

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA AMBIENTAL**

“VITRIFICACIÓN EX SITU PARA LA
INERTIZACIÓN DE RELAVES MINEROS CON
APLICACIÓN DE ENMIENDAS EN LA CUENCA
DEL RÍO MOCHE, QUIRUVILCA, 2022”

Tesis para optar al título profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Autor:

Maria Pierina Aroni Villalobos

Asesor:

Dr. Fernando Enrique Ugaz Odar
<https://orcid.org/0000-0002-1324-0551>

Trujillo - Perú

2023

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Elvar Renato Miñano MERA	18130961
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Juan Carlos Flores Cerna	18898536
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Luis Alva Díaz	43679478
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

INFORME DE SIMILITUD

REVISION FINAL

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	repositorio.uisek.edu.ec Fuente de Internet	2%
3	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	www.minem.gob.pe Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad Privada del Norte Trabajo del estudiante	1%
6	futur.upc.edu Fuente de Internet	1%
7	Submitted to Universidad del Istmo de Panamá Trabajo del estudiante	1%
8	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
9	repositorio.tec.mx Fuente de Internet	

DEDICATORIA

A Dios primero, porque sin Él yo no estaría aquí y nada sería posible.

A mis padres y hermanos, porque se merecen todos mis logros y metas cumplidas.

A mis mejores amigas, porque nunca dejaron de creer en mí.

A Carlos Quiñones, por su amor incondicional y por ser mi compañero de vida en
las buenas, mejores y peores.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios por nunca abandonarme y darme todas las herramientas que necesité para avanzar y llegar hasta aquí.

A mi alma mater, Universidad Privada del Norte, por brindarme los conocimientos fundamentales para mi formación profesional y al laboratorio de la Universidad, por el apoyo con sus instrumentos y equipos.

A mi asesor, por el apoyo constante, paciencia, dedicación y ánimos durante todo el proceso.

Tabla de contenido

Jurado calificador	2
Informe de similitud	3
Dedicatoria	4
Agradecimiento	5
Tabla de contenido	6
Índice de tablas	8
Índice de figuras	8
Resumen	9
Capítulo I: Introducción	10
1.1. Realidad problemática	10
1.2. Formulación del problema	12
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
1.4. Hipótesis	13
1.4.1. Hipótesis alternativa H1:	13
1.4.2. Hipótesis nula H0:	13
1.5. Antecedentes	13

1.6. Bases teóricas	16
Capítulo II: Metodología	23
1.7. Materiales, instrumentos y métodos	23
1.7.1. Materiales e instrumentos	23
1.7.2. Métodos	25
Capítulo III: Resultados	29
Capítulo IV: Discusión y conclusiones	35
1.8. Discusión	35
1.9. Conclusiones	36
1.10. Limitaciones y recomendaciones	37
Referencias	39
Anexos	44

Índice de tablas

Tabla 1: Ubicación de la muestra	23
Tabla 2: Análisis de varianza del crecimiento de la planta de frijol	29

Índice de figuras

Figura 1: Mapa del distrito de Quiruvilca	23
Figura 2: Diagrama de flujo del procedimiento	27
Figura 3: Concentración inicial de plomo, cadmio y arsénico	30
Figura 4: Concentración final de plomo, cadmio y arsénico	31
Figura 5: Comparación de la concentración final de Plomo, Cadmio y Arsénico con los ECA	32
Figura 6: Porcentaje de remoción para Plomo, Cadmio y Arsénico	33
Figura 7: Crecimiento de la planta de Frijol	34

RESUMEN

Algunos elementos con alto potencial contaminante, como los metales pesados, tienden a ocasionar alteraciones significativas y efectos negativos según su nivel de concentración. El manejo incorrecto de los residuos peligrosos ha originado un grave problema de contaminación, provocando un deterioro creciente de los recursos naturales y el medio ambiente. Debido a este mal manejo, se ha generado un aumento de la demanda por buscar alternativas económicas y efectivas para remediarlos. Utilizando un enfoque cuantitativo, de carácter confirmatorio y de diseño experimental, este trabajo de investigación buscó desarrollar la técnica de vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con aplicación de enmiendas en la cuenca alta del río Moche. Asimismo, se analizó la muestra de suelo en el pre y post tratamiento, utilizando el método del ICP y absorción atómica para determinar la presencia de compuestos inorgánicos, siendo comparados con los ECA para suelo agrícola. Además, se determinó la altura de crecimiento de la planta de frijol, tanto en las muestras tratadas como en el testigo, a través de la adición de humus como enmienda. Los resultados del análisis pretratamiento arrojaron una concentración de 1500 mg/kg para Pb, 100 mg/kg para Cd y 2000 mg/kg para As, superando los ECA suelo. La muestra de suelo fue llevada a la mufla a 1100 °C a diferentes tiempos, aplicando 2 horas a la submuestra 1 y 5 horas a la submuestra 2. La concentración en el análisis postratamiento mostraron una reducción considerable para cada metal, dando como resultado en la M1 = 300 mg/kg (Pb), <100 mg/kg (Cd), 400 mg/kg (As); y en la M2 = 200 mg/kg de (Pb), <100 mg/kg de (Cd), 200 mg/kg de (As). De igual modo, se determinó la efectividad del proceso de vitrificación y la aplicación de humus como enmienda en el crecimiento de la planta de frijol, logrando 21 cm de altura en la M2 a los 21 días de siembra.

PALABRAS CLAVES: Vitrificación, inertización, relave minero, enmienda.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El cambio climático que sigue afectando al mundo y la contaminación ambiental, como una de las consecuencias más significativas de las diversas actividades humanas, continúan sucediendo a un ritmo cada vez más acelerado con el pasar de los años, haciendo obligatorio y necesario que los gobiernos y autoridades competentes, tomen acciones inmediatas para restablecer el daño ocasionado y devolver el equilibrio al planeta, previniendo así la gravedad de consecuencias futuras (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2016, p. 1). Esta situación ha producido gran preocupación en la sociedad sobre la protección y preservación del medio ambiente, generando una mayor motivación en la creación de alternativas para atender y revertir los daños generados por el ser humano y así prevenir o impedir que el ambiente se siga destruyendo; ya que, estas acciones desencadenan consecuencias negativas en la salud y bienestar de los seres humanos y de todo ser vivo.

La contaminación ambiental evoluciona de forma constante y este proceso sucesivo compromete a todos los ecosistemas, ambientes y recursos naturales, y desde cualquier ángulo o panorama, involucra también a los seres vivos emisores y receptores de contaminantes (Domínguez, 2015, p. 1). De esta manera, el suelo termina siendo uno de los recursos gravemente afectados, ya que, puede degradarse por el almacenamiento de sustancias peligrosas o nocivas, llegando a influir de manera negativa incluso en el comportamiento y funciones del suelo, disminuyendo la productividad de los cultivos y generando probables alteraciones en la estructura de los tejidos de las especies. Es así, que el avance de estos procesos genera un alto riesgo para la salud y bienestar de los

consumidores al ingresar directa o indirectamente los contaminantes a la cadena trófica (García, 2009, p. 1).

