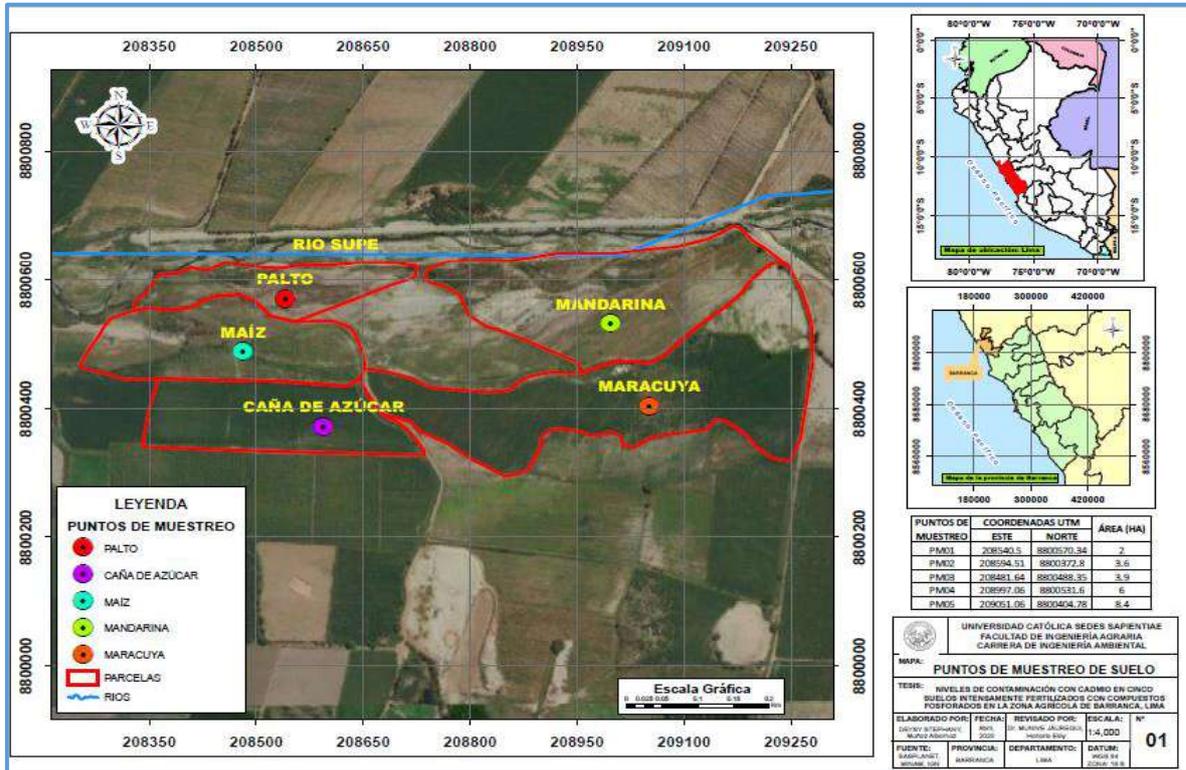
Quelación

Una de las funciones de los agentes quelantes es capturar a los iones metálicos, formando complejos que tienen la propiedad de mantenerse solubles e inoos y se produce cuando un ligando polidentado, especialmente una molécula orgánica grande, ocupa dos o más sitios de coordinación circundante de un ion metálico central (Vázquez, 2016).

APÉNDICES

Apéndice 1. Plano de ubicación y puntos de muestreo del área en estudio

En el Apéndice 1 se muestra la ubicación geográfica y las parcelas donde fueron considerados los puntos de muestreo del trabajo de experimentación.



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 2. Resultados originales del contenido de cadmio en los suelos en estudio

Cultivo	Profundidad (m)	Bloques	Cadmio (mg.kg ⁻¹)	Número
1. Mandarina	0-20	I	1.55	1
		II	1.38	2
		III	1.45	3
	20-60	I	1.60	4
		II	1.48	5
		III	1.52	6
2. Maracuyá	0-20	I	1.35	7
		II	1.45	8
		III	1.37	9
	20-60	I	1.30	10
		II	1.36	11
		III	1.28	12
3. Caña de azúcar	0-20	I	1.21	13
		II	0.98	14
		III	1.09	15
	20-60	I	1.18	16
		II	0.95	17
		III	0.93	18
4. Palto	0-20	I	1.39	19
		II	1.32	20
		III	1.35	21
	20-60	I	1.31	22
		II	1.26	23
		III	1.33	24
5. Maíz	0-20	I	1.79	25
		II	1.66	26
		III	1.76	27
	20-60	I	1.83	28
		II	1.77	29
		III	1.81	30



Las muestras fueron procesadas por la Srta. bachiller según el cronograma establecido por el laboratorio el 16 y 17 de diciembre del 2019, utilizando los equipos del Laboratorio de manera correcta según las normas, los mismos que durante su permanencia en este lugar demostró responsabilidad y puntualidad en las labores realizadas.

Se expide este documento a solicitud de la interesada para los fines que vea por conveniente.

