

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

“CULTIVO DE GERANIO: USO POTENCIAL PARA
REMOVER ARSÉNICO (AS), CADMIO (CD) Y
COBRE (CU) DE SUELOS CONTAMINADOS”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Ambiental



Autora:

Aída del Rosario Obeso Obando

Asesor:

Dr. Ricardo David Vejarano Mantilla

Trujillo - Perú

2021

DEDICATORIA

A Dios.

Porque si él no existiera, sería necesario inventarlo, es un Ser que obra de maneras misteriosas y nos deja enseñanzas para poder ser mejores personas, además en su infinita bondad nos deja ser partícipes de hechos trascendentales.

A mi Padre

Por las enseñanzas que me dejó, por su infinito amor, dedicación como ser humano en todos los aspectos de su vida, además de su alegría y dicha al acompañarme en cada uno de mis logros.

AGRADECIMIENTO

Agradezco de manera especial a mis padres por su apoyo moral y económico a lo largo de mis estudios y formación universitaria, por ese orgullo y ganas de superación que en todo momento me transmitieron.

Además de mentores de la Universidad, ya que sus ideas fueron importantes en toda mi transición universitaria, que marcará el camino por el cual debo de seguir avanzando.

También de manera especial a mi asesor Dr. Ricardo David Vejarano Mantilla, quien me brindó su apoyo y asesoramiento en todo momento, además de ser un profesional modelo de admirar

TABLA DE CONTENIDOS

CONTENIDO

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Realidad problemática.....	9
1.2. Formulación del problema.....	12
1.3. Objetivos	12
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	12
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	13
1.4. Hipótesis.....	13
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	14
2.1. Tipo de investigación	14
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
REFERENCIAS	27
ANEXOS	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	14
<i>Instrumentos y materiales para el muestreo de identificación de suelos contaminados en el botadero El Milagro.....</i>	14
Tabla 2.....	15
<i>Instrumentos y materiales para la determinación de metales pesados en las muestras de suelo contaminado.</i>	15
Tabla 3.....	21
<i>Concentraciones promedio de As, Cd y Cu (ppm) y porcentajes de remoción (%) con respecto a la concentración inicial de cada metal.....</i>	21

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Botadero El Milagro de la Ciudad de Trujillo.</i>	16
<i>Figura 2. (a) Muestras de suelo contaminado. (b) Procedimiento de homogenización y cuarteado de las muestras de suelo contaminado. (c) Macetas con las respectivas plantas de geranio. (d) Preparación de las muestras para el análisis de metales mediante ICP-OES.</i>	19
<i>Figura 3. Concentración de As (ppm) tras las seis semanas de cultivo de geranio en el suelo contaminado.</i>	22
<i>Figura 4. Concentración de Cd (ppm) tras las seis semanas de cultivo de geranio en el suelo contaminado.</i>	23
<i>Figura 5. Concentración de Cu (ppm) tras las seis semanas de cultivo de geranio en el suelo contaminado.</i>	24
<i>Figura 6. Porcentajes de remoción de As, Cd y Cu en las muestras de suelo contaminado mediante cultivo de geranio.</i>	25

RESUMEN

La fitorremediación es una técnica que se basa en la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, estabilizar o reducir diversos contaminantes del suelo, entre ellos algunos metales pesados. El objetivo del estudio fue evaluar la capacidad del geranio (*Pelargonium zonale*) para remover arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de suelos contaminados. El cultivo del geranio fue realizado en condiciones *ex situ*, durante un periodo de seis semanas, en muestras de suelo obtenidas del botadero El Milagro de la ciudad de Trujillo (Perú). Las concentraciones de As, Cd y Cu en las muestras de suelo disminuyeron significativamente tras el periodo de prueba, mostrando una tolerancia hacia los metales, con una disminución del As y Cd de hasta 74% y 79%, respectivamente, con respecto a la concentración inicial, mientras que para Cu se logró una reducción de hasta 55%. Los resultados sugieren el potencial de remoción de As, Cd y Cu mediante el cultivo de geranio, como alternativa para la recuperación de suelos contaminados con este tipo de metales.

Palabras clave: geranio, remoción de metales, suelos contaminados, arsénico, cadmio, cobre.

Phytoremediation refers to the use of plants to absorb, accumulate, stabilize, or reduce pollutants from contaminated soils, including some heavy metals. The aim of the study was to evaluate the potential of geranium (*Pelargonium zonale*) to remove metals, such as arsenic (As), cadmium (Cd), and copper (Cu), from contaminated soils. For this, geranium plants cultivation was carried out in a system in *ex situ* conditions over a 6-week treatment period, in soil samples extracted from El Milagro dump, of the city of Trujillo (Peru). Concentrations of As, Cd and Cu decreased in soil samples through the cultivation period, showing a significant tolerance of the geranium plants towards these metals, with a decrease of As and Cd, up to 74% and 79%, respectively, with respect to the initial concentration, whereas for Cu decreased of up to 55%. The results suggest the removal potential of As, Cd, and Cu by geranium cultivation, as an interesting alternative for the recovery of contaminated soils with this kind of metals.