Según los resultados del estudio *Progress in the Management of Contaminated Sites in Europe*, extrapolándolos a toda Europa, se puede calcular que existen 2,5 millones de emplazamientos potencialmente contaminados, siendo identificados, dentro de los países de estudio, un 33% de los emplazamientos y solo el 15% de ellos remediados. En cuanto a la industria, es considerada uno de los principales sectores responsables de la contaminación del suelo y aguas subterráneas, ya que representa el 60% de la contaminación y se coloca a la industria metalúrgica como la principal fuente contaminante. Posteriormente, se encuentra como fuente contaminante el sector de servicios, generando el 32% de contaminación y causada principalmente por las estaciones de servicio (European Soil Data Centre [ESDAC], 2014, p. 1).

Los elementos como el Pb, Se, Cd, Cu, Hg, Ni, As, y Zn se consideran nocivos para la gran mayoría de los seres vivos, alterando el medio ambiente y afectando negativamente la salud humana (García, 2009, p. 2). Por lo tanto, como una alternativa de remediación o remoción de estos metales surge el método de vitrificación, la cual se define como aquel proceso que logra reducir in situ o ex situ la concentración de diferentes contaminantes por medio de la fundición y fusión de los elementos, bajo la exposición de ellos a temperaturas mayores a 1100 °C, siguiendo con un inmediato enfriamiento, obteniendo como resultado un compuesto amorfo no cristalino (Volke, Velasco y de la Rosa, 2005).

En el Perú, el sector minero es una de las industrias que ha existido y persistido desde tiempos ancestrales y debido a ello, la presencia de estos metales en el suelo sigue siendo un aspecto relevante de los problemas de contaminación ambiental en nuestro país. A pesar de esto, se conoce que la legislación correspondiente a asuntos y aspectos ambientales era muy

escasa hasta antes del año 1990, fecha en la que se promulgó el código del medio ambiente en nuestro país (Manrique y Sanborn, 2021, p. 7).

Bajo este contexto, la justificación del estudio se basa en la gran importancia que tiene el recurso suelo en el desarrollo de todos los seres vivos, ecosistemas y el propio ser humano. Sin embargo, una de las preocupaciones que se ha venido intensificando en los últimos años, es la degradación del suelo y disminución de su calidad, debido a la continua acumulación de metales pesados, entre ellos el cadmio y plomo, producto de diversas actividades antropogénicas que han afectado significativamente algunas zonas del departamento de La Libertad.

De este modo, la presente investigación se encuentra enmarcada en la línea de investigación de Desarrollo Sostenible y Gestión Empresarial, específicamente en la sub-línea de Remediación ambiental, biominería, gestión de residuos y excedentes industriales.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo actúa la vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con aplicación de enmiendas en la cuenca del río Moche, Quiruvilca, 2022?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar la técnica de vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con aplicación de enmiendas en la cuenca del río Moche, Quiruvilca, 2022.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analizar la Muestra de Suelo - MS (pre tratamiento) para determinar la presencia de compuestos inorgánicos según ECA-SUELOS 2017.
- Analizar la Muestra de Suelo - MS (post tratamiento de vitrificación) para determinar la presencia de compuestos inorgánicos según ECA-SUELOS 2017.

- Determinar el porcentaje de remoción obtenido en el análisis de la muestra de suelo post-tratamiento.
- Determinar la altura de la planta tanto en el tratamiento como en el testigo a través de la aplicación de abono orgánico como enmienda.

1.4. Hipótesis

A continuación, se presentan dos hipótesis a la investigación experimental realizada:

1.4.1. Hipótesis Alternativa H1:

La vitrificación ex situ SI dejará inactivo a los contaminantes del relave minero con aplicación de enmiendas en la cuenca del río moche, Quiruvilca, 2022.

1.4.2. Hipótesis Nula H0:

La vitrificación ex situ NO dejará inactivo a los contaminantes del relave minero con aplicación de enmiendas en la cuenca del río moche, Quiruvilca, 2022.

Los resultados cuantitativos indicarán que se confirmó la H1, cuando se pueda comprobar que los valores de la contaminación del suelo con compuestos inorgánicos son reducidos con respecto a los valores del ECA suelo MINAM 2017, rechazando la hipótesis nula.

1.5. Antecedentes

En el trabajo de investigación de Corral y Salguero (2017), realizado en Ecuador sobre la “Inertización de relaves mineros utilizando la vitrificación para su aprovechamiento en la construcción”, tuvo como propósito la presentación de una alternativa para el tratamiento de los relaves mineros, obtenidos del Mineraducto ubicado en el distrito Minero Zaruma-Portovelo, aplicando el método de inertización. Para ello, se empleó la vitrificación

ex situ, donde se sometió a altas temperaturas la muestra seca, agregando vidrio en polvo y las sustancias fundentes como bórax con la intención de alcanzar un material totalmente inerte. Finalmente, el ensayo de TCLP aplicado a la muestra tratada, evidenció que el método de vitrificación obtuvo altos porcentajes de inertización, alcanzando casi el 100% para Zinc, Plomo y Cobre; mientras que, para arsénico se logró solo el 6.88%.

En el trabajo de Arisqueta y Simbaña (2021) titulado “Inertización de metales pesados de un lodo de la industria metalmeccánica, utilizando el proceso de vitrificación ex situ”, se efectuaron 26 pruebas de inertización-vitrificación del lodo bajo las siguientes condiciones: temperatura a 1063°C, tiempo máximo de 1 h., velocidad de calentamiento 60°C/hora y 10 horas de enfriamiento. Adicionalmente, se agregó vitrificante de vidrio molido y la técnica se llevó a cabo en el horno para vidrio. La verificación de la eficiencia de la técnica aplicada se realizó a través de la metodología EPA 1311, siendo empleada en las muestras tratadas desde la P22 hasta la P26, calculando también el porcentaje de inertización. Los resultados indicaron la efectividad del proceso en el Pb, Zn, As, Fe, Cu y Ni al incrementar la cantidad de vitrificante hasta alcanzar el 100%. Por otro lado, para el Hg, Co, Se, Mn, Cr y Cd se obtuvo el 100% de inertización en las diferentes pruebas. El proceso de vitrificación permitió que el lodo se normalice y cambie a una sustancia inocua, obteniendo un material de “vidrio” y generando nuevas utilidades como “materia prima secundaria” en bisutería y como material en el sector de construcción.

En el trabajo de investigación de Vidal (2003) titulado: “Desarrollo de una metodología de selección eco-eficiente de técnicas para remediar suelos contaminados con metales pesados”, se desarrolló un procedimiento que busca evaluar y seleccionar diferentes opciones de remediación para lugares o espacios contaminados con metales pesados, tomando en cuenta los componentes como el tiempo, costo y efectividad de remediación.

