

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PROTECCIÓN DE DIFERENTES SUELOS
AGRÍCOLAS - DISTRITOS DE TIABAYA, ZAMÁCOLA, UCHUMAYO Y CAYMA
DE LA PROVINCIA DE AREQUIPA - FRENTE A LA ABSORCIÓN DE ARSÉNICO
(As) POR EL CULTIVO DE LECHUGA (*Lactuca sativa*)**

Tesis presentada por:

Chuta Tintaya, Gabriela Danitza

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniera Ambiental

AREQUIPA – PERÚ

2022

Dedicatoria

A Dios, quien está presente en todo momento de mi vida y me ha permitido llegar hasta este punto, brindándome la voluntad y fortaleza para poder lograr mis metas y objetivos satisfactoriamente.

A mi mamá, por haberme educado y brindado en todo momento su apoyo incondicional sin importar las dificultades.

A mis hermanos, que me apoyaron para lograr este objetivo y siempre estuvieron a mi lado impulsándome.

Agradecimientos

A mi Alma Mater, la Universidad Nacional de San Agustín por haberme formado en sus aulas donde logré mis sueños de llegar a ser un profesional de éxito.

A los investigadores de la Universidad de Purdue por haberme guiado en el desarrollo del trabajo de investigación, en especial al Dr. Alejandro Rodríguez Sánchez por su dedicación, su conocimiento, paciencia, motivación y sobre todo su apoyo incondicional y a la Dra. Betty por haberme apoyado en todo el desarrollo de la investigación.

A todas las personas que han formado parte de mi vida profesional, quiero agradecer su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles. Algunas están conmigo y otras en mi corazón, sin importar en donde se encuentren quiero darles las gracias por todas sus bendiciones.

Para todos los demás que me apoyaron, muchas gracias y que Dios los bendiga.

Índice de Contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice de Contenido.....	iv
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Figuras	vii
Siglas y Abreviaturas.....	ix
Glosario de Términos	x
Introducción.....	14
Resumen	16
Abstract.....	18
CAPITULO I.....	20
1 Generalidades	20
1.1 Planteamiento del problema.....	20
1.2 Justificación	22
1.2.1 Ambiental	22
1.2.2 Económico	22
1.2.3 Social.....	23
1.2.4 Tecnológica.....	23
1.3 Antecedentes.....	23
1.3.1 Local	23
1.3.2 Nacional	25
1.4 Hipótesis	26
1.5 Objetivos.....	26
1.5.1 Objetivo general	26
1.5.2 Objetivos específicos	26
1.6 Variables	27
CAPÍTULO II.....	28
2 Marco teórico.....	28
2.1 Arsénico	28
2.1.1 Arsénico en el Perú	28
2.1.2 Fuentes de contaminación	29
2.2 Fitotoxicidad	31
2.2.1 Movimiento de arsénico en plantas	31
2.2.2 Translocación	32
2.3 Respuesta bioquímica al estrés causado por metales pesados en el vegetal y suelo	32
2.3.1 Medición de prolina en la lechuga	32
2.3.2 Medición de glomalina en el suelo.....	33
2.4 Propiedades fisicoquímicas del suelo	33
2.4.1 Textura	34
2.4.2 pH.....	34
2.4.3 Conductividad eléctrica.....	35
2.4.4 Materia orgánica.....	35
2.4.5 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	35
2.4.6 Humedad	36
2.4.7 Nutrientes	36
CAPÍTULO III	37
3 MATERIALES Y MÉTODOS	37
3.1 Descripción del área de estudio	37
3.1.1 Descripción del área de estudio simular experimental	37
3.1.2 Material de estudio.....	37
3.1.3 Población y muestra	37
3.2 Diseño experimental	38
3.2.1 Muestreo de suelos.....	40
3.2.2 Preparación del suelo para el cultivo de la lechuga (Lactuca sativa)	41
3.2.3 Siembra de especies	42
3.2.4 Análisis de suelos.....	43
3.2.5 Determinación de los parámetros bioquímicos en suelos y plantas	44

3.2.6 Análisis estadístico	47
CAPÍTULO IV	48
4 Análisis de resultados	48
4.1 Caracterización de la presencia de arsénico (As) en suelos estudiados	48
4.2 Crecimiento de la planta en las diferentes concentraciones de arsénico	49
4.3 Respuesta de la prolina ante la presencia de arsénico en los suelos.	52
4.4 Respuesta de la glomalina frente al arsénico en los suelos	53
4.5 Relación del arsénico frente a los macronutrientes y micronutrientes en el cultivo de la lechuga (Lactuca Sativa)	55
4.6 Discusión de resultados.....	58
Conclusiones.....	60
Recomendaciones	62
Bibliografía.....	63
Anexos.....	70

Índice de Tablas

Tabla 1: Variables independientes y dependientes	27
Tabla 2: Coordenadas - puntos de muestreo	37
Tabla 3: Distribución de contaminante en macetas	40
Tabla 4: Relación del arsénico vs macronutrientes y micronutrientes de la lechuga	55
Tabla 5: Relación de arsénico vs macronutrientes y micronutrientes en los suelos estudiados	56

Índice de Figuras

Figura 1: Puntos de muestreo de suelos	38
Figura 2: Etapas de proceso experimental	39
Figura 3: Concentración de As en suelos	48
Figura 4: Crecimiento de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).....	49
Figura 5: Peso de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).....	50
Figura 6: Longitud de raíz de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).....	51
Figura 7: Altura de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).....	51
Figura 8: Concentración de prolina en lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).....	52
Figura 9: Concentración de glomalina fácilmente extraíble en suelo.	54
Figura 10: Concentración de glomalina totalmente extraíble de los suelos estudiados.	55
Figura 11 Estación de monitoreo – Uchumayo.....	71
Figura 12 Estación de monitoreo – Tiabaya	71
Figura 13 Estación de monitoreo – Zamácola.....	72
Figura 14 Estación de monitoreo – Cayma	72
Figura 15 Muestra de suelo – Uchumayo.....	73
Figura 16 Muestra de suelo –Cayma.	73
Figura 17 Distribución de suelos en macetas.	73
Figura 18 Adición de arseniato de sodio heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)en concentraciones de 20 ppm y 60 ppm.....	73
Figura 19 Adición de fertilizante a los suelos.	74
Figura 20 Plantones de la lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).....	74
Figura 21 Distribución de plantones (<i>Lactuca sativa</i>).	74
Figura 22 Regado de plantones (<i>Lactuca sativa</i>).....	74
Figura 23 Desarrollo de plantones (<i>Lactuca sativa</i>).....	74
Figura 24 Pesado de suelos para análisis de glomalina.	75
Figura 25 Adecuación de muestra de suelo en tubos falcon para centrifuga.	75
Figura 26 Adición de solución (Citrato de sodio) a las muestras de suelo.	75

Figura 27 Ubicación de muestras para autoclave.....	75
Figura 28 Proceso de autoclave.	76
Figura 29 Retiro de muestras de suelo del proceso de autoclave.....	76
Figura 30 Muestras de Glomalina difícilmente extraíble.....	76
Figura 31 Retiro de muestras - hojas de la lechuga (<i>Lactuca sativa</i>).	76
Figura 32 Traspaso de líquido sobrenadante posterior al proceso de centrifugado.	76
Figura 33 Muestras de Sobrenadante antes de autoclavado.....	77
Figura 34 Muestras de prolina para efectuar lecturas por espectrofotometría.	77

Siglas y Abreviaturas

GRSP:	“Glomalin Related Soil Protein” : proteína de suelo relacionada con la glomalina.
FAO:	Food and Agriculture Organization, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
OMS:	Organización Mundial de Salud
EE-GRSP:	Proteína fácilmente extraíble de suelo relacionada con glomalina.
T-GRSP:	Proteína total del suelo relacionada con la glomalina.

Glosario de Términos

- **Proteína** : Constituidas por largas cadenas de aminoácidos proteicos unidos entre sí por un tipo de enlace llamado: “enlace peptídico”. Los aminoácidos son moléculas orgánicas compuestas de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.
- **Prolina** : Aminoácido que se encuentra en pequeñas cantidades en las plantas, cuando éstas crecen en condiciones óptimas. En condiciones de estrés, se ha encontrado que el contenido de prolina aumenta para actuar como un agente osmótico, protegiendo a la planta.
- **Glomalina** : Glicoproteína indicadora de la calidad del suelo y sensible a las perturbaciones. La glicoproteína es producida por las paredes de las hifas de los hongos micorrícicos arbusculares. Una vez extraída del suelo se la conoce como: “glomalin related soil protein” (GRSP).
- **Arsénico** : El arsénico (As) es el contaminante metaloide más generalizado y preocupante en los suelos agrícolas, siendo las fuentes geogénicas más generalizadas que las fuentes antropogénicas.

Introducción

La creciente demanda poblacional requerirá del abasto de alimentos de buena calidad, por lo cual la producción de alimentos se incrementará en 70% en todo el mundo y 100% en los países en desarrollo. Por consiguiente, la cantidad y la calidad nutricional de los alimentos es fundamental para el desarrollo de la persona y su salud. El 95% de la producción de alimentos depende del suelo (FAO, 2015), pero sólo sustrato sanos puede prestar los servicios ecosistémicos necesarios y asegurar la producción de alimentos. La contaminación de este afecta la seguridad alimentaria al disminuir el rendimiento agrícola debido a los niveles tóxicos de contaminantes y al hacer que los cultivos producidos sean inseguros para el consumo humano (FAO, 2015).

Los metales pesados son los tipos de contaminantes más persistentes y complejos de remediar por la naturaleza. No solamente degradan la calidad del aire, agua, suelo y el cultivo de alimentos, sino que también amenazan la salud, el bienestar de animales y seres humanos. Los metales se acumulan en los tejidos de los organismos vivos, a diferencia de la mayoría de los compuestos orgánicos, no están sujetos a degradación metabólica. (McBride, 1994). El exceso de metales pesados en el suelo, como arsénico(As), cadmio(Cd), plomo(Pb) y mercurio(Hg), también puede alterar el metabolismo de las plantas y disminuir la productividad de los cultivos.(GTIS & FAO, 2019) ,por lo cual son los elementos más importantes en la contaminación de la cadena alimentaria (McLaughlin et al., 1999).

Las principales fuentes de As en suelos provienen de compuestos agroquímicos, actividades de minería y fundición, también pueden introducirse a través del estiércol del ganado, alimentado con plantas que contienen As. Algunos materiales parentales de los suelos son ricos en As, por lo tanto, su meteorización y erosión también puede ser una fuente natural de As en altas concentraciones (GTIS & FAO, 2019).

La capacidad de adsorción del suelo tiene un efecto importante en la biodisponibilidad de los metales pesados y metaloides. La captación biológica por la biota del suelo y las plantas ocurre sólo cuando éstas en forma iónica. Muchos metales se presentan en formas catiónicas simples, pero algunos como el As y el Cr forman oxianiones más complejos (GTIS & FAO, 2019). Por lo tanto, es importante comprender las respuestas fisiológicas y los mecanismos de tolerancia de las plantas hacia la exposición de metales pesados. La prolina, funciona como mecanismo de antiestres de la planta, ante la presencia de concentraciones de arsénico en el suelo (Vásquez, 2013), y la glomalina presente en el suelo ayudara a reducir la biodisponibilidad de los metales pesados (Lozano, 2015) hacia los vegetales.

La presente investigación evaluará la capacidad de la función protectora de los suelos agrícolas de los distritos de Cayma, Uchumayo, Tiabaya y Zamácola, en el cultivo de lechuga frente a la absorción de diferentes concentraciones de arsénico y sus efectos fisiológicos en el vegetal.

Resumen

El presente estudio, tuvo como objetivo investigar la capacidad de protección de los suelos agrícolas de los distritos de Tiabaya, Zamácola, Uchumayo y Cayma, en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*) y sus reacciones fisiológicas a diferentes concentraciones de arsénico, dicha evaluación se realizó en el departamento de Arequipa, el alcance del proyecto contempló un periodo de 100 días, se analizó la respuesta de prolina, glomalina y la correlación del contaminante con la presencia de macro y micronutrientes, determinándose los siguientes resultados, con respecto al desarrollo de la planta a los 35 días y una concentración 60 ppm de arsénico, las plantas registraron valores significativos de crecimiento: Cayma (5.82cm.), Tiabaya (3.68cm), Uchumayo (4.28cm) y Zamácola (3.73cm), se determinó que las concentraciones de arsénico no excedieron la normativa nacional y US-EPA; la presencia de prolina a una concentración de 20 ppm en los suelos de Cayma, Zamácola, Uchumayo fue constante, y menor que las cultivadas en Tiabaya; las plantas cultivadas a una concentración de 60 ppm en Cayma presentaron una mayor respuesta de la prolina con respecto a las plantas cultivadas de los demás suelos; con respecto a la glomalina fácilmente extraíble, los suelos de Uchumayo presentaron una respuesta creciente a concentraciones de 0 ppm, 20 ppm y 60 ppm de arsénico, en comparación de los demás suelos donde la respuesta de dicha proteína fue constante. La correlación del contaminante fue positiva moderada con los micronutrientes en los suelos de Cayma, Tiabaya y Zamácola; moderada positiva con los macronutrientes en el suelo de Uchumayo, negativa moderada con los macronutrientes en los suelos de Tiabaya, Uchumayo y Zamácola y negativa moderada con los micronutrientes con el suelo de Cayma. Concluyendo que el arsénico afecta las funciones protectoras del suelo y la biodisponibilidad de los macro y micronutrientes que puede absorber la lechuga (*Lactuca sativa*).

Palabras clave: suelos agrícolas, arsénico, glomalina, prolina, micronutrientes y macronutrientes

Abstract

The objective of this study was to investigate the protection capacity of different agricultural soils in the districts of Tiabaya, Zamácola, Uchumayo and Cayma, in the cultivation of lettuce (*Lactuca sativa*) and their physiological reactions to different concentrations of arsenic. carried out in the department of Arequipa, the scope of the project contemplated a period of 100 days, analyzing the response of proline, glomalin and the correlation of the contaminant with the presence of macro and micronutrients, determining the following results, with respect to the development of the plant at 35 days and a concentration of 60 ppm of arsenic, the plants registered significant growth values: Cayma (5.82cm.), Tiabaya (3.68cm), Uchumayo (4.28cm) and Zamácola (3.73cm), it was determined that the concentrations of arsenic did not exceed the national and US-EPA regulations; the presence of proline at a concentration of 20 ppm in the soils of Cayma, Zamácola, Uchumayo was constant, and lower than those cultivated in Tiabaya; the plants cultivated at a concentration of 60 ppm in Cayma presented a greater proline response with respect to the plants cultivated in the other soils; Regarding the easily extractable glomalin, the soils of Uchumayo presented an increasing response to concentrations of 0 ppm, 20 ppm and 60 ppm of arsenic, compared to the other soils where the response of said protein was constant. The correlation of the contaminant was moderately positive with the micronutrients in the soils of Cayma, Tiabaya and Zamácola; moderate positive with the macronutrients in the Uchumayo soil, moderate negative with the macronutrients in the Tiabaya, Uchumayo and Zamácola soils, and moderate negative with the micronutrients in the Cayma soil. Concluding that arsenic affects the protective functions of the soil and the bioavailability of macro and micronutrients that can be absorbed by lettuce (*Lactuca sativa*).