Keywords: geranium, metals removal, contaminated soils, arsenic, cadmium, copper.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El impacto ambiental producido por las actividades antropogénicas se ha hecho cada vez más predominante, siendo la contaminación de los suelos por metales pesados uno de los aspectos que mayor preocupación genera debido a las consecuencias que pueden ocasionar en los ecosistemas involucrados. Desde diferentes frentes se ha planteado la recuperación de estos suelos mediante tratamientos de biorremediación, siendo uno de los más promisorios la fitorremediación, técnica que aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, estabilizar o reducir los contaminantes del suelo, entre ellos los metales pesados (Delgadillo-López et al, 2011).

Existen varios casos significativos de contaminación de suelos por metales pesados, especialmente en zonas con alta actividad industrial. Uno de esos casos ocurre en La Oroya Antigua (región Junín, Perú), donde la presencia de arsénico, cadmio, plomo, mercurio o antimonio en suelos suele superar los estándares permitidos. Por ejemplo, el arsénico supera 393 veces los estándares internacionales (Díaz, 2016).

En las grandes ciudades también existen fuentes de contaminación por metales, por ejemplo, los lugares de deposición de residuos urbanos. En Perú, de acuerdo con las estimaciones del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2013) en el año 2012 se generaron en torno a 7.1 millones de toneladas de residuos sólidos municipales (entre residuos domiciliarios, no domiciliarios y rurales). A los residuos domiciliarios, corresponden aproximadamente 4.6 millones de toneladas, siendo Lima la región que más basura generó, aproximadamente 2 millones de toneladas al año, seguida por La Libertad con 275 mil toneladas, Piura (253 mil toneladas), Callao (219 mil toneladas) y Arequipa (202 mil toneladas).

En cuanto a la composición de estos residuos sólidos, un 50.9% corresponde a materia orgánica, 10.1% a plástico, 8.5% a residuos peligrosos, 8.1% a papel y cartón, 7.1% a material inerte, 3.4% a madera y restos de jardín, 3.2% a vidrio, 2.8% a metales, 1.8% a textiles, 1.6% a caucho y cuero, 0.8% a huesos, 0.6% a tetra pack y 0.45% a aparatos eléctricos y electrónicos (MINAM, 2012).

En cuanto a la disposición de estos residuos, el Ministerio de Ambiente estima que solo el 47% fue dispuesto en rellenos sanitarios autorizados, mientras que el porcentaje restante terminó en botaderos a cielo abierto o en lugares no identificados en cifras oficiales (MINAM, 2014). Otros destinos de estos residuos además incluyen la incineración, reciclaje y el vertido en ríos, lagunas o el mar. Las regiones de Áncash, Cajamarca, Puno y Lima concentran la mayor cantidad de municipalidades que depositaron su basura en botaderos a cielo abierto. Si bien existe un registro de 12 rellenos sanitarios autorizados y en funcionamiento para una población que supera los 30 millones de habitantes, esta situación demuestra la inexistencia de infraestructura suficiente para la adecuada disposición final de los residuos urbanos (OEFA, 2015).

En el ámbito regional, La Libertad es la segunda región que más desperdicios sólidos genera en el país, concentrándose la mayor producción en la ciudad de Trujillo, donde principalmente los residuos se depositan a cielo abierto, sin ningún control. Ejemplo de ello es el conocido botadero de El Milagro, en el cual se acumulan desperdicios sólidos provenientes de nueve distritos, recibiendo casi 720 toneladas de basura al día (262 mil toneladas al año), desplegadas en casi 58 hectáreas (Figura 1), cuyos montículos de desperdicios pueden alcanzar hasta 15 metros de altura y que en algunos casos son incinerados *in situ*, de acuerdo al informe presentado por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) del Ministerio del Ambiente (OEFA, 2015).

El botadero El Milagro se ubica dentro de los 20 más críticos de América Latina (Castro, 2016), en el cual es recurrente la disposición de residuos con altos contenidos de sustancias contaminantes, entre ellos metales como plomo, arsénico, cadmio, mercurio, entre otros (MINSA, 2012), cuya procedencia son residuos de pintura, baterías, electrodomésticos, aparatos electrónicos, combustibles, etc., cuyo manejo inadecuado y disposición final no están debidamente controlados.

Estos metales pueden filtrarse a través del suelo a las corrientes subterráneas y superficiales de agua, llegando incluso a cultivos alimentarios e incorporarse en la cadena trófica y en última instancia alcanzar al ser humano, con severas consecuencias sobre la salud (Huaranga et al, 2012; Squadrone et al, 2016), problemática que requiere ser atendida de manera integral, no solo para reducir la presencia de los contaminantes en los suelos, sino también para disminuir o eliminar la fuente de generación de estos.

Desde diferentes frentes se está planteando la recuperación de suelos contaminados mediante la aplicación de tratamientos de biorremediación, siendo el cultivo de plantas o fitorremediación una de las más interesantes alternativas para solucionar el problema (Fernández et al, 2017; Patel y Patra, 2014).

La fitorremediación consiste en el aprovechamiento de la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el ambiente como metales pesados, sustancias radioactivas o compuestos orgánicos, con demostradas ventajas frente a los métodos convencionales debido a su simplicidad de aplicación y bajo costo (Delgadillo-López et al, 2011), además de brindar como resultado una cobertura verde, más agradable estéticamente y más aceptable desde el punto de vista ambiental (Bernal et al, 2007).