Las alternativas fueron evaluadas para comprender cómo funcionan y así poder identificar sus beneficios y limitaciones. Para ello, se definieron ocho criterios de evaluación para el proceso de selección de las técnicas, donde se elaboró un mecanismo de evaluación cuantitativa en cada criterio. Mediante una matriz de selección, se dictó la importancia relativa de cada uno de los criterios utilizando ponderaciones. Asimismo, se calculó un índice de clasificación considerando el análisis de cada criterio y su trascendencia para el usuario. Al final, este proceso se aplicó a un caso real, en el cual la conclusión de la selección fue comparada con los resultados que se obtendrían de la forma convencional. Sin embargo, para la aplicación del método de vitrificación, se necesita la implementación de maquinaria para el acondicionamiento del espacio y para la aplicación de la técnica. Por último, se concluye que el método de vitrificación no es eco-eficiente, ya que, genera mayor consumo energético; además, su proceso de fusión del suelo origina un alto impacto ambiental al destruir por completo la matriz del suelo, por lo cual, cuando se remueve el material tratado, se necesita rellenar con suelo limpio.

En el estudio de Navarro et al. (2009) sobre “Vitrificación solar de lodos de flotación de la zona minera de Sierra Almagrera (Almería)”, se tuvo como propósito la evaluación de la posible remediación de las zonas mineras afectadas. Para ello, se utilizó un horno solar para realizar los ensayos de vitrificación a los lodos y así poder analizar la capacidad de lixiviación de los residuos mineros. En el caso del Arteal, los resultados de los lixiviados indicaron la evidente disminución en la movilidad del Cu, Fe, Ni y Ba, pero aumentando la del Pb y Sb. Sin embargo, cabe resaltar que el Cd y Mn presentaron concentraciones muy similares en los lixiviados de las muestras tratadas y sin tratar. Por otro lado, en el caso del residuo minero de Jaravías, donde la muestra pasó por un tratamiento térmico a una mayor temperatura, la movilidad del Fe, Mn, Pb y Zn se redujo considerablemente.

1.6. Bases Teóricas

1.6.1. El suelo

El suelo es un componente finito, producto de la intervención del clima combinada con el tiempo, topografía, el ser humano, flora, fauna y de materiales como rocas y minerales originarios. Esta capa se distingue de su material parental por su textura, consistencia, estructura, color y propiedades biológicas, químicas y físicas. Este recurso es la base de nuestra agricultura y es el componente principal para todo tipo de ecosistemas; por lo tanto, se encarga de sostener y proporcionar los principales nutrientes minerales para todos los organismos vivos. El correcto manejo de este recurso refuerza y garantiza que los elementos minerales no se transformen en elementos insuficientes o tóxicos para las especies de flora al ingresar en la cadena alimentaria (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020, p.1).

1.6.2. Metales pesados

De acuerdo a la tabla periódica, el metal pesado es un elemento químico cuya densidad es mínimo cinco veces mayor a la del agua y pueden llegar a ser altamente tóxicos. Estos son algunos elementos correspondientes a dicha categoría: aluminio, bario, berilio, cobalto, cobre, estaño, hierro, manganeso, cadmio, mercurio, plomo, arsénico, cromo, níquel, plata, selenio, vanadio, oro y zinc (Londoño Franco, Londoño y Muñoz, 2016, p. 146). Los metales pesados pueden ser encontrados de forma natural en el suelo, estando presentes como componentes del mismo en determinadas concentraciones o también, como producto de las diferentes actividades humanas. Dentro de esta categoría, existen los llamados oligoelementos, los cuales son fuente principal de micronutrientes para los cultivos y son necesarios en bajas proporciones, ya que, resultan indispensables para completar el ciclo vital de los organismos. Sin embargo, pueden convertirse en tóxicos si exceden cierto

límite de concentración, tales como el B, Cr, Fe, Mn, Se, Ni y el As. Por otro lado, existen metales pesados que se conocen por no presentar función biológica, por lo tanto, su concentración en determinadas cantidades termina siendo altamente nocivos y poseen la capacidad de almacenarse en los organismos vivos, tales como el Bi, Cd, Pb, Hg, Sn, Sb, Ti (Prieto et al., 2009, p. 30).

Cuando la presencia en el suelo, de alguno de estos metales pesados, supera en concentración los LMP, llegan a generar impactos inminentes como el retraso o interrupción en el crecimiento y formación normal de las plantas; además, genera un desorden funcional en diversos constituyentes del medio ambiente, así como el descenso de las poblaciones microbianas del suelo. Asimismo, es fundamental tener en cuenta que la capacidad de adsorción de los metales está altamente condicionada por el nivel de pH del suelo y de igual manera su solubilidad (Prieto et al., 2009, p. 35).

1.6.3. Cadmio

El cadmio (Cd) es un metal pesado ubicado en el grupo 12 dentro de la tabla periódica. Este metal pesado no es fácil de encontrar, sin embargo, puedes hallarlo presente en pequeños yacimientos de cadmio alrededor de todo el continente; es por ello que usualmente no se obtiene a partir de ciertos minerales, sino que, generalmente se consigue como un subproducto de la industria metalúrgica, mediante la extracción, fundición y refinación del zinc. Este metal es usado comúnmente en la producción de baterías de níquel y cadmio (Londoño Franco, Londoño y Muñoz, 2016, p. 148).

Uno de los elementos más tóxicos es el cadmio y por ello es catalogado como un metal de transición, gracias a que posee propiedades similares con otros elementos ubicándose en el bloque “d” de la tabla periódica. Este elemento se utiliza en diferentes aplicaciones industriales como pigmento en esmaltes, pinturas, etc. Además, se utiliza en la

aleación de cobre, aluminio y plata, así como en la elaboración de pilas de cadmio-níquel.

Sin embargo, cuando se encuentra en concentraciones elevadas, su toxicidad es altamente peligrosa y termina ocasionando problemas de salud graves en el ser humano (Londoño Franco, Londoño y Muñoz, 2016, p. 149).

1.6.4. Plomo

El plomo es otro elemento perteneciente al grupo 14 de la tabla periódica, siendo su número atómico el 82 y representado simbólicamente como Pb. Este elemento presenta propiedades tóxicas, ya que, se trata de un metal pesado y debido a ello, muchas de sus aplicaciones han terminado obsoletas. No obstante, una gran cantidad de compuestos de plomo son utilizados en la industria moderna como en aleaciones con otros elementos, ya sea bismuto, cobre, estaño, sodio, entre otros. El plomo se obtiene principalmente gracias a la extracción, por medio de trabajos mineros en yacimientos con diferentes tipos de minerales. Actualmente, este elemento es utilizado en múltiples casos, sobresaliendo su uso en la fabricación de cubiertas protectoras para cables de todo tipo. De igual modo, muchas empresas usan este metal para la fabricación de pigmentos artificiales, así como en la industria de la construcción y planificación urbana (Londoño Franco, Londoño y Muñoz, 2016, p. 151).