Keywords: agricultural soil, arsenic, glomalin, proline, micronutrients and macronutrients

CAPITULO I

1 Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

El arsénico inorgánico se distribuye de manera natural en el ambiente, siendo sus estados en el ambiente variables al reaccionar con oxígeno u otras moléculas de aire, agua y suelo o por acción de microorganismos (Bundschuh et al., 2008).

El arsénico al ser consumido por la persona tiende a acumularse y bio-magnificarse en los tejidos, debido a que es una sustancia que no se excreta. En la industria de alimentos existe un gran interés por los riesgos de dicha sustancia y sus efectos sobre la salud humana (Rusu & Meghea, 2015), debido a que varios estudios han demostrado que la ingesta de este metal pesado puede aumentar el riesgo de cáncer de piel, hígado, vejiga y pulmón (Quispe, 2019).

La acumulación de arsénico en tejidos de las plantas puede variar por muchos factores, tales como las características de las especies vegetal, condiciones del suelo y adicionalmente, el empleo de productos sanitarios arsenicales (Carbonell et al., 1998).

Las raíces de las plantas son una de las vías de entrada de diferentes metales y es necesario que dichos elementos en cuestión se encuentren disueltos para ser absorbidos por la planta. (Mengel et al., 2001), consecuentemente en la rizósfera se encuentran microorganismos, solubilizadores de fosfatos, promotores del crecimiento vegetal, biocontroladores y especies patogénicas, que compiten por espacio y nutrientes. Estas interrelaciones entre microorganismos inciden en la interacción suelo-planta-microorganismos-ambiente y repercuten de forma directa en el crecimiento y en el desarrollo de las especies vegetales (Cano, 2011).

Dentro de la dieta básica de la población Arequipeña se encuentra la lechuga (*Lactuca sativa*), debido a que sus condiciones de crecimiento no son exigentes, por lo que puede ser cultivado en cualquier temporada del año (FEN, 2014). Sin embargo varios estudios indican que las lechugas son capaces de absorber y transportar metales pesados en sus hojas y raíces (Llopart et al., 2017). Cabe considerar que las plantas presentan una serie de mecanismos celulares que pueden estar participando en la tolerancia a elementos potencialmente tóxicos. Estos consisten en la formación de micorrizas, el secuestro del metal en la pared celular de la planta y generación de prolina, este aminoácido reduce el efecto tóxico de los metales y puede contribuir como una fuente disponible de carbono y nitrógeno, la prolina puede considerarse como un marcador bioquímico de metales pesados presentes en la planta (González Mendoza, Daniel Zapata Pérez, 2008).

El suelo también presenta una serie de glicoproteínas como es el caso de la glomalina, producida por las hifas de las micorrizas, que tiene potencial para establecer enlaces con moléculas de alta toxicidad, como los metales pesados, constituyendo una barrera eficaz en la masa micelial, no permitiendo que ingresen a las células vegetales (Riopedre-Galán et al., 2021).

Según (Paredes et al., 2018), en su estudio “Consumo de plantas medicinales de uso habitual y posible efecto adverso en la salud de la población, como resultado de la contaminación de las plantas, Arequipa, Perú”; determino la presencia de arsénico y otros metales pesados en especies vegetativas (avena, manzanilla, eucalipto, alfalfa, matico y menta) cultivados en suelos agrícolas de Arequipa, presentando concentraciones altas de arsénico y níquel en la mayoría de las especies estudiadas.

El alcance de la presente investigación está comprendida en los suelos agrícolas de los distritos de Tiabaya, Uchumayo, Cayma y Zamácola, los cuales vienen siendo regados de

manera directa por las aguas superficiales del Rio Chili ,que se encuentran con elevadas concentraciones de arsénico, representando un riesgo a la salud por el consumo de productos agrícolas que contienen dicho elemento.(Pinto, 2018)

1.2 Justificación

1.2.1 Ambiental.

Las prácticas agrícolas insostenibles reducen la capacidad de respuesta del suelo frente a contaminantes y a su vez facilita su transferencia hacia la planta (FAO, 2015). El arsénico presente en las aguas superficiales del rio chili superan los límites internacionales de la OMS (Pinto, 2018). Según Miranda et al., (2008) la lechuga es una especie acumuladora con un potencial para absorber el arsénico presente en el suelo.

En el presente estudio evaluará la función protectora de los suelos agrícolas frente al arsénico, el cual será cuantificado en base a la respuesta de la glomalina y la prolina presente en la lechuga (*Lactuca sativa*) frente al contaminante.

1.2.2 Económico

El sector agrícola es un motor fuerte que impulsa la economía nacional peruana (Rodríguez, 2018); para los años 2017 y 2018 se registraron exportaciones de lechuga de 31 y 23 toneladas (Mendieta, 2018) y nivel nacional las hectáreas cultivadas a nivel nacional de esta especie fueron de 4814,6 ha (2018) y 4605,0 ha. (2019) (Sanchez et al., 2019). Siendo Arequipa una de las principales productoras de lechuga a nivel nacional. (Sanchez et al., 2019). El proyecto evaluará las consecuencias del contaminante presente en el suelo frente al desarrollo fisiológico de la planta, los cuales podrían tener efectos negativos en la producción y calidad de esta especie vegetal, reduciendo su exportación.

1.2.3 Social

En Latinoamérica, se evidencia la presencia de arsénico en un 50% en especies vegetales, las cuales son consumidas por la población. (Medina-Pizzali et al., 2018), siendo la ingesta de alimentos y consumo de aguas contaminadas una de las vías de exposición a dicho elemento, el cual tiene efectos sobre los principales órganos y sistemas del cuerpo.

Conocer la respuesta de las proteínas de la planta y el suelo frente al arsénico y su interacción entre los macronutrientes y micronutrientes presentes en el sistema suelo-planta frente al arsénico.

1.2.4 Tecnológica

Es importante comprender las respuestas bioquímicas y los mecanismos de tolerancia del suelo a la exposición de arsénico.

El presente estudio de investigación, evaluó la capacidad del suelo para acumular metales, permitiendo conocer los mecanismos de protección que se activan a favor de la planta, se estudió la prolina como indicador de defensa ante el arsénico y a su vez la evolución de glomalina después de adicionar contaminante (As) al cuerpo receptor (suelo), debido a que es una glicoproteína indicadora de la calidad de suelo y sensible a las perturbaciones.

1.3 Antecedentes.

1.3.1 Local

Pocohuanca (2017) en su estudio “Supervivencia, crecimiento, y respuesta fisiológica de *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. en relación a diferentes concentraciones de arsénico con fines de su uso en rizofiltración”, realizó un análisis experimental de 3 fases: El experimento 1, consistió en tratar las plantas con concentraciones de 4, 8, 16 y 32 ppm de

arseniato de sodio (Na_2HAsO_4) diluida con nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), y un control sin arsénico, por el periodo de 32 días, midió la tasa de crecimiento absoluto (TCA), número y longitud de la raíz, longitud total, peso fresco, peso seco, tasa de crecimiento relativo (TCR), índice de tolerancia y contenido de pigmentos fotosintéticos. En el experimento 2 se utilizó concentraciones de 4 y 8 ppm de arsénico, un control sin arsénico y un testigo con solución nutritiva Hoagland, durante 16 días, y se midió el peso seco de raíces, tallos, hojas, la respuesta fisiológica (pigmentos fotosintéticos, malondialdehído, carbohidratos, prolina, proteínas, superóxido dismutasa, catalasa, peroxidasa y glutatión reductasa) y la acumulación de arsénico (factor de bioacumulación y factor de translocación). En el experimento 3 se utilizó agua procedente del río Tambo (0.32457 ppm de arsénico) diluida al 50 y 100% con agua de destilada, durante 32 días, realizando mediciones iguales al experimento 2. Los resultados del experimento 1 muestran que el porcentaje de sobrevivientes fue del 100%, y que el TCA y TCR fueron mayores a los 16 días con tratamientos de 4 y 8 ppm de arsénico. El índice de tolerancia fue mayor en el tratamiento con 8 ppm. Los pigmentos fotosintéticos disminuyeron en todos los tratamientos. El experimento 2 mostró que concentraciones de 4 y 8 ppm de arsénico incrementan el peso seco de la raíz, tallo y hoja. El contenido de pigmentos fotosintéticos y proteínas se vio afectado en el tratamiento con 4 ppm, mientras que el nivel de peroxidación lipídica, carbohidratos y prolina se mantuvo respecto al control. Hubo mayor acumulación de arsénico en el tratamiento con 4 ppm en las raíces. El contenido de pigmentos fotosintéticos, malondialdehído y prolina se incrementó con diferencias significativas.

Grumberg et al. (2010) en su estudio “La glomalina y su relación con la productividad del cultivo de maíz”, determinó una correlación positiva y significativa entre la abundancia de glomalina y el rendimiento del cultivo de maíz ($r=0.43$), registrándose el mayor rendimiento en el tratamiento NPSK Micro (11807 kg ha⁻¹). Llegó a la conclusión de que la glomalina es un buen bioindicador del efecto que produce la fertilización inorgánica sobre los hongos

micorrízicos arbusculares (HMA), microorganismos que están íntimamente relacionados con el nivel nutricional de las plantas, mientras más completa sea la fertilización, como en el caso del tratamiento NPS+micronutrientes de este trabajo, más eficiente es su respuesta en cuanto al mayor contenido de glomalina en el suelo, más abundancia de HMA y consecuentemente mayor rendimiento del cultivo de maíz.

1.3.2 Nacional

Vásquez (2013) en su estudio “Efecto del plomo sobre la biomasa y el contenido de prolina en *Rorippa nasturtium-aquaticum* (L.) Hayek, en condiciones de invernadero”. Se propuso enraizar las plantas y tratarlas con 0, 5, 10 y 15 mg/L de plomo durante 8 y 16 días. Determinándose que el contenido de prolina en hojas aumentó a medida que las plantas fueron tratadas con mayor concentración de plomo y tiempo de exposición, mientras que, en las raíces, no hubo aumento significativo de este parámetro. La concentración de prolina fue mayor en hojas que en raíces, alcanzando valores máximos de 160.29 y 2.24 ug/g en peso fresco. Los resultados indican que plantas expuestas a concentraciones menores a 15 mg/L de plomo no alteran su biomasa, y que el aumento en el contenido de prolina es un mecanismo de defensa ante la presencia de este metal.

Yáñez, Alfaro, Ávila, Bovi, (2019) en su estudio “La acumulación de arsénico en cultivos de lechuga (*Lactuca sativa*) y habas (*Vicia faba*) y su riesgo potencial para el consumo humano”, tuvo como objetivo determinar la absorción de arsénico por frijoles y cultivos de lechuga cultivados en el suelo con contenido de arsénico e irrigados con agua contaminada con este elemento tóxico en Pastos Chicos, Jujuy (Argentina). Se determinó que la biomasa seca total (TDB) y el arsénico total se hallaron en suelos, raíces, hojas, vainas y semillas. Estos datos se usaron para determinar varios parámetros, como los factores de translocación (TF) y bioconcentración (BCF), cociente de riesgo objetivo (THQ) y riesgo carcinogénico (CR). Las

plantas de lechuga presentaron reducciones de TDB de 33.3 y 42.8% cuando se cultivaron en suelos contaminados con arsénico, y en suelos de control bajo riego con agua contaminada, respectivamente. La presencia de este tóxico en semillas de frijol ancho y hojas de lechuga (partes comestibles) excedió los límites establecidos por el Código Alimentario Argentino, es decir, 0.10 y 0.30 mg/Kg, respectivamente. Los valores de THQ para las hojas de lechuga fueron superiores a 1, los mismos que para las semillas de habas cuando se cultivaron en el suelo con contenido de arsénico y se regaron con agua contaminada con arsénico, lo que sugiere que los consumidores correrían riesgos significativos al consumir estas verduras.

1.4 Hipótesis

La evaluación de la capacidad protectora de los suelos de los distritos de Tiabaya, Zamacola, Uchumayo y Cayma frente a la absorción de arsénico, podrá ser observado por la respuesta de las proteínas glomalina y prolina en el cultivo de la lechuga en la provincia de Arequipa.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Evaluar la capacidad de protección de diferentes suelos agrícolas de los distritos de Tiabaya, Zamácola, Uchumayo y Cayma de la provincia de Arequipa - frente a la absorción de Arsénico (As) por el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*).

1.5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la presencia del arsénico (As) en suelos representativos de las zonas agrícolas de Tiabaya, Uchumayo, Cayma y Zamácola.

- Evaluar el desarrollo (crecimiento) de la planta en las diferentes concentraciones de arsénico (As).
- Evaluar la respuesta de la prolina que presenta la planta frente a diferentes concentraciones de arsénico (As) en los suelos estudiados.
- Evaluar la respuesta de la glomalina presente en el suelo frente a las diferentes concentraciones de arsénico (As).
- Evaluar la interacción del contaminante frente a los nutrientes de los suelos estudiados en las diferentes concentraciones de arsénico.

1.6 Variables

Tabla 1
Variables independientes y dependientes

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES
VARIABLES INDEPENDIENTES	Físico-químicas	Cantidad Suministrada de As	mg/Kg
	Físico-químicas	Concentración de As en la planta	mg/Kg
VARIABLES DEPENDIENTES	Bioquímica	Concentración de Glomalina en el suelo	mg/ml
		Concentración de Prolina en la planta	mg/ml

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO II

2 Marco teórico

2.1 Arsénico

El arsénico es un elemento natural de la corteza terrestre; ampliamente distribuido en todo el medio ambiente, presente en el aire, agua y tierra. En su forma inorgánica es muy tóxico (OMS, 2018).

El arsénico, cuyo símbolo es As y número atómico 33, es un elemento de color gris plateado brillante, quebradizo, amorfo. Sus compuestos tienen conductividad baja, por eso se comporta como metal o como no metal y de ahí su denominación de metaloide. Se oxida fácilmente en contacto con el aire húmedo y produce trióxido; es muy tóxico, aunque algunas de sus formas orgánicas intervienen en los procesos metabólicos de varias especies. Su nombre deriva del griego arsenikos, que significa 'potente' (Ramírez, 2013).

El arseniato As(V) es la especie arsenical más difundida en el medio ambiente, y la mayoritaria en agua y suelos; como luego veremos, está presente en plantas, algas, animales acuáticos y terrestres. El arsenito As(III) es la forma inorgánica reducida y está presente en forma minoritaria en el agua, suelo y seres vivos; durante mucho tiempo fue considerada la especie arsenical más tóxica. Los niveles de base de As en suelos y sedimentos aumentan cuando hay fuentes de contaminación naturales o antropogénicas (Bundschuh et al., 2008).

2.1.1 Arsénico en el Perú

En Argentina, Bolivia, Chile, Perú, Ecuador y Colombia, el arsénico está presente en el agua, principalmente subterránea, como As geogénico mayormente vinculado con el volcanismo en los Andes. El As proveniente de estas fuentes, pasa al entorno (aguas

superficiales y subterráneas, suelos, etc.) por disolución natural, desgaste de rocas (Argentina, Chile, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia) o actividades mineras (Chile, Bolivia, Perú, Ecuador). Otras fuentes de As, que son de importancia menor y muy localizada, son las actividades artificiales (por ejemplo, procesos electrolíticos de producción de metales) y agrícolas (por ejemplo, el uso de plaguicidas que contienen As) (Bundschuh et al., 2008).