Son diversas las plantas con potencial para aplicaciones de fitorremediación, las cuales deben presentar un rápido crecimiento y alta productividad de biomasa, además de ser tolerantes y buenas acumuladoras de metales pesados (Danh et al, 2014; Fernández et al, 2017; Patel y Patra, 2014;), por ejemplo: geranio, girasol, jacinto, mostaza, alfalfa, ortiga, álamo, nabo, cebada, centeno, entre otras (Delgadillo-López et al, 2011), (Patel y Patra, 2014), (Orroño y Lavado, 2009).

De modo que la aplicación de la fitorremediación mediante el cultivo de geranio (*Pelargonium zonale*) (Orroño y Lavado, 2009) se justifica en la necesidad de buscar una alternativa tecnológica que permita reducir el contenido de metales pesados en suelos contaminados del botadero El Milagro de la ciudad de Trujillo, para lo cual se plantea como objetivo el evaluar la capacidad del geranio para la acumulación y consiguiente remoción de arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de estos suelos contaminados.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la eficiencia del cultivo de geranio para la remoción de arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de suelos contaminados del botadero El Milagro de la ciudad de Trujillo?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la eficiencia del cultivo de geranio para la remoción de arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de suelos contaminados del botadero El Milagro de la ciudad de Trujillo.

1.3.2. **Objetivos específicos**

- Caracterizar los suelos contaminados con arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) del botadero El Milagro de la ciudad de Trujillo.
- Evaluar la evolución de las concentraciones de arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) en las muestras de suelo contaminado mediante el cultivo de geranio.
- Determinar el porcentaje de remoción de arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) en las muestras de suelo contaminado mediante cultivo de geranio.

1.4. **Hipótesis**

El cultivo de geranio tiene una eficiencia para la remoción de arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de suelos contaminados mayor al 50%.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

2.1.1. **De acuerdo con el fin que se persigue:** Aplicada.

2.1.2. **De acuerdo con la naturaleza de los datos:** Cuantitativa.

2.1.3. **De acuerdo con el nivel:** Explicativa.

2.1.4. **De acuerdo con el diseño de investigación:** Experimental pura.

2.2. Materiales, instrumentos y métodos

2.2.1. Materiales e instrumentos

Tabla 1.

Instrumentos y materiales para el muestreo de identificación de suelos contaminados en el botadero El Milagro.

Instrumento / material	Finalidad	Cantidad
Bolsas de polietileno de alta densidad	Para preservar las muestras.	50 bolsas <i>ziplock</i>
Fichas de muestreo	Documento para recoger la información en campo, que incluye la técnica de muestreo, las condiciones del punto de muestreo y una descripción de las muestras tomadas.	3 formatos
Cadena de custodia	Un original y dos copias, las cuales se trasladan junto a las muestras desde su obtención hasta el ingreso a laboratorio. El laboratorio debe incluir una copia de esta cadena con los resultados del análisis, firmada por todos los participantes en el proceso de muestreo y por la persona del laboratorio que recibe las muestras para su análisis.	3 formatos
Guantes látex	Para seguridad y limpieza en la manipulación de las muestras.	3 pares
Lentes de seguridad		1 par
Agua destilada		250 mililitros
Toallas de papel		1 paquete
Mascarilla para polvos		3 unidades

Marcador indeleble		2 unidades
Cinta adhesiva		1 unidad
Bolígrafos		2 unidades
Cinta métrica	Para medir distancias entre los puntos de muestreo.	1 unidad
Termómetro digital	Para medir la temperatura del lugar de muestreo.	1 unidad
Palana	Para extraer las muestras de tierra.	1 unidad
GPS	Para la georreferenciación de la zona de muestreo.	1 unidad

Tabla 2.

Instrumentos y materiales para la determinación de metales pesados en las muestras de suelo contaminado.

Instrumento / material	Finalidad	Cantidad
Mascarillas	Para prevenir incidentes durante el trabajo en laboratorio.	25
Lentes de protección		01
Guantes látex		25 pares
Guardapolvo		01
Viales	Para contener muestras.	10
Balanza electrónica	Para medir con precisión las cantidades.	01
Mortero	Para triturar las muestras.	02
Bolsas <i>ziplock</i>	Para contener las muestras vegetales.	18
Estufa UN55 PLUS	Para secar las muestras de tierra.	01

2.2.2. Método para la identificación de suelo contaminado

A. Muestreo de Identificación (MI)

Esta fase de identificación tuvo por objeto determinar si en un determinado sitio se superaba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo o los niveles de fondo. Se realizó una evaluación preliminar que comprendió la investigación histórica y levantamiento técnico del sitio, y sobre esta base se ejecutó el Muestreo de Identificación (MI). Los parámetros que se analizaron fueron las concentraciones de aquellas sustancias químicas de interés

Cultivo de geranio: uso potencial para remover arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de suelos contaminados toxicológico o eco toxicológico generados por la actividad presente o pasada en el lugar de estudio.

B. Determinación de puntos de muestreo

Las muestras de suelo contaminado se extrajeron del botadero El Milagro de la ciudad de Trujillo (Figura 1). De acuerdo con la clasificación del MINAM, Guía de Muestreo de Suelos, el número mínimo de puntos de muestro fue de seis (06), ya que el área de estudio tenía un perímetro entre 0.1 y 0.3 hectáreas.