Una de las consecuencias más graves que origina la elevada concentración de plomo en el suelo, son los múltiples daños ocasionados durante el crecimiento y desarrollo de las plantas; así como, los diferentes grados de acumulación en las mismas. En ciertas especies, se intensifica la acumulación de plomo de forma acelerada en los órganos de las plantas, mientras aumenta su concentración en el suelo, llegando a niveles menores de 1000 mg Pb por kg-1 de suelo, generando que estas especies no lo toleren y lleguen a morir. Por otro lado, en ciertas especies de plantas, el plomo tiene la capacidad de almacenarse

especialmente en las raíces, resultando mínima su concentración en otros órganos de los cultivos. De igual modo, su disponibilidad en las plantas se encuentra condicionada al nivel de pH del suelo (Prieto et al., 2009, p. 35).

1.6.5. Arsénico

El arsénico es un elemento y mineral que se encuentra distribuido considerablemente en la Tierra, en todo el ambiente, pero generalmente lo encuentras en la superficie de las rocas combinado con azufre, manganeso, hierro, níquel o plata. La sobreexposición del arsénico para animales, como cerdos y aves, puede generar síntomas agudos como incoordinación, ataxia, después de tres a cinco días. Por otro lado, la toxicidad crónica de este elemento puede ocasionar lesiones en la piel como hiperqueratosis e hiperpigmentación; así como, otros daños a nivel del sistema nervioso e hígado en el ser humano (Londoño Franco, Londoño y Muñoz, 2016, p. 149).

1.6.6. Relaves mineros

Los relaves son un subproducto frecuente generado por procesos mineros, los cuales forman un lodo semilíquido compuesto por agua y finas partículas de rocas, creado a partir del mineral extraído luego de ser triturado y molido en el proceso (ICMM, 2020).

En principio, el relave minero no es considerado un material tóxico debido a su composición. Sin embargo, su toxicidad puede producirse en condiciones posteriores al reaccionar con agua y solubilizar elementos nocivos que puedan transportarse disueltos en agua. Para aquellas empresas mineras que producen relaves con una alta presencia de elementos tóxicos para todo ser vivo, sobre todo para el ser humano, ya sea el Cr, As, Pb, entre otros, deben buscar prevenir y proteger que esas reacciones de solubilización de componentes tóxicos no se produzcan ni propaguen en lo absoluto. Estas acciones, sujetas y

dictadas por ley, buscan garantizar la protección de la salud humana y del medio ambiente (Sernageomin, 2018, p. 1).

1.6.7. Estándares de Calidad Ambiental para suelo

Dentro del marco de ley, se aprueban en el año 2017, los nuevos Estándares de Calidad Ambiental para suelo mediante el Decreto Supremo N°011-2017-MINAM, donde se establecen los valores de concentración permitidos para las sustancias, elementos, parámetros físico-químicos y biológicos contenidos en el suelo, los cuales, no deben representar ningún peligro o riesgo para ningún ser vivo ni el medio ambiente. De este modo, los valores establecidos para suelo agrícola son 50 mg/kg, 1.4 mg/kg y de 70 mg/kg en arsénico, cadmio y plomo respectivamente. Asimismo, los ECA establecidos para suelo comercial, industrial o extractivo es de 140 mg/kg para As, 22 mg/kg para Cd y 800 mg/kg para Pb (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017, p. 14).

1.6.8. Remediación de suelos

La remediación de un suelo contaminado comprende el tratamiento o práctica de un conjunto de operaciones unitarias con el fin de recuperar la calidad inicial del suelo o el mayor porcentaje posible. Esta medida altera la composición y estructura de un elemento contaminante mediante la aplicación de procesos biológicos, químicos o físicos, buscando reducir su movilidad, toxicidad o volumen (United States Environmental Protection Agency [US EPA], 1991, p. 215). Para el tratamiento de estos suelos, las diferentes técnicas de remediación se han clasificado según el lugar donde se realiza el proceso. El primero es el proceso “in situ”, el cual consiste en aplicaciones donde el recurso contaminado no tiene la necesidad de ser excavado ni retirado para poder tratarlo y de ese modo, remover o eliminar los contaminantes presentes; es decir, los procesos se desarrollan en el mismo lugar donde se halla la contaminación. El segundo tipo de proceso es “ex situ”, el cual sí requiere del

proceso de excavación, dragado o cualquier otro procedimiento para retirar el material afectado y transportarlo a otro lugar para su tratamiento de descontaminación (Instituto Nacional de Ecología y Cambio climático, 2007).

1.6.9. Vitrificación

Como una alternativa de remediación para suelos contaminados se encuentra la técnica de vitrificación. Este procedimiento puede ser empleado tanto in situ como ex situ y consiste en calentar y llevar el suelo a altas temperaturas, transformándolo en un componente cristalino y químicamente estable. El proceso logra disminuir la movilidad de los compuestos inorgánicos y eliminar los elementos orgánicos mediante reacciones de oxidación y/o pirólisis (Roqueta, 2016, p.8). En el caso del método in situ, se produce la conducción directa de calor a través del suelo, utilizando el principio de calentamiento por resistencia de Joule aplicando una corriente mediante electrodos. Para este tipo de aplicación, se emplean los mecanismos de transferencia de calor mediante conducción, a través del estado sólido del suelo, y asimismo, se aplica el mecanismo de convección, dado el cambio de fase del agua presente en el suelo y del aire retenido en los intersticios. Por otro lado, el desafío principal que plantea este tipo de tecnología radica en que el calentamiento reduce y evacúa la cantidad de humedad que presenta el suelo. Debido a ello, una baja conductividad eléctrica puede generar un calentamiento desigual y un uso ineficiente de la energía eléctrica (Corredor, 2016, p.14).

Por otro lado, en el caso de su práctica ex situ, se logra alcanzar la elevación de temperatura mediante la utilización de diferentes sistemas, como el uso de plasma, la corriente eléctrica directa, combustión o inducción, siendo el uso de la corriente eléctrica el más desarrollado. Luego de separar los componentes gruesos del suelo, este es llevado e introducido en un horno semejante a los empleados para la producción de vidrio,

exponiéndolo a temperaturas de 1.100-1.400°C a través de una corriente eléctrica. El tratamiento genera gases y vapor de agua como residuos, los cuales necesitan ser captados y tratados antes de ser liberados a la atmósfera. El alcance de remoción obtenido gracias al método de vitrificación es casi del 100%, logrando excelentes resultados en el control y eliminación de los contaminantes (Ortiz et.al, 2007).