2.1.2 Fuentes de contaminación

2.1.2.1 Arsénico en el organismo humano.

La cinética del arsénico es compleja, debido a que afecta a todos los aparatos y sistemas del cuerpo, puesto que interfiere con reacciones enzimáticas de amplia distribución. Los efectos más claros presentes derivados por la ingesta crónica de arsénico puede provocar cáncer de hígado, piel, pulmón, próstata, riñón, y vejiga; también se ha asociado la inhalación crónica de compuestos de arsénico con el cáncer de pulmón y el angiosarcoma, una forma poco común de cáncer de hígado (Lara, 2015).

Para evaluar el índice de riesgo para la salud humana, es necesario estimar el nivel de exposición a As, cuantificando las vías de exposición de dicho metal pesado al organismo objetivo. La exposición de elementos tóxicos para los seres humanos se produce a través de varias vías, incluida la inhalación, ingesta de alimentos y contacto dérmico. El cociente de peligro objetivo (THQ) y el riesgo carcinogénico (RC) son cálculos que se utilizan para evaluar el riesgo potencial para la salud humana asociado con el consumo de verduras (Yañez et al., 2019).

2.1.2.2 Arsénico en las plantas

Los compuestos de As(III) son 4 a 10 veces más móviles que los de As(V), hecho que aumenta su biodisponibilidad para los cultivos, las cinéticas de oxidación - reducción son

relativamente lentas y pueden hallarse en el suelo ambos estados de oxidación. El mecanismo de adsorción es específico, y es el mismo que controla la adsorción de los fosfatos, siendo afectado por el pH y por las condiciones redox del suelo. Ante un alto potencial redox, predomina el As(V), y la movilidad del As es baja; a medida que aumenta el pH y el potencial redox disminuye, predomina el As(III). La forma reducida de As está más sujeta a la lixiviación porque tiene mayor movilidad (Bundschuh et al., 2008).

Todas las plantas absorben metales del suelo donde se encuentran, pero en distinto grado, dependiendo de la especie vegetal, y de las características y contenido en metales del suelo. Las plantas pueden adoptar distintas estrategias frente a la presencia de metales en su entorno (Baker, 1981; Barceló & Poschenrieder, 2003).

Unas basan su resistencia a los metales con la estrategia de una eficiente exclusión del metal, restringiendo su transporte a la parte aérea. Otras acumulan el metal en la parte aérea en una forma no tóxica para la planta. La exclusión es más característica de especies sensibles y tolerantes a los metales, y la acumulación es más común de especies que aparecen siempre en suelos contaminados. La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes varía según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes. Estas diferencias en la absorción de metales, pueden ser atribuidas precisamente a la capacidad de retención del metal en cuestión, por el suelo de cultivo y a la interacción planta-raíz-metal y el metabolismo vegetal propio (Vig et al., 2003).

(Quispe, 2019) plantea que encontró elementos ecotóxicos como el arsénico en 4 tipos de hortalizas (poro, ajo, hierbabuena y cilantro) en la ciudad de Arequipa, donde los resultados no exceden los límites internacionales alimentarios para este metal.

2.2 Fitotoxicidad

La fitotoxicidad del arsénico viene determinada por la forma química en que está presente, variando su disponibilidad y por lo tanto su toxicidad, siendo el arsénico soluble en agua más fitotóxico que otros más fuertemente enlazados (Carrión, 2009). Los compuestos orgánicos de arsénico son aplicados en proporciones considerablemente más bajas que los inorgánicos, resultando menos fitotóxicos para los cultivos (Burló et al., 1992). La fitotoxicidad es dependiente de la sensibilidad del cultivo, así pues, el arsénico total del suelo no refleja adecuadamente la forma en que es disponible el elemento para la planta o su grado de toxicidad (Carbonell et al., 1994).

2.2.1 Movimiento de arsénico en plantas

La acumulación de estos metales pesados como As, Cd, Pb, Cr, Zn, Cu y Ni en las células ha dado lugar a diferentes alteraciones a nivel fisiológico, bioquímico y celular que conduce al daño severo a la planta (Yadav et al., 2014).

La presencia de arsénico dentro de las células vegetales tiene efectos fisiológicos negativos para la planta que originan una serie de respuestas (síntomas de toxicidad). La fitotoxicidad ocasionada por las altas concentraciones de metales pesados da como resultado clorosis, crecimiento débil de las plantas y puede incluso ocasionar reducción en la captación de los nutrientes así como desórdenes en el metabolismo (Ruiz & Armienta, 2012).

En otro hallazgo (Yadav et al., 2014) observó que la sustitución del átomo central de magnesio (Mg) de la clorofila con As conduce al desmantelamiento de esta, resultando en el desglose de la fotosíntesis y el crecimiento del girasol. También se informa que el arsénico tiene gran potencial para bloquear varios procesos metabólicos en la célula y puede interactuar con grupos sulfhidrilos de las proteínas, y reemplazar el grupo fosfato del ATP.

2.2.2 Translocación

El contenido de metales en los cultivos depende de una gran variedad de factores. De todos ellos, hay que destacar la especie vegetal, el tipo de suelo y sus características físico-químicas, ya que influyen tanto en la toma de los metales por la planta como en su distribución entre los diferentes órganos vegetales (Peris, 2006).

2.3 Respuesta bioquímica al estrés causado por metales pesados en el vegetal y suelo

2.3.1 Medición de prolina en la lechuga

La prolina es un aminoácido proteinogénico, con una conformación rígida, es esencial para el metabolismo primario. La acumulación de prolina en plantas estresadas tiene una función de protección (Cardozo & Quiriban, 2014). El aumento del contenido de prolina para actuar como un agente osmótico, protegiendo a la planta de la deshidratación (López, 2011).

Además de su rol como soluto en el ajuste osmótico, la prolina contribuye a estabilizar estructuras subcelulares, membranas, proteínas, eliminación de radicales libres y como buffer del potencial redox bajo estrés. La función de la prolina es: como osmolito, estabiliza las macromoléculas, un destino para el exceso de reductantes y almacenamiento de carbono y nitrógeno para usar luego de transcurrido el déficit hídrico. Se conoce que luego de un estrés salino, sequía y metal ocurre una importante acumulación de prolina, debido a un aumento de la síntesis o disminución de la degradación (Cardozo & Quiriban, 2014). La prolina libre actúa como un osmoprotector, estabilizador de proteínas, quelato de metales, inhibidor de LPO (peroxidación de lípidos) y eliminador de OH⁻ y O₂; por lo tanto, la prolina no es sólo una importante señal redox, sino también un secuestrador de EROs (especies reactivas de oxígeno) formados ante condiciones de estrés (Gill & Tuteja, 2010).

2.3.2 Medición de glomalina en el suelo

La glomalina es una glicoproteína que protege a las hifas durante el transporte de nutrientes desde la planta hasta el extremo de la hifa y desde el suelo hasta la planta. La glomalina actúa como un aglutinante de minerales y materia orgánica, por lo que está en directa relación con la estabilidad de agregados y la estructura del suelo. En conclusión, la cuantificación de glomalina en un ecosistema tiene varias implicancias, ya que su abundancia estaría reflejando buenas posibilidades nutricionales para la planta debido al incremento de volumen radicular (sobre todo en lo relacionado a la absorción de P), la mejor agregación del suelo, infiltración de agua, mayor permeabilidad al aire, actividad microbiana general y resistencia a la erosión del suelo, entre otros procesos (Grumberg et al., 2010).

Se pueden evaluar dos fracciones de la glomalina: la glomalina total (GT) y la glomalina fácilmente extraíble (GFE). La primera representa la máxima cantidad que puede ser extraída y está fuertemente unida a las partículas de suelo, requiriendo por ello más tiempo (ciclos múltiples) de exposición a altas temperaturas para su extracción. Mientras que la GFE es el pool de más reciente deposición e incluso se ha sugerido que proviene de una descomposición parcial de la glomalina más estable (GT) (Rodríguez et al., 2020).

2.4 Propiedades fisicoquímicas del suelo

El suelo actúa en general como una barrera protectora con la capacidad de filtrar, descomponer, neutralizar, almacenar contaminantes y evitar en gran parte su biodisponibilidad. Esta capacidad depuradora de un suelo depende de los contenidos en materia orgánica, carbonatos y oxihidróxidos de hierro y manganeso, de la proporción y tipo de minerales en arcilla, de la capacidad de intercambio catiónico, pH, textura, permeabilidad y actividad microbiana; su poder depurador de un suelo tiene un límite, cuando se superan esos límites

para una o varias sustancias, el suelo funciona como contaminado y es fuente de contaminantes (Galán & Romero, 2008).

El suelo acumula y concentra los metales pesados por su capacidad de retención en las capas superficiales, donde se encuentra la parte biológica más activa del suelo. Las reacciones químicas que suceden en el suelo controlan el movimiento de los metales y su absorción por las plantas, es necesario conocer de qué manera se comportan los metales en el suelo y cómo repercute su comportamiento en la transferencia de metales a las plantas (Peris, 2006).

2.4.1 Textura

El grado de toxicidad y bioacumulación está influenciado por las propiedades del suelo, especialmente por el pH y la textura (Sacristan, 2015). Por consiguiente, los suelos arcillosos retienen más metales por adsorción o en el complejo de cambio de los minerales en arcilla y los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación (Galán & Romero, 2008).

2.4.2 pH

El pH del sustrato controla las reacciones químicas que determinan si los nutrientes van a estar o no disponibles (solubles o insolubles) para su absorción. Por tal motivo, los problemas nutritivos más comunes ocurren en los cultivos cuando el pH se encuentra fuera del rango óptimo (Bárbaro et al., 2014). La adsorción de metales es dependiente del pH, por lo cual la adsorción es más alta en suelos menos ácidos, mientras que las condiciones ácidas favorecen la desorción y la liberación de los metales de nuevo a la solución del suelo (GTIS & FAO, 2019).

2.4.3 Conductividad eléctrica

La solución del suelo contiene sales solubles en mayor o menor proporción, pero si la cantidad de estas aumenta y alcanzan un límite, la vegetación no puede subsistir. Los principales cationes que dan origen a la salinidad son: sodio, calcio, magnesio, potasio, y los principales aniones son: sulfatos, cloruros, carbonatos y bicarbonatos (Andrades & Martínez, 2014).

2.4.4 Materia orgánica

La adición de enmiendas orgánicas e inorgánicas es muy efectiva para reducir la biodisponibilidad de los metales pesados en los suelos al aumentar el número de sitios de unión y modificar el pH del suelo (GTIS & FAO, 2019)

La materia orgánica es un indicador de la calidad del suelo, debido a que incide directamente sobre propiedades edáficas (como la estructura y disponibilidad de carbono y nitrógeno), y que posee una influencia más significativa sobre la calidad del suelo y su productividad (Silva, 2004).

2.4.5 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico depende del tipo de minerales de la arcilla, de la materia orgánica, de la valencia y del radio iónico hidratado del metal, en consecuencia a mayor tamaño y menor valencia, menos frecuentemente quedan retenidos (Galán & Romero, 2008).

2.4.6 Humedad

Las condiciones cambiantes de la humedad del suelo ante la presencia o ausencia de oxígeno origina cambios en los estados de oxidación de algunos iones y compuestos, pudiendo ser un importante control de la movilidad de contaminantes (GTIS & FAO, 2019).

2.4.7 Nutrientes

La presencia de ciertos contaminantes también puede producir desequilibrios en los ciclos de nutrientes y la acidificación del suelo (GTIS & FAO, 2019).

2.4.7.1 Macronutrientes

Se encuentran presentes en el suelo en mayores cantidades para ser aprovechado por los cultivos. Su presencia es indispensable para el crecimiento y fructificación de las plantas. Los principales Macronutrientes son: Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Magnesio (Mg) (FAO, 2013).

2.4.7.2 Micronutrientes

Los micronutrientes son requeridos por las plantas en pequeñas cantidades, pero al igual que los macronutrientes son indispensables, pues su deficiencia ocasiona en la mayoría de los casos desórdenes fisiológicos en las plantas. Los principales Micronutrientes son: Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Zinc (Zn), Boro (B), Cobre (Cu), Molibdeno (Mo), Cloro (Cl), y Azufre (S) (FAO, 2013).

CAPÍTULO III

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

3.1.1 Descripción del área de estudio simular experimental

El estudio se realizó en un ambiente acondicionado en el edificio Antonio Raymondi de la Universidad Nacional de San Agustín, situado en el distrito de Arequipa, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa.

3.1.2 Material de estudio

Constituido por los suelos agrícolas de los distritos de Tiabaya, Zamácola, Uchumayo y Cayma, teniendo como objeto de estudio a la lechuga (*Lactuca sativa*), cultivada en los diferentes suelos agrícolas durante un periodo de 3 meses y medio.

3.1.3 Población y muestra

3.1.3.1 Población

Suelos agrícolas de los distritos de Tiabaya, Zamácola, Uchumayo y Cayma.