Figura 1. Botadero El Milagro de la Ciudad de Trujillo.

C. Profundidad de muestreo

Según la Guía del Muestro de Suelos del MINAM, la profundidad requerida fue de 30 centímetros, sin embargo.

Primero se limpió cuidadosamente el área a muestrear de cualquier desecho o escombros superficial (ramas, piedras, residuos, etc.) en un área de 15 cm de radio.

D. Tipo de muestreo

Muestreo estadístico, utilizado para comprobar de manera homogénea la presencia o ausencia y distribución de contaminantes en el suelo. El muestreo fue aleatorio estratificado ya que el terreno presentó irregularidades, por lo que fue necesario disponer de información previa de contaminantes.

2.3. Procedimiento experimental

2.3.1. Cultivo *ex situ* de geranio en suelo contaminado

Se extrajo aproximadamente 9 kg de muestra de suelo del botadero El Milagro, ciudad de Trujillo, de acuerdo con la metodología descrita en la Guía para Muestreo de Suelos del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2014), a una profundidad de 30 cm (Figura 2a).

Las muestras fueron sometidas a homogenización y cuarteo para el llenado en las macetas y posterior cultivo *ex situ* de tres plantas de geranio en cada maceta (Figuras 2b y 2c). Los riegos se realizaron tres veces por semana con cantidades de 400 ml de agua por maceta, de acuerdo con lo mostrado en la. Los ensayos se realizaron en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada del Norte, sede Trujillo.

a



b



c



d



Figura 2. (a) Muestras de suelo contaminado. (b) Procedimiento de homogenización y cuarteado de las muestras de suelo contaminado. (c) Macetas con las respectivas plantas de geranio. (d) Preparación de las muestras para el análisis de metales mediante ICP-OES.

2.3.2. Tratamiento previo a los análisis de las muestras de suelo contaminado

Las muestras de suelos fueron analizadas cada dos semanas, para lo cual las plantas fueron removidas de las macetas (Figura 2d).

Las muestras de tierra fueron secadas a una temperatura de 140 °C por 24 horas en una estufa UN55 PLUS (Mettler GmbH Co. KG, Alemania), para ser posteriormente trituradas y almacenadas hasta su análisis.

2.3.3. Contenido residual de metales en las muestras de suelo

El análisis del contenido residual de metales en las muestras de suelo se realizó en el Laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de Trujillo, mediante Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Acoplado por Inducción (ICP-OES), en base a la metodología propuesta por Herrero et al. (2015), para lo cual se pesaron 3 gramos de muestra, las cuales fueron incineradas en una mufla modelo FO100CR (Yamato Scientific Co.Ltd., Estados Unidos) a 550°C por cuatro horas. Luego las cenizas fueron tratadas con una mezcla de HNO₃ y ácido

perclórico (2:1 mL:mL). El residuo final fue disuelto en 1 mL de HNO₃, enrasando a 25 mL con agua ultrapura (Figura 2d).

Las lecturas de los metales fueron hechas usando un ICP- OES Prodigy de Alta dispersión (ICP Prodigy, Teledyne Leeman Labs., Estados Unidos). Las longitudes de onda seleccionadas para el As, Cd y Cu fueron de 189.042 nm, 226.502 nm y 327.395 nm, respectivamente.

Los resultados obtenidos fueron sometidos a un Análisis de Varianza para identificar diferencias significativas entre replicas y la Prueba de Comparación Multiple DSH de Tukey (5% de significancia), utilizando el software Statistica 7 (StatSoft Inc., 2004).

CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se muestran las concentraciones de As, Cd y Cu en las muestras iniciales de suelo (Inicio), así como las concentraciones residuales tras el tratamiento en función del tiempo de cultivo de geranio (2, 4 y 6 semanas), cuyos análisis fueron hechos por triplicado, observándose diferencias significativas entre todos los periodos de cultivo, así como en los porcentajes de remoción de cada metal.

Tabla 3

Concentraciones promedio de As, Cd y Cu (ppm) y porcentajes de remoción (%) con respecto a la concentración inicial de cada metal.

Semana	Concentración de metal (ppm)		
	As	Cd	Cu
Inicio	39.500	5.030	0.020
2	27.731 ± 0.53 a 45%	2.140 ± 0.11 a 57%	0.015 ± 0.00 a 23%
4	13.960 ± 0.12 b 65%	1.827 ± 0.05 b 64%	0.011 ± 0.00 b 45%
6	10.323 ± 0.12 c 74%	1.053 ± 0.01 c 79%	0.009 ± 0.00 c 55%

Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa (DSH de Tukey, $p < 0.05$).

Es de especial interés el alto contenido de As en las muestras de suelo evaluadas, ya que indica un peligro para la salud de las poblaciones cercanas a este botadero a cielo abierto, dado que en muchos casos, este metal ha sido detectado en el aire (Díaz, 2016), y en el caso específico del botadero El Milagro, los niveles detectados son comparables a zonas mineras en cuyos suelos se han detectado altas concentraciones que llegan hasta 40 ppm (Díaz, 2016), con el riesgo que implica para la población al estar relacionado este metal con diversos casos de cáncer.