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

1.7. Materiales, instrumentos y métodos

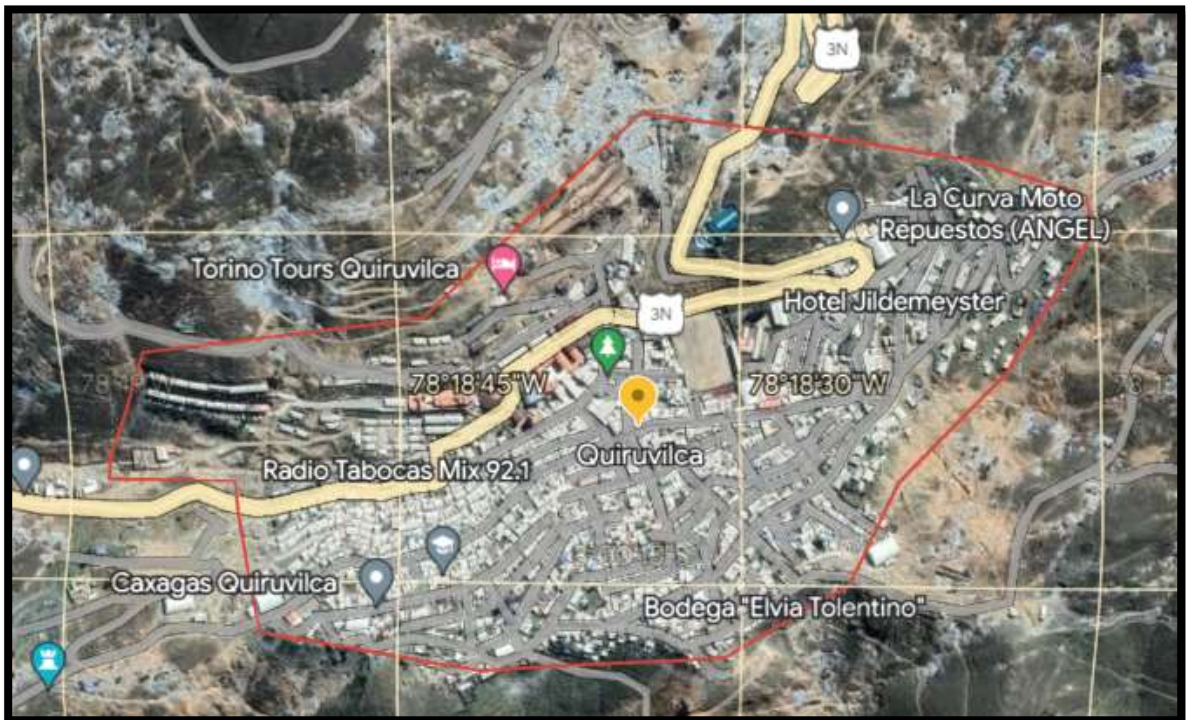
1.7.1. Materiales e instrumentos

1.7.1.1. Población

La población es el conjunto de personas u objetos de los que se desea conocer algo en una investigación. Puede estar constituida por personas, animales, registros médicos, los nacimientos, las muestras de laboratorio, entre otros" (López, 2004, p. 69). Por ello, en la presente investigación se considera una población finita comprendida por los suelos agrícolas contaminados del distrito de Quiruvilca, provincia de Santiago de Chuco, departamento de La Libertad.

Figura 1

Mapa del distrito de Quiruvilca - provincia de Santiago de Chuco



1.7.1.2. Muestra

La muestra es un subconjunto o parte del universo o población en que se llevará a cabo la investigación; es decir, es una parte representativa de la población (López, 2004, p. 70).

Tabla 1

Ubicación de la muestra según las coordenadas UTM

Zona	Longitud	Latitud	Altitud
17 L	Este: 795868.53	Sur: 9114400.18	3937 msnm.



1.7.1.3. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

1.7.1.3.1. Determinación de arsénico por ICP

De acuerdo al ECA suelo, se utilizó el método de ensayo EPA 3050 para la determinación de arsénico en la muestra de suelo. De este modo, se aplicó la técnica de ICP, la cual permite determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica a nivel de traza, analizando específicamente, en este caso, el arsénico. Se adjunta en el Anexo 1 el método 3050 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

1.7.1.3.2. Determinación de plomo y cadmio por Absorción atómica

De acuerdo al ECA suelo, el método de ensayo utilizado para la determinación de plomo y cadmio se aplicó el EPA 3051- Digestión ácida de suelos asistida por microondas. El alcance y aplicación está dado para diferentes metales pesados, incluyendo los dos elementos del presente estudio de investigación. Se adjunta en el Anexo 2 el método 3051 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

1.7.2. Métodos

1.7.2.1. Enfoque de estudio

El presente trabajo de investigación ha considerado un enfoque cuantitativo, ya que, aplica la recopilación y análisis de los datos para responder a las preguntas del estudio, y así demostrar una hipótesis con base en la evaluación numérica (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p. 10).

1.7.2.2. Tipo de investigación

La investigación es de carácter confirmatorio, ya que, las metas y objetivos del estudio buscan medir y probar algo. Por lo tanto, este trabajo de estudio corresponde a una investigación cuantitativa, la cual se centra en la medición y comprobación a través de datos numéricos (Ortega, 2022).

1.7.2.3. Diseño de investigación

El estudio se ajusta y pertenece al desarrollo de un diseño experimental, lo cual indica una investigación mediante la manipulación de variables. Este diseño busca evaluar las causas y calcular los efectos que presentan una variable en comparación con otra en torno a la misma investigación experimental (Velásquez, 2018).

