



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



[Atribución 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0)

Esta licencia permite que otros distribuyan, mezclen, adapten y construyan sobre su trabajo, incluso comercialmente, siempre que le reconozcan la creación original. Esta es la licencia más complaciente que se ofrece. Recomendado para la máxima difusión y uso de materiales con licencia.

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"



ESCUELA DE POSGRADO

EVALUACION DE ORIGINALIDAD

CONSTANCIA

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud al **BORRADOR DE TESIS** cuyo título es:

"IMPACTO AMBIENTAL DE LOS FERTILIZANTES FOSFATADOS EN EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN POR CADMIO EN SUELOS CULTIVADOS EN EL VALLE DE ICA"

Presentado por:

FUENTES QUIJANDRIA FELIX GUILLERMO

Del **DOCTORADO EN GESTIÓN AMBIENTAL.**

Que, se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la Escuela de Posgrado de la UNICA, el informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 5%.

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate. En Ica 16 de marzo de 2023

Atentamente

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
ESCUELA DE POSGRADO



Dr. ROBERTO H. CASTAÑEDA TERRONES
DIRECTOR (e) DE LA ESCUELA DE POSGRADO

UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”
VICE RECTORADO DE INVESTIGACION
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN GESTIÓN AMBIENTAL
MENCIÓN:
GESTIÓN AMBIENTAL



**Impacto ambiental de los fertilizantes fosfatados en el nivel de
contaminación por cadmio en suelos cultivados
en el valle de Ica**

LINEA DE INVESTIGACION

Sociedad, desarrollo sostenible, políticas públicas y ambientales

INFORME DE INVESTIGACION

PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR EN GESTIÓN AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

I.A. FELIX GUILLERMO FUENTES QUIJANDRIA, M.A.

Ica – Perú

2023

DEDICATORIAS

In Memoriam:

***A la Memoria de mi madre:
María Estela Quijandria Arias de Fuentes,
por su indesmayable y eficiente labor de
inculcarme valores éticos y morales.***

“...Dedico esta Tesis Doctoral a mis familiares, quienes fueron, son y serán mi gran apoyo para continuar este largo camino, sin ellos nada de esto hubiese logrado, a mis hermanas que siempre estuvieron conmigo, y a mis amores, mis hijos quienes son mi inspiración y motivación para seguir logrando mis objetivos.

Y a todos los que creen que un mundo mejor es posible.....”

***“... por la hermana tierra, que es toda bendición,
la hermana madre tierra, que da en toda ocasión
las hierbas, los frutos y flores de color,
y nos sustenta y rige: ¡loado, mi Señor!”
(San Francisco de Asís).***

AGRADECIMIENTOS

Tener que hacer un recuento de la cantidad de gente que ha pasado por mi vida y me ha ido dando pequeñas o grandes pinceladas con las que he ido construyendo este trabajo se me hace una tarea muy difícil...digamos que una serie de casualidades hicieron que entrara en el tema de la agricultura y más específicamente en el cuidado del ambiente: un extraño término acerca de algo que se denominaba “Gestión Ambiental”, conversaciones en la cafetería de la universidad que nunca era la mía, reflexiones nocturnas, visiones apocalípticas de que el mundo iba a estallar si no se hacía algo inmediatamente ...todo ello, conjugado con el amor a las plantas que ya sentía gracias a las realidades en las que estaba sumergido por mis profesores de pre grado y maestría, a los que les agradezco que me enseñaran que la ciencia, la tecnología y la armonía con el medio ambiente pueden ir de la mano.

De esta manera salté de los campos agrícolas a un mundo totalmente desconocido para mí, como era el de la Gestión Ambiental. Entré a la Escuela de Post Grado quizá con pies temblorosos pero firmes, pero tenaz en cumplir con mis objetivos y con un saco de preguntas que hacer a mi espalda. Menos mal que siempre estuvieron cerca mis docentes, doctores todos ellos de excelente calidad en didáctica y pedagogía universitaria, para responder a mis dudas y no permitir que mis tormentas se convirtieran en naufragio.

Poco a poco, empecé a desenvolverme en ese gran mundo y confiar que “si habrá un mundo mejor”... y me fui familiarizando con frases de sistemas integrados de gestión, desarrollo sostenible y demás artilugios, siempre bajo la mirada paciente de personas, de las que me costó la vida separarme, del Dúo Dinámico: Jesús Caveró D., “Caverito” y José Flores G., “El Combo” (QEPD y DDG) que llenaron de sonrisas mi primera etapa...Con ellos aprendí que si vas deprisa, el río se apresura, y si vas despacio el agua se remansa...

De la segunda etapa, lo que más recordaré es una habitación de la casa, que también era su estudio, del Ing. Dr. José Flores G.,(+) donde nos reuníamos para bosquejar todos los trabajos encargados en cada una de las asignaturas llevadas a lo largo de los estudios del doctorado, sacándome de mis dudas relacionadas con la gestión ambiental, desarrollo sostenible y el ordenamiento territorial, resolviendo problemas irresolubles, ayudándome en mis cortocircuitos con el ordenador y provocándome con mis peculiares gustos, etc.

Gracias a ellos, las pequeñas dificultades con las que me fui encontrando, se resolvieron, como por arte de magia y aprendí a respetar y querer al ambiente.

Y cómo no, tengo que agradecer el apoyo incondicional que tuve de mi madre y demás familiares, que siempre han estado a mi lado para que sacara todo esto adelante; ¿de amigos y colegas, que han tenido que soportar mis malos momentos y mi estresante manera de vivir las cosas, de la familia, siempre interesada en, ¿cuándo acabaré la tesis?, ¿cuándo la sustentará? (como dicen ellos) y de todos mis hijos, que me han levantado tantas veces, dibujándome sonrisas cuando el optimismo con el que suelo ver las cosas me decepcionaba.

Debo agradecer de manera especial y sincera al Dr. Juan M. Alva Fajardo por aceptarme para realizar esta investigación doctoral bajo su permanente supervisión. Su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiar mis ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta investigación, sino también en mi formación como investigador.

Las ideas propias, siempre enmarcadas en su orientación y rigurosidad, han sido la clave del buen trabajo que hemos realizado juntos y de la mano, el cual no se podría concebir, sin su siempre oportuna participación y asesoría profesional.

Le agradezco también el haberme facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis. Muchas gracias.

Un agradecimiento especial a todos ellos.

I.A. Félix G. Fuentes Quijandria, M.A.

El amigo de siempre.....

INDICE GENERAL

INDICE DE CONTENIDOS	Pags.
DEDICATORIAS.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
INDICE GENERAL.....	iv
INDICE DE TABLAS.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT.....	ix
CAPITULO I.....	01
1.0.- INTRODUCCIÓN.....	01
1.1.- ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	03
1.1.1.- Antecedentes a nivel internacional.....	03
1.1.2.- Antecedentes a nivel nacional.....	06
1.1.3.- Antecedentes a nivel local.....	08
1.2.- MARCO TEÓRICO.....	09
1.2.1.- Aspectos generales del cadmio.....	10
1.2.2.- Caracterización.....	10
1.2.3.- Aportes al ambiente.....	11
1.2.4.- Efectos del cadmio en las plantas.....	12
1.2.5.- Efectos del cadmio sobre la salud humana.....	13
1.2.6.- El cadmio en relación con el ambiente.....	14
1.2.7.- Sobre la toxicología del cadmio.....	16
1.2.8.- Límites máximos permisibles (LMP) y estándares de calidad ambiental (ECAs) del cadmio en el suelo y calidad del ambiente.....	17
1.2.9.- Sobre los fertilizantes fosfatados.....	19
1.2.10.- Aspectos sobre los suelos cultivados en el valle de Ica.....	24
1.3.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	33
1.3.1.- Delimitación del problema.....	33
1.3.2.- Formulación del problema.....	33
1.4.- JUSTIFICACIÓN EN IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	34
1.4.1.- Justificación.....	34

1.4.2.- Importancia.....	34
1.5.- HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	34
1.5.1.- Hipótesis.....	34
1.5.2.- Variables.....	35
1.6.- OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	35
1.6.1.- Objetivo general.....	35
1.6.2.- Objetivos específicos.....	35
CAPÍTULO II.....	36
2.0.- ESTRATEGIA METODOLOGICA.....	36
CAPITULO III.....	44
3.0.- RESULTADOS.....	44
CAPITULO IV.....	48
4.0.- INTERPRETACION Y DISCUSIÓN DERESULTADOS.....	48
CAPITULO V.....	54
5.0.-CONCLUSIONES.....	54
CAPITULO VI.....	57
6.0.- RECOMENDACIONES Y AGRADECIMIENTOS.....	57
CAPITULO VII.....	59
7.0.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	59
CAPITULO VIII.....	65
8.0.- ANEXOS	65

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Fuentes de cadmio.....	11
Tabla 2: Bioacumulación relativa en las partes comestibles de diferentes cultivos, a partir de U.S. EPA y Colb 1981.....	12
Tabla 3: Acumulación relativa por vegetales: Cd y Pb en fracciones comestibles; Cu, Ni y Zn en hojas.....	12
Tabla 4: Algunas diferencias entre los ECA y los LMP.....	17
Tabla 5: Propuesta de límites máximos permisibles de cadmio en suelos en el Perú.....	19
Tabla 6: concentración de cadmio en las rocas.....	20
Tabla 7: Valores límites de cadmio en los fertilizantes y suelos en países diversos.....	23
Tabla 8: Distribución de las tierras en le región Ica.....	24
Tabla 9: Superficie de los principales cultivos de agroexportación en la región agraria Ica.....	25
Tabla 10: Series de suelos, extensión y porcentaje aproximado de los suelos en el valle de Ica.....	28
Tabla 11: Clasificación de las tierras de acuerdo a su capacidad de uso del valle de Ica.....	29
Tabla 12: Clasificación de las tierras de las pampas de Villacurí de acuerdo a su capacidad de uso.....	30
Tabla 13: Uso actual de la tierra en el valle de Ica y de las pampas de Villacurí.....	31
Tabla 14: Dosis de fertilización fosfatada sugeridas para un rendimiento óptimo de cultivos en el valle de Ica.....	32
Tabla 15: Principales fertilizantes fosfatados utilizados en los suelos cultivados del valle de Ica.....	32
Tabla 16: Interpretación de los resultados de la concentración de cadmio en los suelos.....	43
Tabla 17: Resultados del análisis químico de la concentración de cadmio en los suelos cultivados en el valle de Ica – Zona Alta.....	44
Tabla 18: Resultados del análisis químico de la concentración de cadmio en los suelos cultivados en el valle de Ica – Zona Media.....	45
Tabla 19: Resultados del análisis químico de la concentración de cadmio en los suelos cultivados en el valle de Ica – Zona Baja.....	46
Tabla 20: Resultados del análisis químico de la concentración de cadmio en los suelos cultivados en el valle de Ica – Zona de Villacurí.....	47

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fuentes agrícolas de contaminación del suelo.....	5
Figura 2: Distribución de los compuestos acuosos de cadmio según pH.....	11
Figura 3: Ciclo del cadmio en la agricultura de Dinamarca.....	15
Figura 4: Cartilla de manejo agronómico del cadmio en el cultivo de papa (<i>Solanum tuberosum L.</i>) para un producto de calidad.....	15
Figura 5: Países productores de cadmio en el mundo.....	16
Figura 6: Diagrama de flujo sobre la aprobación de los ECA y LMP	18
Figura 7: Procesos de fabricación de los fertilizantes fosfatados a partir de la fosforita natural.....	21
Figura 8: Ubicación de los puntos de muestreo de suelos en el valle viejo de Ica.....	40
Figura 9. Ubicación de los puntos de muestreo de suelos en el valle nuevo de Ica (Villacurí).....	41
Figura 10. Contenidos de la concentración de cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en la zona alta del valle de Ica.....	44
Figura 11. Contenidos de la concentración de cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en la zona media del valle de Ica.....	45
Figura 12. Contenidos de la concentración de cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en la zona baja del valle de Ica.....	46
Figura 13. Contenidos de la concentración de cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en la zona de Villacurí del valle de Ica.....	47

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue estimar el impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en la capa arable de suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica, Perú.

Previously, an edaphic survey of the area under study was carried out and four study areas were delimited in the valley of the province of Ica, with respect to cultivated soils for agricultural use, the upper, middle, lower area of the Ica valley (Valle old) and the area of Villacurí (new Valley).

Se aplicó el modelo de muestreo de suelos en dos profundidades de 0,00 m – 0,30 m y de 0,30 – 0,60 m de profundidad en cada una de las zonas (Jurisdicción y/o centro poblado dedicado a la agricultura), realizando una simulación de las series de suelos del valle de Ica, donde se concentra la mayor superficie de suelos cultivados de uso agrícola.

De acuerdo a las características de estas series de suelo y los parámetros requeridos para el modelo, se construyeron 40 escenarios de análisis y se consideró que las muestras fueran enviadas para el análisis químico de la concentración del cadmio, a un laboratorio certificado, que fue el Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria, La Molina, Lima – Perú.

En términos generales, los resultados indicaron una acumulación de cadmio para aquellos suelos cultivados para uso agrícola ubicados en la zona baja del Valle de Ica, los cuales alcanzaron una concentración promedio de 4,993 mg.kg⁻¹ de cadmio, mientras que los suelos de expansión más reciente de la frontera agrícola, los suelos de la Pampa de Villacurí sólo alcanzaron en promedio 1.377 mg.kg⁻¹ de cadmio.

Palabras clave: Suelos cultivados - Fertilizantes fosfatados – Contaminación por Cadmio

ABSTRACT

The objective of this research was to estimate the impact of phosphate fertilizers on the accumulation of cadmium in the topsoil of cultivated soils for agricultural use in the Ica Valley, Peru.

Previously, an edaphic survey of the area under study was carried out and four study areas were delimited in the valley of the province of Ica, with respect to cultivated soils for agricultural use, the upper, middle, and lower areas of the old valley (Ica). and the area of Villacurí (Valle Nuevo).

The soil sampling model was applied in two depths of 0,00 m – 0,30 m and 0,30 – 0,60 m deep in each of the zones (Jurisdiction and/or populated center dedicated to agriculture), performing a simulation of the series of soils of the Ica valley, where the largest area of cultivated soils for agricultural uses is concentrated.

According to the characteristics of these soil series and the parameters required for the model, 40 analysis scenarios were built and it was considered that the samples were sent for the chemical analysis of the cadmium concentration, to a certified laboratory, which was the Soil, Water, Plant and Fertilizer Analysis Laboratory of the National Agrarian University, La Molina, Lima – Peru.

In general terms, the results indicated an accumulation of cadmium for those cultivated soils for agricultural use located in the lower area of the Ica Valley, which reached an average cadmium concentration of 4,993 mg.kg⁻¹ of cadmium, while in the most recent expansion of the agricultural frontier, the soils of the Pampa de Villacurí only reached an average of 1,377 mg.kg⁻¹ of cadmium.

Keywords: Cultivated soils - Phosphate fertilizers - Cadmium contamination.

CAPITULO I

1.0.- INTRODUCCIÓN

Los metales pesados se encuentran en forma natural en la corteza terrestre. Estos se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas. En general esto puede ocurrir durante la extracción, el refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de efluentes industriales y emisiones vehiculares. Además, la inadecuada disposición de residuos metálicos también ocasiona contaminación del suelo, agua superficial y subterránea y de ambientes acuáticos.

“Se ha constatado que la acumulación progresiva de los elementos traza metálicos (ETM), como también se les conoce, así como elementos pesados en los suelos, particularmente cadmio (Cd), tienen efectos negativos en la salud humana. Dichos metales una vez absorbidos por el organismo interfieren en procesos enzimáticos causando diferentes patologías” [1]. “Particularmente el cadmio produce trastornos renales daños a los huesos, edema pulmonar, daño al hígado, anemias e hipertensión” [2].

“La principal fuente de consumo de cadmio en el ser humano son los alimentos de origen vegetal” [3], “sin embargo, también, éste puede llegar al ser humano mediante la ingesta de alimentos de origen animal y por la inhalación del humo del tabaco” [4].

“El cadmio ingresa a la malla trófica, desde el suelo, produciéndose fenómenos de bioacumulación y biomagnificación. En el caso del ser humano, el cadmio es de alta toxicidad a niveles traza acumulándose en el cuerpo (particularmente el riñón) persistiendo cerca de 10 a 30 años hasta su eliminación” [4].

Una fuente también importante de aporte de cadmio al suelo, es el uso de fertilizante fosfatados derivados de la roca fosfórica.

“Durante el proceso de fabricación de los fertilizantes fosfatados, a partir de dicho material, quedan metales como impurezas a nivel de trazas, dado que la concentración promedio de cadmio en el suelo oscila entre valores menores de 1 a 3 mg.kg⁻¹” [5], y aplicaciones sucesivas podrían incrementar hasta valores que afecten a la salud humana en el largo plazo.

“La acumulación de cadmio en el suelo por el uso de fertilizantes fosfatados es una materia relevante desde el punto de vista ambiental y de la salud humana. La Organización Mundial de la Salud, define a un suelo contaminado de cadmio cuando este sobrepasa el límite máximo permisible, que es 0,5 ppm o mg/kg, siendo potencialmente peligroso para la salud humana causando daños adversos; mientras que el estándar de calidad para el suelo nos dice que el máximo permisible es de 1,4 mg/Kg MS” [4].

En cuanto a los cultivos (especies y variedades), éstos presentan diferentes niveles de fitotoxicidad frente a una misma concentración de cadmio en sus tejidos y este elemento se acumula a distintas concentraciones dependiendo del tipo de órgano vegetal.

La población abiertamente se expone al cadmio a través de la cadena alimenticia, aunque también por el consumo de tabaco y alimentos contaminados con cadmio presente en los fertilizantes fosfatados. El cadmio se acumula en el organismo humano, fundamentalmente en los riñones causando hipertensión arterial. La absorción pulmonar es mayor que la intestinal, por lo cual, el riesgo es mayor cuando el cadmio es aspirado.

El cadmio ha sido asociado con la aparición de cáncer en animales de experimentación, así como con casos de cáncer de próstata en humanos.

Debido a su toxicidad el cadmio se encuentra sujeto a una serie de legislaciones más severas en términos ambientales y de salud humana.

Una de las fuentes importantes de la emisión de cadmio, es la producción de fertilizantes fosfatados inorgánicos. Parte del cadmio terminará en el suelo después de que el fertilizante es aplicado en el campo y el resto del cadmio terminaría en las aguas superficiales.

El cadmio es un metal pesado que por su naturaleza es uno de los elementos más tóxicos para la vida; también este se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza asociado a distintos minerales; además de esto, el hombre ha contribuido enormemente a su dispersión desde los inicios de sus actividades ya sean mineras, agrícolas u otras asociadas con el desarrollo industrial.

“La acumulación de cadmio en el suelo por el uso de fertilizantes fosfatados es materia relevante desde el punto de vista ambiental y de la salud humana, dado que la concentración total de cadmio en el suelo normalmente fluctúa entre valores menores a $1 - 3 \text{ mg. kg}^{-1}$ ” [6] y [5], y aplicaciones sucesivas, prolongadas e irracionales podrían incrementar estos niveles afectando la salud humana en el largo plazo.

“Los efectos de la fertilización fosfatada en diversos cultivos, ha sido ampliamente estudiada en muchos países del mundo, especialmente en Australia, [7] y [8], “así mismo otros como Austria, Bélgica, Dinamarca, Francia, Finlandia, Alemania, Grecia, Irlanda, Suecia, Reino Unido, han hecho ya evaluaciones sobre el riesgo del cadmio en los fertilizantes, las evaluaciones en estos países se han efectuado siguiendo la misma metodología, sobre la base de los datos existentes y ya se tienen informes al respecto” [9].

“Como consecuencia de la creciente preocupación por la degradación del medio ambiente en los países del mundo, principalmente desde la década de los 70, la normativa para su protección ha aumentado de manera paulatina. Principalmente, el desarrollo industrial, la agricultura y ganadería intensiva han llevado a una situación crítica a los recursos naturales del planeta. Es en este contexto en

el que el hombre está llamado a cumplir un papel fundamental. Es el caso que, la mayor parte de la regulación para la protección del medio ambiente ha venido impulsada por la normativa de la Unión Europea. Habiendo sido éste el caso de la regulación de la protección de bienes ambientales como el agua o la atmósfera, no puede decirse lo mismo del recurso ambiental del suelo. El suelo como bien jurídico no ha sido objeto de protección ambiental directa hasta fechas recientes. Aunque sí han sido abordados ámbitos de su problemática desde otras normativas sectoriales, la falta de una política directa eficaz se ha hecho patente” [10].

Por todo lo antes expuesto sobre el cadmio y su efecto en el medio ambiente y en la salud humana, la presente investigación tuvo por objetivo determinar, si en los suelos cultivados del valle de Ica, Perú, el uso de fertilizantes fosfatados aplicados al suelo, han producido una acumulación de cadmio en la capa arable del suelo, por lo que se justifica la realización de la presente investigación.

1.1.- ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION

En vista que la información sobre trabajos de investigación sobre el tema proyectado a nivel nacional es limitada, en este punto me permitiré solo citar algunas investigaciones generales sobre los fertilizantes fosfatados y los efectos de la contaminación de cadmio, así como también me permitiré citar algunos casos internacionales aislados en el elemento pesado en mención, como también citas a nivel mundial que he tenido la oportunidad de revisar.

En este capítulo he tratado de recopilar toda la información técnica disponible, tanto genérica, como específica sobre el elemento cadmio en sus diferentes aspectos, con la finalidad de sustentar y discutir los resultados obtenidos en el presente ensayo.

1.1.1.- Antecedentes a nivel internacional

En el año 2002[11], “sostienen que, la contaminación de los suelos, sedimentos y aguas es uno de los problemas ambientales más graves de nuestra sociedad y es una consecuencia de la intensa actividad industrial y el desarrollo agrario de las pasadas décadas. La liberación de gran número de compuestos químicos, en numerosas ocasiones en concentraciones elevadas, ha originado su progresiva acumulación en la atmosfera, aguas superficiales y subterráneas y en sistemas de difícil recuperación como son los suelos. Hasta fechas muy recientes las únicas tecnologías para la descontaminación de los suelos estaban basadas en técnicas fisicoquímicas de aplicabilidad limitada, costosas y que modifican los ecosistemas de forma irreparable. Recientemente han aparecido técnicas que utilizan plantas y microorganismos para degradar, extraer o inmovilizar los contaminantes de suelo o aguas. La utilización de las plantas para la descontaminación de los suelos se denomina de forma genérica fitorremediación”.

En el año 2008 [12], “concluye que, la contaminación de los suelos deriva de un incremento del contenido de metales en muchas ocasiones varias veces por encima del Fondo Geoquímico Local (FG), que surge de la ejecución de determinadas actividades humanas” (Nriagu, 1984, citado por Diez, por

[12]), “Hasta hace pocos años, la consideración de un suelo contaminado en Europa se basaba en unos cuantos niveles críticos definidos en el Anexo 1ª de la Directiva 86/278/EEC” (CEC, 1986, citado por [12]), y “que establece valores límites de concentración de metales en suelos agrícolas fertilizados con lodos” (Reiniger, 1997, citado por [12]),. “Esta directiva fue ejecutada en forma de leyes nacionales, con algunos niveles críticos más bajos en algunos países (Holanda, Dinamarca, Suecia). En España, el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero” (B.O.E Nº 15, 2005, citado por [12]), considera el FG, que denomina “*nivel genérico de referencia*” (NGR), como el parámetro básico para la evaluación, por parte de las Comunidades Autónomas, de la contaminación del suelo por determinadas sustancias.

“La UE distingue cinco categorías de actividades potencialmente contaminantes de metales pesados” (Van-Camp et al., 2004, citado por [12]):

- Industria: Accidentes, vertidos, escapes o fugas, almacenamiento y deposición de residuos.
- Actividades mineras: Con un riesgo generalmente asociado con el almacenamiento y deposición de escombreras, drenajes ácidos y el uso de ciertos reactivos químicos.
- “Actividades de procesado de residuos: Se estima que el 57% de los residuos municipales generados en la UE se llevan a un vertedero; el 87% en la CEE” (EEA, 1995, citado por Diez, 2008 [12]).
- Tráfico: A través de emisión de gases, pérdidas de aceites y gasolinas, abrasión de gomas de los neumáticos, etc.
- Otras actividades: Productos de construcción usados sobre el suelo (hormigones, pinturas), prácticas inadecuadas de agricultura (uso de fertilizantes y pesticidas) almacenamientos privados y comerciales (tanques, gasolineras), sistemas de tratamientos de aguas, etc.