Los olivos 21 de febrero de 2022

Armando Chiclla Salazar
Jefe del Laboratorio de Microbiología y
Biotecnología
Facultad de Ingeniería Agraria (FIA) UCSS
Telf: 938238294

Apéndice 3. Resultados de las entrevistas a agricultores sobre los niveles de fertilización fosfatada

En la siguiente tabla se muestra los resultados de las consultas personales hechas a los agricultores de la zona en estudio con referencia a la fertilización que vienen aplicando a sus cultivos, especialmente en lo referido al uso de fertilizantes fosfatados

CULTIVO	NIVEL DE FERTLIZACIÓN FOSFATADA		
	Bajo (1)	Medio (2)	Alto (3)
Mandarina			X
Maracuyá		X	
Caña de azúcar	X		
Palto		X	
Maíz			X

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

Nivele bajo (1): Para fórmulas de fertilización incompletas, aplicadas sin criterio técnico,
Nivel medio (2): Para fórmulas de fertilización completas pero bajas en sus contenidos, y
Nivel alto (3): Para fórmulas completas con formulaciones altas de acuerdo con lo recomendado por especialistas en los cultivos en estudio.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : DEYSY STEPHANY MUÑOZ ALBORNOS

Departamento : LIMA

Distrito :

Referencia : H.R. 69797-106C-19

Bolt : 3452

Provincia : BARRANCA

Predio :

Fecha : 13/09/19

Número de Muestra		pH [1:1]	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	OC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺⁺ + H ⁺			
7276	M-05, maíz 0-20	7.66	2.51	1.70	0.78	19.8	138	63	23	14	Fr.A.	6.72	3.98	1.22	0.74	0.78	0.00	6.72	6.72	100
7277	M-05, maíz 20-60	7.92	2.40	1.60	0.92	16.0	185	57	29	14	Fr.A.	6.40	3.45	1.55	0.77	0.63	0.00	6.40	6.40	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L. = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso



Ing. Efraim La Torre Martínez
 Jefe del Laboratorio

Fuente: UNALM (2019)

Apéndice 5. Tablas para la interpretación de los análisis de suelos

En el Apéndice 5 están consideradas las tablas que se utilizaron para hacer la interpretación del análisis de los suelos considerados en la investigación.

1) Textura

Tipo de textura	Clase textural
Gruesa	Franco arenosa
Moderadamente gruesa	Franca, franco limoso, limosa
Media	Franco arcillosa, franco arcillo arenosa, franco
Fina	arcillo limosa, arcillo arenosa, arcillo limosa, arcilla
Muy fina	Mayor de 60% de arcilla

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

2) pH

Definición	Rango de pH
Ultra ácido	< 3,50
Extremadamente ácido	3,51 a 4,50
Muy fuertemente ácido	4,51 a 5,00
Fuertemente ácido	5,01 a 5,50
Moderadamente ácido	5,51 a 6,00
Ligeramente ácido	6,01 – 6,50
Neutro	6,51 – 7,30
Ligeramente básico	7,31 – 7,80
Moderadamente básico	7,81 – 8,40
Fuertemente básico	8,41 – 9,00
Muy fuertemente básico	> 9,0

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

3) Materia orgánica

Definición	%	g.kg⁻¹
Bajo	< de 2	< de 20
Medio	2 – 4	20 – 40
Alto	> de 4	> de 40

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

4) Conductividad eléctrica (mmhos.cm⁻¹ o dS.m⁻¹)

Definición	Rango de salinidad
Sin problemas de salinidad	< de 2
Ligeros problemas de sales	2 – 4
Medio	4 – 8
Severos problemas	8 – 16
Muy severos problemas	> 16

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

5) Calcáreo total (%)

Definición	Rango de calcáreo total
Bajo	< de 1
Medio	1 – 5
Alto	5 – 15 (precipita al P)
Muy alto	> de 15 (tóxico para las plantas)

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

6) Fósforo disponible

Definición	(ppm o mg.kg⁻¹)
Bajo	0 – 6
Medio	7 – 14
Alto	> de 14

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

7) Potasio disponible

Definición	ppm o mg.kg⁻¹	kg.ha⁻¹
Bajo	0 – 75	0 – 300
Medio	75 – 125	300 – 600
Alto	125 – 250	> de 600
Muy alto	> de 250	

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

8) Capacidad de intercambio catiónico

Definición	(me/100 g o cmol⁽⁺⁾.kg⁻¹)
Muy baja	< de 4
Moderadamente baja	4 – 8
Baja	8 – 12
Moderadamente alta	12 – 20
Muy alta	> de 20

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

9) Porcentaje de saturación de bases

Definición	Rango de PSB
Baja	< de 35
Media	35 - 80
Alta	> de 80

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

10) Relaciones catiónicas

Relación Ca/Mg	Interpretación
< 2	Posibles deficiencias de Ca ⁺⁺
2 – 10	Ideal
> 10	Posibles deficiencias de Mg ⁺⁺

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

Relación Ca/K	Interpretación
< 2,0	Posibles deficiencias de Ca ⁺⁺
3 – 30	Ideal
> 30	Posibles deficiencias de K ⁺

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

Relación Mg/K	Interpretación
< 1,0	Posibles deficiencias de Mg ⁺⁺
2 – 18	Ideal
> 18	Posibles deficiencias de K ⁺

Fuente: Schoeneberger et al. (2012).

Apéndice 6. Vistas del desarrollo de la investigación en el campo y laboratorio

En este Apéndice están incluidas las fotografías registradas en el desarrollo de la fase de campo y la fase de laboratorio del trabajo de investigación



Fotografía 1. Parcela con cultivo de maíz



Fotografía 2. Construcción de una calicata



Fotografía 3. Toma de datos y descripción de los perfiles



Fotografía 4. Calicata 1, suelo con cultivo de mandarina



Fotografía 5. Calicata 2, suelo cultivado con maracuyá



Fotografía 6. Calicata 3, suelo cultivado con caña de azúcar



Fotografía 7. Calicata 4, suelo cultivado con palto



Fotografía 8. Calicata 5, suelo cultivado con maíz



Fotografía 9. Rellenado de la calicata después de la descripción



Fotografía 10. Muestras de suelos en proceso de análisis



Fotografía 11. Muestras listas para el análisis del cadmio



Fotografía 12. Lectura de las muestras para la determinación del cadmio