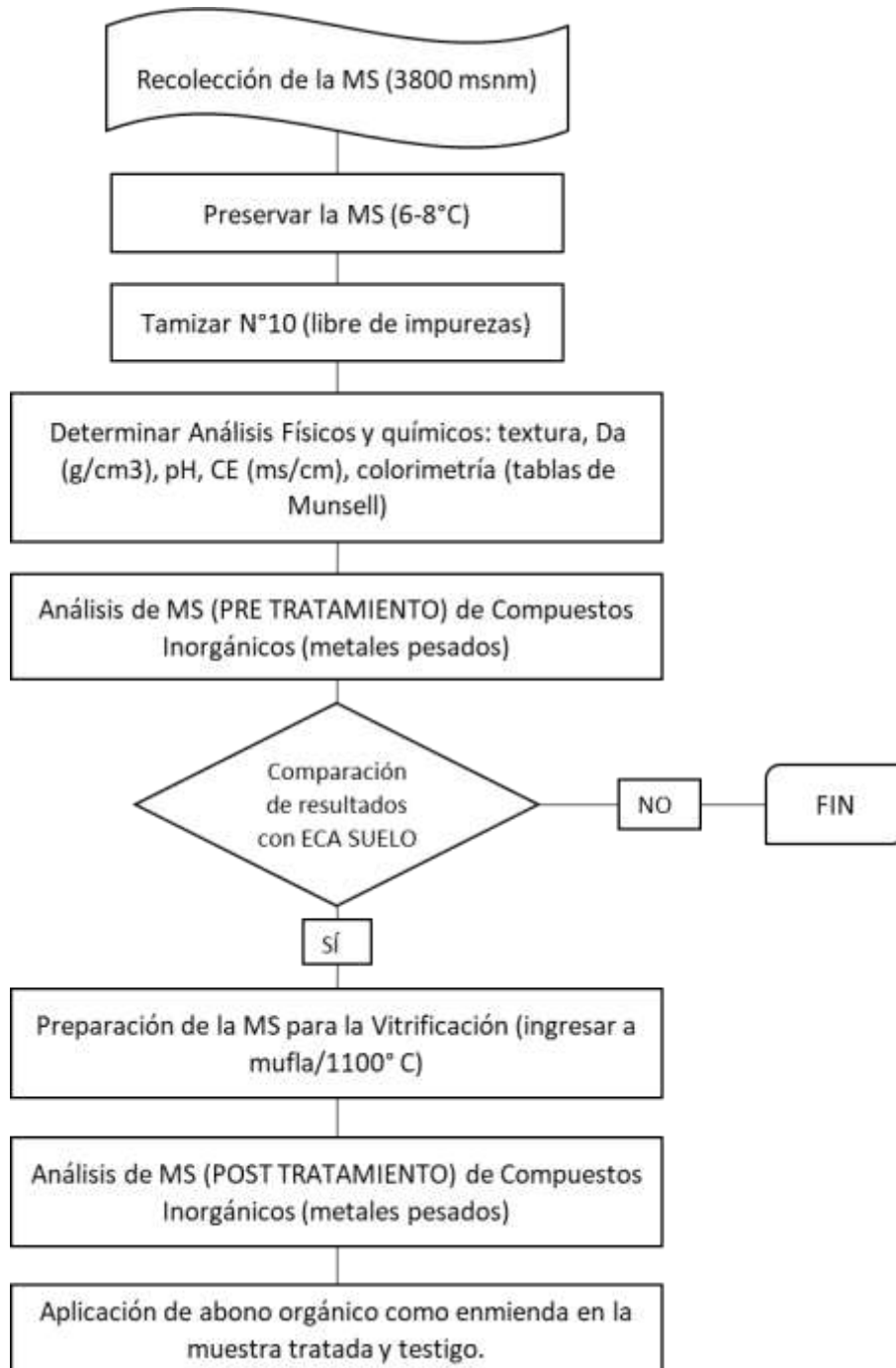
1.7.2.4. Procedimiento

El procedimiento desarrollado para esta investigación empezó a partir de la extracción de la muestra, la cual se obtuvo de un perfil de suelo agrícola a 40 cm de profundidad en el distrito de Quiruvilca. Este proceso se realizó siguiendo la metodología de acuerdo a la guía de muestreo de suelos del MINAM, aplicando la técnica de Muestreo de la Identificación (MI), con el objetivo de investigar la existencia de contaminantes en el suelo y, además, el número de muestras para este estudio. Este método del MI compara los resultados con el fin de establecer si el suelo supera o no los Estándares de Calidad Ambiental (MINAM, 2014).

El procedimiento general se detalla en el siguiente diagrama de flujo. Por otro lado, el proceso de vitrificación se realizó para dos submuestras en diferentes tiempos, los cuales se detallan en los Anexos 3 y 4.

Figura 2

Diagrama de flujo del procedimiento



1.7.2.5. Análisis estadístico

Para comprobar y dar respuesta a las hipótesis, se aplicó un análisis de datos a los resultados finales. El procesamiento de datos se realizó mediante el uso del programa de Excel 2019, donde se obtuvo el análisis de varianza, el valor de probabilidad y otros datos relevantes que apoyaron a responder las hipótesis.

1.7.2.6. Consideraciones éticas

Para decretar la validez y confiabilidad de los instrumentos, se consideró el criterio y el visto bueno de profesionales y expertos en el tema de investigación, relacionados con la carrera profesional de ingeniería ambiental de la Universidad Privada del Norte, sede San Isidro, Trujillo.

Finalmente, con respecto a los aspectos éticos de la investigación y de acuerdo al formato APA- 7^o edición, se han citado todas las fuentes consultadas, requeridas y utilizadas para esta investigación, así como el registro adecuado de las respectivas referencias bibliográficas.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

La presente investigación está fundamentada en figuras y tablas, las cuales se han basado en la recolección de datos y análisis de los resultados obtenidos para responder a cada objetivo.

En la tabla 2 se puede observar que la probabilidad es 0.0061561, siendo Alfa al 0.05 (5%) altamente superior al valor de la probabilidad, lo cual indica un alto grado de significancia. Además, para despejar la hipótesis, se obtuvo el valor de un F calculado igual a 8.9580645, el cual fue mayor al valor crítico del F tabulado. De este modo, se logra confirmar la hipótesis alternativa H1.

Tabla 2

Análisis de Varianza del crecimiento de la planta de frijol

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	694.25	3	231.4166667	8.9580645	0.0061561	4.066180551
Dentro de los grupos	206.6666667	8	25.83333333			
Total	900.9166667	11				

Donde:

F: Factor calculado

Valor crítico para F: Factor tabulado

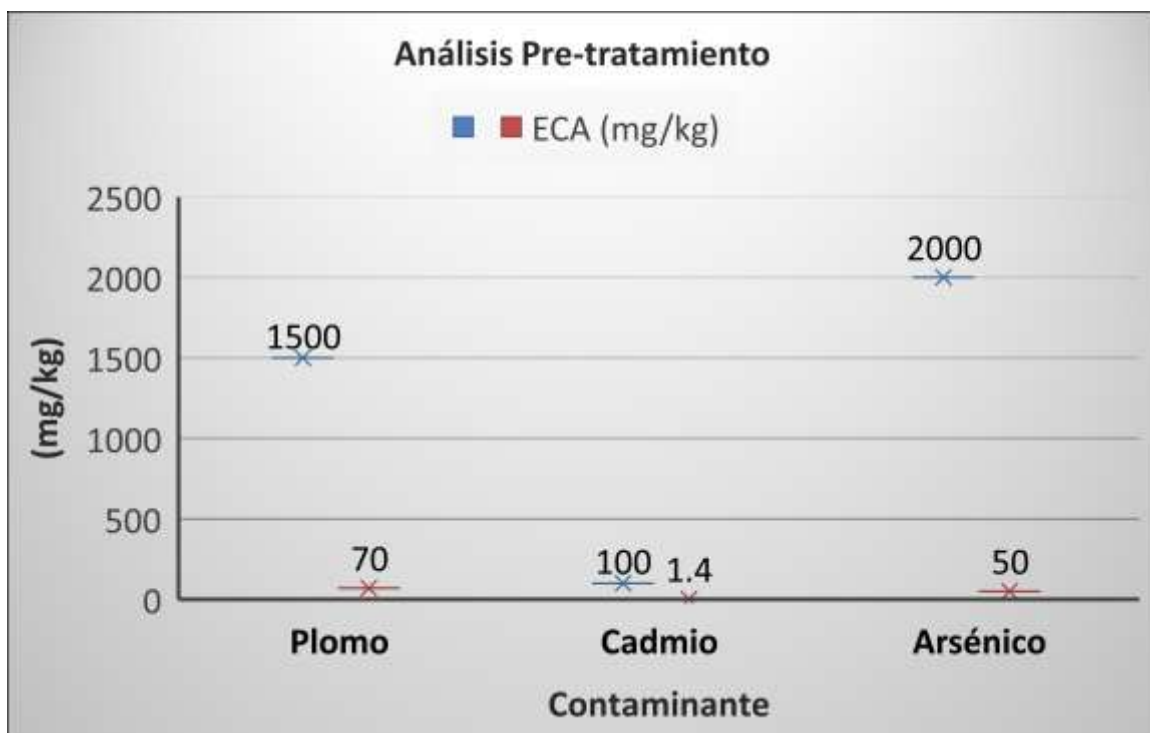
$F_{cal} > F_{tab}$: Acepta H1

$F_{cal} < F_{tab}$: Acepta H0

En la figura N°3, se presenta un resumen de la concentración inicial para plomo, cadmio y arsénico en la muestra de suelo de Quiruvilca, siendo comparadas con los ECA suelo. Los resultados mostraron elevadas concentraciones para cada metal pesado, sobrepasando los estándares de calidad ambiental permitidos para el respectivo tipo de suelo. Cabe resaltar, que la muestra de suelo analizada presentó un pH de 2.61 y una conductividad de 1107 uS/cm.