En el año 2009 [13], “comentan que la contaminación de hábitat con metales pesados se ha convertido en un problema mundial, por lo que existe la necesidad de sistemas rápidos y accesibles que puedan predecir con fiabilidad las concentraciones de estos elementos en el suelo y sobre esta base fomentar el uso de técnicas de biorremediación para la restauración de sitios contaminados. Especial atención ha de prestarse a la fitorremediación como una novedosa tecnología para la estabilización y remediación de la contaminación por metales pesados. Numerosos puntos importantes en este proceso deben ser elucidados, entre los que se incluyen la biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo y el papel de los microorganismos asociados a las plantas que crecen en estos sitios”.

En el año 2012 [14], “consideran que, uno de los rasgos distintivos de la sociedad moderna es la creciente generación de contaminantes ambientales, lo que trae consigo daños considerables a la salud humana y a la diversidad biológica, los metales pesados son contaminantes que necesitan especial atención porque pueden permanecer varias décadas en el suelo y concentrarse en las cadenas tróficas, las tecnologías desarrolladas para el saneamiento de ambientes contaminados con metales pesados son costosas y requieren un largo período de tiempo para su ejecución”.

En el año 2016 [15] “sostienen que, la contaminación por metales pesados y metaloides en recursos hídricos, suelos y aire nos plantea una de las más severas problemáticas que comprometen la seguridad alimentaria y salud pública a nivel global y local, abordan problemas específicos de contaminación por mercurio (Hg), Arsénico (As), Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) en el ambiente y alimentos, así como que en la investigación presentan una descripción sobre las fuentes de contaminación y exposición en seres vivos, tal como la incorporación y retención en alimentos y productos de consumo humano, abordan muchos casos de estudios y resultados obtenidos en algunos países del mundo, incluido Colombia”.

En el año 2019 [16], “sostienen que, las diferentes fuentes agrícolas de contaminantes del suelo incluyen productos agroquímicos, como fertilizantes, estiércol animal, y plaguicidas (Figura 1). Los metales traza contenidos en estos agroquímicos, como Cu, Cd, Pb y Hg, también se consideran contaminantes del suelo ya que pueden perjudicar el metabolismo de las plantas y disminuir la productividad de los cultivos. Las fuentes de agua utilizadas para el riego también pueden causar contaminación del suelo si consisten en aguas residuales agrícolas, industriales o urbanas”. “El exceso de nitrógeno y los metales pesados no sólo son una fuente de contaminación del suelo, sino que además suponen una amenaza para la seguridad alimentaria, la calidad del agua y la salud humana cuando entran en la cadena alimentaria” [17]).



Figura 1. Fuentes agrícolas de contaminación del suelo.
Fuente: FAO. La contaminación del suelo: una realidad oculta, 2019

“La aplicación excesiva de fertilizantes y estiércol o el uso ineficiente de los principales nutrientes (N y P) en los fertilizantes, son los principales contribuyentes a los problemas ambientales vinculados a la agricultura” [18]. “Estos dos nutrientes son una fuente de contaminación difusa. El nitrógeno en exceso también puede perderse en la atmósfera a través de las emisiones de gases de efecto invernadero y el exceso de P contribuye a la eutrofización de las fuentes de agua circundantes. El uso excesivo de fertilizantes puede llevar a la salinidad del suelo, a la acumulación de metales pesados, a la eutrofización del agua y a la acumulación de nitrato, los cuales pueden ser una fuente de contaminación

ambiental y una amenaza para la salud humana. La industria de fertilizantes también se considera una fuente de metales pesados como Hg, Cd, As, Pb, Cu, Ni y Cu, y radionúclidos naturales como ^{238}U , ^{232}Th y ^{210}Po . La manipulación y el manejo adecuado de los fertilizantes es crucial para evitar la contaminación del suelo” [19].

1.1.2.- Antecedentes a nivel nacional

En el año 2011 [20], “sostiene que, el nivel natural de cadmio en el suelo es generalmente $< 1,0$ ppm. Puede existir de forma natural en altas concentraciones, cuando se encuentra asociado a minerales de zinc, o en áreas cercanas a depósitos de cadmio. Básicamente se recupera como subproducto de los procesos de fundación y refinamiento de concentrados de zinc en una proporción de $3,0 - 3,5$ kg/Tm de zinc. Así mismo comenta que en suelos contaminados, las especies de cadmio soluble predominantes es el ion libre Cd^{+2} junto con otras especies neutras como CdSO_4 o CdCl_2 , presentes en cantidades crecientes donde el pH es mayor que 6,5. El cadmio no tiene función biológica esencial y tanto él como sus compuestos son muy tóxicos para planta y animales” [6].

En el año 2012 [21], “sostienen en su trabajo de investigación, al evaluar la concentración de contaminantes en los suelos y si son convenientes para la agricultura, sobre todo en los cultivos de maíz y haba. Los análisis revelaron concentraciones significativas que alcanzaron y superaron los niveles máximos permitidos por las normas de Canadá para As, B, Cd y Zn., teniendo según los resultados del análisis, a través del método analítico de inducción de plasma niveles altos. Al revisar el arsénico, este contiene 48,3 ppm, con lo cual es 302, 5% mayor al nivel de referencia, la concentración de boro es de 11,4 ppm supera por 470% al límite de referencial, el cadmio presenta 4,28 ppm, superando en 198,6% al límite de referencia y el zinc concentra 777,9 ppm, que es mayor que el nivel de referencia, que es de 288,95%. Los otros elementos analizados, no muestran resultados altos al compararlos con los límites referenciales”.

En el año 2016 [22], “sostiene que, para prevenir el problema de los vertimientos industriales de las empresas mineras, la legislación de nuestro país, obliga a restaurar dichos suelos mediante acciones de remediación que permitan extraer, controlar, contener o reducir los contaminantes de un área determinada. Dentro de ello una de las tecnologías existentes para ello, es la fitorremediación, que permite la utilización de plantas, en el proceso de mejoramiento de suelos se presenta como una técnica emergente que permite reducir los costes de tratamiento”.

En el año 2018[23], “recalca que, en su trabajo realizado tuvo como objetivo remover cadmio en suelos mediante lavado vertical con dos extractantes; donde se determinó el nivel de pH adecuado, el extractante con mayor eficiencia para remoción de cadmio y la comparación de cambios químicos en el suelo antes y después del lavado, se armó un equipo de sistema de lavado vertical, el volumen de extractante usado fue de 2L aplicados a 1 kg de suelo en cada tratamiento, con 3 repeticiones; se trabajó con dos tipos de extractantes el primero es el ácido acético y el segundo es el jugo de carambolas,

trabajándolos a tres niveles de pH (2, 3 y 4); estos se arreglaron factorialmente, obteniendo 18 tratamientos más 3 testigo. al finalizar el sistema de lavado vertical se determinó que el mejor pH para la remoción de cadmio en ambos extractantes es a pH 2 y el extractantes más eficiente fue el ácido acético, alcanzando una eficiencia de 66.9 %, además de esto se mostraron cambios químicos en el suelo como el pH, el potencial de óxido reducción y la conductividad posterior al lavado”.

En el año 2019 [24], en el trabajo de investigación “Fitoextracción de cadmio y zinc en suelos contaminados utilizando *Lactuca sativa* var. White Boston, en la EEA el Mantaro - Junín 2019”, que consistió en la evaluación de la absorción de metales pesados por las plantas, fueron óptimas. Se trabajó con muestras de tres áreas de terreno, El análisis de caracterización se realizó en la UNALM siendo los resultados: pH (8,26, 8,19 y 8,25,), textura, (Franco a Franco arcillosa), CIC (15,20, 17,60, 16,00), Ce (0,70, 0,72, 0,48 dS/m), M.O (1,43, 2,26, 1,80), CaCO₃(13,80%, 11,90%, 18,11%). Las concentraciones químicas, de los metales pesados detectados en el área A (mg/kg): cadmio (20,92), zinc (36,7). En el área B(mg/kg): cadmio (6,75), zinc (299,21). Lote C(mg/kg): cadmio (12,30), zinc (202,39) y después la asimilación de los metales se nota en los siguientes resultados: área A(mg/kg): cadmio (3,519), zinc (227,86). En el área B(mg/kg): cadmio (3,39), zinc (221,01). Área C(mg/kg): cadmio (2,67), zinc (149,18); fueron analizados en el laboratorio acreditado CERPER S.A. los resultados de hoja y raíces es, Área A: cadmio (1,14 y 2,47 ppm) zinc (98,95 y 68,93 ppm). área B: cadmio (1,57 y 3,25 ppm), zinc (170,36, 90,93 ppm). área C: cadmio (0,63 y 3,92 ppm), zinc (92,64, 80,07 ppm).

En el año 2020 [25], “sostienen que, el cadmio (Cd) es un elemento de amplio uso en procesos industriales como el revestimiento de metales y la fabricación de baterías. Además, el cadmio es uno de los elementos más tóxicos para humanos, animales y plantas, siendo uno de los contaminantes de larga residualidad en el medio”.

Con el fin de luchar contra la contaminación, hay técnicas de remediación utilizadas actualmente; dentro de estas la biorremediación que es una alternativa rentable que no demanda de un presupuesto elevado. La biorremediación surge como una técnica favorable para el ambiente, dado que no es necesario el uso de productos químicos que contrarresten la concentración del cadmio; lo más importante, al intervenir distintas clases de microorganismos que componen el suelo donde incluso ciertos microorganismos tienen la capacidad de descontaminar y generar procesos de adsorción del cadmio. El objetivo de esta revisión es evaluar la biorremediación de un suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de los microorganismos *Rhizopus sp.* y *Rhodobacter sphaeroides*. Se llevó a cabo la revisión de literatura en 40 artículos que fueron analizados según los criterios de búsqueda como inserción de palabras clave en diferentes bases de datos y portales académicos. Los resultados confirman que el *Rhizopus sp.* sirve como herramienta biotecnológica para la limpieza de suelos, y el *Rhodobacter sphaeroides* es importante como agente inmovilizante de cadmio por medio de la creación de sulfuros.

Se concluye que los microorganismos investigados favorecen en la remediación del suelo contaminado con cadmio a través de sus capacidades metabólicas”.

1.1.3.- Antecedentes a nivel local

En el año 2019 [26], “en su investigación realizada sobre el efecto de la aplicación de fertilizantes fosfatados en la contaminación por cadmio de suelos agrícolas de la zona baja del valle de Ica, siendo esta una de las primeras investigaciones en la región sobre este tema, asociada a la agricultura sobre metales pesados realizados en esta zona.

Sin embargo, en dicha investigación encontró que los valores de la concentración de cadmio en los suelos de la zona oscilaban entre el rango de 3,51 – 5,07 mg.kg⁻¹, en los cuales dichos valores de la concentración de cadmio en el suelo agrícola, sobrepasan el estándar de calidad ambiental establecido por el Ministerio del Ambiente del Perú que es de 1,4 ppm, demostrando que los suelos de uso agrícola de la zona baja del valle de Ica, cultivados con espárrago, si se encuentran contaminados por cadmio (Cd) al sobrepasar los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) en los referidos suelos, establecidos por el ministerio del Ambiente del Perú”.

En el año 2019 [27], “concluye en una investigación sobre el impacto de las aguas servidas en la contaminación de plomo (Pb) en suelos cultivados en la zona media del valle de Ica que, al evaluar cinco muestras de suelo a dos profundidades, sostiene que el contenido del metal pesado, compromete la contaminación del suelo por este elemento en la profundidad de 0,00 a 0,30 m., sobrepasa el Estándar de Calidad ambiental (ECA), según el Decreto supremo N°011-2017-MINAM, mientras que en la profundidad de 0,30 a 0,60 m no sobrepasan el ECA para este elemento, pero termina comentando que, de continuarse el riego agrícolas con este tipo de aguas el subsuelo puede llegar a contaminarse en un futuro muy cercano”.

En el año 2022 [28], “realizó una investigación de la contaminación de suelos cultivados con el cultivo de espárrago, tomando en cuenta las regulaciones que están poniendo los países como E.E.U.U, la Comunidad Europea, entre otros, para metales pesados, pesticidas y microbiológicos”.

“Los resultados del análisis del suelo agrícola de las 07 parcelas evaluadas, muestran contaminación por cadmio, los valores encontrados fueron de: 1,882; 2,265; 2,765; 1,998; 2,016; 3,830 y 3,510 mg/kg, superando ampliamente los Límites Máximos Permisibles de la Norma ECA del Ministerio del Ambiente MINAN 2017, la Norma FAO y la Organización Mundial de la salud, el límite que establece la norma es un valor de 1,4 mg/kg. Los análisis de follaje o hojas modificadas, se aprecia que las muestras no tienen los niveles de contaminación de cadmio, no superando los Límites Máximos Permisibles de la norma”.

“Los resultados del análisis de los turiones de espárrago al iniciarse la cosecha, se aprecia que el Cadmio está presente en 02 parcelas, con valores de 0,0727 y 0,0875 mg/kg, si bien no llegan al límite

que es de 0,1 mg/kg, nos expresa que están contaminados con trazas de cadmio. En las 05 parcelas evaluadas el nivel de concentración supera ampliamente la norma con niveles de: 0,1183; 0,1183; 0,200; 0,1394 y 0,143 mg/kg, mostrando contaminación de los turiones. En relación al análisis del agua de riego, el Parámetro para Cadmio es de 0,01 mg/L, se evaluó el agua subterránea extraída de los pozos; Santa Dominguita IRHS 23, que tiene un valor de 0,00125 mg/L y El Redentor IRHS 455, un valor de 0,00117 mg/L, no están contaminadas por Cadmio, pero si tienen trazas de este metal”.

En el año 2023[29], “en su investigación donde evaluó la remediación del cadmio en el suelo agrícola mediante prácticas agronómicas en el cultivo de espárrago, (*Asparagus officinalis* L.) Híbrido Supermacho en la zona baja del valle de Ica. Concluye que en los análisis de suelo, tomados después de parada la cosecha e inicio del desarrollo vegetativo, alcanzo una concentración de cadmio de 2,79 mg.kg⁻¹, el segundo análisis fue realizado al finalizar la cosecha; después de realizadas las practicas agronómicas, y presentó un valor de 1,75 mg.kg⁻¹, reduciéndose la concentración del cadmio, pero confirma el nivel alto del cadmio pues, la norma fija un valor de 1,4 mg.kg⁻¹, coincidiendo con las investigaciones realizadas sobre el tema, en el sentido que la reducción de los elementos contaminantes en el suelo es a largo plazo. Analizando otras estructuras vegetativas de la planta, las raíces y las hojas modificadas, no presentan contaminación por cadmio, porque no hay valor cuantificable por no ser parte comestible, pero mostraron trazas de cadmio en estos órganos. La parte cosechable y comestible, los turiones, la concentración fue de 1,07 mg.kg⁻¹ de cadmio, estando muy por encima de la norma que establecía un valor de 0.1 mg.kg⁻¹. y actualmente establece un nuevo valor de 0,03 mg.kg⁻¹, lo que obliga a seguir adoptando esta técnica u otras para disminuir o reducir el nivel de cadmio en el suelo”.

1.2.- MARCO TEÓRICO

La investigación se enmarca en el concepto de “Agricultura Sostenible” que se refiere a aquella que satisface las necesidades del presente sin comprometer las capacidades de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades [30]. Dicho concepto ha sido desarrollado aplicando a la agricultura el concepto de “Desarrollo Sostenible”, que nace formalmente en 1987 en el Informe de la Comisión Mundial del Medio Ambiente de las Naciones Unidas, “Nuestro Futuro Común” (Informe Brundtland) como respuesta al empeoramiento y globalización de la crisis ecológica.

Este concepto surge del aumento de las preocupaciones, en los países, sobre el deterioro del medio ambiente y también por una nueva percepción del medio ambiente, producto de las ideas planteadas en Estocolmo y en el Informe del Club de Roma el año 1972 (Fuente: https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf).

1.2.1.- Aspectos generales del cadmio.

“El cadmio, por su densidad de 8,25 g/cc, forma parte de los metales pesados, término aplicado a los elementos con una densidad superior a 6 g . c m³ [5]. Otra denominación es elemento traza, es decir, elemento presente en la corteza terrestre en un valor inferior a 1%” [1]. “Últimamente, también se está usando la denominación elemento traza metálico (ETM) para referirse a los metales pesados” [31] y [32]. En la presente investigación se hará mención al cadmio por su nombre.

1.2.2.- Caracterización.

El cadmio (numero atómico 48, masa atómica relativa 112,40 es un elemento metálico que pertenece, junto con el zinc (Zn) y el mercurio (Hg), al grupo IIB de la tabla periódica.

La principal especie del cadmio en la solución suelo es Cd²⁺. Pero, este metal puede formar los siguientes compuestos iónicos: CdCl⁺, CdOH⁺, CdHCO₃⁺, CdCl₃⁻, CdCl₄²⁻, Cd (OH)³⁻ y Cd (OH)₄²⁻, además de complejos orgánicos.

En las soluciones suelo en condiciones aeróbicas los compuestos de cadmio serán las siguientes (en orden decreciente):

- Suelos ácidos: Cd(II), CdSO₄⁰, y CdCl₄⁺
- Suelos alcalinos: Cd(II), CdCl⁺, CdSO₄⁰ y CdHCO₃⁺

Además del cadmio, son frecuentes los compuestos neutros como el CdSO₄, CdCl₂, presentes en altas concentraciones en los suelos con pH superiores a 6,5.

“El complejo acuoso dominante en aguas subterráneas a pH menores que 8,2, con moderada a baja concentración de sulfato (menor a 10^{-2,5} M de SO₄²⁻) es el ion Cd²⁺. A medida que aumenta el pH, se espera que se formen otras formas complejas de este metal. Tal como se aprecia en la figura 2, se espera que, en aguas subterráneas con pH menores de 6,0; todo el cadmio esté bajo la forma del ion Cd²⁺” [33].

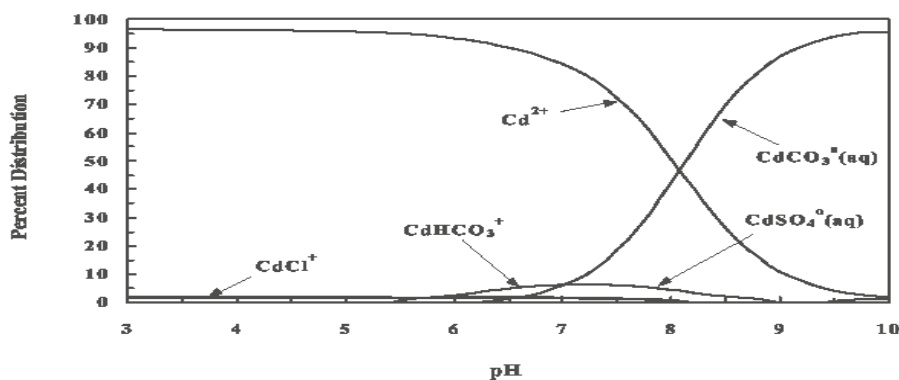


Figura 2: Distribución de los compuestos acuáticos de cadmio según pH
Fuente: EPA – EE.UU. 1999, <http://www.epa.gov/radiation/technology/partition.htm>

1.2.3.- Aportes al ambiente.

El cadmio ingresa al ambiente mediante diversas fuentes, tanto naturales como antrópicas. En la tabla 1, se indican las fuentes de cadmio al ambiente.

TABLA 1
FUENTES DE CADMIO

ANTROPOGENICAS	NATURALES
✓ Lodos residuales y estiércol.	✓ Actividad volcánica
✓ Fertilizantes fosfatados y nitrogenados.	✓ Rocas fosfatadas (Ígneas y sedimentarias).
✓ Industria de plateado y galvanizado.	
✓ Industria de esmaltado y vitrificado.	
✓ Minería de cinc, cobre, plomo y otros metales.	
✓ Industria de fundición de metales.	
✓ Incineración	
✓ Industria de alimentos fosfatados para animales.	

Fuente: J. Huaraca, L. Pérez, L. S. Bustinza y N. Pampa. 2020. Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. Inf. tecnol., La Serena, v. 31, n. 4, p. 139-152, agosto 2020. Disponible en http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071807642020000400139&lng=es&nrm=iso. accedido en 17 feb. 2023. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>.

“En la corteza terrestre el cadmio se encuentra en cantidades muy bajas ($< 1 \text{ mg.kg}^{-1}$), en promedio se encuentran valores de 0,1 a 0,2 mg.kg^{-1} ” [34].

“Sin embargo, en los suelos su contenido fluctúa entre valores menores de 1 a 3 mg.kg^{-1} de Cd. La concentración de cadmio en un suelo no contaminado es inferior a 1 mg.kg^{-1} ” [33]. Las concentraciones del cadmio podrían aumentar dependiendo de las actividades humanas, el material parental del suelo y de condiciones climáticas locales.

“Las principales fuentes de emisiones de cadmio son los servicios eléctricos, minería de yacimientos de oro y plata y manufactura de productos de arcillas estructurales”. (Fuente: www.scorecard.org/chemical-profiles/html/cadmium.html, 2002).

“El carbón y otros combustibles fósiles contienen cadmio y su combustión lo libera al ambiente. El cadmio también se encuentra en los yacimientos de azufre que contienen sulfuro de zinc y en yacimientos de plomo y cobre que contienen zinc. El cadmio se ha detectado en esquistos carbonáceos y rocas fosfóricas. Las emisiones volcánicas contienen aerosoles enriquecidos con cadmio”. (Fuente: www.scorecard.org/chemical-profiles/html/cadmium.html, 2002).

Otra fuente de cadmio que afecta directamente al ser humano es el humo de tabaco que corresponde a una fuente de contaminación interna de cadmio.

1.2.4.- Efecto del cadmio sobre las plantas.

No todas las plantas presentan ni la misma sensibilidad ni la misma capacidad de absorción frente a una concreta concentración de metal disponible; existe una gran disparidad en las relaciones de disponibilidad, toxicidad y respuestas de las plantas al estrés por metales pesados.

Varios escritores han categorizado plantas consumidas por humanos y animales según su grado de sensibilidad o resistencia a los metales. Claramente, el criterio varía según el elemento y la especie vegetal. No obstante, estas listas son comúnmente útiles (Tablas 2 y 3).

TABLA 2
BIOACUMULACIÓN RELATIVA EN LAS PARTES COMESTIBLES DE
DIFERENTES CULTIVOS, A PARTIR DE U.S. EPA Y COLB 1981.

ALTA	MODERADA	BAJA	MUY BAJA
Lechuga	Col rizada	Col	Judía
Espinaca	Nabo(raíces)	Maíz dulce	Guisante
Acelga	Rábano	Brócoli	Melón
Escarola	Mostaza	Coliflor	Tomate
Endibia	Patatas	Col de Bruselas	Pimienta
Berro		Apio	Berenjena
Nabos (hojas)		Frutos de baya	Árboles frutales
Remolacha			
Zanahoria			

Fuente: Extraído de J. Boixadera y M. R. Teira (eds). 2001. "Aplicación agrícola de residuos orgánicos". Universidad de Lérida

TABLA 3
ACUMULACIÓN RELATIVA POR VEGETALES: Cd Y Pb EN FRACCIONES
COMESTIBLES; Cu, Ni Y Zn EN HOJAS

Metal Pesado	Alta	Baja
Cadmio - Cd	Lechuga, espinaca, apio, col.	Papa, maíz, judía, guisante
Plomo - Pb	Col rizada, centeno, apio	Determinadas variedades de cebada, papa, maíz
Cobre - Cu	Remolacha azucarera, determinadas variedades de cebada.	Porro, col, cebolla.
Níquel - Ni	Remolacha azucarera, centeno, remolacha forrajera, nabo.	Maíz, porro, cebada, cebolla.
Zinc - Zn	Remolacha azucarera, remolacha forrajera, espinaca, raíz de remolacha.	Papa, poro, tomate, cebolla.

Fuente: Extraído de J. Boixadera y M. R. Teira (eds). 2001. "Aplicación agrícola de residuos orgánicos". Universidad de Lérida.