En la Figura 3, se observa la evolución del contenido de As, logrando reducir en torno a un 65% en la cuarta semana de cultivo de geranio, a partir de la cual la tasa de remoción empieza a disminuir. Se conoce que las plantas acumuladoras pueden tolerar altos niveles de ciertos metales en el suelo y acumular entre 100 y 1000 veces los niveles acumulados por la mayoría de otras especies, sin efectos adversos en su crecimiento (Prieto et al, 2009).

En el caso del As, al ser un elemento no esencial para las plantas, en altas concentraciones pueden alterar los procesos metabólicos, pudiendo inhibir el crecimiento y causar la muerte (Danh et al, 2014), caso que no ocurriría con el geranio, lo cual se evidencia en la afinidad del sistema suelo-planta para este metal y su consiguiente remoción en las muestras de suelo (figuras 3 y 6). La bibliografía reporta la absorción del As hacia diferentes partes de la planta, por ejemplo, las raíces (Moreno-Jiménez et al, 2012).

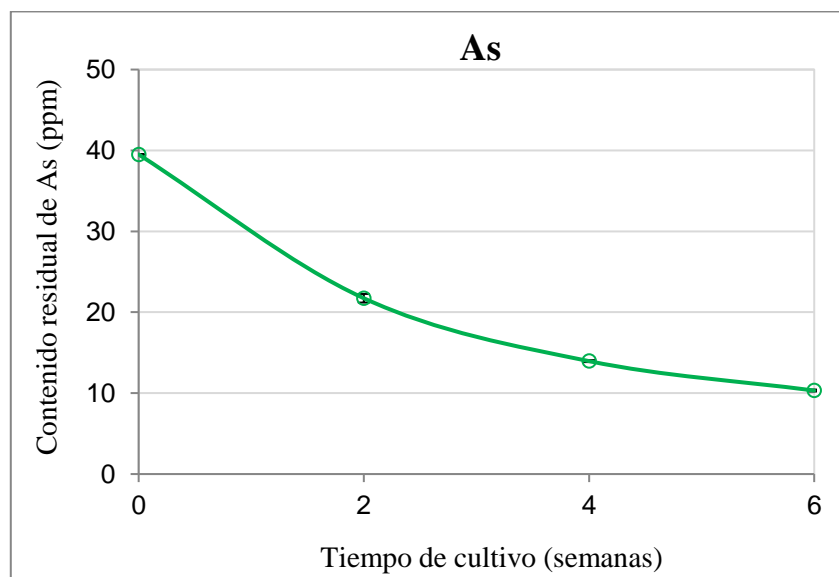


Figura 3. Concentración de As (ppm) tras las seis semanas de cultivo de geranio en el suelo contaminado.

Por su parte, en la Figura 4 se observa la evolución del contenido de Cd en las muestras de suelo, alcanzando un 57 % de remoción tan solo en la segunda semana de cultivo, disminuyendo la tasa de remoción hasta la cuarta semana. Este fenómeno podría estar

relacionado con una posible saturación de la planta de geranio durante el proceso de absorción de Cd a partir de la semana 2. No obstante, y a pesar de esta ralentización, se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de Cd entre las semanas 2 y 4 (DSH Tukey, $p < 0.05$), lo que indica una adaptación de la planta a la presencia de este metal.

Estudios previos reportan la capacidad de las plantas del género *Pelargonium* para remover del suelo y acumular Cd (Patel y Patra, 2014), lo cual se refleja en la disminución significativa de la concentración de este metal con respecto a los niveles iniciales en las muestras de suelo (figuras 4 y 6).

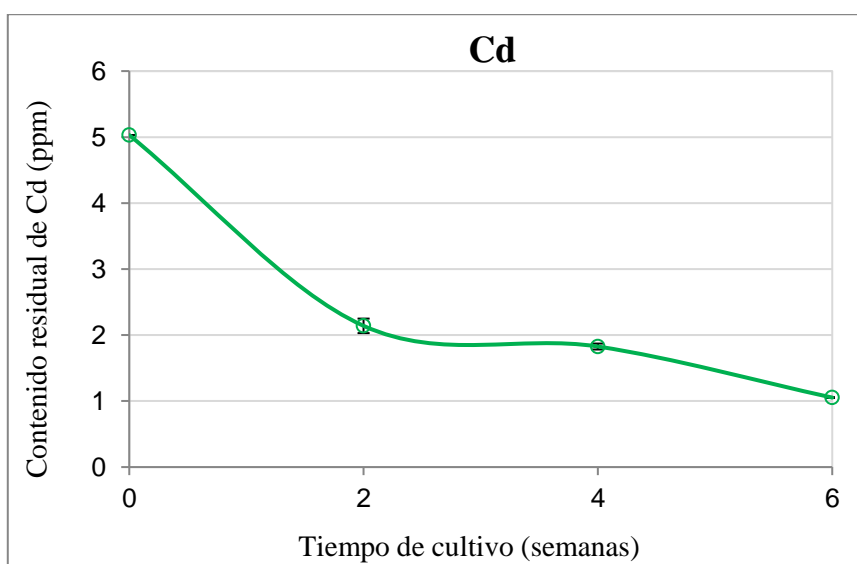


Figura 4. Concentración de Cd (ppm) tras las seis semanas de cultivo de geranio en el suelo contaminado.