Tabla 2
Coordenadas - puntos de muestreo

Estación de muestreo	Distrito	Ubicación
EM 001	Uchumayo	214571.02 m E 8182014.15 m S 19 K
EM 002	Tiabaya	221444.00 m E 8179624.00 m S 19 K
EM 003	Zamácola	221410.00 m E 8187543.99 m S 19 K
EM 004	Cayma	227973.00 m E 8188461.00 m S 19 K

Fuente: Datos expresados en sistema de coordenadas Universal Transversal De Mercator

Figura 1
Puntos de muestreo de suelos



Fuente: Imágenes elaboradas en el software Google Earth Pro – versión 7.3

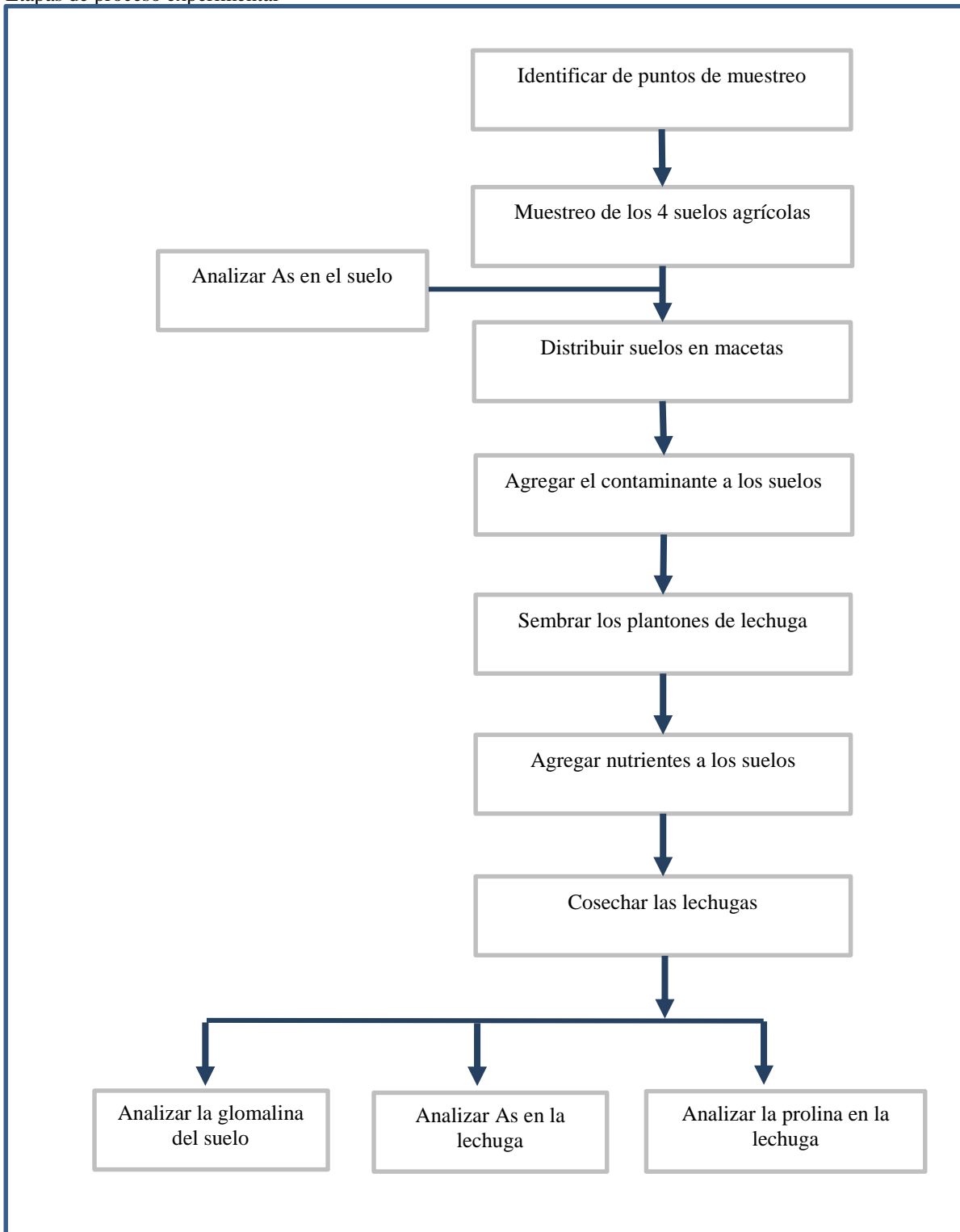
3.1.3.2 Muestra

Constituida por 60 macetas, divididos en 4 grupos de acuerdo al lugar de procedencia, cada grupo fue dividido en subgrupos de 5 para someterlos a las siguientes adiciones de arsénico: 60 mg/kg, 20 mg/kg y concentración inicial del contaminante 0 mg/kg.

3.2 Diseño experimental

En la figura 2 se muestra las etapas del proceso experimental, desde el muestreo de suelos, adición de contaminante y fertilizante, siembra y cosecha de lechugas hasta los análisis que se realizaron.

Figura 2
Etapas de proceso experimental



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3 se puede observar el diseño experimental del presente trabajo de investigación.

Tabla 3
Distribución de contaminante en macetas

Suelo	Concentración As (mg/kg)	Repeticiones				
		R1	R2	R3	R4	R5
Tiabaya	0	✓	✓	✓	✓	✓
	20	✓	✓	✓	✓	✓
	60	✓	✓	✓	✓	✓
Zamácola	0	✓	✓	✓	✓	✓
	20	✓	✓	✓	✓	✓
	60	✓	✓	✓	✓	✓
Uchumayo	0	✓	✓	✓	✓	✓
	20	✓	✓	✓	✓	✓
	60	✓	✓	✓	✓	✓
Cayma	0	✓	✓	✓	✓	✓
	20	✓	✓	✓	✓	✓
	60	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Elaboración propia

3.2.1 Muestreo de suelos

La toma de muestras se realizó según la guía de muestreo de suelos del Ministerio del Ambiente¹(MINAM, 2014), tomando 6 puntos de muestreo a una profundidad de 30 cm para conformar una muestra compuesta representativa del área.

3.2.1.1 Materiales

- 01 Pala
- 10 Sacos

¹ GUÍA PARA MUESTREO DE SUELOS: En el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo

3.2.2 Preparación del suelo para el cultivo de la lechuga (*Lactuca sativa*)

3.2.2.1 Adición de arseniato sódico dibásico heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Los suelos fueron recolectados de los distritos de Tiabaya, Uchumayo, Zamácola y Cayma, siendo distribuidos en 15 macetas respectivamente; para la aplicación de contaminante al suelo, previamente se realizó el secado de los mismos a fin de obtener un peso estable. Se añadió dos concentraciones de arsénico sódico dibásico heptahidratado (20 mg/Kg y 60 mg/Kg) y uno de control (0 mg/Kg).

- Para la preparación de la solución a 20 mg/Kg de arsénico se diluyó 5.097 g de arseniato sódico dibásico heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en 500 mL de agua potable.
- Para la preparación de la solución a 60 mg/kg de arsénico se diluyó 15.291 g de arseniato sódico dibásico heptahidratado en 500 mL de agua potable. Para el control se regó con 500 ml de agua potable.

3.2.2.2 Materiales

- Macetas durakota N°8
- 01 Probeta de 1 L.
- 03 baldes de plástico de 20L
- Balanza
- Luna de vidrio
- Agua potable
- Arseniato de sodio heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

3.2.2.3 Adición de fertilizante

Se añadió el fertilizante (Balance) el cual presenta la siguiente composición N 20%, P 20%, K 20%, aminoácidos 15g/L, algas marinas 35g/L, vitamina B1 250mg/L, Mg 0.3 g/L, Fe 0.85g/L, Zn 2 g/L y B 0.5g/L, a los cuatro suelos en evaluación (Zamacola, Tiabaya, Cayma y Uchumayo), se diluyeron 80ml de fertilizante en 15 litros de agua, adicionando 25ml de la mezcla a cada una de las 60 macetas.

3.2.2.3.1 Materiales

- Macetas durakota N°8
- 01 Probeta de 1 L.
- 01 baldes de plástico de 20L
- Balanza
- Luna de vidrio
- Agua potable
- Fertilizante balance

3.2.3 Siembra de especies

Se procedió a cultivar la especie vegetal (*Lactuca sativa*) en las 60 macetas de estudio, posterior a un 1 mes de haber agregado el contaminante (As). Se usaron plantones de lechuga para la siembra.

3.2.3.1 Materiales

- 02 Reglas
- 75 Plantones de lechuga
- 12 Espátulas de plástico

- 01 Jarra de plástico de 01 L
- 02 lapiceros
- 01 Bitácora

3.2.4 Análisis de suelos

- La materia orgánica total del suelo se determinó mediante el método de pérdida por ignición (LOI) (Heiri et al., 2001).
- El pH y la conductividad del suelo se determinaron utilizando el suelo 1: 1 para método de agua desionizada (Mclean, 1983).
- El fósforo extraíble con agua (WEP) se determinó usando un suelo tamizado 1:10 peso / volumen para proporción de agua desionizada, las lechadas de muestra se agitaron en una mesa agitadora durante 1 hora a 200 rpm, se centrifugó durante 10 min a 6000 rpm, y el sobrenadante se filtró a través de filtros de fibra de vidrio de 0,45 μm (Kleinman et al., 2007).
- Las concentraciones de nutrientes de los extractantes fueron analizadas en un analizador discreto SEAL AQ2 (SEAL Analytical Inc., Werkstrasse, Alemania) utilizando el método: Azul de molibdeno para WEP, método de fenato alcalino para NH_4^+ , y método de reducción de cadmio para NO_3^- (Eaton et al., 1995).
- Las concentraciones de metales se determinaron utilizando un analizador de fluorescencia de rayos X portátil (Vanta M pXRF, con un tubo de rayos X Rh y W, Olympus, Waltham, Ma, EE. UU.) siguiendo las instrucciones del fabricante. Brevemente, se molieron 5 g de suelo tamizado en un mortero durante 1 min, envasado en una taza de muestra, cubierto con una película de polipropileno de 4,0 μm y escaneado utilizando el pXRF.

3.2.5 Determinación de los parámetros bioquímicos en suelos y plantas

3.2.5.1 Determinación de la concentración de glomalina en suelo

Para este estudio, las proteínas del suelo relacionada con la glomalina (GRSP) se cuantificaron utilizando el método de Bradford “Proteína total del suelo relacionada con la glomalina (T-GRSP)”. El proceso de extracción de la glomalina se describe a continuación:

- a) Se recuperó las fracciones de suelo EE-GRSP (Glomalin Easily extraíble- Glomalin Related Soil Protein), autoclavando 1.0 g de suelo con 4 mL de citrato de sodio 20 M, pH 7.0 a 121 °C por 30 min. Solo se requiere un ciclo de autoclave para obtener esta fracción.
- b) Después de este proceso de extracción, la fracción T-GRSP GRSP (Glomalin Totally extraíble- Glomalin Related Soil Protein) se extrajo de la misma muestra de suelo, usando 4 mL de citrato de sodio 50 M, pH 8.0 y repitiendo el proceso de autoclavado a 121 °C por 60 min.
- c) Después de cada extracción/ciclo de autoclave la muestra se centrifugó a 5000 rpm durante 15 min (2000 rpm por 30 min). El sobrenadante se decanta y se almacena a 4 °C hasta el análisis.
- d) El proceso de extracción continua hasta que el sobrenadante sea transparente o de color amarillo claro (este paso se realizará de 3 a 4 veces, dependiendo del color del sobrenadante, que deberá ser un color miel).
- e) La determinación de concentración de proteínas se realizará mediante espectrofotometría, usando como patrón una dilución de albúmina de suero bovina (BSA) y en una longitud de onda de 595 nm.

3.2.5.2 *Materiales*

- Autoclave
- Citrato de sodio
- Agua destilada
- Probeta
- Vasos precipitados
- Balanza digital
- Espectrofotómetro
- Bandejas
- Refrigerador

3.2.5.3 *Determinar la concentración de prolina en la lechuga*

La metodología para determinar la concentración de prolina en planta es “Determinación de prolina con ensayo colorimétrico” (Ábrahám et al., 2010), la cual se describe a continuación:

- a) Se recolectan las muestras, luego se miden el peso fresco y se usaran aproximadamente 100 mg para una reacción. Alternativamente, se congelarán las muestras en nitrógeno líquido/hielo.
- b) Se agrega ácido sulfosalicílico al 3% (5 μL / mg de peso fresco) (1.5%) y deberá molerse el material vegetal. Se debe mantener los tubos en hielo hasta terminar con todas las muestras.
- c) Se centrifuga las muestras durante 5 minutos a temperatura ambiente.
- d) Luego se prepara la mezcla de reacción en un tubo separado: 100 μL de ácido sulfosalicílico al 3%, 200 μL de ácido acético glacial, 200 μL ninhidrina ácida.

- e) Se agrega 100 μ L del sobrenadante del extracto de la planta.
- f) Se incuba los tubos a 96 °C durante 60 min.
- g) Se debe terminar la reacción en hielo.
- h) Se extraen las muestras con tolueno, debiendo agregarse 1 ml de tolueno a la mezcla de reacción, agitar en vórtex las muestras durante 20 s y dejar en el banco durante 5 minutos para permitir la separación de las fases orgánica y acuosa.
- i) Se debe retirar el cromóforo que contiene tolueno en un tubo nuevo.
- j) Al finalizar, se medirá la absorbancia a 520 nm usando tolueno como referencia.
- k) La concentración de prolina se determina utilizando una curva de concentración estándar.

3.2.5.4 Materiales

- Autoclave
- Citrato de sodio
- Ácido acético
- Ácido sulfosalicílico
- Ninhidrina ácida
- Tolueno
- Vasos precipitados
- Probeta
- Balanza digital
- Espectrofotómetro
- Refrigerador

3.2.6 Análisis estadístico

Para evaluar la respuesta de la glomalina y prolina se utilizó la prueba estadística de Kruskal Wallis, es un método no paramétrico usado para probar si un grupo de datos proviene de una misma población y para analizar la relación entre el arsénico versus los nutrientes se empleó el coeficiente de correlación de Pearson.

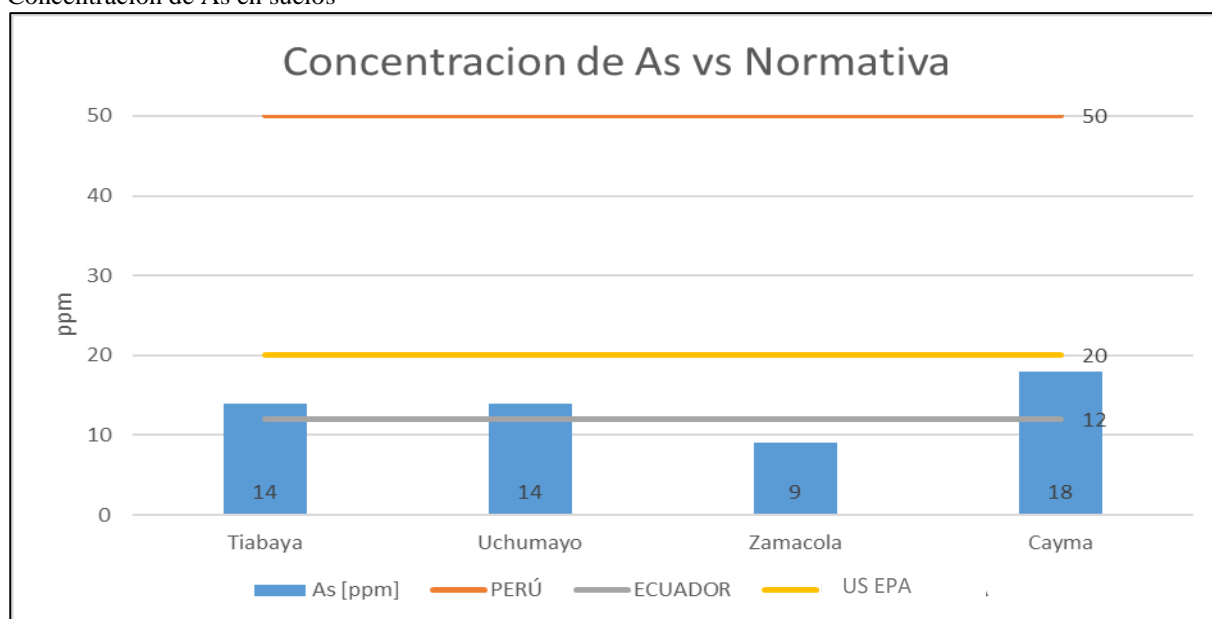
CAPÍTULO IV

4 Análisis de resultados

4.1 Caracterización de la presencia de arsénico (As) en suelos estudiados

La concentración inicial de arsénico en los suelos de Tiabaya y Uchumayo fueron de 14 ppm, Zamácola de 9 ppm y Cayma de 18 ppm. Dichas concentraciones no superaron los estándares de calidad de suelos agrícolas² y la normativa de la US-EPA³, los cuales son de 50 ppm y 20 ppm respectivamente, por lo contrario, las concentraciones de Tiabaya, Uchumayo y Cayma superaron el valor establecido según la normativa ecuatoriana⁴ que es de 12 ppm para suelo agrícola.

Figura 3
Concentración de As en suelos



Fuente: Concentración de contaminante expresados en ppm, y su comparativa con respecto de normativa internacional.

² Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo.

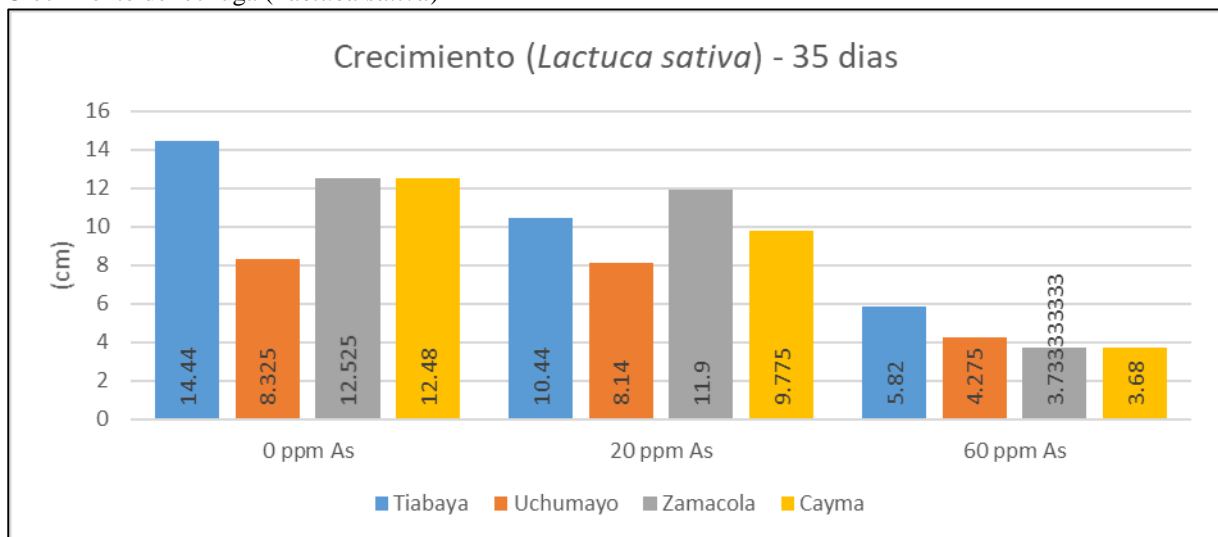
³ US EPA/600/4-91/029 Estándar de calidad ambiental para suelo.

⁴ Registro oficial N° 387: Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados.

4.2 Crecimiento de la planta en las diferentes concentraciones de arsénico

Según la figura 4, se evidenció el crecimiento de la lechuga (*Lactuca sativa*) durante los 35 días, observando diferencias significativas en el crecimiento de las lechugas según las diferentes concentraciones, donde el suelo 0 ppm As presentó una altura máxima de 14 cm y una altura mínima de 8 cm, en comparación con la concentración de 60 ppm As, las cuales presentaron una altura máxima de 6 cm y una altura mínima de 4 cm. Por el contrario, no se encontró una diferencia en el crecimiento de las lechugas con concentraciones de 0 ppm As y 20 ppm As.

Figura 4:
Crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa*)

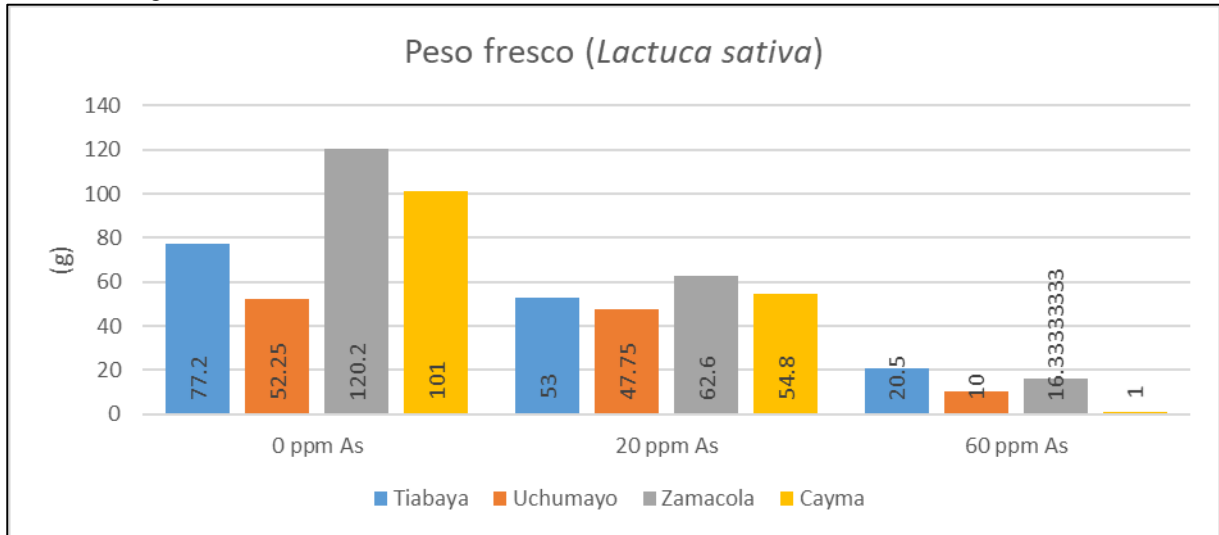


Fuente: Elaboración propia

En el suelo de Tiabaya los crecimientos de lechuga (*Lactuca sativa*) fueron de 14.44 cm (0 ppm As), 10.44 cm (20 ppm As) y de 5.82 cm (60 ppm As), en el suelo de Cayma fueron 12.48 cm (0 ppm As), 9.775 cm (20 ppm As) y de 3.68 cm (60 ppm As), en el suelo de Uchumayo fueron 8.325 cm (0 ppm As), 8.14 cm (20 ppm As) y de 4.275 cm (60 ppm As) y en el suelo de Zamácola fueron 12.525 cm (0 ppm As), 11.9 cm (20 ppm As) y de 3.73 cm (60 ppm As), demostrando que a mayor concentración de arsénico la planta se ve afectada en su crecimiento.

En la cosecha de lechuga (*Lactuca sativa*) se evaluó el desarrollo de la planta según el peso de la planta, la altura de la planta y longitud de la raíz:

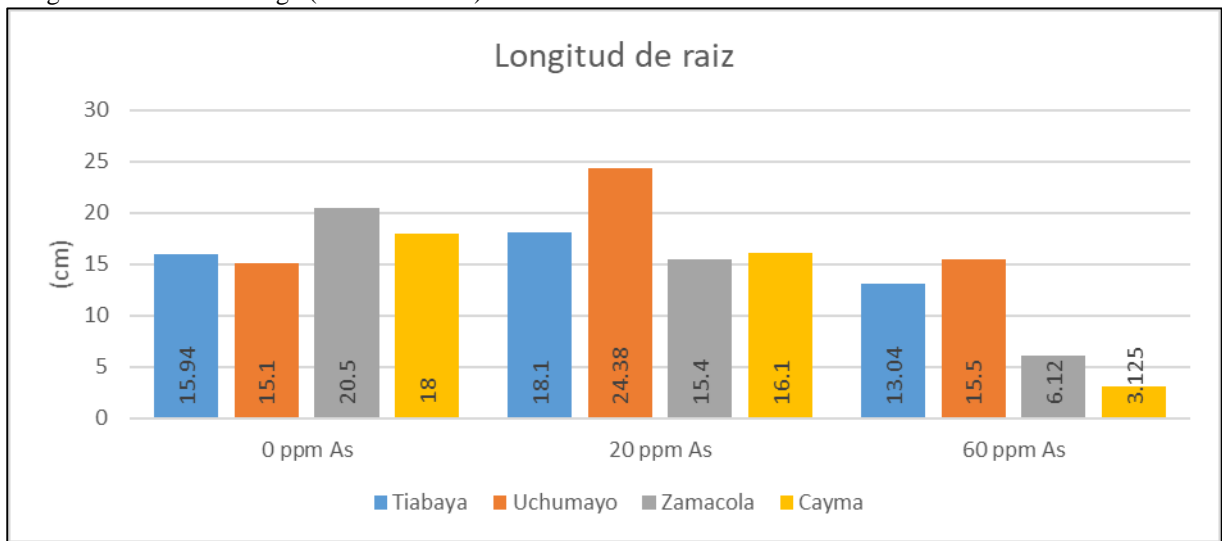
Figura 5
Peso de lechuga (*Lactuca sativa*)



Fuente: Elaboración propia

La lechuga cultivada en el suelo de Zamácola registró un peso fresco de 120.2 g, seguido por Cayma con un peso de 101 g. y las de Tiabaya con un peso de 77.2g en una concentración de 0 ppm; a 20 ppm los pesos de las lechugas se encuentran entre 47.75 - 62.6 g, a diferencia de 60 ppm donde la lechuga de Cayma registro el menor peso 1g, demostrando que a mayor concentración del arsénico menor es el peso de las lechugas.

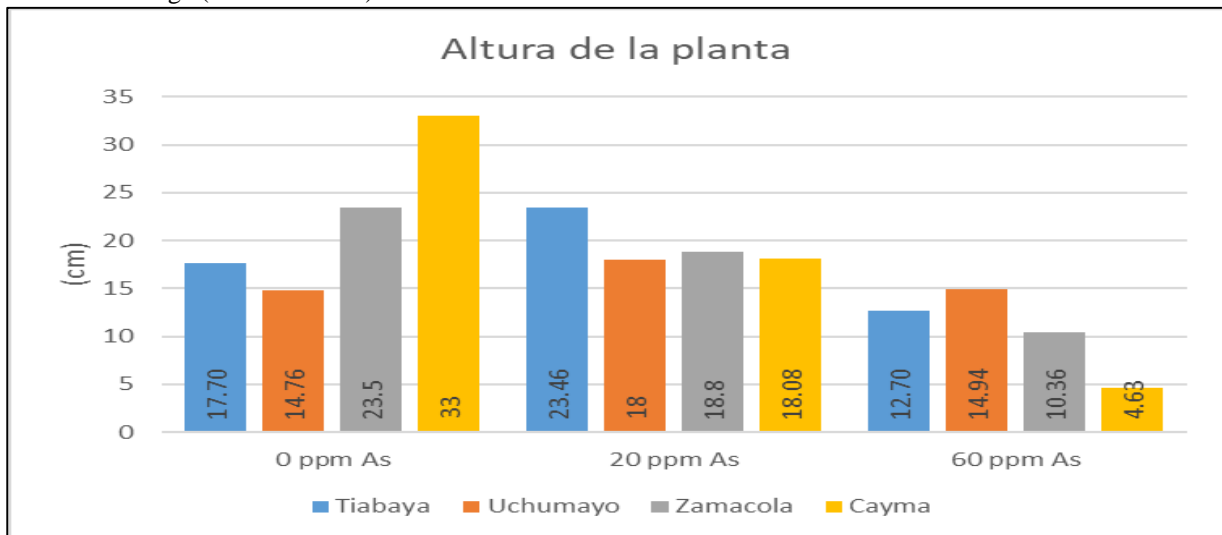
Figura 6:
Longitud de raíz de lechuga (*Lactuca sativa*)



Fuente: Elaboración propia

En la figura 6, se observa que a una concentración de 60 ppm es menor el desarrollo de las raíces, donde las raíces de las lechugas cultivadas en los suelos de Zamácola y Cayma presentaron una diferencia de la longitud significativa con respecto a las concentraciones de 20ppm – 60 ppm, a diferencia de los otros suelos donde la longitud de la raíz es constante a diferentes concentraciones.

Figura 7
Altura de lechuga (*Lactuca sativa*)



Fuente: Elaboración propia

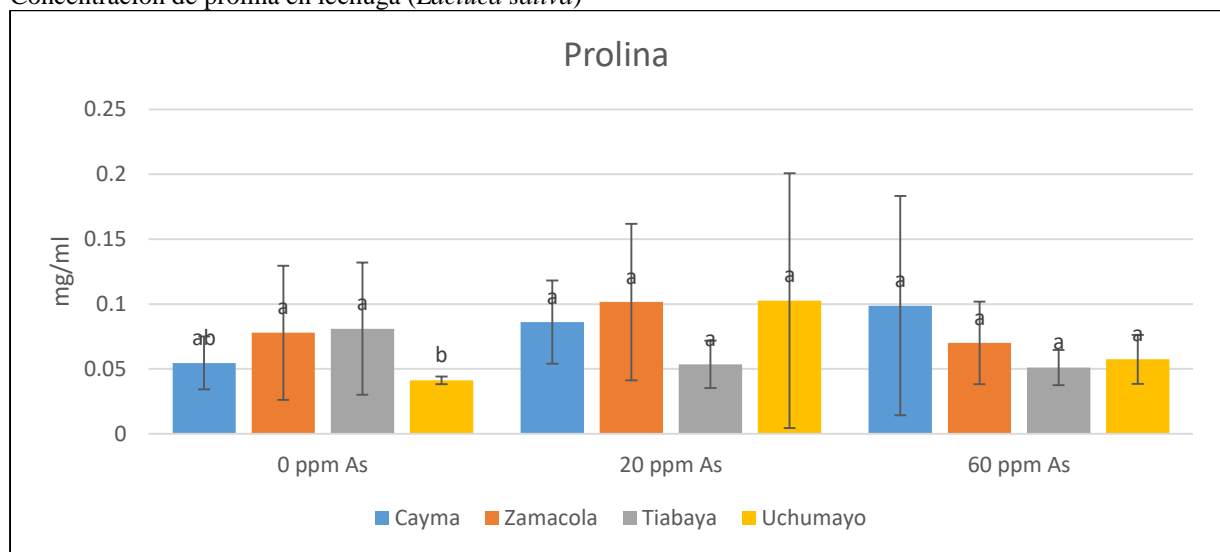
En la figura 7, se observa que a una concentración de 60ppm la altura de planta disminuye, siendo las lechugas cultivadas en los suelos de Cayma y Zamácola las que menor crecimiento obtuvieron.

Se puede ver que las lechugas cultivadas en suelos de Cayma registraron menor desarrollo a mayor concentración del arsénico presente en su composición.

4.3 Respuesta de la prolina ante la presencia de arsénico en los suelos.

Según la figura 8 se puede observar que la concentración de prolina con respecto a los suelos donde fueron cultivados.

Figura 8
Concentración de prolina en lechuga (*Lactuca sativa*)



Fuente: Elaboración propia

A 0 ppm de exposición, las concentraciones de prolina en las lechugas fueron de la siguiente manera: Tiabaya > Zamácola > Cayma > Uchumayo, donde Tiabaya tiene la mayor respuesta y Uchumayo la menor respuesta.

A 20 ppm, la respuesta de prolina en las lechugas fue de la siguiente forma Uchumayo > Zamácola > Cayma > Tiabaya, donde Uchumayo tiene la mayor respuesta y Tiabaya la menor respuesta.

A 60 ppm, la respuesta de prolina en las lechugas fue de la siguiente forma: Cayma>Zamácola>Uchumayo>Tiabaya, donde Cayma tiene la mayor respuesta y Tiabaya la menor respuesta.