La acumulación en determinados tejidos u órganos es variable, así: la asimilación de Cr, Hg y Pb es pequeña y son bloqueados en la raíz; Cd y Hg son más zootóxicos que fitotóxicos, es decir, pueden acumularse en tejido vegetal en concentraciones tóxicas para los animales, sin que ello produzca efecto

adverso para la planta; la elevada fitotoxicidad de Cu, Ni y Zn hace que el vegetal actúe de barrera de protección frente a la incorporación en la cadena trófica.

1.2.5.- Efectos del cadmio en la salud humana.

“Investigaciones recientes señalan que la exposición a reducidas concentraciones de cadmio produce alteraciones a los huesos con consecuentes riesgos de fracturas. Esto debido a que el cadmio puede interferir con el metabolismo del calcio, la vitamina D y el colágeno, produciendo, a largo plazo, alteraciones de los huesos tales como la osteomalacia y la osteoporosis” [4].

“El cadmio, una vez aportado por la vía de la fertilización fosfatada, puede ser absorbido por los cultivos y llegar hasta quienes se alimentan de ellos. Los vegetales se presentan sanos y vigorosos aun cuando contengan más cadmio que lo normal. En Japón se ha tipificado la enfermedad “Itai-Itai”, en seres humanos, causada por consumo durante largo tiempo de arroz contaminado con cadmio” [5]; [4] y [30].

“Un aumento en la dieta de Ca^{2+} , Zn^{2+} y Fe^{3+} , disminuye la absorción de cadmio, cobre, plomo o mercurio; en cambio, un exceso de Cd^{2+} en la dieta induce síntomas por deficiencia de Ca^{2+} en humanos. En el caso de la carboxipeptidasa pancreática (cinc dependiente), disminuye la actividad y especificidad ante cadmio, mercurio, plomo, cobre o níquel, por intercambio del cinc desde el sitio activo” [35].

“El cadmio puede sustituir el calcio de los huesos, con resultados nefastos, tal como fue demostrado en Japón en los años 50, con agricultores que vivían en tierras contaminadas cercanas a una mina de cinc-cadmio” [36].

“Existen antecedentes de que el cadmio se relaciona con tumores en testículos y cáncer a la próstata en trabajadores expuestos” [36]. Se ha demostrado que el riñón es el órgano crítico para el cadmio” [37]. “La exposición crónica al cadmio produce Nefrotoxicidad” [38].

“Otra situación de cuidado, particularmente en niños, es que se han encontrado Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) en huevos de gallinas alimentadas con materiales inorgánicos” [39].

“El cuerpo absorbe aproximadamente 5% del Cd tomado del alimento y el agua y 10% del Cd inhalado del humo del cigarrillo. En promedio, un paquete de 20 cigarrillos contiene 20 - 25µg de Cd. Un no fumador, en un área no contaminada absorbería cerca de 0,5 -1,3 µg por día desde el alimento y el agua” [34].

De acuerdo a lo sostenido por [40]., “estableció que el máximo de ingesta diaria de Cd (IDA o Ingesta Diaria Admisible) no debería sobrepasar $1,0 [\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}]$ del peso del cuerpo (es decir, $70 \mu\text{g}\cdot\text{día}^{-1}$) para un hombre promedio). La ingesta dietética de Cd se estimó en $15 - 30 \mu\text{g}\cdot\text{día}^{-1}$ para los habitantes estadounidenses y $20 - 40 \mu\text{g}\cdot\text{día}^{-1}$, para los europeos” [41].

“Debido a que el alimento es la mayor fuente de ingesta de Cadmio - Cd, las estrategias de reducción del riesgo tendrán importantes implicaciones para la producción agrícola” [1].

Según sostiene [42], “el cadmio ingresa en la alimentación humana con los vegetales y productos animales, se fija en los cultivos más rápidamente que el plomo, los frutos y semillas contienen menos cadmio que las hojas, el efecto en la salud humana por el cadmio es el siguiente:

- Diarreas, dolor de estómago y vómitos severos.
- Fractura de huesos
- Fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad.
- Daños en el sistema nervioso central.
- Daños al sistema inmune.
- Desordenes psicológicos.
- Posible daño en el ADN y/o desarrollo de cáncer”.

1.2.6.- El cadmio en relación con el ambiente.

“La contaminación ambiental causada por el cadmio es un asunto complejo que ha sido examinado por varios investigadores desde distintos ángulos, incluyendo la salud humana y de otros seres vivos, la toxicología ambiental y sus implicaciones en la industria y la economía en la producción de varios productos con diferentes usos que contienen cadmio”.

Específicamente en el sector agropecuario, el cadmio es motivo de preocupación en relación con la fertilización fosfatada, el uso de biosólidos, la alimentación animal con productos fosfatados, el agua de riego y la disponibilidad del metal para los cultivos. Algunos países han tomado medidas para reducir la presencia de cadmio, ya sea mediante la utilización de rocas fosfóricas con bajo contenido de este metal para la producción de fertilizantes fosfatados o a través del uso de fertilizantes fosfatados con concentraciones menores de cadmio. Otra estrategia utilizada en el campo es la aplicación de correctores de pH del suelo, ya que se ha demostrado que el cadmio se vuelve más biodisponible para las plantas en suelos con pH ácido.

En Dinamarca se ha desarrollado un modelo que explica el ciclo del cadmio y se ha llegado a cuantificar las entradas y salidas del sistema (Figura 3).

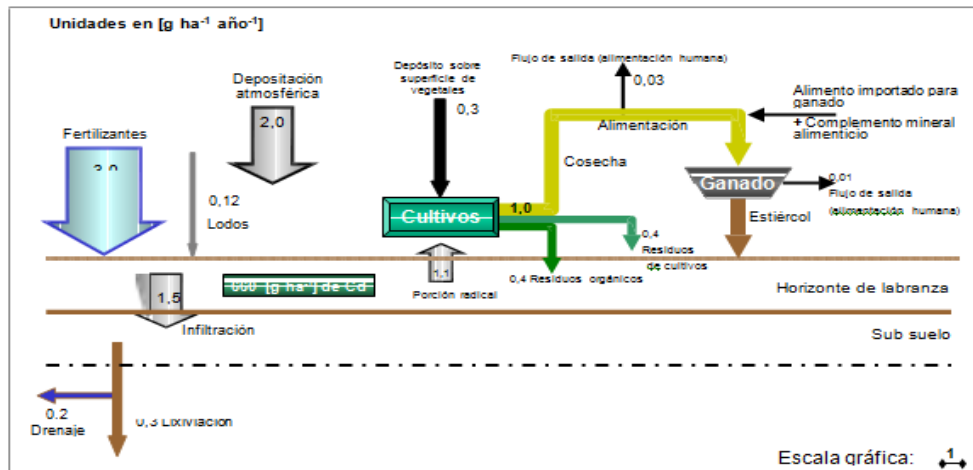


Figura 3: Ciclo del cadmio en la agricultura de Dinamarca
 Fuente: M. Hovmand, J. Tjell y H. Mosback , 1993. Plant uptake of airborne cadmiun. Environmental Pollution 30:27-38

Este modelo presenta las consecuencias ambientales del cadmio, lo que puede ayudar a su gestión y prevenir efectos negativos tanto en la salud humana como en el medio ambiente. Es importante destacar que la medición de las entradas y salidas de cadmio en el sistema permitiría evaluar el impacto de este metal y tomar medidas preventivas para evitar el deterioro del suelo y, por ende, los efectos adversos en la salud humana.

“Otro país que presenta avances en materia del cadmio y de la fertilización fosfatada es Australia, a través de programas de información a agricultores donde se tratan diversas estrategias para la disminución de las concentraciones de cadmio en el ambiente, particularmente en el recurso suelo” [43-44]. En la Figura 4 se presenta una cartilla destinada a los productores de papas donde se reseñan ambos manejos, “malo” y “bueno”, para ilustrar los aspectos que se pueden manejar para la reducción del cadmio en los cultivos.

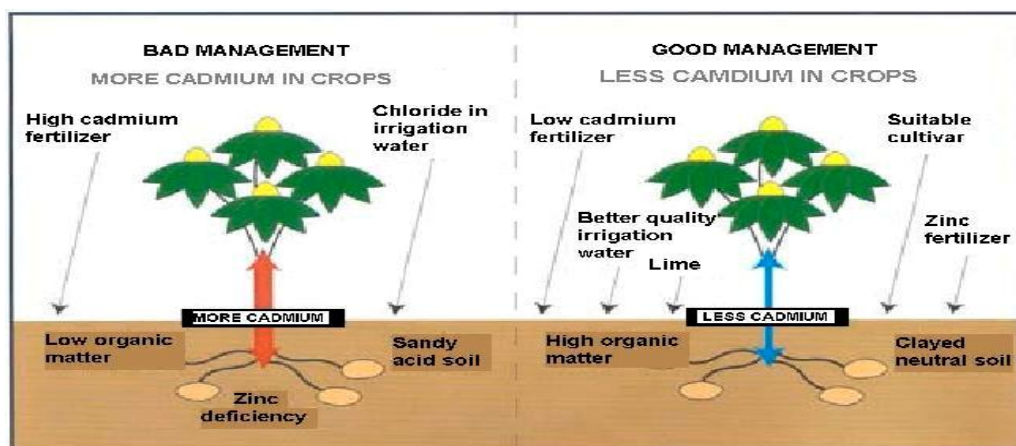


Figura 4: Cartilla de manejo agronómico del cadmio en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum L.*) para un producto de calidad
 Fuente: CSIRO, 1996; citado por Senn y Milham, 2001

“El estudio del cadmio es un tema complejo debido a los fenómenos de bioconcentración y biomagnificación en el ambiente. Es un tema que ha sido abordado por diversos autores, especialmente por un grupo de expertos, reunidos en dos oportunidades en el marco de *International Programme on Chemical Safety*, de la Organización Mundial de la Salud [45], en trabajo conjunto con la *International Labour Organisation*. El trabajo de los expertos se centró en investigaciones de una serie de seres vivos en los que se encontró que los mayores factores de bioconcentración eran para los microorganismos, particularmente para una diatomea de agua dulce con un factor de 40.000” [46].



Figura 5: Países productores de cadmio en el mundo
Fuente: www2.uah.vavtaacademia/anteriores/t

Los puntos mencionados sobre la agricultura de Dinamarca (Figura 3) es solo uno de los temas que los investigadores han abordado en un esfuerzo por evaluar el problema de manera integral, considerando tanto su dimensión espacial como temporal.

1.2.7.- Sobre la toxicología del cadmio

De acuerdo con lo reportado por [47], “sostiene que el cadmio es un metal que forma parte del grupo IIB de la tabla periódica, con peso atómico de 112,41 g; la forma iónica del cadmio es Cd^{+2} ”.

El químico alemán Friedrich Stromeyer descubrió el cadmio en 1817 en las incrustaciones de los hornos de cinesta. Este metal se considera el más móvil en el medio ambiente acuático y una de sus principales características es su bioacumulación y persistencia en el ambiente. El cadmio es uno de los principales agentes tóxicos relacionados con la contaminación ambiental industrial, ya que posee cuatro de las características más preocupantes de un elemento tóxico:

- 1°.- Efectos adversos sobre el hombre y el ambiente.
- 2°.- Bioacumulación.
- 3°.- Persistencia en el ambiente.
- 4°.- El cadmio se obtiene como subproducto de tratamiento metalúrgico del zinc y del plomo,

a partir de sulfuro de Cadmio. Además de contaminar el ambiente desde su fundición y refinación, contamina también por sus múltiples aplicaciones industriales.

1.2.8.- Sobre los Límites Máximos Permisibles (LMP) y Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) del cadmio en el suelo y calidad del ambiente.

El Estándar de Calidad Ambiental (ECA) y el Límite Máximo Permisible (LMP), son herramientas de gestión ambiental que establecen parámetros y obligaciones para regular y proteger la salud pública y la calidad ambiental en la que vivimos. Estos instrumentos permiten a las autoridades ambientales llevar a cabo acciones de control, seguimiento y fiscalización de los efectos causados por las actividades humanas en el medio ambiente.

**TABLA 4
ALGUNAS DIFERENCIAS ENTRE LOS ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) Y LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES (LMP)**

Estándares de Calidad Ambiental (ECA)	Límites Máximos Permisibles (LMP)
“Miden la concentración de elementos, sustancias u otros en el aire, agua o suelo (Cuerpos receptores)”	“Miden la concentración de ciertos elementos, sustancias y/o aspectos físicos, químicos y/o biológicos que se encuentran presentes en las emisiones, efluentes o descargas generadas por una actividad productiva en particular”.
“Son usados para el establecimiento de políticas ambientales públicas”.	“Son exigibles para cada sector en particular y su cumplimiento es obligatorio para cada una de las empresas y/o personas pertenecientes a él”.
“Su medición se realiza directamente en los cuerpos receptores”	“Su medición se realiza directamente en los puntos de emisión o vertimiento”.
“Son propuestos por el Ministerio del Ambiente (MINAM), previa evaluación y consulta”.	“Son propuestos por la autoridad sectorial”.
“Su medición y vigilancia están a cargo de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) y el MINAM”.	“Su medición y fiscalización está a cargo del MINAM”.

Fuente: www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP). (Informe Quincenal de la Sociedad Nacional de Minería y Petróleo. Julio 2012.).

Los ECA miden la concentración de elementos, sustancias, parámetros físicos, químicos y biológicos en el aire, agua o suelo, pero que no representan un riesgo significativo para la salud humana ni el medio ambiente. Por otro lado, los LMP miden la concentración de elementos, sustancias, parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en las emisiones, efluentes o descargas generadas por una actividad productiva (minería, hidrocarburos, electricidad, etc.) que, al excederlos, pueden causar daños a la salud humana y al medio ambiente. Una diferencia entre ambos es que la medición de un ECA se realiza directamente en los cuerpos receptores, mientras que en un LMP se mide en los puntos de emisión y vertimiento. Sin embargo, ambos instrumentos son indicadores que, a través del análisis de sus resultados, permiten establecer políticas ambientales (ECA) y corregir el impacto de una actividad específica (LMP).

La distinción radica en que la medición de un ECA se lleva a cabo directamente en los cuerpos receptores, mientras que un LMP se realiza en los puntos de emisión y vertimiento. A pesar de esto, ambos instrumentos son indicadores que permiten establecer políticas ambientales (ECA) y corregir el impacto de una actividad específica (LMP) a través del análisis de sus resultados.

La calidad ambiental se refiere al conjunto de características del ambiente, que están en línea con la disponibilidad y facilidad de acceso a los recursos naturales, así como la presencia o ausencia de agentes nocivos. Es esencial para mantener y mejorar la calidad de vida de los seres humanos. Los términos "Estándar de Calidad Ambiental" y "Límite Máximo Permissible" están estrechamente relacionados con este concepto, y son herramientas operativas diseñadas, normadas y aplicadas para garantizar el cumplimiento de la Política y el Plan Nacional de Acción Ambiental en el país.

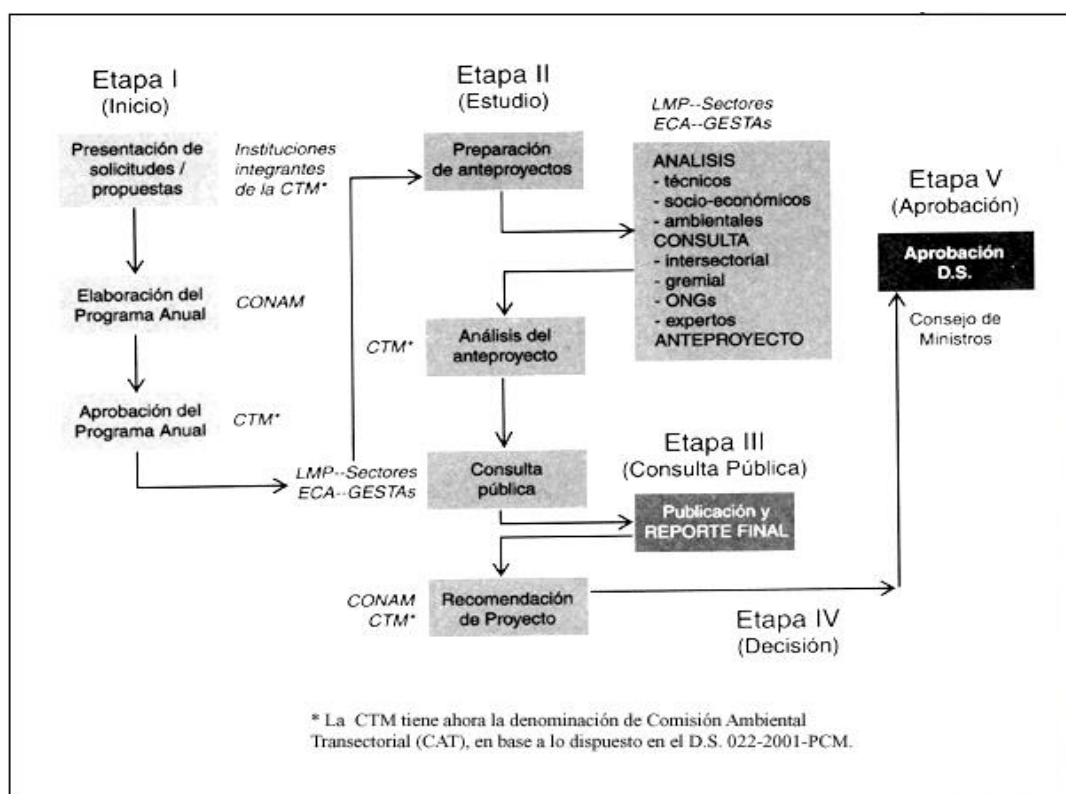


Figura 6: Diagrama de flujo sobre la aprobación de los ECA y LMP.

Fuente: Ministerio del Ambiente, Perú 2012

En el Perú, y sobre todo en el sector agricultura, no existen Límites Máximos Permisibles (LMPs) y menos Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para cadmio en el suelo, recientemente con fecha 07 de noviembre del 2012, el Ministerio del Ambiente, dispuso la publicación para fines de consulta pública el Proyecto de Decreto Supremo, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental para suelo, ECA – suelo (Fuente: www.minam.gob.pe), de una serie de elementos orgánicos e inorgánicos como es el caso del cadmio, tal como se detalla a continuación:

TABLA 5
PROPUESTA DE LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CADMIO
EN SUELOS EN EL PERU

N°	Parámetro	Usos del Suelo			Método de ensayo
		Suelo Agrícola	Suelo Residencial/Parques	Suelo Comercial/Industrial/Extractivos	
1	Cadmio Total (mg/kg MS)*	1,40	10,00	22,00	EPA** 3050-B

*: Concentración de metales totales.

** Environmental Protection Agency of the United States (Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EE.UU.).

(Fuente: www.minam.gob.pe)

1.2.9.- Sobre los fertilizantes fosfatados

1.2.9.1.- Origen

“Respecto del origen de los fertilizantes fosfatados, éstos se obtienen a partir de la roca fosfórica compuesta prácticamente por todos los elementos químicos de la tabla periódica. La denominación roca fosfórica es un término general que describe un conjunto de minerales naturales que contienen una elevada concentración de compuestos fosfatados” [48]. “Existen dos tipos principales de roca fosfórica, ígnea y sedimentaria, las cuales tienen grandes diferencias en características mineralógicas, texturales y químicas. El contenido de metales pesados son normalmente más altos en las rocas sedimentarias que en las ígneas” [49].

1.2.9.2.- Aspectos de los fertilizantes fosfatados

Tal como se observa en la tabla 6, las rocas sedimentarias presentan las mayores concentraciones de cadmio.

“Las fosforitas alcanzan concentraciones de cadmio de hasta 980 mg.kg^{-1} , aspecto interesante de destacar ya que de esta roca se derivan los fertilizantes fosfatados que se utilizan en los sistemas agrícolas. En el caso, cabe hacer notar que la fertilización fosfatada es muy necesaria en la mayoría de sus suelos de origen Entisoles (suelos de reciente formación), particularmente los suelos de texturas media y gruesa, debido a que éstos retienen el fósforo, no dejándolo disponible para las plantas” [49].

“El Cd es un elemento no deseable en los fertilizantes y aunque no representa un peligro inmediato debido a su baja concentración, la industria de fertilizantes está trabajando en bajar su contenido mediante técnicas de eliminación y purificación de los fertilizantes. Actualmente la estrategia está orientada al uso de los fertilizantes fosforados con bajas concentraciones de este metal” [43].

TABLA 6
CONCENTRACION DE CADMIO EN LAS ROCAS

TIPOS DE ROCA	RANGO (mg kg ⁻¹)	RANGO (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 – 11,00	-
- Esquistos negros	0,30 – 219,00	-
- Piedras areniscas y conglomerados	0,019 – 0,40	-
- Carbonatos	0,007 – 12,00	0,065
- Fosforita	< 10 – 980	-
- Carbón	0,01 - 300	-
Yacimientos minerales de azufre:		
- Esfalerita (ZnS)	0,2 – 0,4 (<5%)	-
- Galena (PbS)	< 0,5%	-
- Tetrahedrita – Tennantita (CuZn)(SbAs)S	< 0,24%	-
- Metacinnabar (HgS)	11.70%	-

Fuente: J. Alloway, 1995, Cadmium. En: Heavy metals in soils. Second edition. Blackie Academy and Professional. pp.122-150.

1.2.9.3.- Procesos de fabricación de los fertilizantes fosfatados

“Los minerales de fosfato en la fosforita (roca fosfórica sedimentaria, usualmente marina, Bessoain et al., 1999) son la fluorapatita ($3Ca_3(PO_4)_2CaF_2$) e hidroxiapatita ($3Ca_3(PO_4)_2Ca(OH)_2$). Estos minerales proporcionan la mayor parte del fósforo para la fabricación de fertilizantes, en el mundo entero. Sin embargo, la propia fosforita en polvo no sirve como fertilizante porque el fósforo que contiene, no se halla en forma soluble y menos soluble que permitiría una asimilación fácil por las plantas. Haciendo reaccionar este mineral con ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3) o ácido clorhídrico (HCl), se obtiene ácido fosfórico (ácido ortofosfórico – H_3PO_4) y superfosfórico, importantes intermediarios en la producción de fertilizantes fosfatados. La reacción con ácido sulfúrico es la más utilizada” [50].

La figura 7, ilustra el proceso de producción de fertilizantes fosfatados a partir de fosforita natural. Para obtener superfosfatos, la fosforita se trata con ácido sulfúrico, ácido fosfórico o ácido superfosfórico. La fosforita puede seguir dos rutas (proceso vía húmeda y proceso térmico) para obtener ácido fosfórico, que se utiliza para producir el resto de los fertilizantes. El tratamiento previo incluye amoníaco (NH_3), ácido sulfúrico o urea [$CO(NH_2)_2$], según el tipo de fertilizante, como se indica en la figura. Además, se pueden producir nitrofosfatos a partir de la fosforita natural mediante el uso de ácido nítrico. Los fertilizantes más utilizados en el mundo y en Perú son superfosfatos, fosfato mono amónico y fosfato di amónico.

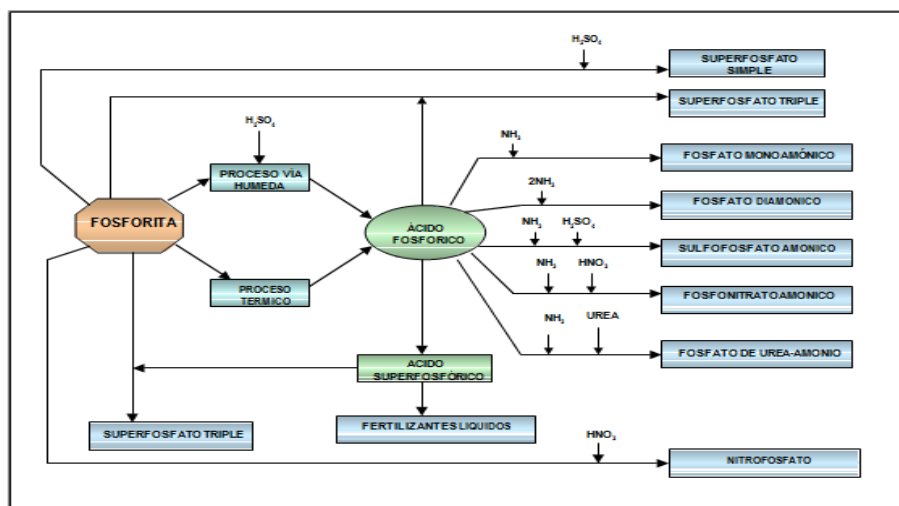


Figura 7: Procesos de fabricación de los fertilizantes fosfatados a partir de la fosforita natural.