Mientras que en la Figura 5 se observa la evolución del contenido de Cu en las muestras de suelo, el cual reduce constantemente hasta alcanzar un 55% de remoción en la sexta semana de cultivo. No obstante, no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de Cu entre la semana 4 y la semana 6 (DSH Tukey, $p < 0.05$), lo que indicaría la limitada capacidad del geranio para remover Cu de muestras de suelo. Ello se evidencia en

la Figura 6, donde el porcentaje de remoción de este metal por el geranio es menor que el mostrado para el As y Cd.

Se ha reportado que, en el caso del Cu, el mecanismo de absorción estaría relacionado con una absorción pasiva, siempre y cuando las plantas estén expuestas a concentraciones tóxicas del metal (Kabata-Pendias, 2011). Sin embargo, las concentraciones iniciales de Cu en las muestras de suelo no podrían considerarse como tóxicas para la planta de geranio, de modo que en este caso se trataría de un proceso de absorción activa, donde es muy probable que el metal ingrese a las células de las raíces en formas disociadas a tasas diferentes de absorción.

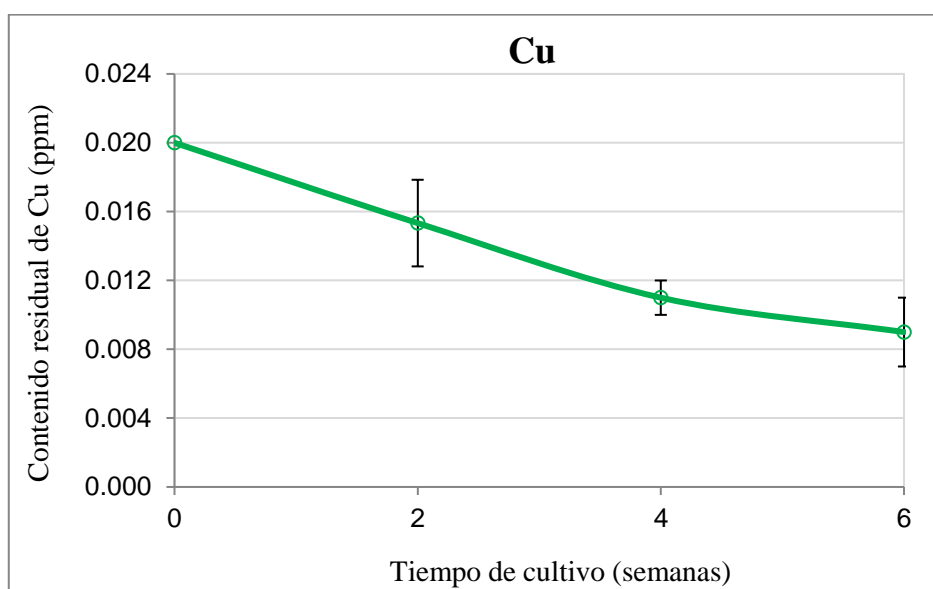


Figura 5. Concentración de Cu (ppm) tras las seis semanas de cultivo de geranio en el suelo contaminado.

Finalmente, al comparar las tasas de remoción de los tres metales, se obtuvo una reducción significativa en las concentraciones de As y Cd, y en menor medida de Cu, aprovechando la capacidad de remoción del geranio, debido a que cuenta con una mayor productividad de biomasa, lo cual la hace estar considerada como una planta potencialmente acumuladora de metales (Orroño y Lavado, 2009), inmovilizándolos en sus raíces, tallos y hojas (Hernández, 2008), y sin el riesgo posterior de eliminarlos hacia el ambiente. De modo que a partir de los

resultados obtenidos, se pueden plantear estrategias orientadas a reducir los niveles de estos metales en botaderos como El Milagro mediante el cultivo de geranio, que además de reducir el potencial riesgo de intoxicación para las poblaciones cercanas a este botadero (Díaz, 2016), se contribuya a mejorar el paisaje de la zona (Bernal et al, 2007), como ocurre en el antiguo botadero de Moravia, en la ciudad de Medellín, Colombia (Sánchez, 2010), como alternativa a los métodos de tratamiento de suelos contaminados actualmente disponibles (Kim y Baek, 2019), pero que por la extensión del terreno a tratar podrían verse limitados respecto a su efectividad.