Las lechugas cultivadas en Cayma presentaron una respuesta de la prolina con respecto a las concentraciones del As, representado de la siguiente forma 60 ppm>20 ppm>0 ppm, mientras que las cultivadas en Zamácola registraron su mayor respuesta de prolina a 20 ppm y de igual forma las cultivadas en Uchumayo, a diferencia de las cultivadas en Tiabaya que a una concentración de 20 ppm y 60 ppm fue constante la respuesta de la prolina ante la presencia del As.

La función protectora de la prolina fue constante a una concentración de 20 ppm para las lechugas cultivadas en los suelos de Cayma, Zamácola, Uchumayo y menor para las cultivadas en Tiabaya, a diferencia de las plantas cultivadas en Cayma a una concentración de 60 ppm, donde presentan una mayor respuesta de la prolina con respecto a las plantas cultivadas los otros suelos.

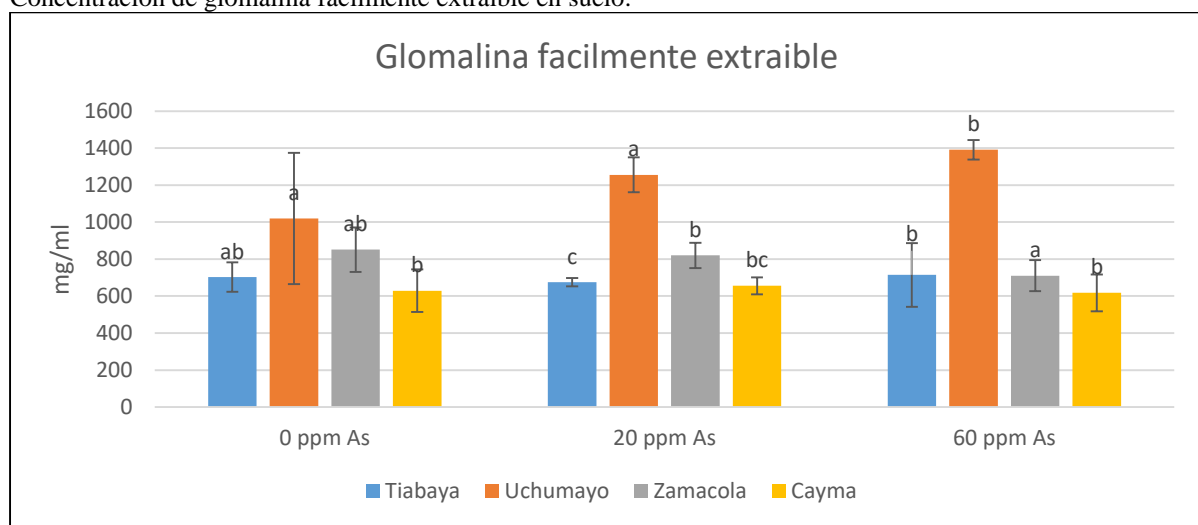
Del análisis con la prueba Kruskal Wallis de la prolina a 0 ppm As, se puede observar que los suelos de Cayma, Zamácola y Tiabaya presentan una respuesta similar a diferencia del suelo de Uchumayo sin la presencia del contaminante, mientras que, a 20 y 60 ppm, los cuatro suelos tienen una reacción de protección similar ante la presencia de arsénico.

4.4 Respuesta de la glomalina frente al arsénico en los suelos

En la figura 9, se observa la presencia de la glomalina fácilmente extraíble a concentraciones de 20 ppm y 60 ppm, registrándose un aumento en los suelos de Uchumayo con respecto a las concentraciones del As, a diferencia del suelo de Zamácola donde se observa que la presencia de GFE disminuye conforme aumenta la concentración de As y los suelos de

Cayma y Tiabaya tienen una presencia constante en las dos concentraciones de As, en comparación con los suelos que no presentan contaminante (0 ppm) y mediante la aplicación de la prueba de Kruskal Wallis se puede observar una similitud de respuesta de la GFE a 0 ppm As, por otro lado en la concentración de 20 ppm As el suelo de Uchumayo muestra una diferencia de respuesta siendo esta mayor a comparación con los otros suelos, de igual manera a 60 ppm As con el suelo de Zamácola.

Figura 9
Concentración de glomalina fácilmente extraíble en suelo.

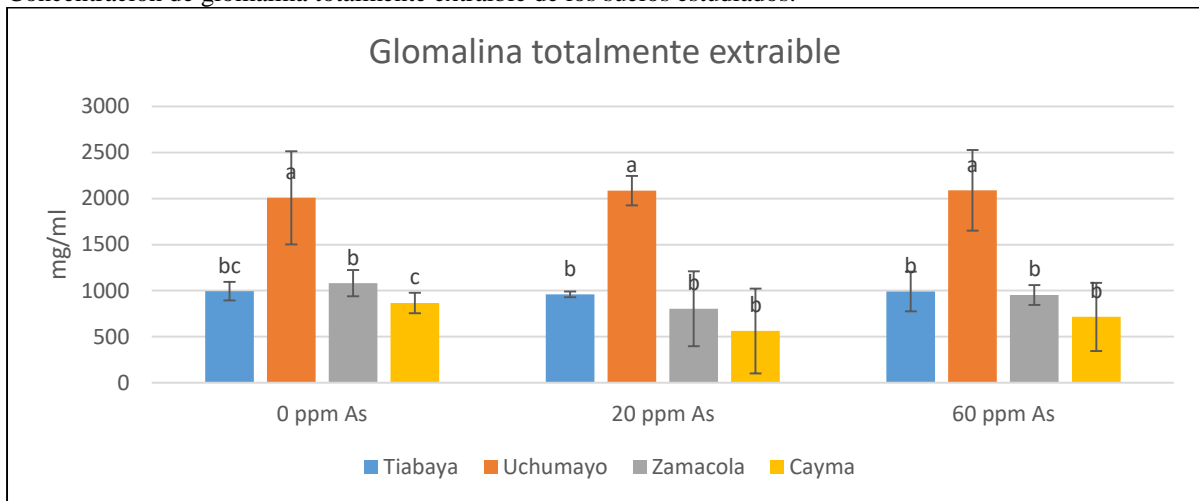


Fuente: Elaboración propia

En la figura 10, se observó la presencia de la glomalina totalmente extraíble ante la presencia de 0 ppm, 20 ppm y 60 ppm, donde se evidencia un aumento ligero de la presencia de la GTE en los suelos de Uchumayo a diferencia del suelo de Tiabaya donde la presencia de la GTE es constante ante las concentraciones de 0 ppm, 20 ppm y 60 ppm As. Por otro lado, se observó en el suelo de Zamácola que la presencia de GTE disminuye en 20 ppm y aumenta en 60 ppm, de igual manera sucede el suelo de Cayma.

Mediante la aplicación de la prueba de Kruskal Wallis se puede observar que hay una relación de la GTE en 0 ppm As donde los suelos de Tiabaya, Cayma y Zamácola presentaron una similitud de respuesta de la glomalina a diferencia del suelo de Uchumayo, la misma tendencia se muestra en las concentraciones de 20 ppm y 60 ppm As.

Figura 10
Concentración de glomalina totalmente extraíble de los suelos estudiados.



Fuente: Elaboración propia

4.5 Relación del arsénico frente a los macronutrientes y micronutrientes en el cultivo de la lechuga (*Lactuca Sativa*).

En la tabla 4 se encuentra la relación de arsénico y la cantidad de micronutrientes y macronutrientes.

Tabla 4
Relación del arsénico vs macronutrientes y micronutrientes de la lechuga.

		Macronutrients					Micronutrients															
		Ca	K	Mg	P	S	B	Cu	Fe	Mn	Na	Ni	Si	V	Zn							
<i>L. sativa</i>	Soil As	p-value	Yellow	White	White	Orange	Orange	Orange	Purple	Green	White	Orange	White	White	White							
		Correlation	Blue	Pink	Light Blue	Pink	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Pink	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Light Blue	Pink							
		-1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
p-value		Green		Orange		Yellow		Purple														
		<0.05		<0.01		<0.001		<0.0001														

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del analizador de fluorescencia de rayos X portátil e ICP- MS realizado por el Laboratorio de Investigación de la Universidad Purdue en el marco del proyecto Agricultura Urbana Sostenible.

Según la tabla 4, se observa que varía la concentración de los macronutrientes y micronutrientes según la presencia del As en el suelo presentando una correlación positiva, con el Fe fue moderada (0.40668), baja con el Ca (0.3534), S (0.29213), B (0.3299), Cu (0.2652), Ni (0.32494) fue muy baja con el Mg (0.15468), Na (0.16761) y V (0.14131).

Según la tabla 4, se observa que varía la concentración de los macronutrientes y micronutrientes según la presencia del As, en el suelo presentan una correlación negativa, con el P fue baja (-0.32186), Mn (-0.21255) y muy baja con el K (-0.10453) y Zn (-0.08844).

La presencia de As en los suelos afectó la interacción de los macronutrientes y micronutrientes disponibles para la lechuga.

En la tabla 5 se observa la relación de arsénico y la cantidad de micronutrientes y macronutrientes en los suelos de Tiabaya, Uchumayo, Zamácola y Cayma

Tabla 5
Relación de arsénico vs macronutrientes y micronutrientes en los suelos estudiados.

		Macronutrientes					Micronutrientes								
		Ca	K	Mg	P	S	B	Cu	Fe	Mn	Na	Ni	Si	V	Zn
Tiabaya	Soil As	p-value													
		Correlation													
Uchumayo	Soil As	p-value													
		Correlation													
Zamácola	Soil As	p-value													
		Correlation													
Cayma	Soil As	p-value													
		Correlation													

-1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del analizador de fluorescencia de rayos X portátil realizado por el Laboratorio de Investigación de la Universidad Purdue en el marco del proyecto Agricultura Urbana Sostenible.

Según la tabla 5, en el suelo de Tiabaya, se observa que varía la concentración de los macronutrientes y micronutrientes según la presencia del arsénico, se presenta una correlación negativa, donde el P (-0.58977), K (-0.4716), Mn (-0.45339) tuvieron una correlación moderada y una correlación muy baja con el Zn (-0.12613), Si (-0.13369).

Según la tabla 5, en el suelo de Uchumayo, se observa que varía la concentración de los macronutrientes y micronutrientes según la presencia de arsénico en el suelo, presentando una correlación negativa moderada con P (-0.56297) y una correlación negativa baja con el V (-0.29918).

Según la tabla 5, en el suelo de Zamácola, se observa que varía la concentración de los macronutrientes y micronutrientes según la presencia del arsénico en el suelo presentando una correlación negativa, donde el K (-0.66079), Zn (-0.54954), P (-0.44611) tuvo una correlación moderada y una correlación baja con el Mn (-0.35576).

Según la tabla 5, en el suelo de Cayma, se observa que varía la concentración de los macronutrientes y micronutrientes según la presencia del arsénico en el suelo presentan una correlación negativa, donde el Na (-0.42339) tuvo una correlación moderada, una correlación baja con el Mg (-0.32095), V (-0.33287), Si (-0.29482), K (-0.26013), B (-0.22545) y Cu (-0.23421), y una correlación muy baja con el P (-0.13879) y Mn (-0.13879).

El arsénico, obtuvo una correlación moderada negativa con los macronutrientes en los suelos de Tiabaya, Uchumayo y Zamácola, a diferencia de los suelos de Cayma que tienen una correlación moderada negativa con los micronutrientes presentes en los suelos de los cuatro distritos en estudio.

Según la tabla 5, en el suelo de Tiabaya, se observa que varía la concentración de los macronutrientes y micronutrientes según la presencia del arsénico en el suelo, donde el V (0.60457) y B (0.46165) tuvo una correlación moderada, una correlación baja con el Ca (0.243), Mg (0.34822), S (0.24068), Fe (0.28718) y una correlación muy baja con el Cu (0.18717), Na (0.19934) y Ni (0.14357).

Según la tabla 5, en el suelo de Uchumayo, se observa que varía la concentración de los macronutrientes y micronutrientes según la presencia del arsénico en el suelo, donde el Ca (0.46347), Mg (0.51664), S (0.41666), B (0.43932) tuvo una correlación moderada, una correlación baja con el Cu (0.30743), Fe (0.37523), Mn (0.23684), Na (0.35197), Ni (0.27591) y Si (0.22125).

Según la tabla 5, en el suelo de Zamácola, se observa que varía la concentración de los macronutrientes y micronutrientes según la presencia del arsénico en el suelo, donde el Cu (0.52066), Fe (0.63066), Na (0.44387), Ni (0.56099) y V (0.48495) tuvo una correlación moderada, una correlación baja con el Ca (0.28974), B (0.28771) y una correlación muy baja con el Mg (0.1626), Na (0.19934) y Si (0.1791).

Según la tabla 5, en el suelo de Cayma, se observa que varía la concentración de los macronutrientes y micronutrientes según la presencia del arsénico en el suelo, donde el Fe (0.5814) tuvo una correlación moderada, una correlación baja con el Ca (0.20811), S (0.33025) y Si (0.38153) y una correlación muy baja con el Zn (0.19951).

El arsénico, obtuvo una mejor correlación con los micronutrientes en los suelos de Cayma, Tiabaya y Zamácola, a diferencia de los suelos de Uchumayo que tiene una correlación moderada con los macronutrientes presentes en los suelos de los cuatro distritos en estudio.

4.6 Discusión de resultados

De acuerdo a lo mencionado por Vásquez (2013) en sus resultados, se demostró que el contenido de prolina en hojas aumentó a medida que las plantas fueron tratadas con mayor concentración de plomo y tiempo de exposición. De igual forma en el presente trabajo de investigación encontramos el aumento de la prolina ante diferentes concentraciones de arsénico.

Además, Grumberg et al., (2010) encontró una correlación significativa positiva entre los valores de la glomalina, el contenido de carbono total, nitrógeno total y azufre inorgánico en el suelo y el rendimiento de cultivo de maíz. De igual manera en la investigación encontramos que hay una relación directa con la cantidad de macronutrientes, micronutrientes y el contenido de glomalina en la relación suelo - planta (*Lactuca sativa*), donde el contenido de la glomalina fácilmente extraíble fue mayor en el suelo de Uchumayo a 60 ppm de As, y una correlación positiva moderada B y V en el suelo de Tiabaya , en Uchumayo tuvo una correlación positiva moderada con Ca, Mg, S y B, en Zamácola tuvo una correlación positiva moderada con Cu, Fe, Na, Ni y V y en Cayma tuvo una correlación positiva moderada con Fe. Por otro lado, en el suelo de Uchumayo tuvo una correlación negativa moderada con el P (-0.56297), en el suelo de Zamácola una correlación negativa moderada con el K (-0.66079), Zn (-0.54954), P (-0.44611), en el suelo de Cayma tuvo una correlación negativa moderada el Na (-0.42339) y finalmente en Tiabaya tuvo una correlación moderada con el P (-0.58977), K (-0.4716) y Mn (-0.45339).

Como indica Pochuanca (2017) en sus resultados, el crecimiento se ve disminuido a mayor concentración de arsénico, donde la longitud total disminuyó en los tratamientos a partir de los 8 días hasta los 32 días, sin presentar diferencias significativas. La materia fresca fue aumentando con los días, en todos los tratamientos, sin embargo, se observó que los menores pesos fueron con 16 y 32 ppm de As, en comparación con lo observado en el presente trabajo de investigación encontramos que el crecimiento se ve disminuido a mayor concentración de arsénico y por tipo de suelo, donde se registró que el crecimiento a los 35 días donde el suelo 0 ppm As presentó una altura máxima de 14 cm y una altura mínima de 8 cm, en comparación con la concentración de 60 ppm As, las cuales presentaron una altura máxima de 6 cm y una altura mínima de 4 cm. y finalizando, los menores pesos fueron de la concentración de 60 ppm.