Fuente: Elaborado a partir de información de Naciones Unidas, 2001

1.2.9.4.- Límites máximos permisibles (LMP) y estándares de calidad ambiental (ECA) de cadmio en los fertilizantes fosfatados

Para el caso de los fertilizantes fosfatados, en el Perú no existen estos instrumentos de gestión para dichos productos agrícolas y menos para entradas de cadmio al suelo.

“Tal como lo señala en un estudio sobre el consumo de fertilizantes en el Perú, donde determina que la importación, producción y venta de los fertilizantes, es realizado por diferentes empresas comercializadoras y que no están regidas por ningún reglamento específico al respecto y si hubiera un elemento regulador existen términos ambiguos tales como “elementos perjudiciales” e “impurezas”, que no están claramente definidos y por lo tanto no permiten un control sobre el contenido de elementos, tales como el cadmio en los fertilizantes”[51].

Además, no se requiere un etiquetado que proporcione la composición completa de los fertilizantes, lo que dificulta la toma de decisiones informadas en la elección, compra, uso y aplicación de los fertilizantes, así como en la implementación de medidas de seguridad para prevenir impactos en los cultivos, la salud y el medio ambiente. En la actualidad, se está preparando una propuesta para establecer leyes en relación a los niveles de elementos traza metálicos en lodos y biosólidos que se utilizan en la agricultura.

La tabla 7, presenta los límites de valores de fertilizantes, entradas de cadmio al suelo y contenido de cadmio en los suelos en diversos países.

Se puede observar que cada país ha establecido sus propios límites de cadmio para fertilizantes y suelos, debido a la diversidad de condiciones locales. La preocupación por establecer regulaciones en este aspecto surge a raíz del episodio en Japón y la creciente evidencia de la contaminación del suelo por cadmio en otros países, como Australia, Austria y Finlandia.

La calidad ambiental se refiere al conjunto de características del ambiente que están en línea con la disponibilidad y facilidad de acceso a los recursos naturales, así como la presencia o ausencia de agentes nocivos. Es esencial para mantener y mejorar la calidad de vida de los seres humanos. Los términos "Estándar de Calidad Ambiental" y "Límite Máximo Permisible" están estrechamente relacionados con este concepto, y son herramientas operativas diseñadas, normadas y aplicadas para garantizar el cumplimiento de la Política y el Plan Nacional de Acción Ambiental en el país (Fuente: www.miman.gob.pe. – Estándares Ambientales – 2012).

“Los análisis de cadmio en los fertilizantes son importantes porque es un metal que se halla de manera natural en los suelos. Las plantas tienen la capacidad de absorberlo y, así mismo, su transmisión directa a los productos que luego serán comercializados. Para la salud de las personas es un metal pesado muy peligroso ya que es tóxico, acumulativo en el organismo y de alta permanencia. Para asegurar una producción de frutas y hortalizas de calidad y libres de metales pesados, es clave anticiparse e implementar estrategias que contribuyan a minimizar este riesgo” [51].

“Además de analizar el suelo también es recomendable descartar la contaminación que podría provenir de factores externos al suelo como el agua y fertilizantes, para lo cual contamos con todos estos análisis. Con límites de detección de <0.02 ppm para el caso de los fertilizantes” [51].

“En lo ambiental, el cadmio es un elemento relativamente raro en la litosfera. Por afinidad química, se le encuentra junto al zinc, en proporción muy variable. Las principales fuentes de contaminación son: la minería metalúrgica de metales no ferrosos, la metalurgia del hierro y acero, la fabricación de fertilizantes fosfatados, la incineración de residuos de madera, carbón o “plásticos”, la combustión de aceite y gasolina y las aplicaciones industriales de cadmio. La concentración de cadmio en aire de áreas industriales varía de 9,1 a 26,7 mg/m³ frente a 0,1 a 6 mg/ m³ en el aire de áreas rurales. El tiempo de permanencia del cadmio en suelos es de hasta 300 años y el 90% permanece sin transformarse” (FAO, 1980) [50]. “El cadmio llega al suelo de los terrenos agrícolas por deposición aérea (41%), con los fertilizantes fosfatados (54%), por aplicación de abono de estiércol (5%) y, en el Perú, frecuentemente por efluentes que contienen residuos líquidos y sólidos de plantas hidrometalúrgicas de cadmio. Hemos encontrado que, en suelos contaminados, los niveles de cadmio alcanzan valores de hasta 1 mg de Cd/g y el agua de ríos contaminados puede contener hasta 0,14 mg.l⁻¹ de Cd” [50].

“El cadmio entra en la alimentación humana con los vegetales y productos animales. Se fija a las plantas más rápidamente que el plomo. Los frutos y semillas contienen menos cadmio que las hojas. El pescado, los crustáceos, el riñón e hígado de animales acumulan cadmio en grado relativamente elevado” [50].

TABLA 7
VALORES LÍMITES DE CADMIO EN LOS FERTILIZANTES Y SUELOS EN PAÍSES DIVERSOS

País	Límite de Cd en fertilizantes (mg.kg ⁻¹ de P ₂ O ₅)	Límite de Cd en fertilizantes (mg.kg ⁻¹ de P)	Límites de entrada de Cd a los suelos agrícolas (g.ha ⁻¹)	Límites de entrada de Cd a los suelos agrícolas (mg.kg ⁻¹ suelo seco)	Referencia
Alemania	40 – 90 ^a	91,6 – 206,1	16,7 ^b	1,0	Oosterhuis et al., 2000
Australia	150	343,5	--	--	Roberts, 1996
Austria	75	171,8	10 ^c /5 ^d	1,0	Oosterhuis et al., 2000
Bélgica	90	206,1	150	1,0 – 3,0	Oosterhuis et al., 2000
Dinamarca	47	107,6	--	0,5	Oosterhuis et al., 2000
Finlandia	21,5	49,2	3	0,5	Oosterhuis et al., 2000
Japón	146	334,4	--	--	Roberts, 1996
Luxemburgo	90	206,1	150	1,0 – 3,0	Oosterhuis et al., 2000
Noruega	43	98,5	--	--	Roberts, 1996
Países Bajos	17 ^e	40,0 ^e	--	0,5 – 1,0	Oosterhuis et al., 2000
Portugal	40 – 70 ^f	91,6 – 160,3	--	--	Oosterhuis et al., 2000
Reino Unido	--	--	0,15 ^g	3,0 ^h	Oosterhuis et al., 2000
Suecia	43 ⁱ	98,5	1,75 ⁱ	--	Oosterhuis et al., 2000
Suiza	21	46,1	--	--	Roberts, 1996

^a Basado en un acuerdo voluntario entre el gobierno y la industria.

^b Promedio sobre un periodo de tres años.

^c Suelo arable

^d Praderas y hortalizas

^e OECD(1994) menciona un límite de 40 mg kg⁻¹ de P (17 mg kg⁻¹ P₂O₅). De acuerdo con un vocero de VKP (Vereniging van Kunstmestproducenten), no hay límite para el contenido de Cd en fertilizantes en los Países Bajos. Está en preparación un acuerdo voluntario

^f Mencionado en OECD (1994); probablemente no es un límite legal.

^g Sólo con lodos residuales.

^h Suelos con un pH de 5 y superior, tratados con lodo residual.

ⁱ Un límite voluntario de 21,5 mg kg de P₂O₅ ha sido introducido por la SLR (Svenska Lantmännen, cooperación sueca a agricultores).

^j Promedio para siete años; menor a 0,75 g ha por año a partir del año 2000.

Fuente: K. Isherwood, 1992. Phosphate industry and the environment. In: International Workshop of Phosphate Fertilizer on the Environment. Tampa. Proceedings Tampa: International Fertilizer Development Center, 1992. p. 115-123

“Hay países como son los casos de Austria y Finlandia, que han renunciado a las disposiciones comunitarias en la Unión Europea con respecto a los contenidos de cadmio permisible en los diferentes fertilizante fosfatados y en el suelo, debido a que han detectado problemas ambientales, según evaluaciones realizadas por consultores externos por el Directorio General de las Comunidades Europeas (Directorate General III of the European Comminites) para la evaluación del riesgo del cadmio

en los fertilizantes” [52]. La Unión Europea ha avanzado respecto al establecimiento de disposiciones a nivel comunitario relativas al contenido de cadmio en los fertilizantes.

1.2.10.- Aspectos sobre los suelos cultivados en el valle de Ica

1.2.10.1.- Generalidades

La agricultura, constituye una de las actividades económicas de mayor importancia y en especial en el valle de Ica, tanto por el área sembrada respecto al total nacional, así como por el valor de la producción, por tener rubros de agro exportación a mercados internacionales muy exigentes en lo que respecta a la calidad e inocuidad de los productos ofertados.

“Ica representa un gran potencial exportador; posee el 65% de la agro exportación en el Perú. En la actualidad se está exportando 46 productos entre los que destacan: el arándano, el espárrago, la uva de mesa, los cítricos, las paltas, la cebolla, los pimientos, la alcachofa, entre otros”. Los datos de las áreas cultivadas en el departamento de Ica, es como sigue:

- Superficie de la región : 2 130 551 ha.
- Área aprovechable : 243 543 ha.
- Tierras cultivadas : 116 909 ha.
- Área de agroexportación: 35 000 ha [53].

**TABLA 8
DISTRIBUCION DE LAS TIERRAS EN LE REGION ICA**

USOS DE LA TIERRA	EXTENSION (ha)	PORCENTAJE(%)
TOTAL DEPARTAMENTAL	243 543	100,00
TIERRAS AGRICOLAS:	116 909	48,02
a.- Bajo Riego	113 288	96,90
b.- En secano	3 621	3,10
TIERRAS NO AGRICOLAS:	126,544	51,98
a.- Pastos	59 953	47,38
b.- Bosques Secos	10 226	8,08
c.- Relictos	56 365	44,54

Fuente: Encuesta Nacional Agropecuario (ENA) - Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2019.

Este departamento posee una configuración geográfica notable, siendo el único de la región sur de la costa que consiste en planicies o llanuras costeras. Destacan los extensos desiertos como las Pampas de Lanchas y Villacurí, ya que la Cordillera de los Andes se encuentra lejos hacia el interior. Además, algunos plegamientos geológicos han dado lugar a la formación de terrenos que llegan hasta el mar, creando la Península de Paracas. Al sur, se encuentran formaciones aisladas que conforman el complejo de Marcona, hogar de los depósitos de hierro más grandes de la Costa del Pacífico. [53].

TABLA 9
SUPERFICIE DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS DE AGROEXPORTACION EN
LA REGION AGRARIA ICA (ha)
(Campaña Agrícola 2021 – 2022)

PROVINCIAS DEL DEPARTAMENTO						
CULTIVOS	Chincha	Pisco	Ica	Palpa	Nazca	Total
Pallar (Grano seco)	109,00	48,50	518,50	398,60	571,70	1 527,30
Garbanzo (Grano seco)	--..--	---..--	58,00	118,50	---..--	176,50
Cebolla amarilla	30,00	1,00	21,00	---..--	125,50	177,50
Páprika	---..--	133,00	396,00	---..--	125,50	744,30
Tomate	26,00	241,00	197,40	31,30	17,50	513,20
Espárrago	2 387,00	699,50	6 042,50	122,50	12,00	9 264,50
Alcachofa	235,00	---..--	193,00	---..--	---..--	428,00
Vid	1 719,00	273,10	3 941,60	6,50	88,00	6 028,20
Cítricos:						
Naranja	89,00	27,00	553,30	235,80	113,70	1 019,30
Mandarina	789,00	12,50	140,90	4,00	1,00	947,40
Tanguelo	52,00	386,00	305,80	29,10	40,80	813,70
Mango	---..--	7,00	512,50	199,20	34,50	753,20
Palto	532,00	16,50	528,00	9,40	29,60	1 115,50
Pecano	116,00	4,00	502,00	9,40	29,60	639,808
Total Exportado	6 084,00	1 849,60	13 910,50	1 046,60	1 258,10	24 148,80

Fuente: Dirección Regional Agraria del Gobierno Regional de Ica, 2020.

“Desde la perspectiva de la física de suelos, el suelo es un sistema disperso altamente complejo, heterogéneo y puede ser tetrafásico, es decir, sólido, líquido, gaseoso y coloidal, dependiendo de la proporción y la composición de sus componentes. El suelo muestra una gran dinámica, que es determinada por varios factores, como la luz solar, la presión, el agua, los componentes solubles y los organismos. En términos prácticos, un buen suelo consiste en un 50% de fase sólida, del 15 al 35% de fase líquida y del 15 al 35% de fase gaseosa. La composición de las fases líquida y gaseosa puede variar dependiendo de la cantidad de agua presente” [53].

“La fase coloidal se presenta dependiendo de la cantidad de arcilla, limo y agua presentes en el suelo. La fase coloidal puede formar dispersiones o estados de agregación llamados gránulos. El tamaño de las partículas coloidales varía entre 10^{-5} y 10^{-7} mm, de diámetro promedio (su tamaño es de 10 a 100 veces mayor que las moléculas, átomos e iones)”.

1.2.10.2.-Origen

“Los suelos del valle de Ica se encuentran en la formación ecológica del desierto per árido subtropical, que no tiene lluvias durante todo el año. El paisaje de la zona es principalmente eólico, con una leve influencia aluvial y un micro relieve ligeramente ondulado. La agricultura en la zona depende completamente de la extracción de agua subterránea a través de pozos tubulares” [53].

Los suelos del valle de Ica se encuentran sobre depósitos eólicos, aluviales y fluvio-aluviales.

- **Depósitos eólicos:** “Estos suelos se originan por la acumulación de arena transportada por el viento, dando lugar a la formación de dunas cercanas a la costa. Debido a la falta de humedad en estos suelos áridos, la descomposición química de las rocas es muy baja y la cantidad de arcilla es limitada. Estos suelos son abundantes en la zona oeste de Ica”.

- **Depósitos aluviales:** “Los suelos ubicados a lo largo del curso del río Ica son resultado de la sedimentación del mismo, y se caracterizan por ser predominantemente arenosos y limosos, con presencia de arcilla. Es sobre estos suelos donde se encuentra la ciudad de Ica”.

- **Depósitos fluvio - aluviales:** “Estos suelos se encuentran en las zonas de transición entre la cordillera que bordea el valle de Ica y la llanura costera. Los depósitos en estos suelos provienen de las quebradas que se encuentran al este de la ciudad de Ica y están compuestos por materiales de mayor tamaño que las arenas, como piedras y gravas, provenientes de los cerros cercanos y de la parte alta de las quebradas”. Estos suelos se pueden dividir en tres zonas importantes:

Zona I: “Está conformada superficialmente por terrenos de cultivo (limos), en estado semi compacto y poco húmedo ($h=1.00$ m). Subyaciendo al suelo anterior se presentan suelos limosos, con presencia de óxidos y suelos arcillosos. Con baja humedad y plasticidad. El predominio de suelos finos es notorio. Esta zona lo conforma el oeste y sur-oeste de la ciudad”.

Zona II: “La zona está compuesta por depósitos de arena con una graduación pobre y de grano fino a medio, con un contenido medio a bajo de finos no plásticos, baja humedad y con intercalaciones de suelos arcillosos y limosos de poca potencia en forma de lentes. Esta zona incluye el cercado de Ica y algunas partes de urbanizaciones cercanas”.

Zona III: “La zona está compuesta principalmente por arenas mal graduadas de color amarillo claro, con una ligera humedad y una estructura poco compacta. Estos suelos son de origen eólico, lo que significa que fueron transportados por el viento y cubren grandes áreas de terreno. Esta área en particular se encuentra en el extremo norte y oeste de la ciudad de Ica [53]”.

1.2.10.3.- Características

Los suelos cultivados de uso agrícola del valle de Ica, son suelos de textura ligera a media, generalmente franco – arenosos, que en los primeros 50 cm, presentan una o dos capas delgadas de limo de 1 a 2 cm, de espesor, que pueden haberse acumulado por ocasionales cursos de agua de las quebradas adyacentes [53].

En cuanto a su fertilidad química, estos en promedio son suelos de reacción ligeramente alcalina y bajos en calcáreo, ligeramente salinos, aunque se puede dar el caso de suelos excesivamente salinos como ocurre en los suelos de la Pampa de Villacurí y en la zona baja del valle e incluso con problemas de sodificación. Estos suelos presentan baja fertilidad química debido a la escasa presencia de coloides arcillo-húmicos, lo que se refleja en una baja capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, se han encontrado relaciones catiónicas adecuadas y en algunos casos, deficiencias críticas de materia orgánica y, por lo tanto, de nitrógeno total. El fósforo asimilable varía de bajo a medio, mientras que el potasio disponible es de medio a alto. En lo que respecta a la concentración de sales solubles, estas pueden encontrarse en un nivel que puede ser limitante para el cultivo, aunque con buenas prácticas agrícolas de manejo de suelos y el agua de riego se puede minimizar este factor limitante, más aun teniendo en cuenta que el sistema de riego por goteo hace posible la aplicación con eficiencia de esta y otras técnicas de manejo del suelo, las sales que predominan en los suelos son el cloruro de calcio, sulfato de magnesio, sulfato de calcio y el cloruro de sodio [53].

Ica es un departamento privilegiado para este tipo de inversiones, por su calidad de suelo, clima, temperaturas, luminosidad, recursos hídricos; también cuenta con puertos y aeropuertos y además de su cercanía a la capital del Perú.

El Tratado de Libre Comercio (TLC) con los Estados Unidos y otros países, junto con la construcción de la carretera transoceánica, están generando nuevas oportunidades comerciales para la región de Ica. Esto no solo impulsará el desarrollo económico, sino que también permitirá la exportación de nuevos productos. Además, la carretera transoceánica conectará los puertos marítimos de General José de San Martín en Pisco y San Nicolás en Marcona, lo que fomentará el crecimiento económico y la creación de empleos en ambas provincias.

1.2.10.4.- Principales series de suelos cultivados en el valle de Ica

“El departamento de Ica se encuentra ubicado en la costa sur central del litoral peruano. Abarca una superficie de 21 328 km², equivalente al 1,7 por ciento del territorio nacional, la que incluye 22 km² de superficie insular oceánica. Limita por el norte con Lima, por el este con Huancavelica y Ayacucho, con Arequipa por el sur y al oeste con el Océano Pacífico. En Ica destacan extensos desiertos como las pampas de Lancha y Villacurí. Asimismo, algunos plegamientos geológicos han determinado la formación de terrenos que avanzan hasta el mar, dando lugar a la península de Paracas; mientras que, al sur, unas formaciones aisladas han determinado el complejo de Marcona, donde se ubican los más grandes depósitos de hierro de la costa del Pacífico” [53].

TABLA 10
SERIES DE SUELO, EXTENSION Y PORCENTAJE APROXIMADO DE LOS
SUELOS EN EL VALLE DE ICA

Series de Suelos	Símbolo	Extensión Parcial		Extensión Total	
		Hectáreas	%	Hectáreas	%
Tacama	TC	3 652	10,60	---	---
Tacama Salino	TC ^S	493	1,4	4 145	12,00
Ocucaje	OC	3 458	9,90	---	---
Ocucaje Salino	OC ^S	1 323	3,80	---	---
Ocucaje Salino-Sódico	OC ^{SS}	38	0,10	4 819	13,80
Guadalupe	GD	1 105	3,20	---	---
Guadalupe Salino	GD ^S	290	0,80	1 395	4,00
La Máquina	LM	533	1,50	---	---
La Máquina Salino	LM ^S	235	0,70	768	2,20
Tinguña	TG	2 563	7,40	2 563	7,40
Los Castillos	LC	3 842	1,00	---	---
Los Castillos Salino	LC ^S	419	1,20	4 261	12,20
Tate	TA	3 842	11,00	---	---
Tate Salino	TA ^S	419	1,20	4 261	12,20
Cachiche	CCH	65	0,20	---	---
Cachiche Salino	CCH ^S	325	0,90	390	1,10
Ica	IC	4 391	12,60	---	---
Ica Salino	IC ^S	1 966	5,70	6 357	18,30
Pedrones	PE	183	0,50	183	0,50
Ribereño Seco	RS	420	1,20	420	1,20
Arenal	AR	1 663	4,80	---	---
Arenal Salino	AR ^S	43	0,10	1 706	4,90
Santiago	SG	1 580	4,50	1 580	4,50
Piedras	PI	83	0,20	83	0,20
Cerro Blanco	CE	83	0,20	83	0,20
Tajahuaana	TJ	152	0,40	152	0,40
Cauce de Rio	RW	433	1,30	433	1,30
Dunas	DU	1 180	3,40	1 180	3,40
Cerros	M	80	0,20	80	0,20
TOTAL	---	34 859	100,00	34 859	100,00

(Fuente: Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales - ONERN, 1971).

“Por el lado agrícola, destacan cultivos de exportación y agroindustria como el espárrago, uva, palta, cebolla cabeza amarilla, cítricos (mandarina, naranja, tándgelo y limón), arándanos, páprika, tomate, alcachofa y algodón, así como otros de consumo interno como camote, maíz amarillo duro, papa, pallar y zapallo. Por superficie cosechada en 2020, sobresalieron, uva (17,0 mil hectáreas), maíz amarillo duro (15,4 mil hectáreas), espárrago (14,7 mil hectáreas) y palta (5,2 mil hectáreas)” [53].

“El sector agropecuario es la segunda actividad con mayor contribución (15,7 por ciento) al VAB departamental de 2020 y fue una de las actividades que continuaron sus operaciones desde el inicio del estado de emergencia por efecto del COVID-19. Cuenta con 254 mil hectáreas de tierras con aptitud agrícola, de las cuales aproximadamente el 91,3 por ciento se encuentran bajo riego y el resto es de secano (dependiente de las lluvias)” [53]. La característica principal de estos suelos, es que no tienen un perfil desarrollado, excepto un horizonte A poco profundo, marginal. Son Entisoles, muchas llanuras aluviales recientes, depósitos de arena, los depósitos sin consolidar con horizontes erosionados y las arenas.

“Sus propiedades están ampliamente determinadas (heredadas) por el material original. De los horizontes de diagnóstico, representado por los horizontes superficiales (Epipedones) y los horizontes subsuperficiales (Endopedones), cuyas características de diagnóstico son sencillas y fácilmente medibles en el suelo, solo presentan aquellos que se originan fácilmente. Casi siempre con horizontes de diagnóstico ócrico y solo algunos con hístico y con álbico (desarrollados a partir de arenas)” [54].

1.2.10.5.- Clasificación por capacidad de uso de los suelos del valle de Ica

Las tierras del valle de Ica, por haber cultivadas durante muchos años, presentan capacidades de uso similares a las clases de aptitud para el riego, por lo que, considerando las características de los suelos, fertilidad, clima y humedad, se han dividido entre grandes grupos como se puede apreciar en la tabla 11.

TABLA 11
CLASIFICACION DE LAS TIERRAS DE ACUERDO A SU CAPACIDAD DE
USO DEL VALLE DE ICA

CLASIFICACION DE TIERRAS			AREA			
			(miles de ha)	(%)		
	Cultivables		Sub -Total	32 810	Sub -Total	94,12
	1.1	Clase 1	8	--..--	23,57	--..--
1	1.2	Clase 2	15	--..--	43,71	--..--
	1.2	Clase 3	9	--..--	26,84	--..--
2	Cultivables con métodos		Sub - Total	166	Sub -Total	0,48
	2.1	Clase 4	166	--..--	0,48	--..--
3	No cultivables		Sub - Total	1 833	Sub - Total	5,4
	3.1	Clase 8	1 833	--..--	5,4	--..--
			TOTAL	34 859	TOTAL	100

Fuente: Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales - ONERN, 1971.

Las tierras de las Pampas de Villacurí (Valle nuevo), se caracterizan por presentar en su mayoría texturas arenosas, las que, asociadas a las características de fertilidad, clima, humedad, se dividieron en tres grandes grupos representados en la tabla 12.