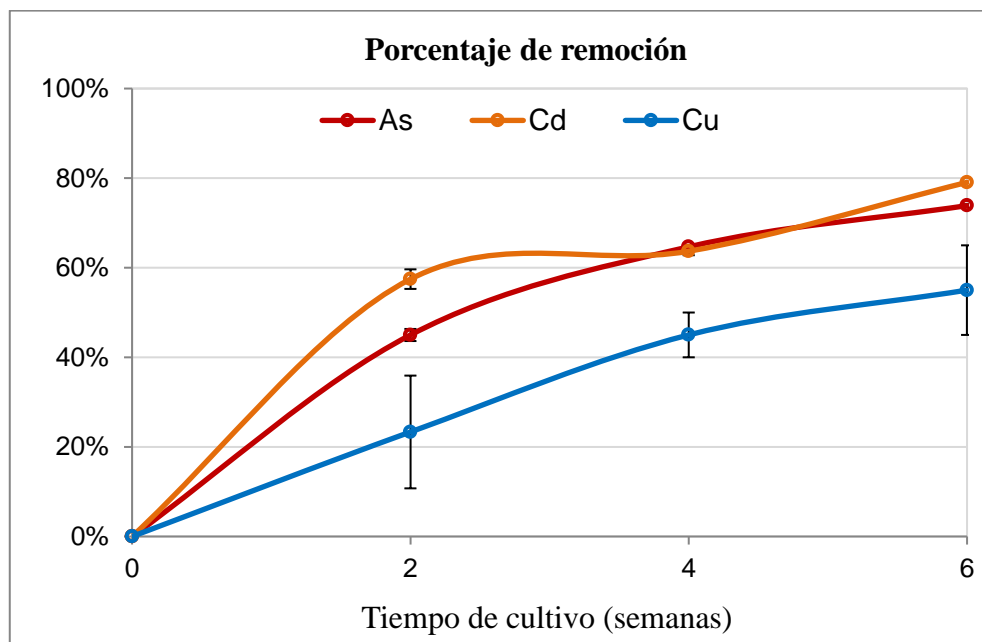


Figura 6. Porcentajes de remoción de As, Cd y Cu en las muestras de suelo contaminado mediante cultivo de geranio.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

Se obtuvo una disminución de los metales contaminantes del suelo mediante el cultivo de geranio, donde el mayor porcentaje de remoción se logró para el Cd, alcanzando hasta un 79% tras seis semanas de cultivo, y para el As, con un 74% de remoción, mientras que la menor tasa de remoción fue obtenida para el Cu (55%) tras las seis semanas de cultivo. Los resultados obtenidos muestran que la fitorremediación mediante el cultivo de geranio constituye una alternativa a los métodos convencionales de remoción de metales como el As, Cd y Cu de suelos contaminados, por lo que se puede utilizar como una herramienta efectiva y económica, debido a su manejabilidad de cultivo. Finalmente, es necesario considerar que la problemática de contaminación de suelos urbanos, como el estudiado, debe ser atendida desde una manera integral, no solamente por la presencia de los contaminantes, sino también para reducir, o eliminar, la fuente de generación de estos contaminantes.

- Bernal, M.P., Clemente R., Vázquez S., & Walker D.J. 2007. Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. Ecosistemas. *Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 16(2): 67-77.
- Castro, W. 2016. Botadero el Milagro entre los 20 críticos en el mundo. Diario La República. Lima, Perú. Disponible en: <https://larepublica.pe/sociedad/782085-oefa-botadero-de-el-milagro-entre-los-20-criticos-en-el-mundo/>.
- Danh, L.T., Truong, P., Mammucari, R., & Foster, N. 2014. A critical review of the arsenic uptake mechanisms and phytoremediation potential of *Pteris vittata*. *International Journal of Phytoremediation*, 16(5): 429-453.
- Delgadillo-López, A., González-Ramírez, C., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J., & Acevedo-Sandoval, O. 2011. Phytoremediation: an alternative to eliminate pollution. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14: 597-612.
- Díaz, W. 2016. Estrategia de gestión integrada de suelos contaminados en el Perú. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – UNMSM*, 19(38): 103-110.
- Fernández, S., Poschenrieder, C., Marcenò, C., Gallego, J.R., Jiménez-Gámez, D., Bueno, A., & Afif, E. 2017. Phytoremediation capability of native plant species living on Pb-Zn and Hg-As mining wastes in the Cantabrian range, north of Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, 174: 10-20.
- Hernández, A. 2008. *Contaminación por cadmio en suelos aledaños a Met-Mex Peñoles y retención de este metal por el geranio (Pelargonium spp)* (Tesis). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Torreón, Coahuila, México.
- Herrero, Z., Valcárcel, L.A., Montero, A., Estevez, J.R., dos Santos, J.A., Pupo, I., Rodríguez, M., Alberro, N., López, D., & Hernández, D. 2015. Application of Cold Vapor-Atomic Absorption (CVAAS) Spectrophotometry and Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry methods for cadmium, mercury and lead

analyses of fish samples. Validation of the method of CVAAS. *Food Control*, 48: 37-42.

Huaranga, F., Méndez, E., Quilcat, V., & Huaranga F. 2012. Contaminación por metales pesados en la cuenca del río Moche, 1980-2010, La Libertad-Perú. *Scientia Agropecuaria*, 3(3): 235-247.

Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants. Fourth edition. Boca Raton, United States: CRC Press.

Kim, E.J., & Baek, K. 2019. Selective recovery of ferrous oxalate and removal of arsenic and other metals from soil-washing wastewater using a reduction reaction. *Journal of Cleaner Production*, 221: 635-643.

MINAM. 2012. Quinto Informe Anual de Residuos Sólidos Municipales y no Municipales en el Perú gestión 2012. Ministerio del Ambiente (MINAM). Lima, Perú. Disponible en: <https://redrrss.minam.gob.pe/material/20140423145035.pdf>.

MINAM. 2014. Guía para Muestreo de Suelos. En el marco del D.S. N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo. Ministerio del Ambiente (MINAM). Lima, Perú. Disponible en: http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf.

MINAM. 2014. Sexto Informe Nacional de Residuos Sólidos de la Gestión del Ámbito Municipal y No Municipal 2013. Ministerio del Ambiente (MINAM). Lima, Perú. Disponible en: <http://redrrss.minam.gob.pe/material/20160328155703.pdf>.