Conclusiones

Se concluyó que la concentración de arsénico no supero los estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos agrícolas y la normativa de la US-EPA, pero los suelos de Tiabaya, Uchumayo y Cayma superaron el valor límite de 12 ppm que establece la normativa ecuatoriana para calidad de suelo agrícola.

Se comprobó que la lechuga (*Lactuca sativa*) a los 35 días ha sido afectado por las diferentes concentraciones de arsénico (0 ppm, 20 ppm y 60 ppm) , para lo cual se evidenció que a una concentración de 60 ppm dicha planta registro los siguientes valores de altura para el suelo de Cayma(5.82 cm.), Tiabaya(3.68 cm), Uchumayo (4.28 cm) y Zamácola(3.73) cm. y sus pesos fueron de 1 g. , 20.5 g, 15.8 g. y 16.3 g. respectivamente, en comparación con las otras concentraciones donde el desarrollo promedio fue 19.6 cm y un peso de 54.5 g.

Se evidenció la función protectora de la prolina hacia la lechuga (*Lactuca sativa*), donde a una concentración de 20 ppm en los suelos de Cayma, Zamácola, Uchumayo fue constante y menor para las cultivadas en Tiabaya, a diferencia, de las plantas cultivadas en Cayma a una concentración de 60 ppm, donde presentan una mayor respuesta de la prolina con respecto a las plantas cultivadas de los demás suelos, del análisis estadístico se observó que la respuesta de la proteína fue similar en los cuatro suelos frente a 20 y 60 ppm As.

Se demostró que la glomalina fácilmente extraíble en el suelo de Uchumayo tuvo un aumento en su presencia a concentraciones de 20 ppm y 60 ppm de As, a diferencia del suelo de Zamácola donde se observa que la presencia de GFE disminuye conforme aumenta la concentración de As y los suelos de Cayma y Tiabaya tienen una presencia constante en las dos concentraciones de As, del análisis estadístico se observó que la respuesta de la proteína a 20 ppm en el suelo de Uchumayo fue diferente a comparación de los otros suelos, de igual manera a 60 ppm con el suelo de Zamácola.

Por otro lado, el suelo de Uchumayo presentó un aumento ligero de la presencia de GTE, a diferencia del suelo de Tiabaya donde la proteína fue constante en las concentraciones de 0 ppm, 20 ppm y 60 ppm As. Por otro lado, se observó en el suelo de Zamácola que la presencia de GTE disminuye en 20 ppm y aumenta en 60 ppm, de igual manera sucede en el suelo de Cayma, del análisis estadístico se observó que hay una relación en la respuesta de la GTE en 0 ppm As donde los suelos de Tiabaya, Cayma y Zamácola presentaron una similitud de respuesta de la glomalina a diferencia del suelo de Uchumayo, la misma tendencia se muestra en las concentraciones de 20 ppm y 60 ppm As.

El arsénico obtuvo una correlación positiva moderada con los micronutrientes en los suelos de Cayma, Tiabaya y Zamácola; una correlación moderada positiva con los macronutrientes en el suelo de Uchumayo; una correlación negativa moderada de macronutrientes en los suelos de Tiabaya, Uchumayo y Zamácola; una correlación negativa moderada con los micronutrientes con el suelo de Cayma.

Recomendaciones

Realizar estudios sobre la influencia de las proteínas como medio de protección en los cultivos ante la presencia de otros metales pesados.

Realizar estudios sobre la interacción de microorganismos en el sistema suelo-planta y su relación con los metales pesados.

Evaluar periódicamente la calidad de las aguas de riego, evitar el uso de plaguicidas en los cultivos agrícolas, para evitar la presencia y bioacumulación de metales pesados en los cultivos.

Realizar estudios considerando los parámetros fisicoquímicos del suelo (textura, materia orgánica, nitratos, fosfatos, carbono total, capacidad de intercambio catiónico, pH, conductividad) para obtener mayor información sobre interacción entre el sistema suelo-planta.

Bibliografía

Ábrahám, E., Hourton-Cabassa, C., Erdei, L., & Szabados, L. (2010). Methods for Determination of Proline in Plants. In *Plant Stress Tolerance, Methods in Molecular Biology* (R. Sunkar, Vol. 639, pp. 1–15). <https://doi.org/10.1007/978-1-60761-702-0>

Andrades, M., & Martínez, E. (2014). Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. 3ª ed. *Universidad de La Rioja, 3ra Edición*, 34.

Baker, A. J. M. (1981). Accumulators and Excluders - Strategies in the Response of Plants to Heavy Metals. *Journal of Plant Nutrition*, 3(1–4), 643–654. <https://doi.org/10.1080/01904168109362867>

Bárbaro, L. A., Karlanian, M. A., & Mata, D. A. (2014). Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica en los sustratos para plantas. In *Instituto de Floricultura CIRN*. http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_importancia_del_ph_y_la_conductividad_elctrica.pdf

Barceló, J., & Poschenrieder, C. (2003). Phytoremediation: principles and perspectives. *Contributions to Science*, 2(3), 333–344. <https://doi.org/10.2436/cs.v0i0.310>

Bundschuh, J., Pérez-Carrera, A., & Litter, M. (2008). Distribución del arsénico en la región Ibérica e Iberoamericana. In *IBEROARSEN, CYTED, Buenos Aires, Argentina*.

Burló, C., Carbonell, B., & Mataix, B. (1992). Efecto del As en el comportamiento vegetal de *Lycopersicum esculentum*. *Suelo y Planta*, 2(4), 641–650.

Cano, M. (2011). A REVIEW OF INTERACTION OF BENEFICIAL MICROORGANISMS IN PLANTS : Mycorrhizae , Trichoderma spp . and Pseudomonas spp . *U.D.C.A.*, 14(2), 15–31.

Carbonell, A., Aarabi, M., Delaune, R., Gambrell, R., & Patrick, W. (1998). Arsenic in wetland vegetation: Availability, phytotoxicity, uptake and effects on plant growth and nutrition. *Science of the Total Environment*, 217(3), 189–199. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00195-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00195-8)

Carbonell, A., Burlo, F., & Mataix, J. (1994). Effect of arsenite on the concentrations of micronutrients in tomato plants grown in hydroponic culture. *Journal of Plant Nutrition*, 17(11), 1887–1903. <https://doi.org/10.1080/01904169409364853>

Cardozo, P. M., & Quiriban, A. (2014). Las proteínas en la tolerancia al estrés hídrico en plantas. *Revista de La Facultad de Agronomía UNLPam*, 24(1), 55–67.

Eaton, A., Clesceri, L., Greenberg, A., Franson, M., & American Public Health Association. (1995). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (20th Editi). Washington, DC : American Public Health Association. [https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater&author=A.D. Eaton&publication_year=2005](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Standard+Methods+for+the+Examination+of+Water+and+Wastewater&author=A.D.+Eaton&publication_year=2005)

FAO. (2013). El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas. 33.

FAO. (2015). World fertilizer trends and outlook to 2018. *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS*, 1, 66.

FEN. (2014). *Lechuga Lettuce*. 183–184. <http://www.fen.org.es/mercadoFen/pdfs/lechuga.pdf>

Galán, E., & Romero, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla*, 10, 48–60.

Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(12), 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>

González Mendoza, Daniel Zapata Pérez, O. (2008). Mecanismos de tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en plantas. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, 82, 53–61. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-21282008000100005&lng=es&tlng=es

Grumberg, B., Conforto, C., Rovea, A., Boxler, M., March, G., Luna, C., Meriles, J., & Gil, S. V. (2010). La glomalina y su relación con la productividad del cultivo de maíz. *Informaciones Agronómicas Del Cono Sur*, 1, 23–25.

GTIS, & FAO. (2019). La Contaminación Del Suelo: Una Realidad Oculta. *Organizacion de Las Naciones Unidas Para La Alimentacion y La Agricultura FAO*, 144. <http://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>

Heiri, O., Lotter, A., & Gerry, L. (2001). Pérdida por ignición por método para estimar el contenido orgánico y de carbonatos en sedimentos: reproducibilidad y comparabilidad de resultados. *Revista de Paleolimnología*, 25, 101–110. <https://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1008119611481>

Kleinman, P., Sullivan, D., Wolf, A., Brandt, R., Dou, Z., Elliott, H., Kovar, J., Leytem, A., Maguire, R., Moore, P., Saporito, L., Sharpley, A., Shober, A., Sims, T., Toth, J., Toor, G., Zhang, H., & Zhang, T. (2007). Selection of a water-extractable phosphorus test for manures and biosolids as an indicator of runoff loss potential. *Journal of Enviromental Quality*, 36(5), 1357–1367. <https://doi.org/https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/jeq2006.0450>

Lara, A. (2015). *Determinación de arsénico en cabello de poblaciones expuestas en Matehuala, San Luis Potosí, México*. http://congresogeoquimica.ipicyt.edu.mx/wp-content/uploads/2017/10/Actas-INAGEQ-XXVII-Congreso-Nacional-de-Geoquímica-2017_V4.pdf

Llopart, E., Basso, A., Bethular, P., & Pontello, V. (2017). Contenido de arsénico en plantas de lechuga cultivadas en la ciudad de Funes. *Invenio*, 20(38), 71–79.

López, E. (2011). Estudio sobre la variabilidad de niveles de proteínas en plantas situadas en los saladares del Paraje Natural Municipal Clot de Galvany , en las Partidas rurales de El Altet y los Balsares , en el término Vinalopo de la Provincia de Alicante ”.

Lozano, E. (2015). Sensibilidad de la glomalina a los efectos provocados por el fuego en el suelo y su relación con la repelencia al agua en suelos forestales mediterráneos. *Universidad Miguel Hernández de Elche*, 191.

McBride, M. (1994). *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press.

McLaughlin, M., Parker, D., & Clarke, J. (1999). Metals and micronutrients -food safety issues. *Field Crops Research*, 60(1), 443–465. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00137-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00137-3)

Mclean, O. (1983). Soil pH and lime requirements. In *Methods of Soil Analysis* (Second edi). <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c12>

Medina-Pizzali, M., Robles, P., Mendoza, M., & Torres, C. (2018). Ingesta del arsénico: El impacto en la alimentación y la salud humana. *Rev. Peru Med. Exp Salud*, 35(1), 93–102. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.351.3604.93>

Mendieta, J. (2018). Boletín estadístico de Comercio exterior agrario. *Sistema Integrado de Estadística Agraria*, 52.

Mengel, K., Kirkby, E., Kosergarten, H., & Appel, T. (2001). *Principles of plant nutrition* (5th Editio). Kluwer Academic.
https://books.google.com.pe/books?id=ePhJuYcz4yUC&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

MINAM. (2014). Guía para el muestreo de suelos. 72.

Miranda, D., Carranza, C., Rojas, C., Jerez, C., Fischer, G., & Zurita, J. (2008). Acumulación de metales pesados en suelo y planta de cuatro cultivos hortícolas, regados con agua del río Bogota. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 2(2), 180–191.

OMS. (2018). *Arsénico*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

Paredes, B., Zegarra, J., Zanabria, J., Cuadros, F., Chávez, J., & Huanca, P. (2018). Consumo de plantas medicinales de uso habitual y posible efecto adverso en la salud de la población, como resultado de la contaminación de las plantas. Arequipa, Perú. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 9(3), 13–22.

Peris, M. (2006). Estudio de metales pesados en suelos bajo cultivos hortícolas de la provincia de Castellón. In *Servei de Publicacions* (Vol. 66).

Pinto, M. (2018). Calidad de agua superficial en el río Chili – en los sectores de Sachaca, Jacobo Hunter, Tiabaya y Uchumayo para uso de riego de vegetales y bebida de animales en la provincia de Arequipa.

Pocohuanca, N. (2017). Supervivencia, crecimiento y respuesta fisiológica de *Myriophyllum aquaticum* (Vell) Verdec. en relación a diferentes concentraciones de arsénico con fines de su uso en rizofiltración.

Quispe, N. (2019). Evaluación del riesgo de toxicidad a través de contaminantes en cultivos agrícolas de tallo corto en la cuenca media Quilca - Vítor - Chili - Los Tunales - TIABAYA. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN.

Ramírez, A. V. (2013). Occupational and environmental exposure to arsenic. *American College of Occupational and Environmental Medicine*, 74(4), 237–247.

Riopedre-Galán, T., Delgado Álvarez, A., Cabrera-Rodríguez, J. A., & Cartaya-Rubio, O. E. (2021). Relación entre los metales pesados y los hongos formadores de micorrizas arbusculares. *Cultivos Tropicales*, 42(4).

Rodríguez, Y., Chiriboga, R., Concha, T., & Ponce de León, D. (2020). Caracterización de las fracciones de glomalina en suelos Ferralíticos Rojos con diferente uso. 41(4), 16.

Ruiz, H. E., & Armienta, H. M. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(2), 103–117.

Rusu, N., & Meghea, A. (2015). Bioaccumulation of toxic metals in fish oils capsules. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 77(2), 131–140.

Sacristan, D. (2015). Evaluación de la toxicidad y de la bioacumulación del Cu en un cultivo acumulador (*Lactuca sativa* L.) y otro no-acumulador (*Solanum lycopersicum* L.) en suelos agrícolas mediterráneos representativos, como base para la propuesta de estrategias de gestión. In *Universidad de Valencia* (Vol. 1, Issue).

Sanchez, R., Mendieta, J., & Galiano, A. (2019). Informe de seguimiento agroeconómico. *Ministerio de Agricultura y Riego*, 29.

Silva, M. M. (2004). Materia orgánica : Su utilización en la evaluación de la calidad del suelo en distintos ambientes del sur de Santa Fe. *Informaciones Agronómicas Del Cono Sur*, 9–24.

https://scholar.google.es/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=4SKhg9oAAAAJ&citation_for_view=4SKhg9oAAAAJ:Tyk-4Ss8FVUC

Vásquez, L. (2013). Efecto del plomo sobre la biomasa y el contenido de prolina en *Rorippa nasturtium-aquaticum*(L.) Hayek, en condiciones de invernadero.

Vig, K., Megharaj, M., Sethunathan, N., & Naidu, R. (2003). Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: A review. *Advances in Environmental Research*, 8(1), 121–135. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00135-1](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00135-1)

Yadav, G., Srivastava, P. K., Singh, V. P., & Prasad, S. M. (2014). Light intensity alters the extent of arsenic toxicity in *Helianthus annuus* L. seedlings. *Biological Trace Element Research*, 158(3), 410–421. <https://doi.org/10.1007/s12011-014-9950-6>

Yañez, L. M., Alfaro, J. A., Avila Carreras, N. M. E., & Bovi Mitre, G. (2019). Arsenic accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.) and broad bean (*Vicia faba* L.) crops and its potential risk for human consumption. *Heliyon*, 5(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01152>

ANEXOS

ANEXO 1: PANEL FOTOGRAFICO

ESTACIONES DE MONITOREO - SUELO

Figura 11 Estación de monitoreo – Uchumayo



Nota: Referenciación elaboradas en el software Google Earth Pro - versión 7.3

Figura 12 Estación de monitoreo – Tiabaya



Nota: Referenciación elaboradas en el software Google Earth Pro - versión 7.3

Figura 13 Estación de monitoreo – Zamácola



Nota: Referenciación elaboradas en el software Google Earth Pro - versión 7.3

Figura 14 Estación de monitoreo – Cayma



Nota: Referenciación elaboradas en el software Google Earth Pro - versión 7.3

SUELOS MUESTREADOS



Figura 15 Muestra de suelo – Uchumayo. Nota: Toma fotográfica propia



Figura 16 Muestra de suelo –Cayma.