Figura 3

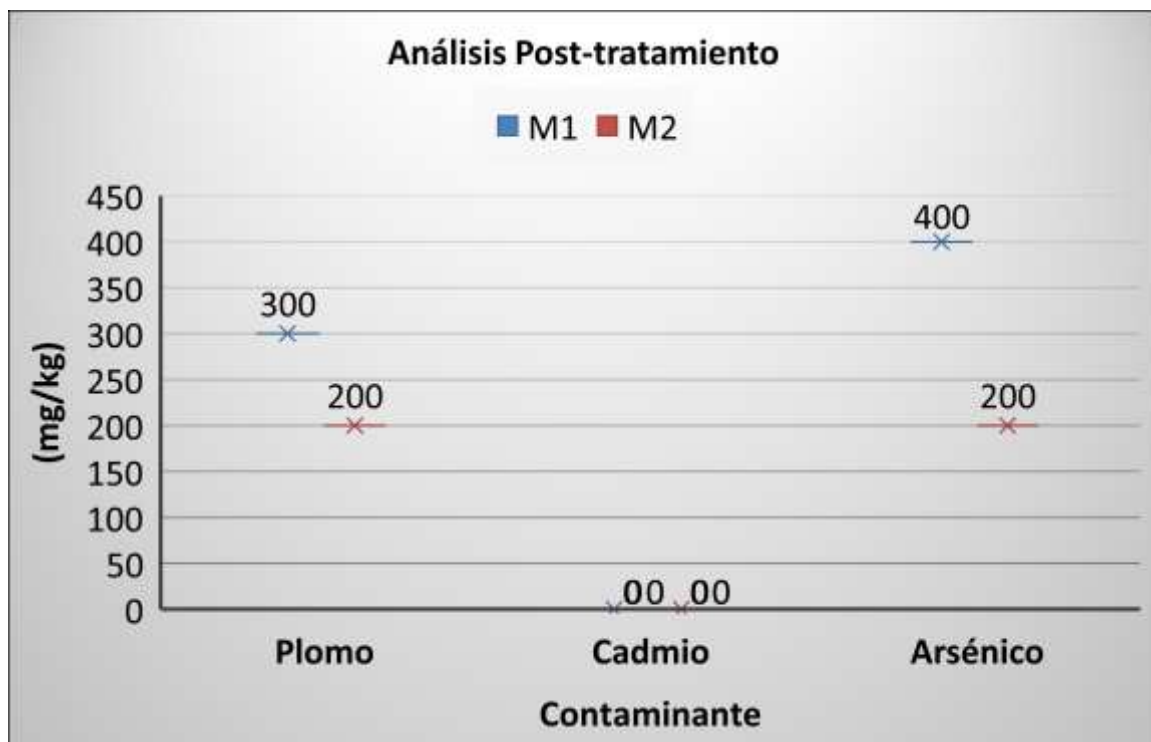
Concentración inicial de Plomo, Cadmio y Arsénico comparada con los ECA



En la figura N°4, se presenta un resumen de la concentración final para plomo, cadmio y arsénico en las muestras de suelo 1 y 2 posterior al proceso de vitrificación. Las muestras fueron llevadas al horno por 2 horas y 5 horas, respectivamente. Los resultados mostraron una considerable reducción en la concentración de cada metal pesado para cada muestra de suelo, logrando mayor efectividad de descontaminación en la muestra 2. En caso del análisis de concentración para cadmio, los resultados obtenidos se indicaron como valores < 100; por lo tanto, en el gráfico se encuentran representados como 0.

Figura 4

Concentración final de Plomo, Cadmio y Arsénico



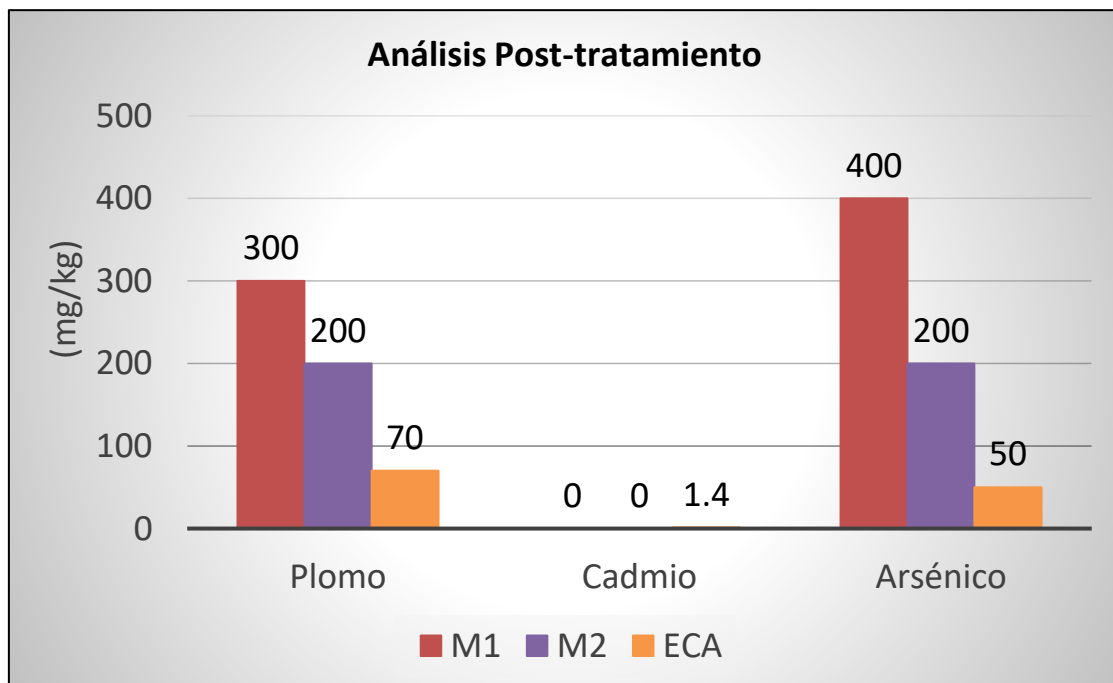
En la figura N°5, se presenta la comparación de la concentración final obtenida para plomo, cadmio y arsénico en las muestras de suelo 1 y 2 con los ECA suelo.