MINSA. 2012. Plan de trabajo de vigilancia y control de riesgos por exposición ocupacional a metales pesados. Dirección General de Salud Ambiental. Ministerio de Salud (MINSA) Lima, Perú. 2012. Disponible en: https://www.minsa.gob.pe/portalweb/06prevencion/prevencion_2.asp?sub5=3.

Moreno-Jiménez, E., Esteban, E., & Peñalosa, J.M. 2012. The fate of arsenic in soil-plant systems. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 215: 1-37.

OEFA. 2015. Fiscalización ambiental en residuos sólidos de gestión municipal provincial. Informe 2014-2015: Índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional.

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Ministerio del Ambiente (MINAM). Lima, Perú. 2015. Disponible en: <http://www.oefa.gob.pe/publicaciones/fiscalizacion-ambiental-en-residuos-solidos-en-gestion-municipal-provincial>.

Orroño, D.I., & Lavado, R.S. 2009. Heavy metal accumulation in *Pelargonium hortorum*: Effects on growth and development. *Phyton*, 78: 75-82.

Patel, A., & Patra, D.D. 2014. Phytoextraction capacity of *Pelargonium graveolens* L'Hér. grown on soil amended with tannery sludge - Its effect on the antioxidant activity and oil yield. *Ecological Engineering*, 74: 20-27.

Prieto, M., Gonzales, C., Román, A., & Prieto, F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en las plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and subtropical Agroecosystems*, 10(1): 29-44.

Sánchez, M. 2010. *Contaminación por metales pesados en el botadero de basuras de Moravia en Medellín transferencia a flora y fauna y evaluación del potencial fitorremediador de especies nativas e introducidas* (Tesis). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.

Squadrone, S., Burioli, E., Monaco, G., Koya, M.K., Prearo, M., Gennero, S., Dominici, A., & Abete, A.C. 2016. Human exposure to metals due to consumption of fish from an artificial lake basin close to an active mining area in Katanga (D.R. Congo). *Science of the Total Environment*, 568: 679-684.

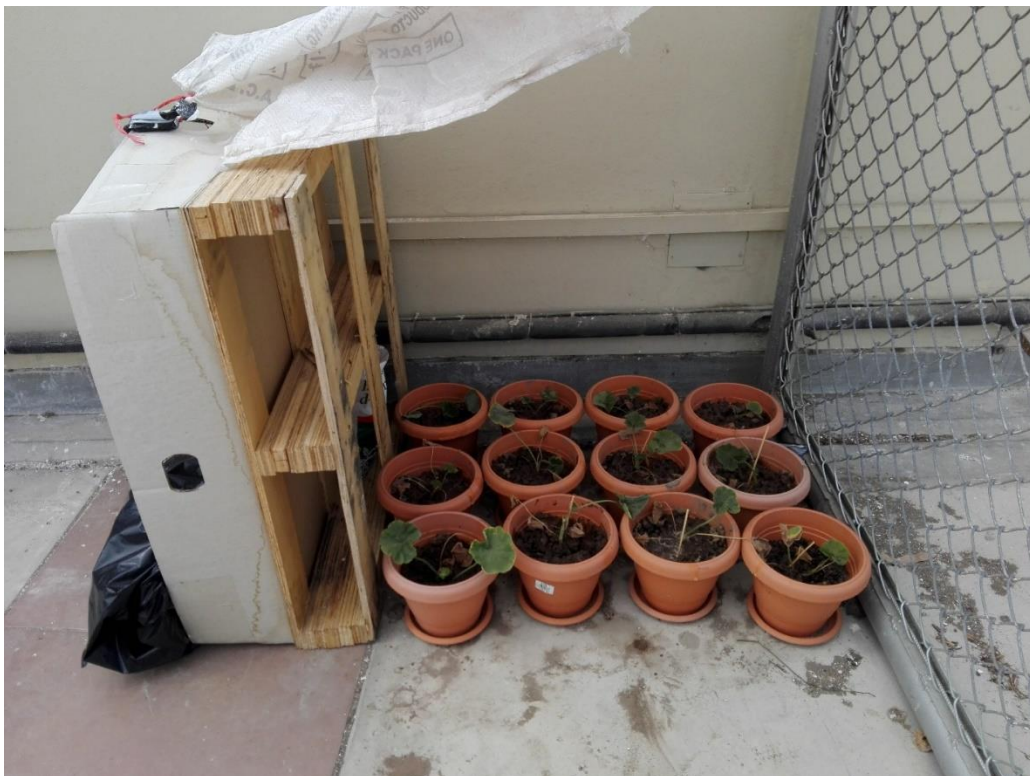
ANEXO N° 1. Reconocimiento del terreno *in situ* y toma de datos referenciales para el muestreo en el botadero El Milagro botadero El Milagro.



Cultivo de geranio: uso potencial para remover arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de suelos contaminados
ANEXO N° 2. Muestro inicial de identificación y recolección de muestras en el botadero El Milagro.



ANEXO N° 3. Cultivo y monitoreo del cultivo de geranio *ex situ*.



ANEXO N° 4. Recolección de las muestras de suelo del cultivo de geranio.



ANEXO N° 5. Secado y preparado de las muestras de tierra del cultivo de geranio.



Cultivo de geranio: uso potencial para remover arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de suelos contaminados

ANEXO N° 6. Pesado y almacenaje preanálisis de las muestras de tierra del cultivo de geranio.