TABLA 12
CLASIFICACION DE LAS TIERRAS DE LAS PAMPAS DE VILLACURI DE
ACUERDO A SU CAPACIDAD DE USO

DESCRIPCION DE LAS TIERRAS		CLASE	AREA (ha)	AREA (%)
1	Cultivables	3	15 720,00	67,39
2	Cultivables con métodos intensivos	4	1 921,60	8,24
3	No cultivables	8	5 685.60	24,37
		TOTAL	23 327,20	100,00

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Naturales – INRENA, 2004

1.2.10.6.- Uso actual de la tierra en el Valle de Ica y de la Pampa de Villacurí.

El uso actual de las 47 001.91 ha de tierra están referidas al uso agrícola y no agrícola. Las tierras agrícolas tanto cultivadas como las no cultivadas del valle de Ica ascienden a un total de 30 376.4 ha y a las Pampas de Villacurí a 6 625.51ha.

“Se entiende como “uso actual de las tierras” a la distribución geográfica espacial de las ocupaciones del suelo para funciones agropecuarias y urbanas como vivienda, comercio, industria, servicios, vías, áreas libres, etc. La distribución de usos del suelo óptima es aquella que satisface las necesidades individuales y sociales de los usuarios. La magnitud y la distribución de las áreas existentes en cada ciudad dependen de las características sociales y económicas de la población, antecedentes culturales, tradiciones y densidad de ocupación”, según lo sostiene [55].

Según [55], determinan que estas tierras pueden dividirse en siete categorías.

- Cultivos transitorios.
- Cultivos semi permanentes.
- Cultivos permanentes.
- Cultivos asociados.
- Granjas.
- Terrenos en barbecho.
- Terrenos en descanso.

Las cuatro primeras (04) corresponden a tierras actualmente cultivadas, mientras que las tres (03) categorías restantes comprenden las tierras no cultivadas. Adicionalmente se han delimitado tierras que tienen usos diferentes al agrícola, tales como:

- Terrenos de zonas urbanas y/o instalaciones privadas.
- Otros terrenos.
- Franja ribereña.

En la siguiente tabla se muestra la cantidad de área y porcentaje de uso actual de la tierra, tanto en el valle de Ica como en la Pampa de Villacurí.

TABLA 13
USO ACTUAL DE LA TIERRA EN EL VALLE DE ICA Y EN LAS PAMPAS
DE VILLACURI

	CATEGORIAS DE CULTIVOS	VALLE DE ICA		VILLACURI		TOTAL	
		(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
1	Cultivos Transitorios	1 711,17	4,24	304,09	4,59	2 015,25	4,29
2	Cultivos Semipermanentes	16 639,70	41,2	3 785,23	57,13	20 424,93	43,46
3	Cultivos Permanentes	3 502,83	8,68	1 261,22	19,04	4 764,05	10,13
4	Cultivos Asociados	4 671,33	11,57	--..--	--..--	4 671,33	9,94
5	Terrenos en descanso y similares.	7 194,02	17,82	1 269,43	19,16	8 463,45	18,00
6	Infraestructura Agrícola	618,63	1,53	--..--	--..--	618,63	1,32
7	Áreas Urbanas, rurales libres, etc.	6 038,73	14,96	5,54	0,08	6 044,27	12,86
	TOTAL	40 376,40	100	6 625,51	100	47 001,91	100

Fuente: E. Chávarri. 2000. ATA – SWECO. Balance hidrológico integral de la cuenca del río Ica. Instituto Nacional de Recursos Naturales - Dirección General de Aguas y Suelos - ATDR Ica. Perú.

1.2.10.7.- La fertilización fosfatada en los suelos cultivados en el valle de Ica.

Para la fertilización fosfatada en los suelos cultivados del valle de Ica, en los diferentes cultivos tradicionales, así como en los de agro exportación, requiere conocer el índice de suficiencia y los niveles críticos del elemento fósforo medido en un análisis químico del suelo.

La historia y la cronología de un suelo en cuanto a las aplicaciones recibidas ya sea vía fertilizantes mineral o abonos orgánicos, señala el nivel de enriquecimiento del suelo en este elemento, que tiene sus características muy peculiares sobre todo en su movimiento en el suelo.

“El fósforo tiene la tendencia de unirse con los primeros elementos que encuentra en el suelo, lo que resulta en una relación débil o en una unión permanente. Para obtener fósforo disponible, la planta debe disolver esta unión a través de la excreción de ácidos en la rizósfera, que es el ambiente inmediato que rodea a la raíz (aproximadamente 2-3 milímetros). La cantidad de fósforo disponible en el suelo depende de tres factores principales: la cantidad total de fósforo en el suelo, el tipo de unión que se ha establecido, lo que puede autorizar o no su solubilidad, y la efectividad del sistema radicular de la planta, incluyendo la longitud y la calidad de sus raíces”.

En la tabla 14, aparecen algunas recomendaciones de fertilización fosfatada con la finalidad de servir como una guía orientativa sobre los cálculos de fertilizantes a ser aplicados en un determinado cultivo, que se aplicarían dependiendo del tipo de suelo, del grado de suficiencia nutrimental, así como del nivel crítico para este elemento en el suelo. En la realización de estos cálculos se debe tener presente que, en los diferentes cultivos, sean estos tradicionales o de agro exportación se requiere adicionalmente el aporte de otros nutrientes importantes requeridos por los cultivos, tales como nitrógeno y potasio entre los principales

TABLA 14
DOSIS DE FERTILIZACION FOSFATADA SUGERIDAS PARA UN
RENDIMIENTO OPTIMO DE CULTIVOS EN EL VALLE DE ICA

Índice de Suficiencia o Nivel Crítico (mg.Kg⁻¹)*	Interpretación del Parámetro	Rango de Aplicación de P₂O₅ (kg.há⁻¹)	Superfosfato Triple de Calcio o Fosfato di Amónico (kg.há⁻¹)
Cultivos Tradicionales			
0 – 7	Bajo	100 – 150	217 – 326
7 – 14	Medio	80 – 100	174 - 217
Más de 14	Alto	40 – 80	87 – 174
Cultivos de Agro Exportación			
0 – 7	Bajo	150 – 200	326 – 435
7 – 14	Medio	100 – 150	217 – 326
Más de 14	Alto	80 – 100	174 – 217

*Fósforo medido mediante el método de Olsen modificado.

Los fertilizantes fosfatados en los cultivos tradicionales son aplicados generalmente en una sola dosificación durante el periodo vegetativo de los cultivos, mientras que en los cultivos de agro exportación por la misma tecnología de riego empleada las dosificaciones de este elemento se hacen en forma fraccionada, teniendo en cuenta que, con esta última técnica, se ha incrementado la eficiencia de uso del elemento fósforo por parte los cultivos y por ende los rendimiento cuantitativos y cualitativos de los cultivos por unidad de área.

Respecto a las alternativas de uso de fertilizantes fosfatados en los suelos cultivados en el valle de Ica, se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 15
PRINCIPALES FERTILIZANTES FOSFATADOS UTILIZADOS EN LOS
SUELOS CULTIVADOS DEL VALLE DE ICA

Fertilizantes	Contenido de Nutrientes (%)			Reacción en el Suelo (pH)
	Nitrógeno (N)	Fósforo (P₂O₅)	Potasio (K₂O)	
SIMPLES				
Superfosfato Triple de Calcio	---	46	---	Neutra
Superfosfato Simple de Calcio	---	20	---	Neutra
Superfos 24	---	24	---	Neutra
COMPUESTOS				
Fosfato di amónico	18	46	---	Acida
Fosfato mono amónico	12	61	---	Acida
Fosfato mono potásico	---	52	34	Acida
LIQUIDOS				
Ácido Fosfórico (85%)	---	61	---	Acida

Fuente: Oficina de Información Agraria – DRA – GORE Ica, 2012.

1.3.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.3.1.- Delimitación del problema

“En el mundo, los fertilizantes fosfatados son producidos a partir de la roca fosfórica, constituyen en la actualidad en el valle de Ica, la mayor entrada de cadmio al suelo. Los fertilizantes fosfatados constituyen más del 50% de la entrada total de cadmio al suelo” [56].

“En los países de los Estados Miembros de la Comunidad Europea, la adición de cadmio, vía fertilizantes fosfatados a la carga total de cadmio en tierras arables y praderas fue de 74 y 44% respectivamente. En éstos países, la entrada promedio de cadmio en los suelos agrícolas, a partir de los fertilizantes fosfatados en 1989 fue de aproximadamente de 2,5 g de cadmio anuales por hectárea” [7].

“En la agricultura, la principal entrada de cadmio a los suelos, es el uso de fertilizantes fosfatados por ello, su aplicación en el Perú y más específicamente en el valle de Ica, año a año en los cultivos estaría generando una acumulación de cadmio en el suelo, que, en el mediano y largo plazo, provocará el deterioro de este recurso natural y eventualmente afectaría a la salud humana” [35].

1.3.2.- Formulación del problema

La acumulación de sustancias en un suelo puede llevar a su degradación, al afectar negativamente su comportamiento. Cuando las concentraciones de estas sustancias alcanzan niveles tóxicos para los organismos del suelo y las plantas, se produce una degradación química que puede provocar una pérdida parcial o total de la productividad del suelo.

El cadmio tiene una gran capacidad de absorción por parte de la materia orgánica del suelo, lo que puede tener un impacto negativo en el medio ambiente. En suelos ácidos, este elemento puede ser fácilmente tomado por las plantas, lo que representa un riesgo potencial para la salud humana y animal si se consumen estos productos contaminados.

Cuando la concentración de este elemento es alta en el suelo, existe una alteración en los procesos microbiológicos del suelo que pueden amenazar el buen funcionamiento del medio.

“La formulación de un problema de investigación puede formularse en forma proposicional, como ya se ha hecho y también puede hacerse en forma interrogativa” [57]. En este último caso podemos plantearnos las siguientes interrogantes:

- ¿De qué manera los fertilizantes fosfatados inciden en la contaminación por Cadmio en suelos cultivados de uso agrícola en Ica?

- ¿De qué manera los fertilizantes simples fosfatados inciden en la contaminación por Cadmio en suelos cultivados de uso agrícola en el valle de la provincia de Ica?

- ¿De qué manera los fertilizantes compuestos fosfatados inciden en la contaminación por Cadmio en suelos cultivados de uso agrícola en el valle de la provincia de Ica?

En tal sentido es que el presente ensayo de investigación fue proyectado con la finalidad de determinar experimentalmente mediante el uso de un modelo de muestreos de suelos establecidos aleatoriamente en las zonas agrícolas del valle de Ica, con la finalidad de estudiar la contaminación por cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica.

1.4.- JUSTIFICACIÓN EN IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1.- Justificación

Teniendo en consideración los altos fines de la investigación agrícola, cuyo objetivo principal es lograr que el agro sea una actividad saludable, rentable, competitiva y sostenible a niveles internacionales con característica de empresa moderna y que contribuya a elevar el ingreso de los productores y la salubridad de los consumidores, ya que en los últimos años y ante la crisis generalizada que vive el agro peruano se hace urgente y necesario la búsqueda de nuevas alternativas de producción con la correcta aplicación de todos y cada uno de los factores que intervienen en el proceso productivo total de un determinado cultivo.

1.4.2.- Importancia

La importancia de esta investigación se sustenta bajo dos puntos de vista:

1.- Es necesaria para concientizar técnica y ambientalmente a autoridades y técnicos encargados del manejo de los fertilizantes fosfatados en el ámbito local, regional y nacional, así como brindarles aportes en forma de apreciaciones, conclusiones y recomendaciones que les puedan servir para comprender y mejorar aún más la gestión integrada del manejo racional de los fertilizantes fosfatados en la región.

2.- Será conveniente y relevante para los encargados del Gobierno Nacional responsable de normar las concentraciones de cadmio y otros elementos pesados que deben contener los fertilizantes fabricados a partir del uso de la roca fosfórica como materia prima primaria y de esta manera evitar el impacto de la contaminación de cadmio en los suelos, y el deterioro de la salud humana y el medio ambiente en un futuro próximo.

1.5.- HIPÓTESIS Y VARIABLES

1.5.1.- Hipótesis

1.5.1.1.- General

- Existe riesgo de contaminación de los suelos por cadmio por efecto del uso de los fertilizantes fosfatados a través del tiempo en los suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica.

1.5.1.2.- Específicas

- Los fertilizantes simples fosfatados inciden significativamente en la contaminación por cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica.

- Los fertilizantes compuestos fosfatados inciden significativamente en la contaminación por cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica.

1.5.2. Variables

1.5.2.1.- Variables independientes (X):

X₁- Las aplicaciones a través del tiempo de los fertilizantes fosfatados.

1.5.2.2.- Variables dependientes (Y):

Y₁- Contaminación por cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica.

Y₂ – Dosis de aplicación de los fertilizantes fosfatados en los cultivos instalados en suelos de uso agrícola en el valle de Ica.

Y₃ – Manejo agronómico de los cultivos cultivados en suelos de usos agrícola en el valle de Ica.

1.5.2.3.- Variables intervinientes (Z):

Z₁- Recursos naturales, el suelo, el agua y el clima.

Z₂- El ambiente. Condiciones y características

❖ Indicadores:

- Incremento de las aplicaciones de fertilizantes fosfatados a los suelos cultivados de usos agrícola.

- Contaminación de los suelos cultivados de uso agrícola por cadmio.

1.6.- OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1.- Objetivo general

- Determinar de qué manera los fertilizantes fosfatados inciden en la contaminación por Cadmio en suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica.

1.6.2.- Objetivos específicos

- Determinar de qué manera los fertilizantes fosfatados simples inciden en la contaminación por Cadmio en suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica.

- Determinar de qué manera los fertilizantes fosfatados complejos inciden en la contaminación por Cadmio en suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica.

CAPITULO II

2.0.- ESTRATEGIA METODOLOGICA

2.1.- Lugar de ejecución de la investigación

La investigación no experimental fue ejecutada a nivel del valle de la provincia de Ica, abarcando su totalidad, es decir en las tres zonas agroclimáticas del valle viejo (Zona alta, media y baja) y el valle nuevo (Pampa de Villacurí).

2.2.- Tipo, nivel y diseño de la investigación

“La presente investigación, fue de tipo **no experimental**, porque no se manipularon de manera intencional una o más variables independientes (causas) para analizar las consecuencias de tal manipulación sobre una o más variables dependientes (efectos), **longitudinal**, porque se recabaron datos en diferentes puntos del tiempo para realizar inferencias acerca del Cadmio, sus causa y sus efectos, **evolutiva**, porque se examinaron cambios a través del tiempo, en muestra de una población vinculados de alguna manera o identificados por una característica común y **descriptiva**, porque se buscó especificar propiedades, características, rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. La meta será describir fenómenos, situaciones, contenidos y eventos, esto es detallar, como son y cómo se presentan”. [57].

Constó de dos fases:

- **Fase descriptiva y de gabinete**

Consistió en la recopilación y análisis de la información obtenida de la consulta de publicaciones científicas y de la realización de entrevistas a especialistas y técnicos en la materia, así como a los productores de las zonas mencionadas.

Se consultaron publicaciones de centros físicos (bibliotecas) y virtuales (bibliotecas electrónicas en Internet), así mismo se consultó bases estadísticas de producción, importación, comercialización de fertilizantes fosfatados y estadísticas de áreas sembradas y de la caracterización de la producción de los cultivos en el valle de Ica.

- **Fase cuantitativa**

Consistió en cuantificar el impacto de la contaminación de los suelos por cadmio en suelos cultivados de usos agrícola, por efecto de las aplicaciones en el tiempo de los fertilizantes fosfatados. Para ello se hicieron muestreos estratificados y luego análisis químico de las muestras de suelo a dos profundidades (0,00 – 0,03 m y de 0,30 – 0,60 m.) de 20 escenarios (40 muestras por analizar químicamente) dentro de la jurisdicción del valle de Ica, (Zona alta, media y baja, y la Pampa de Villacurí).

Dichas muestras fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina en Lima Perú, para la realización del análisis respectivo de la concentración de cadmio en los suelos.

2.3.- Población y muestra

2.3.1.- Población

Para efectos de la presente investigación, la población estudiada estuvo representada por el total del área de suelos cultivados con aptitud agrícola en el valle de la provincia de Ica, los mismos que se encuentran localizados en las tres zonas agroclimáticas del valle de Ica, es decir en la zona alta, media y baja, incluyendo los suelos del sector de la Pampa de Villacurí, conocida como el valle nuevo.

2.3.2.- Muestra

La muestra en este ensayo no experimental estuvo representada por un 10% del área total de suelos cultivados con aptitud agrícola (Población), en cada zona agroclimática, en la cual se conducen cultivos intensivos tradicionales y de agroexportación.

2.4.- Técnicas de recolección de la información

Los métodos de investigación son procesos sistemáticos que permiten ordenar la actividad de manera formal y alcanzar los objetivos propuestos. Es fundamental destacar que los métodos de recolección de datos se refieren al medio a través del cual el investigador se relaciona con los participantes para obtener la información necesaria que le permita alcanzar los objetivos de la investigación.

De modo que para recolectar la información se tuvo presente lo siguiente:

1°. Selección de un instrumento de medición el cual debe ser válido y confiable para poder aceptar o rechazar los resultados.

2°. Aplicar dicho instrumento de medición.

3°. Organizar las mediciones obtenidas, para poder analizarlas.

En tal sentido la recolección de la información, son todas las formas posibles de que se vale el investigador para obtener la información necesaria en el desarrollo de la investigación. Están referidas, entonces, al procedimiento, condiciones y lugar de recolección de datos.

Las técnicas empleadas en la recolección de datos en esta investigación fueron:

2.4.1.- Recolecciones físicas

2.4.1.1.- Los cuestionarios

Los cuestionarios son herramientas específicas que se utilizan para recopilar información y opiniones de las personas que los completan. Estos documentos suelen contener una serie de preguntas cerradas o abiertas que buscan obtener datos específicos y relevantes para la investigación en cuestión. Los cuestionarios pueden ser aplicados en diferentes formatos, como en papel o digital, y pueden ser utilizados en distintas disciplinas y áreas de estudio.

El método utilizado para obtener información en este caso fue a través de técnicos acreditados y agricultores, quienes proporcionaron su opinión, actitudes y sugerencias. Este proceso se llevó a cabo mediante dos métodos: la entrevista y el cuestionario. A través de ellos se recolectaron datos sobre actitudes, creencias, comportamientos y características de las personas que trabajan en la institución objeto de estudio.

Como los cuestionarios pueden ser de dos tipos: abiertos y cerrados, en este caso hemos utilizado preguntas cerradas para obtener información basada en hechos reales limitando la forma de responder del encuestado, es decir, los cuestionarios contuvieron preguntas no estructuradas.

2.4.1.2.- Técnica del fichaje.

También se utilizó la técnica de fichaje que nos permitió recoger en forma física información teórica de las fuentes bibliográficas referidas a nuestros antecedentes y marco teórico. En ellas registramos los asientos bibliográficos de las fuentes, citas textuales, etc.

2.4.2.- Recolecciones virtuales

2.4.2.1.- La encuesta

Este método consistió en obtener información de los recursos de estudio, proporcionados por expertos en el tema y agricultores, sobre opiniones, actitudes o sugerencias. Hay dos maneras de obtener información con este método: la entrevista y el cuestionario.

2.4.2.2.-La entrevista.

La entrevista es un método de comunicación directa entre el investigador y el entrevistado, en el que se plantean preguntas específicas sobre el tema en cuestión con el objetivo de obtener respuestas verbales detalladas y completas. Este método se considera más eficaz que el cuestionario, ya que permite aclarar cualquier duda o malentendido sobre la pregunta y obtener una información más completa y detallada. Además, a través de la entrevista se puede explicar claramente el propósito del estudio y asegurar una mejor respuesta.

2.4.3. Otras técnicas utilizadas

2.4.3.1. Técnica de tabulación de resultados

El proceso de recopilación de datos mediante cuestionarios se siguió de una etapa de tabulación y análisis con el propósito de obtener resultados cuantitativos y cualitativos relacionados con los temas de estudio. Para llevar a cabo esta tarea, fue necesario codificar previamente las respuestas obtenidas. Se realizaron diversas operaciones como la tabulación, la codificación y el diseño de gráficos, utilizando información sobre aspectos biográficos, de uso y de opinión. Los resultados se presentan en forma de tablas y gráficos que muestran las relaciones existentes entre las distintas variables analizadas. Tras la recopilación de información, se obtuvo una gran cantidad de datos referentes a diferentes variables. El primer paso para el análisis de datos fue su organización con el fin de visualizar las características de los valores observados. Cabe destacar que la organización de los datos varía en función del tipo de variable que se esté analizando.

2.4.3.2.- Técnica de juicio de profesionales expertos

Para la elaboración de los instrumentos de acopio de la información y cumplir con los fines de la presente investigación, hemos recurrido al juicio de expertos en la materia, de manera que por una parte, recibimos las orientaciones de los profesionales requeridos y por otra, de los Docentes, así como del asesor de la presente investigación, todos ellos pertenecientes al staff de docentes de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional “San Luis Gonzaga” y que, desde hace más de dos décadas, vienen desarrollando las asignaturas relacionadas con la investigación científica.

Luego de haber construido los instrumentos de obtención de la información, los sometimos a una evaluación previa aplicándolos a la investigación. La realización de este estudio se caracterizó porque los instrumentos se aplicaron simultáneamente, de manera que no existió la posibilidad de que los profesionales requeridos tuvieran conocimiento previamente acerca de la información contenida en el instrumento. Luego procedimos a hacer un análisis comparativo entre los resultados obtenidos y fundamentalmente, sobre la claridad de redacción de los instrumentos de recolección.

2.5.- Instrumentos de recolección de datos

Para fines de recolectar la información, se hizo uso de los siguientes instrumentos de investigación, los mismos que facilitaron la recolección, tabulación, análisis químicos y matemáticos e interpretación de los resultados obtenidos en las diferentes variables en estudio en el presente ensayo de investigación.

Es esencial que el instrumento de investigación que se ha de utilizar en el estudio de evaluación específico, esté en perfecta consonancia con las metas y los objetivos de la investigación. Esto, a su vez, tendrá que ver con el producto (informe) del proyecto.

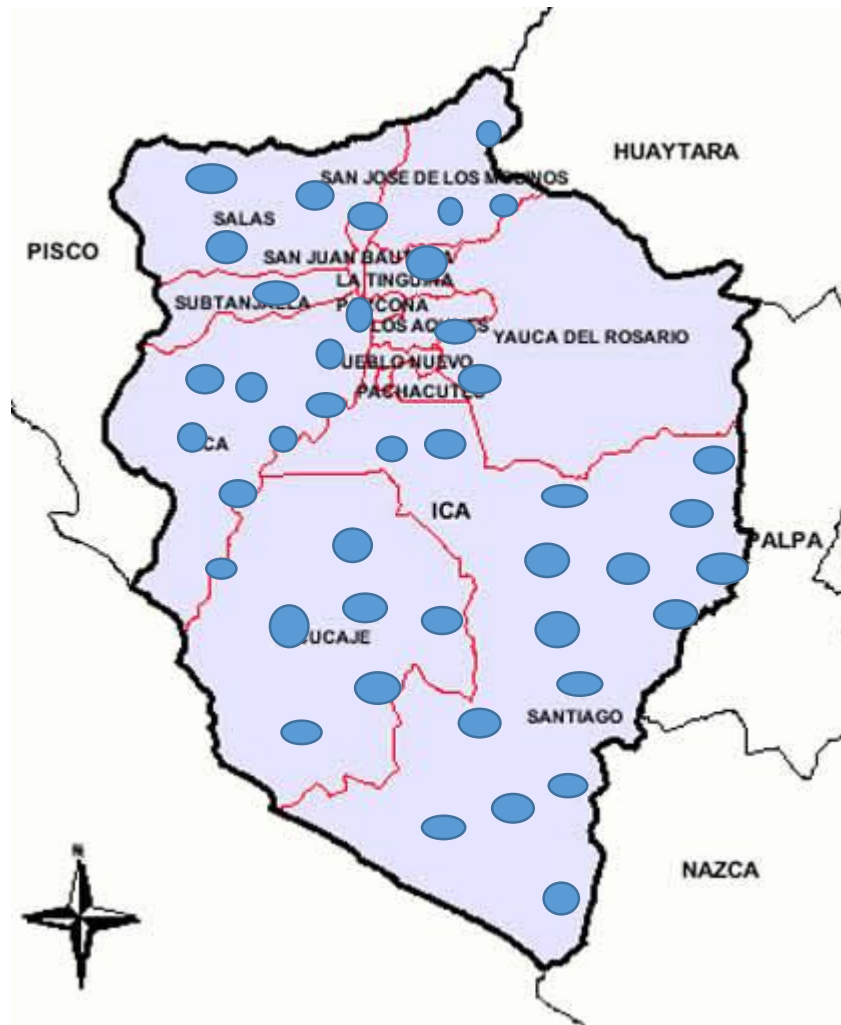


Figura 8. Ubicación de los puntos de muestreo de suelos en el valle viejo de Ica. ●

Los instrumentos de investigación o fuentes de información estuvieron constituidos por:

- Análisis de la información física y virtual sobre el tema de investigación.
- Registro, análisis, validación e interpretación de las técnicas de recolección de la información usadas en la presente investigación.
- Información sobre estadística de importación de fertilizantes proporcionada por la Unidad de Análisis Económicos de Oficina de Estudios Económicos y Estadísticos (OEEE) del Ministerio de Agricultura y Riego del Perú (MIDAGRI).