Nota: Toma fotográfica propia

SECUENCIA METODOLÓGICA

HABILITADO DE SUELO Y SIEMBRA

Figura 17 Distribución de suelos en macetas.



Nota: Toma fotográfica propia

Figura 18 Adición de arseniato de sodio heptahidratado ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en concentraciones de 20 ppm y 60 ppm.



Nota: Toma fotográfica propia

Figura 19 Adición de fertilizante a los suelos.



Nota: Toma fotográfica propia

Figura 21 Distribución de plántones (*Lactuca sativa*).



Nota: Toma fotográfica propia

Figura 20 Plántones de la lechuga (*Lactuca sativa*).



Nota: Toma fotográfica propia



Figura 22 Regado de plántones (*Lactuca sativa*).

Nota: Toma fotográfica propia

CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE PLANTONES (*Lactuca sativa*).

Figura 23 Desarrollo de plántones (*Lactuca sativa*).



Nota: Toma fotográfica propia

ANÁLISIS DE LABORATORIO (PROTEINAS – GLOMALINA)

Figura 24 Pesado de suelos para análisis de glomalina.



Nota: Toma fotográfica propia

Figura 26 Adición de solución (Citrato de sodio) a las muestras de suelo.



Nota: Toma fotográfica propia

Figura 25 Adecuación de muestra de suelo en tubos falcon para centrifuga.



Nota: Toma fotográfica propia

Figura 27 Ubicación de muestras para autoclave.



Nota: Toma fotográfica propia

Figura 28 Proceso de autoclave.



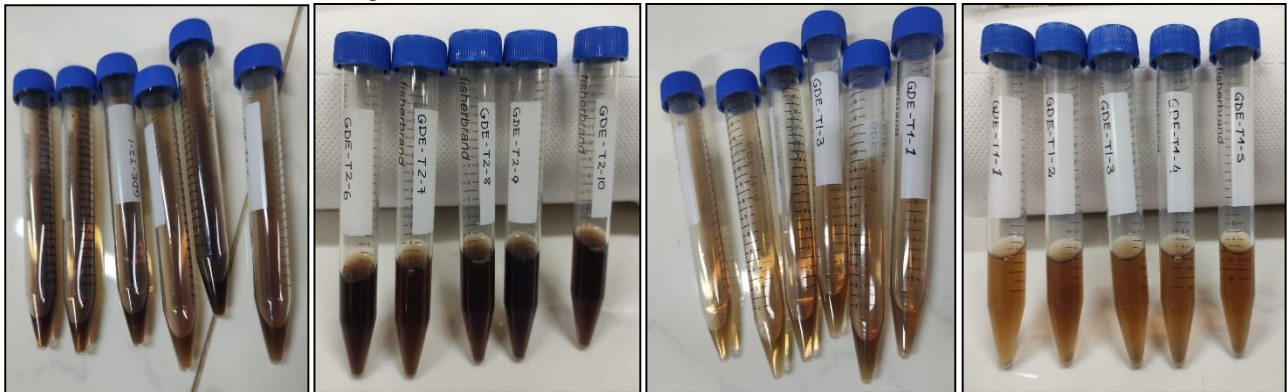
Nota: Toma fotográfica propia

Figura 29 Retiro de muestras de suelo del proceso de autoclave.



Nota: Toma fotográfica propia

Figura 30 Muestras de Glomalina difícilmente extraíble.



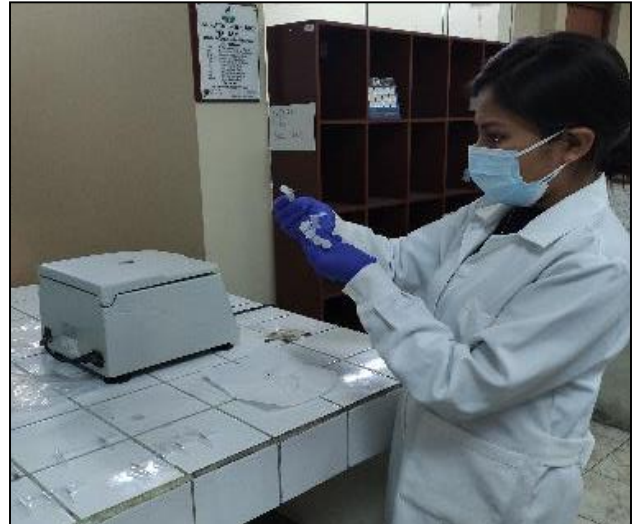
Nota: Toma fotográfica propia

ANÁLISIS DE LABORATORIO (PROTEINAS – PROLINA)

Figura 31 Retiro de muestras - hojas de la lechuga (*Lactuca sativa*).



Figura 32 Traspaso de líquido sobrenadante posterior al proceso de centrifugado.



Nota: Toma fotográfica propia

Nota: Toma fotográfica propia

Figura 33 Muestras de Sobrenadante antes de autoclavado.



Nota: Toma fotográfica propia

Figura 34 Muestras de prolina para efectuar lecturas por espectrofotometría.



Nota: Toma fotográfica propia

ANEXO 2: ANOVA PROLINA

Tabla 4: ANOVA de la Prolina a 0 ppm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,008	3	0,003	4,346	0,029	3,239
Dentro de los grupos	0,030	16	0,002			
Total	0,037	19				

Del análisis de varianza de la prolina a 0 ppm, se demostró que algunos de las cuatro lechugas cultivadas en los suelos en estudio es diferente.

Tabla 5: ANOVA de la Prolina a 20 ppm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,006	3	0,002	0,429	0,735	3,239
Dentro de los grupos	0,078	16	0,005			
Total	0,084	19				

Del análisis de varianza de la prolina a 20 ppm, se demostró que las cuatro lechugas cultivadas en los suelos en estudio son iguales.

Tabla 6: ANOVA de la Prolina a 60 ppm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,002	3	0,001	0,286	0,835	3,239
Dentro de los grupos	0,044	16	0,003			
Total	0,047	19				

Del análisis de varianza de la prolina a 60 ppm, se demostró que las cuatro lechugas cultivadas en los suelos en estudio son iguales.

ANEXO 3: ANOVA GLOMALINA FACILMENTE EXTRAIBLE (GFE)

Tabla 7: ANOVA de GFE a 0 ppm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	448025,2	3	149341,7	3,992	0,006	3,239
Dentro de los grupos	798694,7	16	49918,42			
Total	1246720	19				

Del análisis de varianza de la GFE a 0 ppm, se demostró que algunos de los suelos en estudio es diferente.

Tabla 8: ANOVA de GFE a 20 ppm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	989489,2	3	329829,7	4,089	0,005	3,239
Dentro de los grupos	1708140	16	106758,8			
Total	2697630	19				

Del análisis de varianza de la GFE a 20 ppm, se demostró que algunos de los suelos en estudio es diferente.

Tabla 9: ANOVA de GFE a 60 ppm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	998624,6	3	332874,9	3,553	0,009	3,239
Dentro de los grupos	2086021	16	130376,3			
Total	3084646	19				

Del análisis de varianza de la GFE a 60 ppm, se demostró que algunos de los suelos en estudio es diferente.

ANEXO 4: ANOVA GLOMALINA TOTALMENTE EXTRAIBLE (GTE)

Tabla 10: ANOVA GTE a 0 ppm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	4067768	3	1355923	14,48 64	8E-05	3,2389
Dentro de los grupos	1497595	16	93599,68			
Total	5565363	19				

Del análisis de varianza de la GTE a 0 ppm, se demostró que algunos de los suelos en estudio es diferente.

Tabla 11: ANOVA GTE a 20 ppm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6090186	3	2030062	10,23 81	0,0005	3,2389
Dentro de los grupos	3172571	16	198285,7			
Total	9262757	19				

Del análisis de varianza de la GFE a 20 ppm, se demostró que algunos de los suelos en estudio es diferente.

Tabla 12: ANOVA GTE a 60 ppm

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5647287	3	1882429	15,60 14	5,21E-05	3,2389
Dentro de los grupos	1930520	16	120657,5			
Total	7577807	19				

Del análisis de varianza de la GTE a 60 ppm, se demostró que algunos de los suelos en estudio es diferente.

ANEXO 5 ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA SUELO -

Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM

Parámetros en mg/kg PS ⁽²⁾	Usos del Suelo ⁽¹⁾			Métodos de ensayo ⁽⁷⁾ y ⁽⁸⁾
	Suelo Agrícola ⁽³⁾	Suelo Residencial/ Parques ⁽⁴⁾	Suelo Comercial ⁽⁶⁾ / Industrial/ Extractivo ⁽⁵⁾	
ORGÁNICOS				
Hidrocarburos aromáticos volátiles				
Benceno	0,03	0,03	0,03	EPA 8260 ⁽⁹⁾ EPA 8021
Tolueno	0,37	0,37	0,37	EPA 8260 EPA 8021
Etilbenceno	0,082	0,082	0,082	EPA 8260 EPA 8021
Xilenos ⁽¹⁰⁾	11	11	11	EPA 8260 EPA 8021
Hidrocarburos poliaromáticos				
Naftaleno	0,1	0,6	22	EPA 8260 EPA 8021 EPA 8270
Benzo(a) pireno	0,1	0,7	0,7	EPA 8270
Hidrocarburos de Petróleo				
Fracción de hidrocarburos F1 ⁽¹¹⁾ (C6-C10)	200	200	500	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F2 ⁽¹²⁾ (>C10-C28)	1200	1200	5000	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F3 ⁽¹³⁾ (>C28-C40)	3000	3000	6000	EPA 8015
Compuestos Organoclorados				
Bifenilos policlorados - PCB ⁽¹⁴⁾	0,5	1,3	33	EPA 8082 EPA 8270
Tetracloroetileno	0,1	0,2	0,5	EPA 8260
Tricloroetileno	0,01	0,01	0,01	EPA 8260
INORGÁNICOS				
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA 3051
Bario total ⁽¹⁵⁾	750	500	2 000	EPA 3050 EPA 3051
Cadmio	1,4	10	22	EPA 3050 EPA 3051
Cromo total	**	400	1 000	EPA 3050 EPA 3051
Cromo VI	0,4	0,4	1,4	EPA 3060/ EPA 7199 ó DIN EN 15192 ⁽¹⁶⁾
Mercurio	6,6	6,6	24	EPA 7471 EPA 6020 ó 200.8
Plomo	70	140	800	EPA 3050 EPA 3051
Cianuro Libre	0,9	0,9	8	EPA 9013 SEMWW-AWWA-WEF 4500 CN F o ASTM D7237 y/o ISO 17690:2015

Notas:

[**] Este símbolo dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para el uso de suelo agrícola.

(1) **Suelo:** Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.

(2) **PS:** Peso seco.

(3) **Suelo agrícola:** Suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas.

(4) **Suelo residencial/parques:** Suelo ocupado por la población para construir sus viviendas, incluyendo áreas verdes y espacios destinados a actividades de recreación y de esparcimiento.

(5) **Suelo comercial:** Suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla está relacionada con operaciones comerciales y de servicios.

(6) **Suelo industrial/extractivo:** Suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla abarca la extracción y/o aprovechamiento de recursos naturales (actividades mineras, hidrocarburos, entre otros) y/o, la elaboración, transformación o construcción de bienes.

(7) Métodos de ensayo estandarizados vigentes o métodos validados y que cuenten con la acreditación nacional e internacional correspondiente, en el marco del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo de la *International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)*. Los métodos de ensayo deben contar con límites de cuantificación que estén por debajo del ECA

**ANEXO 5 ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA SUELO -
ECUADOR**

**Registro oficial N° 387: Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios
de remediación para suelos contaminados**

Parámetro	Unidades*	USO DEL SUELO			
		Residencial	Comercial	Industrial	Agrícola
Parámetros Generales					
Conductividad	uS/cm	200	400	400	200
pH	-	6 a 8	6 a 8	6 a 8	6 a 8
Relación de adsorción de Sodio (Índice SAR)	-	5	12	12	5
Parámetros inorgánicos					
Arsénico	mg/kg	12	12	12	12
Sulfuro	mg/kg	-	-	-	500
Bario	mg/kg	500	2000	2000	750
Boro (soluble en agua caliente)	mg/kg	-	-	-	2
Cadmio	mg/kg	4	10	10	2
Cobalto	mg/kg	50	300	300	40
Cobre	mg/kg	63	91	91	63
Cromo Total	mg/kg	64	87	87	65
Cromo VI	mg/kg	0.4	1.4	1.4	0.4
Cianuro	mg/kg	0.9	8	8	0.9
Estaño	mg/kg	50	300	300	5
Fluoruros	mg/kg	400	2000	2000	200
Mercurio	mg/kg	1	10	10	0.8
Molibdeno	mg/kg	5	40	40	5
Níquel	mg/kg	100	100	50	50
Plomo	mg/kg	140	150	150	60
Selenio	mg/kg	5	10	10	2
Talio	mg/kg	1	1	1	1
Vanadio	mg/kg	130	130	130	130
Zinc	mg/kg	200	380	360	200
Parámetros orgánicos					
Accites y grasas	mg/kg	500	<2500	<4000	<4000
Benceno	mg/kg	0.08	5	5	0.03
Etilbenceno	mg/kg	0.1	20	20	0.1
Estireno	mg/kg	5	50	50	0.1
Tolueno	mg/kg	0.37	0.8	0.8	0.08
Xileno	mg/kg	2.4	11	20	0.1
PCBs	mg/kg	1.3	33	33	0.5

ANEXO 6 ESTANDARES DE CALIDAD AMBIENTAL PARA SUELO -EPA

EPA/600/4-91/029

Element	Surface Soil ^b Acid-Neutral	Plant ^c	Relatively Mobile ^d	Relatively Toxic ^d
Antimony (S b)	5-10	150	+	-
Arsenic (As)	100- 1000	5-20		
Beryllium (Be)	> 10	10-50		+
Boron (B)	30-100	>500	+	
Barium (Ba)	30-100	50-200		
Cadmium (Cd)	3-10	5-30	+	+
Cobalt (Co)	30-50	15-50		
Chromium (Cr)	2-10	5-30		
Copper (Cu)	20-100	30-100	+	
Mercury (Hg)	1-5	1-3	+	+
Manganese (Mn)	3000-8000	300-500	+	
Molybdenum (Mo)	5-10	10-50		
Nickel (Ni)	30-100	10-100	-	+
Lead (Pb)	50-100	30-300	-	+
Selenium (Se)	5-10	5-30	+	+
Silver (Ag)	> 2	5-10	-	-
Thallium (Tl)	--	>20	+	+
Tin (Sn)	> 50	>60	+	-
Zinc (Zn)	200-400	100-400	+	+