- Información sobre la superficie instalada de los principales cultivos en el valle de Ica, proporcionados por la Dirección de Información Agraria de la Dirección Regional Agraria del Gobierno Regional de Ica. (DIA - DRA – GORE ICA).

- Relación de empresas agro exportadoras en el valle de Ica, proporcionadas por la Dirección de Información Agraria de la Dirección Regional Agraria del Gobierno Regional de Ica. (DRA – GORE ICA).

- Resultados de los análisis químicos de suelos cultivados en el valle de Ica, con respecto a la presencia de cadmio en la capa arable. (LAQSPAF - Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima - Perú).

- Las series de suelos cultivados en el valle de Ica, (Ica y Villacurí), proporcionados mediante el Inventario, Evaluación y Uso Racional de los Recursos Naturales de la Costa, Cuenca del Río Ica, editado por la ex Oficina nacional de Recursos Naturales (ONERN), luego el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), hoy la Dirección de Recursos Naturales del Ministerio de Agricultura.

- Bibliografía sobre metodología de la investigación, así como de estadística matemática y descriptiva.

- Interpretación de los resultados de los análisis de suelos de cadmio de acuerdo a las directivas del Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM). Todos estos instrumentos de investigación documental, físicos y virtuales, me ha permitido desarrollar las habilidades para buscar, identificar y evaluar las fuentes de información impresa o en línea que he requerido para la culminación de la presente investigación.

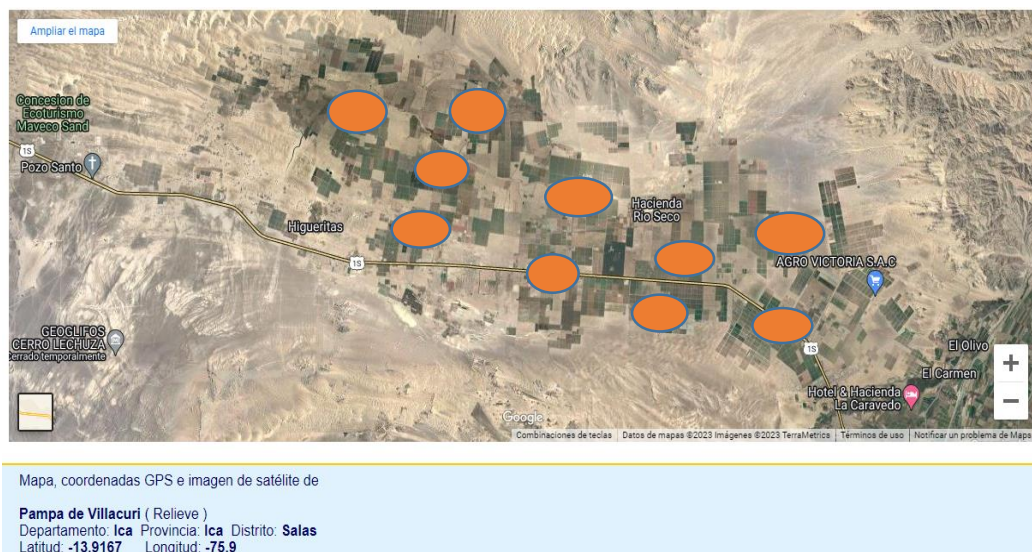


Figura 9. Ubicación de los puntos de muestreo de suelos en el valle nuevo de Ica (Villacurí).

2.6.- Técnicas de análisis e interpretación de los datos

Desde este punto de vista y teniendo en cuenta que la evaluación del parámetro de la contaminación de cadmio en los suelos cultivados de usos agrícola en el valle de Ica, se hicieron mediante la ejecución e interpretación de los resultados obtenidos, para lo cual se utilizaron técnicas estadísticas e interpretativas que se sustentan en la recolección, tabulación y presentación de los resultados obtenidos en la presente investigación, tales como:

- Tablas (Simples y de doble entrada).
- Figuras
- Pictogramas
- Mapas de ubicación geográfica
- Gráficos (De barras, histogramas, circulares, de líneas y polígonos de frecuencias).

El análisis de datos se centró en llegar a una conclusión basada únicamente en lo que ya es conocido por el investigador. La forma en que recopila sus datos debe relacionarse con la forma en que está planeando analizarla y utilizarla, también hay que asegurarse de recopilar información precisa en la que puedas confiar, para ello existen muchas técnicas de recolección de datos.

El análisis, es un conjunto de manipulaciones, transformaciones, operaciones, reflexiones, comprobaciones que realizamos sobre los datos con el fin de extraer significado relevante en relación a un problema de investigación. Analizar datos supondrá examinar sistemáticamente un conjunto de elementos informativos para delimitar partes y descubrir las relaciones entre las mismas y las relaciones con el todo. Persigue alcanzar un mayor conocimiento de la realidad estudiada y, en la medida de lo posible, avanzar mediante su descripción y comprensión hacia la elaboración de modelos conceptuales explicativos, mientras que los datos son entendidos como interacciones, situaciones, fenómenos u objetos de la realidad estudiada, que el investigador recoge a lo largo de su proceso de investigación y que poseen un contenido informativo útil para los objetivos perseguidos en la misma.

El investigador construye los datos y al hacerlo registra la información en algún soporte físico (notas de campo, grabación de audio o vídeo). El dato soporta una información sobre la realidad, implica una mayor o menor elaboración conceptual de la misma.

“La interpretación de los resultados obtenidos de la concentración del cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica, se realizó en base a una tabla de interpretación basada en el límite máximo permisible(LMP) para este elemento, según según el Codex Alimentarius, la OMS/FAO y el Ministerio del Ambiente del Perú (Fuente: Guía para muestreo de suelos, en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelos del Ministerio del Ambiente del Perú)”.

TABLA 16
INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS DE LA CONCENTRACION DE
CADMIO EN LOS SUELOS

Nº	CONCENTRACION DE CADMIO EN EL SUELO (mg. kg ⁻¹)	INTERPRETACION
1	< 1.40	Normal
2	>1,40 – 3,00	Alto
3	>3,00	Muy Alto

“La concentración de Cadmio en los vegetales ha sido relacionada con la cantidad del metal presente en el suelo, y ha sido observado que estos niveles han aumentado a lo largo de los últimos años, incluso en zonas naturales no industrializadas ni urbanizadas. La acumulación ocurre de manera continua, sin un umbral definido como en el caso de otros metales como el plomo, y esto ocurre a concentraciones tan bajas como 0.3ppm en el suelo. Todos los alimentos de origen vegetal están ligeramente contaminados de forma sistemática, con niveles que varían desde 5ppb hasta un máximo de 100ppb. La contaminación puntual es despreciable”.

“La producción de fertilizantes fosfatados es una fuente importante de emisión de cadmio (Cd), y una vez que se aplica en los campos de cultivo, parte del cadmio terminará en el suelo, mientras que el resto se filtrará en las aguas superficiales cuando los residuos del fertilizante son vertidos. En suelos ácidos, la toma de cadmio por las plantas aumenta, lo que puede ser perjudicial para los animales que se alimentan de plantas, ya que el cadmio puede acumularse en sus cuerpos”.

CAPITULO III

3.0.- RESULTADOS

TABLA 17
RESULTADOS DEL ANALISIS QUIMICO DE LA CONCENTRACION DE CADMIO
EN LOS SUELOS CULTIVADOS EN EL VALLE DE ICA – ZONA ALTA

ZONA	Nº	JURISDICCION (Poblado)	PROFUNDIDAD (m)	CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN EL SUELO (mg.kg ⁻¹)	INTERPRETACION
	1	Trapiche	0,00 – 0,30	3,35	Muy Alto
			0,30 – 0,60	4,40	Muy Alto
A	2	Chavalina	0,00 – 0,30	2,45	Alto
			0,30 – 0,60	3,10	Muy Alto
L	3	Los molinos	0,00 – 0,30	3,20	Muy Alto
			0,30 – 0,60	3,43	Muy Alto
T	4	Santa Rosa	0,00 – 0,30	2,35	Alto
			0,30 – 0,60	2,55	Alto
A	5	Santa Bárbara	0,00 – 0,30	3,50	Muy Alto
			0,30 – 0,60	3,62	Muy Alto
SUMATORIA (Σ)				31,95 mg.kg ⁻¹	
PROMEDIO (x̄)				3,195 mg.kg ⁻¹	

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima – Perú, 2021.

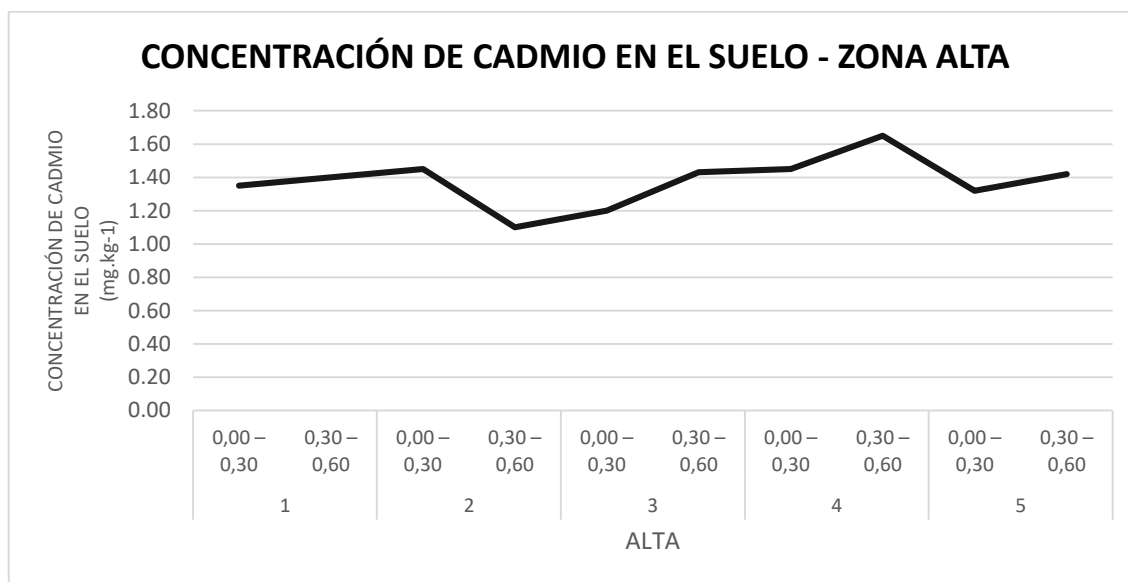


Figura 10. Contenidos de la concentración de cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en la zona alta del valle de Ica

TABLA 18
RESULTADOS DEL ANALISIS QUIMICO DE LA CONCENTRACION DE CADMIO
EN LOS SUELOS CULTIVADOS EN EL VALLE DE ICA – ZONA MEDIA

ZONA	N°	JURISDICCION (Poblado)	PROFUNDIDAD (m)	CONCENTRACIÓN DE CADMIO (mg.kg ⁻¹)	INTERPRETACION
M	1	Tacama	0,00 – 0,30	3,35	Muy Alto
			0,30 – 0,60	3,40	Muy Alto
E	2	Subtanjalla	0,00 – 0,30	3,45	Muy Alto
			0,30 – 0,60	3,10	Muy Alto
D	3	La Tinguña	0,00 – 0,30	2,20	Alto
			0,30 – 0,60	2,43	Alto
I	4	Ica	0,00 – 0,30	2,45	Alto
			0,30 – 0,60	2,65	Alto
A	5	Parcona	0,00 – 0,30	2,50	Alto
			0,30 – 0,60	3,42	Muy Alto
SUMATORIA (Σ)				28,95 mg.kg ⁻¹	
PROMEDIO (x̄)				2,895 mg.kg ⁻¹	

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima – Perú, 2021.

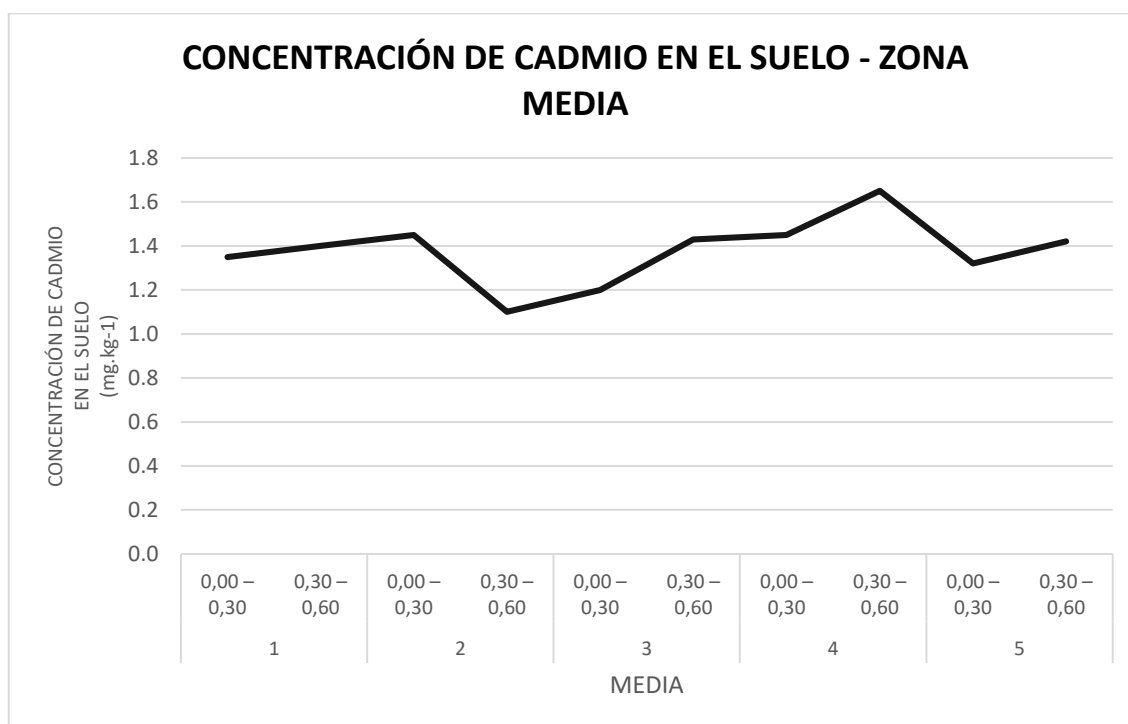


Figura 11. Contenidos de la concentración de cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en la zona media del valle de Ica

TABLA 19
RESULTADOS DEL ANALISIS QUIMICO DE LA CONCENTRACION DE CADMIO
EN LOS SUELOS CULTIVADOS EN EL VALLE DE ICA – ZONA BAJA

ZONA	Nº	JURISDICCION (Poblado)	PROFUNDIDAD (m)	CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN EL SUELO (mg.kg ⁻¹)	INTERPRETACION
	1	Los Aquijes	0,00 – 0,30	3,29	Muy Alto
			0,30 – 0,60	3,99	Muy Alto
B	2	Pueblo Nuevo	0,00 – 0,30	3,17	Muy Alto
			0,30 – 0,60	4,19	Muy Alto
A	3	Santiago	0,00 – 0,30	4,51	Muy Alto
			0,30 – 0,60	3,98	Muy Alto
J	4	La Venta	0,00 – 0,30	4,83	Muy Alto
			0,30 – 0,60	4,62	Muy Alto
A	5	Ocucaje	0,00 – 0,30	3,07	Muy Alto
			0,30 – 0,60	3,83	Muy Alto
SUMATORIA (Σ)				49,93 mg.kg ⁻¹	
PROMEDIO (x̄)				4,993 mg.kg ⁻¹	

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima – Perú, 2021.

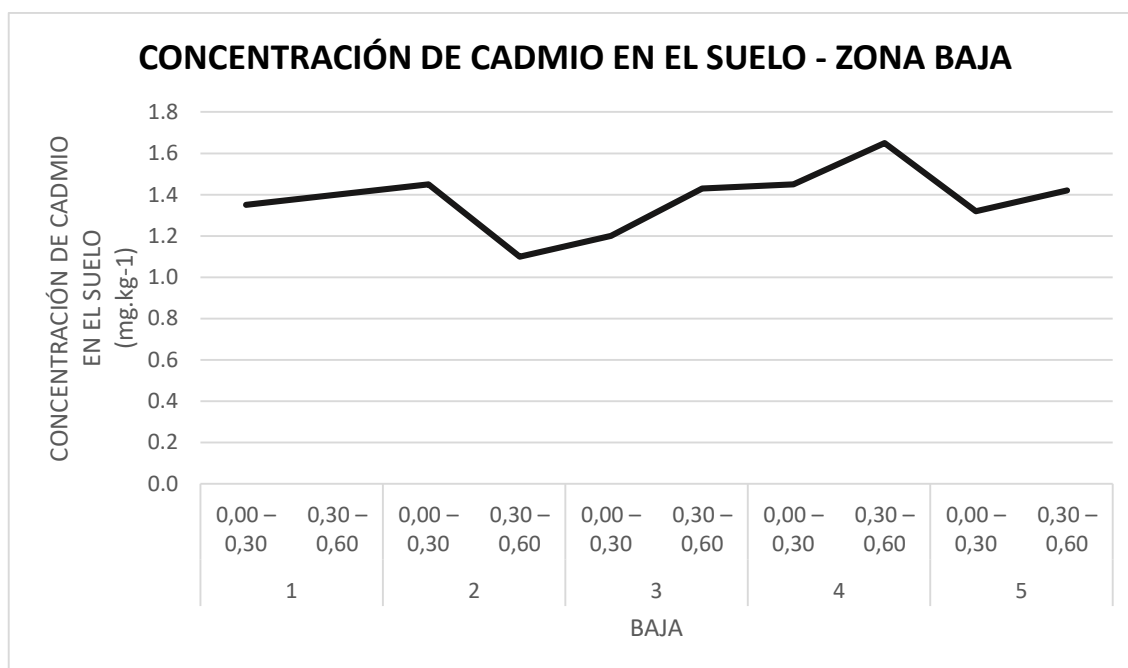


Figura 12. Contenidos de la concentración de cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en la zona baja del valle de Ica

TABLA 20
RESULTADOS DEL ANALISIS QUIMICO DE LA CONCENTRACION DE CADMIO
EN LOS SUELOS CULTIVADOS EN EL VALLE DE ICA – ZONA DE VILLACURI

ZONA	N°	JURISDICCION (Poblado)	PROFUNDIDAD (m)	CONCENTRACIÓN DE CADMIO EN EL SUELO (mg.kg ⁻¹)	INTERPRETACION
V	1	Expansión	0,00 – 0,30	1,35	Normal
		Guadalupe	0,30 – 0,60	1,40	Normal
I	2	Villacurí	0,00 – 0,30	1,45	Alto
		Norte	0,30 – 0,60	1,10	Normal
L	3	Villacurí	0,00 – 0,30	1,20	Normal
		Norte	0,30 – 0,60	1,43	Alto
C	4	Villacurí	0,00 – 0,30	1,45	Alto
		Norte	0,30 – 0,60	1,65	Alto
R	5	Rio Seco	0,00 – 0,30	1,32	Normal
		Rio Seco	0,30 – 0,60	1,42	Alto
SUMATORIA (Σ)				13,77 mg.kg ⁻¹	
PROMEDIO (x̄)				1.377 mg.kg ⁻¹	

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Aguas, Plantas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima – Perú, 2021.

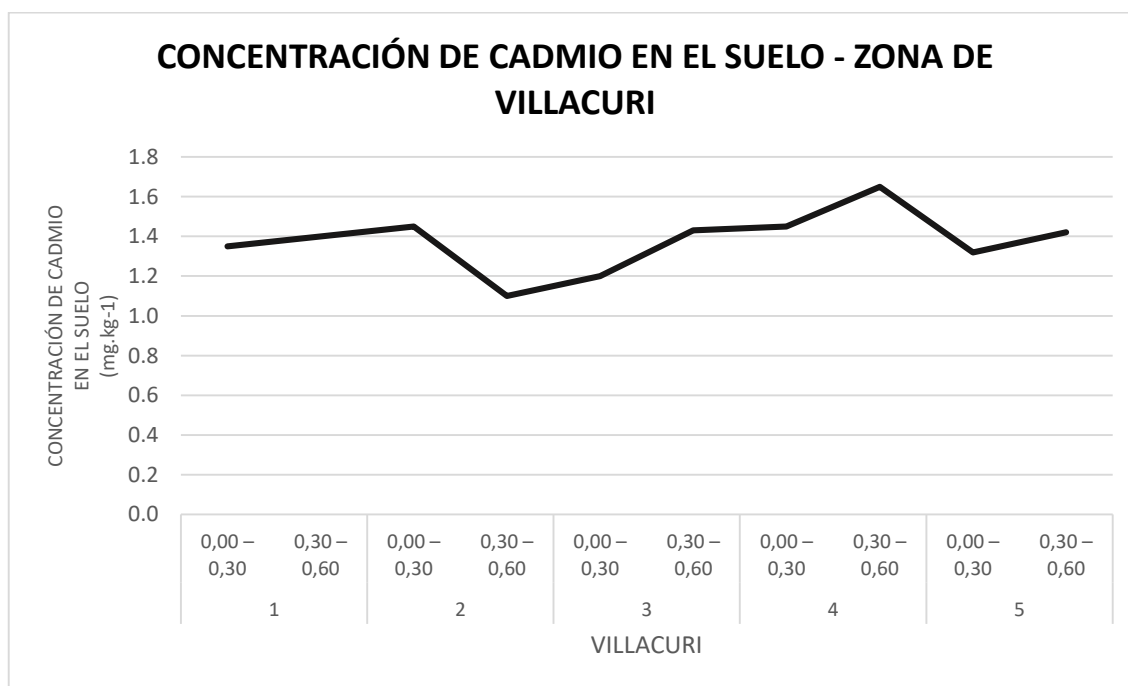


Figura 13. Contenidos de la concentración de cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en la zona de Villacurí del valle de la provincia de Ica.

CAPITULO IV

4.0.- INTERPRETACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La evaluación y conocimiento de la contaminación por metales pesados en el suelo es de interés por sus posibles efectos en la cadena trófica. En la provincia de Ica, (Perú) existen prácticamente cultivos de agroexportación, como el arándano, la palta, la uva de mesa, los cítricos, hortalizas varias, pero también se siguen cultivando cultivos tradicionales como leguminosas de grano (Pallar, frijol, garbanzo, etc.), maíz, algodón, papa, etc. Dentro de la provincia se han usado y se continúa utilizando varios tipos de fertilizantes fosfatados, sean estos simples o compuestos, producidos a partir de la roca fosfórica, de procedencia ígnea o sedimentaria, una con más o menos cadmio que la otra. La pertenencia de los suelos a una misma zona agroexportadora tiene como ventaja que todos ellos reciben casi el mismo tratamiento de fertilización, lógicamente dependiendo de las necesidades nutricionales del cultivo, mientras que en aquellas zonas destinadas a cultivos tradicionales reciben fertilizaciones diversas, en muchos casos a criterio del propio agricultor.

“En nuestro país el nivel máximo de cadmio permitido en el suelo agrícola es de 1.4 mg.kg^{-1} (partes por millón), de acuerdo con la regulación de estándares de calidad ambiental (ECA) de suelo agrícola, establecida por el Ministerio del Ambiente. Pero otros países tienen sus propios niveles según sus respectivas legislaciones”.

“Las normas de, por ejemplo, los Estados Unidos o de la Unión Europea, dos de los principales mercados de destino de nuestras exportaciones, son muy estrictas en los niveles exigidos en frutas y hortalizas. Por ejemplo, la Unión Europea ha definido niveles 0.05 ppm de cadmio en frutas como nivel máximo, por lo que es importante realizar un monitoreo permanente para evitar sorpresas”, según lo advierte [51].

“La absorción se incrementa normalmente cuando disminuye el pH o cuando hay una alta concentración de cadmio en la solución del suelo. También cuando hay una deficiente concentración de micronutrientes, como el caso del zinc, y macronutrientes, igualmente como el caso del calcio. En suelos alcalinos, el cadmio puede formar sales solubles, lo que generaría que la planta incremente la absorción de este metal pesado. Por el contrario, se reduce la absorción del cadmio cuando se presenta o se aumenta la concentración de iones” [51].

“Las hortalizas absorben más que las raíces, éstas más que los cereales y estos últimos más que los frutos. En el caso de los tejidos: las hojas absorben más que los granos y éstos más que los frutos y raíces comestibles. Finalmente, las hojas viejas absorben más que las jóvenes”, precisó [51].

4.1.- Interpretación y discusión de los resultados hallados en la zona alta del valle de Ica, de la concentración del contenido de cadmio en suelos cultivados de uso agrícola.

De acuerdo a lo presentado en los resultados, tabla 17, se puede apreciar que, los suelos cultivados de uso agrícola en la zona alta del valle de la provincia de Ica, que el tenor de contaminación de cadmio oscila entre un rango de 2,35 – 4,40 mg.kg⁻¹, con un promedio general para los suelos de la zona de 3,195 mg.kg⁻¹. Es necesario precisar en este caso que el mayor contenido de cadmio en el suelo se encontró en los suelos de la zona de Trapiche con 4,40 mg.kg⁻¹, mientras que el menor tenor fue hallado en los suelos de la zona de la jurisdicción del centro poblado de Santa Rosa, con 2,35 mg.kg⁻¹, los cuales sobrepasan en demasía a límite máximo permisible de cadmio para los suelos que es de 1,4 mg.kg⁻¹, interpretándose dichos contenidos entre altos y muy altos.

Esta circunstancia en lo referente a los contenidos de cadmio hallados en esta zona es explicable, ya que los suelos durante muchos años han sido dedicados a la producción de los cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.) y algodónero (*Gossypium barbadense* L.), a los cuales les era aplicados cantidades irracionales y sin ningún criterio técnico de fertilizantes, dentro de ellos los fosfatados, en la creencia que al aplicar más fertilizantes obtendrían mayores rendimientos de los cultivos.

Una vez que el elemento ha llegado al suelo puede seguir diversas vías en el mismo. Las principales son aquellas que afectan a su difusión a diversos medios por ser las que afectan a la salud humana. El ingreso en las cadenas tróficas puede hacerse mediante la absorción por las plantas o el lavado hacia las aguas freáticas en las que tiene mucho que ver su solubilidad. Otra forma de abandonar el suelo es la volatilización, medio por el cual vuelve al aire, del que en muchos casos procede, y puede tener influencia en la respiración, otra forma de ingreso es en el metabolismo animal.

4.2.- Interpretación y discusión de los resultados hallados en la zona media del valle de Ica, de la concentración del contenido de cadmio en suelos cultivados de uso agrícola.

De acuerdo a lo presentado en los resultados, tabla 18, se puede apreciar que, aquellos suelos cultivados de uso agrícola en la zona media de la provincia de Ica, nos muestra que el contenido de la concentración de cadmio en dichos suelos alcanza un promedio de 2,442 mg.kg⁻¹, moviéndose estas concentraciones entre el rango de 1,40 – 3,40 mg.kg⁻¹.

En este caso es necesario enfatizar que los mayores contenidos de cadmio en los suelos cultivado en esta zona, corresponden a los hallados en la zona de Subtanjalla, con contenidos para ambas profundidades de 3,10 y 3,40 mg.kg⁻¹, y básicamente a los suelos pertenecientes a la ex – CAP Macacona, suelos que fueron destinados por cientos de años al cultivo del algodónero

(*Gossypium barbadense* L.) y al igual que otras zonas se aplicaban cantidades irracionales de fertilizantes fosfatados, sin ningún criterio técnico y menos teniendo en cuenta una de las leyes que rigen la fertilización de los cultivos, la famosa “ley de los rendimientos decrecientes”, cuyo enunciado propuesto por Mitscherlich, quien sustenta que: “a medida que se aumentan las dosis de un elemento fertilizante, disminuyen los incrementos de los rendimientos del cultivo por cada unidad del fertilizante suministrado, hasta llegar a un momento en que los rendimientos, no solo no aumentan, sino que disminuyen”(Fuente: Principios generales de la fertilización. Extraído de :www.tecnico agrícola.es. Consultado el 13 de enero de 2023.), mientras que los suelos trabajados y de más reciente incorporación a las labores agrícolas, como son los suelos de Parcona, son los menos afectados por esta dificultad ambiental.

La retención de metales pesados en el suelo es principalmente a través de su fijación en el complejo de cambio, debido a su carácter catiónico. Este proceso de fijación es regulado por factores como, la concentración relativa del metal en la solución, el tamaño del ion y su hidratación, así como su carga. El mecanismo de fijación es similar al de las bases de cambio. Es importante destacar que la fijación en el complejo de cambio puede ser reversible y, por lo tanto, la liberación de los metales pesados al suelo también es posible bajo ciertas condiciones.

“Una estrategia efectiva para la inmovilización de metales pesados en el suelo es la precipitación del metal en forma de hidróxido o de sal poco soluble. Esta reacción puede resultar en la formación de minerales secundarios de menor solubilidad que las formas libres previas, lo que reduce su movilidad en el suelo. En suelos no contaminados, la formación de minerales secundarios es mínima o nula, pero en suelos contaminados, puede ser una alternativa efectiva. Algunos ejemplos de este proceso incluyen la formación de wulfenita o molibdato de plomo, hidroxipiromorfita o hidroxifosfato de plomo, o franklinita u óxido de cinc e hierro. Este último caso es un ejemplo de coprecipitación de Fe y Zn” [21]).

La eliminación de vegetación del suelo, como ocurre en la agricultura y la ganadería, reduce los niveles de elementos acumulados en el suelo. Sin embargo, si la vegetación no se aprovecha, los elementos permanecen en el suelo. El mayor problema en el primer caso es la integración del elemento en las cadenas tróficas, lo que puede ser más dañino que su permanencia en el suelo. Sin embargo, algunas plantas hiper acumuladoras pueden utilizarse para depurar el suelo, eliminándolas sin consumirlas.

De todo lo expuesto podemos deducir que determinadas condiciones del suelo afectan de manera importante al comportamiento de los metales pesados, entre ellas podemos destacar:

- pH: “La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, Mo, Se y Cr”.

- Textura: “La arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio”.
- Mineralogía de las arcillas: “Regula la actividad de las mismas”.
- Materia Orgánica: “Reacciona con los metales formando complejos de cambio y quelatos. Algunas plantas, de suelos orgánicos, presentan carencia de ciertos elementos como el Cu y el Zn”.
- Capacidad de cambio: “El poder de adsorción de los distintos metales pesados depende de su valencia y del radio iónico hidratado”.
- Condiciones redox: “Modifica los estados de oxidación de los elementos”.
- Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn: “Tienen una alta capacidad de fijar a los metales pesados e inmovilizarlos. Tienen una gran capacidad de adsorber metales divalentes, especialmente Cu, Pb y en menor extensión Zn, Co, Cr, Mo y Ni”.
- Carbonatos: “Precipitan a un buen número de elementos”.
- Salinidad: “Modifica las condiciones físicas del suelo. En ocasiones pueden modificar la solubilidad por efecto de la alta presencia iónica”.

4.3.- Interpretación y discusión de los resultados hallados en la zona baja del valle de Ica, de la concentración del contenido de cadmio en suelos cultivados de uso agrícola.

De acuerdo a lo presentado en los resultados, tabla 19, se puede apreciar que, por los contenidos hallados en esta zona, se trata de los suelos más afectados por la concentración de cadmio, cuyos valores oscilaron entre 3,17 y 4,83 mg.kg⁻¹, contenidos muy altos de este metal pesado y que debe estar afectando, no solo al suelo sino también a los cultivos instalados (Cultivos frutales) o por instalar (Cultivos hortícolas) y además de tener la facilidad de que por los contenidos muy altos del elemento ingresar más rápidamente a la cadena trófica alimenticia, es de destacar que el promedio de la concentración del elemento en la zona baja del valle de la provincia de Ica, se situó en el margen de 4,993 mg.kg⁻¹, casi coincidiendo con los resultados obtenidos por [26] y siendo menores a los obtenidos por [28] en sus respectivos trabajos de investigación..

Bueno en este caso, es destacar el destino agrícola que se les dio a dichos suelos que, por problemas de salinidad, fueron destinados en su mayoría de área al cultivo del algodónero (*Gossypium barbadense* L.), pero sin embargo los agricultores de esa época no reparaban en que todos los fertilizantes inorgánicos son sales y aplicando cantidades irracionales de fertilizantes, específicamente los fosfatados, incrementaban la salinidad, no solo de los suelos, sino que también estaban incorporando e incrementando los tenores de cadmio.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta zona es la de mayor área de cultivos de agroexportación que sustenta la economía de la provincia de Ica, ya que intervienen en un buen porcentaje en la estimación del producto bruto interno (PBI) de la provincia de Ica, por eso es que los pequeños, medianos y empresas dedicadas al rubro agrícola, deberían ya de tomar medidas de remediación de los suelos, sean estas físicas, químicas y/o biológicas.

“La presencia de metales pesados en los suelos es un riesgo importante para la contaminación del medio ambiente, la toxicidad en las plantas y la calidad de los recursos naturales como el agua y los suelos. Esto depende de la toxicidad específica del metal, su capacidad de acumulación, persistencia y biodegradabilidad. La acumulación de metales pesados en las plantas y su posterior transferencia a los animales, incluyendo al ser humano, representa el mayor riesgo en los suelos. La distribución de los metales pesados en los suelos es influenciada por una serie de factores, como el potencial redox, pH, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, nivel de aguas subterráneas y sus fluctuaciones. En la actualidad, se realizan estudios para determinar la concentración de metales pesados en suelos y su presencia en diferentes cultivos de gran importancia para el consumo humano a nivel mundial, como el caso del cadmio”, según lo sostiene [5].

4.4.- Interpretación y discusión de los resultados hallados en la zona de Villacurí del valle de Ica, de la concentración del contenido de cadmio en suelos cultivados de uso agrícola.

De acuerdo a lo presentado en los resultados, tabla 20, se puede apreciar que, a diferencia de las otras zonas de los valles de la provincia de Ica, los suelos de la zona de Villacurí, los mismos que son de reciente incorporación a las actividades agrícolas, por ampliación de la frontera agrícola, se puede notar que el rango en que se mueve el contenido de la concentración de cadmio en los suelos es de 1,10 – 1,45 mg.kg⁻¹, alcanzando un promedio para dicha zona de 1,337 mg.kg⁻¹, sin embargo hay que hacer notar que, si bien es cierto estos suelos tienen aproximadamente unos 40 - 50 años de producción activa e intensiva, ya se está notando el incremento de la concentración de cadmio, esto quizá debido a que en los suelos de Villacurí, una práctica muy implementada, articulada y usada es la fertirrigación, en la cual se trabaja con soluciones ácidas de fertilizantes y como todos conocemos ya, el pH del suelo, es un factor esencial que modela la concentración de cadmio en los suelos. La acidez del suelo puede tener un impacto en la disponibilidad de los metales pesados, y se ha observado que la mayoría de ellos tienden a estar más disponibles en suelos con pH ácido, con excepción de As, Mo, Se y Cr, que se muestran más disponibles en suelos alcalinos. El pH del suelo es un factor relevante en la movilidad del catión, ya que los hidróxidos pueden precipitar en medios de pH moderadamente alto y, en medios muy alcalinos, volver a solubilizarse como hidroxicomplejos. La capacidad de

adsorción de los metales pesados está altamente influenciada por el pH del suelo (y, por tanto, también su solubilidad).

“La aplicación de fertilizantes que contienen niveles de cadmio puede conducir a su acumulación en el suelo, al igual que otros metales. Si las condiciones del suelo son favorables, el cadmio puede ser absorbido por las plantas cultivadas. La presencia del cadmio en los seres vivos puede provocar alteraciones fisiológicas que pueden ser tóxicas, afectando el metabolismo de los microorganismos y plantas y, en última instancia, la fertilidad del suelo”, tal como lo expone [51].

“Una aplicación continuada de fertilizante con cadmio puede hacer que tras varios años se alcancen niveles preocupantes, que a su vez puede irse acumulando en la cadena trófica”, afirma el profesor. No obstante, es importante tener presente que, “los fertilizantes son uno de los nutrientes más importantes para el crecimiento vegetal y sería “inconcebible pensar que no se vayan a usar”, según lo expresado por [51].

CAPITULO V

5.0.- CONCLUSIONES

La presente investigación es una primera aproximación al estudio de la concentración del cadmio en suelos cultivados de uso agrícola en el valle de la provincia de Ica, como consecuencia de las aplicaciones de fertilizantes fosfatados durante y a través del tiempo.

Los metales pesados presentes en el suelo pueden tener un origen diverso, bien sea natural y heredado del material original (litológico), a través de la actividad humana (antropogénico), o puede ser distribuido a través de los horizontes o en partículas del suelo como resultado de transformaciones minerales o procesos edafológicos (edafológico). Las prácticas agrícolas con frecuencia son fuente de contaminación de metales pesados como resultado de impurezas en los fertilizantes aplicados. Otras fuentes incluyen el uso de lodos como enmienda orgánica, la aplicación de residuos sólidos urbanos y el transporte de partículas de la atmósfera.

5.1.- El cadmio es un metal altamente tóxico que tiene la capacidad de provocar daños en diferentes órganos del cuerpo, incluyendo la próstata. Los mecanismos por los cuales actúa siguen siendo objeto de investigación para poder entender mejor sus efectos en la salud. Se presume que la actividad mutagénica del cadmio es baja y que sus efectos en el organismo ocurren por medio de mecanismos indirectos. Se ha identificado que el metabolismo del zinc desempeña un papel relevante en la carcinogénesis inducida por el cadmio. Aunque todavía se necesitan más estudios para determinar de manera definitiva el mecanismo de acción del cadmio. Este metal es un sólido blando con apariencia de color blanco-azul, gris-negro o polvo gris o blanco y se encuentra en la lista de sustancias consideradas extremadamente perjudiciales para la salud de las personas.

5.2.- La sobre exposición al Cadmio puede provocar graves daños en el sistema nervioso central, el sistema cardiovascular, el sistema inmunológico y los riñones. Además, puede afectar el desarrollo neurológico de los fetos en el útero materno y causar daños en el sistema nervioso central de los niños. Los síntomas de la intoxicación pueden incluir temblores, problemas de memoria, cambios de personalidad, irritabilidad y problemas de visión y audición.

5.3. La exposición al cadmio suele ocurrir en lugares donde se fabrican productos que contienen este metal. Sin embargo, la población en general también puede estar expuesta al cadmio al respirar humo de tabaco o al consumir alimentos contaminados con este metal. La exposición prolongada al cadmio puede dañar los pulmones, producir enfermedades renales y causar irritación en el tracto gastrointestinal. Estos efectos han sido identificados por la Agencia de Protección Ambiental .

5.4.- El cadmio que es liberado por actividades humanas (conocido como contaminación antropogénica) se deposita en el suelo, al igual que en el agua. La principal forma de deposición

en el suelo es mediante la atmósfera, la cual contribuye con el 23% del total. Otras fuentes incluyen vertidos humanos, el uso de lodos industriales como fertilizantes para mejorar la fertilidad química del suelo, y el uso de fertilizantes fosfatados.

5.5. En la industria de los fertilizantes, se suele asumir que el cadmio solo puede provenir de la fosforita y no de otros componentes que se utilizan en la fabricación de fertilizantes fosfatados. Además, por lo general, no se considera la posibilidad de que la fertilización nitrogenada también contribuya a la presencia de cadmio.

5.6.- Como se mencionó previamente, los resultados indican una tendencia al incremento de la cantidad de cadmio en el suelo. Este fenómeno se hace más evidente cuando la tasa de extracción del metal en el cultivo es mayor. Sin embargo, si la tasa de extracción del cultivo es menor, la acumulación de cadmio dependerá en gran medida de la tasa de lixiviación del suelo y de la entrada de cadmio al suelo a través de fertilizantes fosfatados.

5.7.- Es importante llevar a cabo un análisis exhaustivo de las vías de lixiviación del cadmio y cómo éste ingresa a la cadena alimentaria para poder evaluar los posibles riesgos para la salud humana. De hecho, dependiendo del modelo que se aplique es parte de un enfoque más amplio para evaluar el riesgo que representa el cadmio para la salud humana, lo que permite investigar y cuantificar los efectos que puede tener.

5.8.- Según las concentraciones halladas en los suelos de uso agrícola en el valle de la provincia de Ica, es previsible que un aumento gradual en la aplicación de fertilizantes fosfatados resulte en un incremento del contenido de cadmio en el suelo. Por lo tanto, es importante limitar estas entradas de manera que se reduzca la cantidad de este metal que ingresa al suelo. La fertilización fosfatada debe llevarse a cabo de acuerdo a las necesidades básicas de fertilización de los cultivos, utilizando fertilizantes con un contenido de cadmio inferior a $267 \text{ [mg kg}^{-1} \text{ de P]}$ para disminuir el ingreso de Cd al suelo y evitar su acumulación en el tiempo.

5.9.- Asumiendo que la legislación extranjera es aplicable y de importancia en el Perú, por las agroexportaciones generadas de productos hortícolas y frutales y que se considera la ingesta diaria admisible (IDA) del cadmio en ésta, sería esperable que los niveles de cadmio alcanzados en los suelos en 50 años, no sean dañinos a la salud humana (valores inferiores a $0,5 \text{ [mg kg}^{-1} \text{ peso seco]}$). Sin embargo, en estas mismas condiciones, cuando se amplía el horizonte de análisis y se alcanza el estado estable del cadmio, éste alcanza concentraciones superiores a $0,5 \text{ [mg kg}^{-1} \text{ peso seco]}$ y por lo tanto podrían esperarse daños a la salud de las personas.

5.10.- Existen varias alternativas preventivas para evitar la disponibilidad de cadmio para las plantas cultivadas, y una de ellas es promover su retención en el suelo. Una medida efectiva podría ser corregir el pH del suelo mediante la aplicación de compuestos específicos, como la cal, siempre y cuando se verifique que las especies cultivadas no se vean afectadas por la posible alteración del pH.

5.11.- El aumento de la demanda de fertilizantes fosfatados con bajo contenido de cadmio, como se está proponiendo en países como Australia y en la Unión Europea, sugiere que los yacimientos con bajos niveles de cadmio podrían agotarse en el futuro debido a la alta demanda (Hunter et al., 1985). Con el tiempo, es probable que la cantidad de cadmio en los fertilizantes aumente, lo que requerirá el uso de tecnologías especializadas para la eliminación del cadmio. Sin embargo, estas tecnologías son costosas.

5.12.- Las propiedades geoquímicas de las rocas fosfatadas son un factor clave en la cantidad y distribución de los metales pesados en el suelo. Además, factores relacionados con el suelo, como el pH en el caso del cadmio, y la cantidad de materia orgánica, también tienen una gran influencia en la disponibilidad de estos metales.

5.13.- Es necesario contar con normatividad de suelo en el país, para este elemento pesado, así como para otros, que se adecuen a las normatividades vigentes en países de destino del producto de agroexportación peruano, puesto que cada país tiene diferentes características de suelo y por ende no es adecuado regirse por la normatividad internacional.

5.14.- Para los suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica, el comportamiento del Cadmio con los demás parámetros presentaron concentraciones de altas a medias, sobre todo en las zonas alta y baja del valle, mientras que en la zona de Villacurí, las concentraciones halladas fueron bajas en promedio, esto indica que el estado actual del suelo, ha adoptado ese comportamiento por el grado de uso de los suelos en las diferentes zonas del valle de Ica y por ende las aplicación de los fertilizantes fosfatados.

5.15.- La aplicación de fertilizantes fosfatados es la principal fuente de ingreso de cadmio en los suelos cultivados del valle de Ica en el ámbito agrícola. El uso repetido de estos fertilizantes ha dado lugar a una acumulación de cadmio en el suelo que, a largo plazo, podría llevar a la degradación del suelo y, potencialmente, tener consecuencias negativas para la salud humana si no se toman medidas para abordar el problema.

CAPITULO VI

6.0.- RECOMENDACIONES

En base a los resultados, interpretación de los resultados y conclusiones a los que ha sido posible llegar como consecuencia de esta investigación, se recomienda efectivizar las siguientes acciones de seguimiento de la dinámica del elemento pesado cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola en el valle de Ica, lo cuales se detallan a continuación:

6.1.- La recomendación para remediar suelos contaminados por cadmio es implementar técnicas y prácticas culturales, físicas, químicas y biológicas. Una opción es limitar la absorción del metal por las plantas mediante el uso de materiales, vegetales o patrones que no sean capaces de absorber metales pesados. Sin embargo, la alternativa más efectiva es aumentar la competencia de iones en la solución del suelo. Al incrementar la concentración de mili equivalentes de iones, estos competirán con el cadmio y la planta podrá absorber menos cantidad de este metal, según lo expresado por [51].

6.2.- Realizar la trazabilidad de la procedencia de los fertilizantes fosfatados producidos a partir de rocas fosfatadas, sean estas ígneas o sedimentarias, así como, establecer en materia ambiental los Límites Máximos Permisibles (LMP) de cadmio en los fertilizantes fosfatados, sean estos simples o compuestos, así como que sean genéricos o usados en fertirrigación.

6.3.- Analizar y monitorear la dinámica del cadmio en los suelos cultivados de uso agrícola y en los tejidos vegetales de las plantas cultivadas, con la finalidad de estudiar su incorporación en la cadena trófica alimentaria. Tener presente que el cadmio debido a su toxicidad se encuentra sujeto a una serie de normativas a nivel mundial, muy severas en términos ambientales y de salud humana.

6.4.- Manejar adecuadamente los contenidos de materia orgánica y el pH de los suelos cultivados de uso agrícola, ya que con la primera forma compuestos muy estables en el suelo y en el caso del segundo, la acidez acelera el grado de solubilidad del elemento en condiciones ácidas.

6.5.- Sugerir a la entidad responsable con competencias en materia ambiental, el desarrollo de estrategias para la reducción del cadmio, ya sea en el origen de la fabricación de los fertilizantes fosfatados, usando materias primas (rocas fosfatadas) con bajo contenido de cadmio o directamente en el campo, usando fertilizantes fosfatados que tengan bajas concentraciones de este metal.

6.6.- Establecer programas de información a pequeños y medianos agricultores, así como en las empresas agroexportadoras en donde se traten diversas estrategias para la disminución de las concentraciones de cadmio en los suelos cultivados para su uso agrícolas en el valle de la provincia de Ica.

6.7.- Adicionalmente, se recomienda que, en un trabajo multidisciplinario con profesionales de las Ciencias de la Salud, se confirme si existe alguna correlación entre los registros de enfermedades relacionadas con la toxicidad de cadmio, en Ica, y el consumo de algunos productos producidos en el valle.

6.8.- Continuar con este tipo de estudios a nivel del valle de la provincia de Ica, para garantizar la inocuidad de los productos agrícolas producidos para la agroexportación.

6.9.- “En agricultura no hay recetas a seguir. Hay que analizar cada caso y conocer qué tan variable es el suelo, idealmente a través del mapeo de suelos, así como tener un buen manejo nutricional del cultivo y del uso de materias orgánicas e inorgánicas”, según lo sostiene [51].

6.10.- Existen otros mecanismos para reducir la absorción del cadmio, como el uso de sustancias húmicas (remediación orgánica), el biochar (es carbón vegetal que se obtiene de restos vegetales y residuos de biomasa) o el carbón activado (es un elemento poroso que atrapa compuestos, en primer lugar, orgánicos presentes en un gas o en un líquido.). Otra opción es la fitoremediación (uso de plantas o microorganismos). No existe una sola práctica. Las condiciones varían y hay que evaluar una serie de actividades en conjunto.

CAPITULO VII

7.0.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] J. Nebel y T. Wrigth T. 1999. Ciencias ambientales: Economía y desarrollo sostenible. Editorial Pearson. Sexta edición. 698p.

[2] F. Nordberg 1974. Health hazards of environmental cadmium pollution. *Ambio* 3:51-65.

[3] W. Norvell, J. WU, G. Hopkins and R. Welch. 2000. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chlorine and chelate-extractable soil cadmium. Madison, United States. *Soil Science Society of America Journal* 64(6) :2162-2168.

[4] J. Staessen, H. Roels, D. Emeliano and T. Kuznetsova. 1999. Environmental exposure to cadmium, forearm bone density, and risk for fractures: Prospective population study. London. *The Lancet* 353(9159):1140-1144.

[5] A. Carrasco. 1994. Química de metales pesados en suelos de Chile. pp. 137-149. En: SEMINARIO-TALLER: Impacto ambiental de metales pesados en Chile. Santiago, Chile. INIA – La Platina. 261 p.

[6] C. Adriano. 2001. “Trace Elements in the Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals”. 2nd Edition. Springer-Verlag. New York.

[7] E. Rayment.1995. Sources of cadmium in agricultural products. Workshop on cadmium levels in food and agricultural products, Canberra, Australia. 1-2 May 1995. National Food Authority of Australia.

[8] K. Jinadasa, P. Milham, P. Hawkins and S. Cornish. **1997**. Survey of cadmium levels in vegetables and soils of Greater Sydney, Australia. Madison, United States. *Journal of Environmental Quality* 26(4):924.

[9] UNIÓN EUROPEA. 2002. Fertilizers. Risk assessment reports on cadmium infertilizers.[enlínea].<<http://europa.eu.int/comm/enterprise/chemicals/fertilizers/riskassest/reports.htm>>.[consulta: 24 abril 2002].

[10] M. Bolaño. 2013. Régimen Jurídico de los suelos contaminados en la Comunidad Autónoma del País Vasco. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco. Bilbao – España.

[11] M. Becerril, O. Barrutia, J. Hernández, J. García, Hernández A., and C. Garbisu. 2002. “Fitorremediación y Biorremediación: Nuevas Tecnologías Biológicas Para La Eliminación de Los Contaminantes Del Suelo.” In 2. Jornadas Científicas Sobre Medio Ambiente. Madrid (España). 16-17 Abr 2002.

- [12] J. Diez. 2008. Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas. Tesis doctoral. Universidad Santiago de Compostela. Departamento de Edafología e Química Agrícola. España.
- [13] R. García, K. Rab, and A. Reyes. 2009. “Fitorremediación de Metales Pesados Y Microorganismos.” *Ama. Redciencia*. Cu, no. 16: 1–6.
- [14] J. Marrero-Coto, Isis Amores-Sánchez, and O. Coto. 2012. “Fitorremediación, una Tecnología Que Involucra a Plantas Y Microorganismos En El Saneamiento Ambiental.” *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar* 46 (3): 52–71. doi: ISSN: 0138-6204.
- [15] Reyes C.; Vergara I.; Torres O.E.; Díaz M., y Gonzales E.E. 2016. Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Pontifica Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Instituto Geofísico. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería Geológica. Boyacá – Colombia.
- [16] N. Rodríguez-Eugenio, M. McLaughlin, M. y D. Pennock. 2019. La contaminación del suelo: una realidad oculta. Roma, FAO.
- [17] FAO & ITPS. 2015. Status of the World’s Soil Resources (SWSR) - Main Report. Rome, Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. (also available at <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>).
- [18] R. Kanter. 2018. Nitrogen pollution: a key building block for addressing climate change. *Climatic Change*, 147(1–2): 11–21. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2126-6>
- [19] M. Stewart, W. Dobb, E. Johnston & J. Smyth. 2005. The Contribution of Commercial Fertilizer Nutrients to Food Production. *Agronomy Journal*, 97(1): 1. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0001>
- [20] J. Huaynates. 2011. Efecto de la materia orgánica en la absorción de cadmio por el suelo, en la localidad de Supte. Tingo María. Perú. [En línea]: UNAS, (<http://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/UNAS/451/T.CSA84.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, documento, 10 febrero 2018).
- [21] Y. Maquerhua y N. Valverde. (2012). Evaluación del nivel de contaminación de los suelos en el distrito “El Mantaro” provincia de Jauja. Universidad Nacional del Centro del Perú. Facultad de Ingeniería Química. Huancayo - Perú 2012. URI: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3703>

[22] U. Picoy. 2016). Tratamiento de la contaminación de los suelos de la Laguna de Yanamate empleando la tecnología de la fitorremediación. Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental. universidad nacional “Daniel Alcides Carrión”. Facultad de Ingeniería. Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Ambiental. Cerro de Pasco – Perú.

[23] C. Silva. 2018. Remoción de cadmio en suelos mediante lavado vertical con dos extractantes. Tesis para optar el título de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Agraria de la Selva Facultad de Recursos Naturales Renovables. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Tingo María – Perú.

[24] D. Vilcapoma. 2019. Fitoextracción de cadmio y zinc en suelos contaminados utilizando *Lactuca sativa* var. White Boston, en la Estación Agropecuaria Experimental El Mantaro. Tesis para obtener el Grado de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional del Centro del Perú. Unidad de la Escuela de Posgrado. Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química. Huancayo – Perú.

[25] J. Flores y C. Zafra. 2020. Biorremediación de suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de *Rhizopus sp.* y *Rhodobacter sphaeroides*: Revisión [Universidad Peruana Unión]. <http://hdl.handle.net/20.500.12840/3742>.

[26] V. Almeyda. 2019. Efecto de la Aplicación de Fertilizantes, Fosfatados en la Contaminación por el Cadmio de Suelos Agrícolas de la Zona Baja del Valle de Ica. Tesis para optar el Grado de Doctor Universidad Nacional “San Luis Gonzaga”. Escuela de Posgrado. doctorado en Gestión Ambiental. Ica – Perú.

[27] H. Vásquez. 2019. Impacto de las aguas servidas en el nivel de contaminación por plomo en suelos cultivados en la zona media del valle de Ica – 2018. Tesis para optar el Grado de Doctor. Universidad Nacional “San Luis Gonzaga”. Escuela de Posgrado. Doctorado en Gestión Ambiental. Ica – Perú.

[28] J. Garcilazo. 2022. Evaluación de la contaminación por cadmio en el cultivo de espárrago (*Asparagus officinalis* L.) Cv. UC-157- F1 en campo de pequeños agricultores en la zona de Santiago - La Venta con énfasis en el cadmio en turiones. Tesis para optar el Grado de Doctor. Universidad Nacional “San Luis Gonzaga”. Escuela de Post Grado. Doctorado en Gestión ambiental. Ica – Perú.

[29] M. Herrera. 2023. Evaluar la remediación del cadmio en el suelo agrícola mediante prácticas agronómicas en el cultivo de espárrago, (*Asparagus officinalis* L.) Híbrido Supermacho en la zona baja del valle de Ica. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional “San Luis Gonzaga. Vicerrectorado de Investigación. Facultad de Agronomía. Ica - Perú

- [30] Comisión Nacional del Medio Ambiente - CONAMA. 2001. Manual de buenas prácticas agrícolas para evitar la contaminación difusa de aguas. INIA-LA PLATINA. Santiago, Chile. 180 p.
- [31] M. Kaemmerer, M. 2001. Curso aplicación benéfica de Biosólidos a suelos. Aguas Andina. Noviembre 26 al 30 de 2001.
- [32] R. Lavado. 2001. Curso aplicación benéfica de Biosólidos a suelos. Aguas Andinas. Noviembre 26 al 30 de 2001.
- [33] Environmental Protection Agency - EPA – UNITED STATES. 1999a. Understanding variation in partition coefficient, K_D , values. Volume I and II. [en línea]. <<http://www.epa.gov/radiation/technology/partition.htm>>. [Consulta: 26 abril 2020].
- [34] M. Roberts. 1996. EU eyes cadmium in phosphate fertilizers. New York, United States. Chemical Week 158(23):13.
- [35] R. Tapia. 1994. Toxicidad de metales pesados en seres humanos. Págs:63-69. En: Seminario – Taller: Impacto ambiental de metales pesados en Chile. Santiago, Chile. 261p.
- [36] S. Gillett, S. 1999. Unresources. Sometimes we run out of things we need. Other times ... Analog: 30-37.
- [37] World Health Organization - WHO. 1992. C a d m i u m . Environmental Health Criteria 134. United Nations Environmental Programme, International Labour Organization and World Health Organization. 280p.
- [38] W. Tang. 2000. Mechanisms of cadmium nephrotoxicity. Summary, Doctoral Thesis. University of Rhode Island. 159p
- [39] S. Dey and k. Dwivedi. 2000. Toxic metals in hens' eggs in India: A preliminary report. Archives of Environmental Health 55(5): 365.
- [40] World Health Organization - WHO. 1972. Technical Report Series. No. 505, WHO, Geneva.
- [41] OECD. 1994. Risk reduction monograph N°5: Cadmium, background and national experience with reducing risk. Environment Directorate, Organization for Economic Co-operation and Development Monograph Series No. 104, OECD/GD(94)97.
- [42] G. Sánchez. 2016. Ecotoxicología del Cadmio, riesgos para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio. Trabajo de Grado. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Farmacia. Madrid – España.

- [43] J. McLaughlin. 2001. Cadmium clean-up for Australian agriculture. M2 Presswire CSIRO july 2001. [en línea] [consulta: enero 04 de 2002].<wysiwyg://97//http://proquest.umi.com/pq...&Idx=309&Fmt=7&DFmt=6&Mtd=1&Sid=2>
- [44] A. Senn, A. and P. Milham. 2000. Managing cadmium in vegetables. Agfact H8. AC.2. Second edition. May 2000. [en línea] <<http://www.tocal.nsw.edu.au/reader/7187>> [consulta: diciembre 20 de 2001].
- [45] World Health Organization - WHO. 1992. Cadmium – Environmental aspects. Environmental Health Criteria 135. United Nations Environmental Programme, International Labour Organization and World Health Organization. 156p.
- [46] L. Conway. 1978. Sorption of arsenic and cadmium and their effects on growth, micronutrient utilization, and photosynthetic pigment composition of Asterionell Formosa. J. Fish Res. Board. Can. 35:286-294.
- [47] F. Hernández. 2014. Determinación del Cadmio en suelos agrícolas dedicados a la producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) irrigada con aguas residuales. Tesis para obtener el título de Ingeniero en Procesos Ambientales.
- [48] E. Besoain, L. León, S. Chien, S., S. Van Kauwenbergh y A. Amberger. 1999. Las rocas fosfóricas. En: INIA-LA PLATINA. Las rocas fosfóricas y sus posibilidades de uso agrícola en Chile. Chile. pp. 41-43.
- [49] I. Steen. 1998. Phosphorus availability in the 21st century: Management of a non-renewable resource. London. Phosphorus and Potassium (217):25.
- [50] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura – FAO. 1980. Tecnologías de procesos para la fabricación de fertilizantes fosfatados. Serie Desarrollo y transferencia de tecnología N°8. 51p.
- [51] F. Ramírez. 2021. Consumo de los fertilizantes en el Perú. En línea. Extraído de: www.corpmisti.com.pe. Consultado el 23 de abril 2021. Lima – Perú.
- [52] Unión Europea. 2002. Fertilizers. Risk assessment reports on cadmium I fertilizers.[enlínea]><http://europa.eu.int/comm/enterprise/fertilizers/rishassest/reports.htm>>. [consulta: 24 de abril de 2019]

[53] Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN). 1971. Inventario, evaluación y uso racional de los recursos naturales de la costa: Cuenca del río Ica. Vol. I y II. Lima - Perú.

[54] N. Arzola. 2011. Manejo de suelos, fertilizantes y enmiendas en armonía con la conservación del entorno. Primera edición. Editorial Pueblo y Educación. Cuba.306 p.

[55] E. Chávarri. 2000. ATA – SWECO. Balance hidrológico integral de la cuenca del río Ica. Instituto Nacional de Recursos Naturales - Dirección General de Aguas y Suelos - ATDR Ica. Perú.

[56] C. De Meeûs, G. Eduljee and M. Hutton. 2002. Assessment and management of risks arising from exposure to cadmium in fertilizers. I The Science of the Total Environment 291:167-187.

[57] Hernández, R.; Fernandez C. y Baptista M. et al. 2014. Metodología de la investigación. 6ta Edición. Editorial Mc Graw Hill. México. 634 pp.

CAPITULO VIII

8.0.- ANEXOS

ANEXO 1

GLOSARIO DE TERMINOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACION

- **Bioacumulación**

“Acumulación de una sustancia en sistemas biológicos”.

- **Biodisponibilidad**

“Disponibilidad de una sustancia para funciones biológicas. Estar disponible significa que parte de cualquier elemento o compuesto, en el suelo, puede ser absorbido y asimilado para el crecimiento vegetal” (Fuente: C. Brady. 1974. The Nature and properties of soils. McMillan, New York, NY. En: Sumner, M. 2000. Handbook of soil science. CRC Press LLC. United States. 2048p.)

- **Biomagnificación**

Se trata de un fenómeno que es considerado una forma especial de bioacumulación. Este proceso se refiere a la tendencia de ciertos productos químicos a acumularse en la cadena alimentaria, aumentando su concentración a medida que avanzan en los distintos niveles tróficos. En este proceso, la concentración de estas sustancias en el organismo consumidor es mayor que la concentración que se encuentra en el organismo que es consumido. Los contaminantes que son propensos a la biomagnificación suelen ser liposolubles y se almacenan en los tejidos grasos de los sucesivos consumidores”(ejemplo clásico: DDT) (Fuente:<http://www.pes.fvet.edu.uy/cienmar/madid/glosario.html>, 2003).

- **Biosólido**

“Es un subproducto del tratamiento de las aguas servidas domésticas conocidos también como lodos residuales (sewage sludge)” (Fuente: Environmental Protection Agency - EPA) – UNITED STATES. 1999. Biosolids Generation, Use, and Disposal in The United States. Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste. EPA530-R-99-009. September 1999. 74p.).

- **“Buenas prácticas agrícolas”**

“Se refiere al manejo de un sistema agrícola con un conjunto de técnicas conservacionistas que consisten en el uso de agroquímicos y del recurso hídrico de manera de suplir los requerimientos mínimos del cultivo de manera de prevenir la contaminación y controlar la erosión”.

- **Capa arable**

“Se refiere a la capa superficial del suelo de 0 a 20 cm de profundidad que puede ser arada y cultivada”.

- **Deposición atmosférica**

“Ingreso indirecto de tóxicos al suelo después de su diseminación por vía aérea, como depositación (sedimentación) líquida o sólida (aerosoles y sustancias arrastradas por las precipitaciones)” (Fuente: G. Henry y W. Heinke, G.W. 1999. Ingeniería Ambiental. Segunda Edición. Ed. Pearson, México. 778p.).

- **Elemento traza**

“Elemento presente en la corteza terrestre en contenidos inferiores a 0,1%”.

- **Elemento traza metálico**

“Nueva denominación propuesta para referirse a los elementos tradicionalmente denominados metales pesados y que causan deterioro en el ambiente y en la salud humana”. (Fuente: M. Kaemmerer. 2001. Curso aplicación benéfica de Biosólidos a suelos. Aguas Andina. Noviembre 26 al 30 de 2001.

- **Estado estable del cadmio (EE)**

“Concentración de cadmio constante alcanzada en un suelo independientemente de la variable tiempo”.

- **Evapotranspiración**

“El efecto combinado de evaporación y transpiración se denomina Evapotranspiración. Evaporación se define como la transformación del agua de la fase sólida y líquida del suelo en vapor de agua, y liberación desde el suelo. Transpiración es la pérdida de agua por procesos activos de plantas y organismos del suelo” (Fuente: K. Tan. 2000. Environmental Soil Science. Second Edition, Revision and Expanded. Marcel Dekker Ed. New York. 452p.).

- **Fertilizantes fosfatados**

Son compuestos de origen natural o artificial que se agregan al suelo para aumentar su productividad. Son fuentes de fósforo fácilmente aprovechables por las plantas cuyo objetivo es proporcionar este nutriente para su crecimiento y desarrollo. Presentan distintos porcentajes de fósforo y diversas denominaciones.

- **Fitotoxicidad**

Se refiere al deterioro que sufren las plantas frente a un elemento tóxico que es absorbido y metabolizado.

- **Fosforita**

“Designa una roca fosfórica sedimentaria, usualmente marina” (Fuente: E. Besoain. 1999. Mineralogía de las rocas fosfóricas. En: INIA La Platina. Las rocas fosfóricas y sus posibilidades de uso agrícola en Chile. Chile. pp 53-54.).

- **Infiltración**

“Parte de la precipitación llega a penetrar la superficie del terreno a través de los poros y fisuras del suelo o las rocas, relleno de agua el medio poroso”. (Fuente: <http://www.milarium.com/Proyectos/Agenda21/Anejos/SectoresClave/cicloagua.asp>, 2003).

- **Lixiviación**

“Pérdida de elementos solubles (nutritivos u otros componentes) desde el suelo en el agua percolada a través del perfil del suelo” (Fuente. K. Tan. 2000. Environmental Soil Science. Second Edition, Revision and Expanded. Marcel Dekker Ed. New York. 452p.).

- **Metal pesado**

“Nombre que se aplica a la mayoría de los metales con densidad superior a $6 \text{ [g cm}^{-3}]$. El concepto también se ha usado para elementos químicos que, según su concentración, son peligrosos para las plantas y animales. La lista de estos elementos es variable según distintos autores” (Fuente: A. Carrasco. 1994. Química de metales pesados en suelos de Chile. pp 137 – 149. En Seminario Taller: El Impacto ambiental de Metales Pesados en Chile. Santiago de Chile. INIA – La Platina 261 p.)

- **Micronutrientes**

“Son elementos esenciales (B, Cu, Fe, Mn, Zn, Cl) para el crecimiento de las plantas que son requeridos en cantidades mucho menores que los elementos mayores o macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S). También son denominados elementos menores, indicando que su contenido en el tejido vegetal es menor en relación a los macronutrientes”. Otro término usado es elemento traza debido a que se encuentra en concentraciones traza en el tejido vegetal ()

- **Nefrotoxicidad**

“Mecanismo en que el cadmio produce daño al riñón. Mecanismo: En la exposición con Cd, el Cd es primeramente depositado en el hígado, donde induce y se liga a la metalotioneina (MT). El CdMT es liberado desde el hepatocito y reabsorbido desde el filtrado del glomérulo por las células epiteliales tubulares próximas al riñón. El CdMT reabsorbido es rápidamente degradado por los lisosomas liberando Cd^{2+} en el citoplasma, el cual se liga a la MT del riñón. El exceso de Cd^{2+} produce estrés oxidativo”. (Fuente: K. Tan. 2000. Environmental Soil Science. Second Edition, Revision and Expanded. Marcel Dekker Ed. New York. 452p.).

- **Suelo**

“Se trata de un objeto natural tridimensional que posee capas bien definidas que suelen estar compuestas de horizontes conformados por materiales minerales y orgánicos. Estos horizontes pueden contener materia orgánica viva y servir como sustento para la vegetación, aunque no siempre es así”. (M. Sumner. 2000. Handbook of soil science. CRC Press LLC. United States. 2048p.)

- **Roca**

“La corteza terrestre está compuesta por una gran variedad de masas naturales conocidas como rocas, las cuales suelen ser mezclas físicas de minerales. Estos minerales se componen de elementos químicos que se combinan en proporciones específicas, aunque en las rocas estos minerales se unen químicamente en diversas proporciones. Es posible encontrar la misma mezcla de minerales en diferentes ubicaciones. Además, algunas rocas pueden estar compuestas por un solo mineral, mientras que otras contienen materia orgánica o vidrios volcánicos”. (Fuente: W. Emmons, L. Allison, C. Stauffer and G. Thiel. 1965. Geología: principios y fundamentos. Quinta Edición. Ed. McGraw Hill. 491p.).

- **Roca fosfórica**

Es un nombre general para rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas con alto contenido de fósforo (Fuente: E. Besoain. 1999. Mineralogía de las rocas fosfóricas. En: INIA La Platina. Las rocas fosfóricas y sus posibilidades de uso agrícola en Chile. Chile. pp 53-54.).

- **Roca ígnea**

Roca formada por el endurecimiento del magma o rocas en estado de fusión. (Fuente: W. Emmons, L. Allison, C. Stauffer and G. Thiel. 1965. Geología: principios y fundamentos. Quinta Edición. Ed. McGraw Hill. 491p.).

- **Roca sedimentaria**

Roca formada por la depositación de sedimentos (Fuente: W. Emmons, L. Allison, C. Stauffer and G. Thiel. 1965. Geología: principios y fundamentos. Quinta Edición. Ed. McGraw Hill. 491p.).

- **Roca metamórfica**

Es una roca ígnea o sedimentaria que ha sufrido cambios por el calor o la presión (Fuente: W. Emmons, L. Allison, C. Stauffer and G. Thiel. 1965. Geología: principios y fundamentos. Quinta Edición. Ed. McGraw Hill. 491p.).

- **Desarrollo**

“Acción y efecto de desarrollar o desarrollarse. Evolución progresiva de una economía hacia mejores niveles de vida”.

- **Sostenible**

Adj. “Dicho de un proceso, que puede mantenerse por sí mismo, como lo hace, por ejemplo, un desarrollo económico sin ayuda exterior ni merma de los recursos existentes” (Fuente: Real Academia de la Lengua Española, 2023).

- **Desarrollo sostenible**

Amb. “Uso y disfrute de los recursos naturales que consiga el desarrollo económico y social de las poblaciones humanas, asegurando el mantenimiento y la preservación de aquellos para las generaciones futuras”.

ANEXO 2

**RESULTADOS DEL ANALISIS QUIMICO DE LA CONCENTRACION DE CADMIO EN
LOS SUELOS CULTIVADOS DE USO AGRICOLA DEL VALLE DE ICA**

Solicitante: Félix G. Fuentes Quijandria

Departamento: Ica

Provincia: Ica

Referencia: H.R. 20214061C – 08

Fecha: 04 – 11 - 21

ZONA	Nº	PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA (m)	JURISDICCION (Poblado)	CONTENIDO DE CADMIO EN EL SUELO (mg.kg ⁻¹)
	1	0,00 – 0,30		3,35
		0,30 – 0,60	Trapiche	4,40
A	2	0,00 – 0,30		2,45
		0,30 – 0,60	Chavalina	3,10
L	3	0,00 – 0,30		3,20
		0,30 – 0,60	Los Molinos	3,43
T	4	0,00 – 0,30		2,35
		0,30 – 0,60	Santa Rosa	2,55
A	5	0,00 – 0,30		3,50
		0,30 – 0,60	Santa Bárbara	3,62
	6	0,00 – 0,30		2,50
		0,30 – 0,60	Tacama	2,80
M	7	0,00 – 0,30		3,10
		0,30 – 0,60	Subtanjalla	3,40
E	8	0,00 – 0,30		2,20
		0,30 – 0,60	La Tinguña	2,43
D	9	0,00 – 0,30		2,45
		0,30 – 0,60	Ica	2,52
I	10	0,00 – 0,30		1,40
A		0,30 – 0,60	Parcona	1,62

		0,00 – 0,30		3,29
	11	0,30 – 0,60	Los Aquijes	3,99
B	12	0,00 – 0,30		3,17
		0,30 – 0,60	Pueblo Nuevo	4,19
A	13	0,00 – 0,30		4,51
J		0,30 – 0,60	Santiago	3,98
	14	0,00 – 0,30		4,83
A		0,30 – 0,60	La Venta	4,62
	15	0,00 – 0,30		3,07
		0,30 – 0,60	Ocucaje	3,83
	16	0,00 – 0,30		1,35
V		0,30 – 0,60	Expansión Guadalupe	1,40
I	17	0,00 – 0,30		1,45
L		0,30 – 0,60	Villacurí Norte	1,10
L	18	0,00 – 0,30		1,20
A		0,30 – 0,60	Villacurí Centro	1,43
C	19	0,00 – 0,30		1,45
U		0,30 – 0,60	Villacurí Sur	1,65
R	20	0,00 – 0,30		1,32
I		0,30 – 0,60	Rio Seco	1,42

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima – Perú.

Ing. Mg. Sc. Braulio La Torre Martínez
 Jefe del Laboratorio
 Firmado Virtualmente