Los resultados evidencian una significativa reducción en la concentración de cada elemento a través del proceso de vitrificación; sin embargo, los valores siguen superando los estándares de calidad ambiental.

En el Anexo 5 se presenta un resumen del análisis Pre-tratamiento y el Post-tratamiento de las concentraciones obtenidas para plomo, cadmio y arsénico en las muestras de suelo, respectivamente.

Figura 5

Comparación de la concentración final de Plomo, Cadmio y Arsénico con los ECA-SUELO (MINAM 2017)

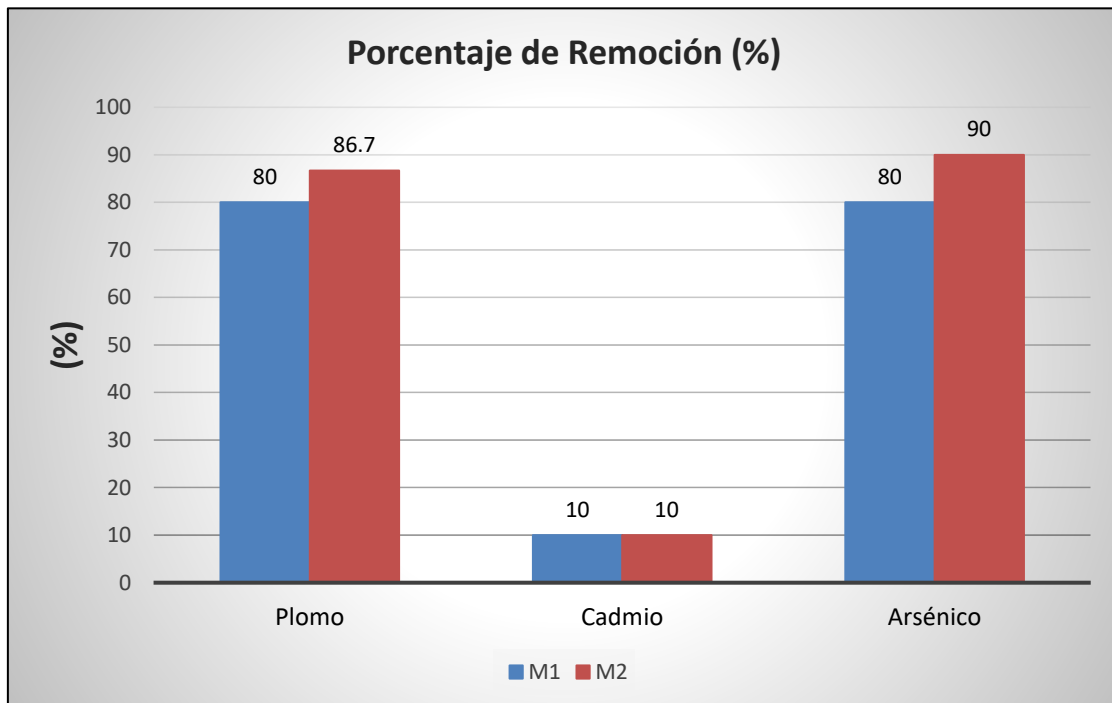


En la figura N°6, se presenta el porcentaje de remoción obtenido para plomo, cadmio y arsénico en las muestras de suelo 1 y 2 finalizado el proceso de vitrificación.

En los resultados, se logra observar que los porcentajes de remoción obtenidos para plomo y arsénico en la muestra 2 fueron mayores a los obtenidos en la muestra 1. Por otro lado, en el caso del porcentaje de remoción para cadmio, se estableció un valor del 10% para ambas muestras, ya que, en ambos casos los resultados arrojaron que la concentración final fue menor a 100 mg/kg.

Figura 6

Porcentaje de remoción para Plomo, Cadmio y Arsénico

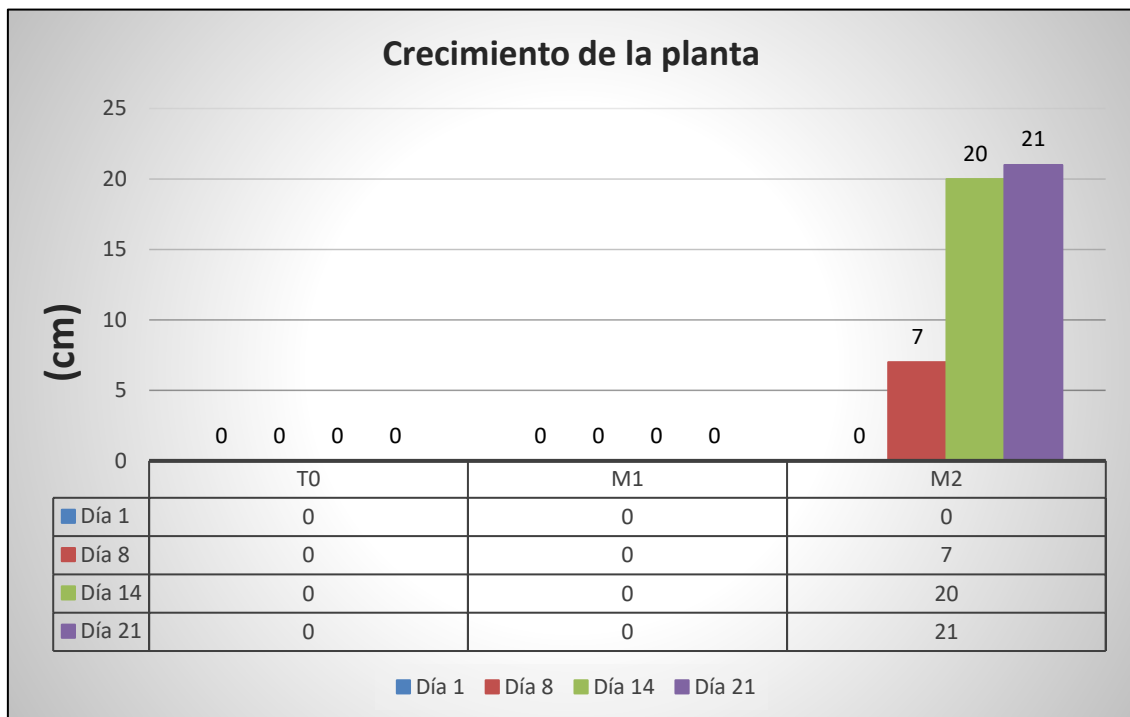


En la figura N°7, se presenta el resumen de crecimiento de la planta de frijol luego de la aplicación de enmienda mediante la utilización de hummus. Se pueden observar los resultados obtenidos en la muestra testigo y en las muestras tratadas hasta el día 21, donde se aprecia la efectividad alcanzada de la siembra solo en la muestra 2 (Ver Anexos 7, 8 y 9).

En el Anexo 6 se indica las concentraciones finales de cadmio, plomo y arsénico en la muestra testigo, muestra 1 y 2, previo a la aplicación de hummus para la siembra de la planta de frijol.

Figura 7

Crecimiento de la planta de Frijol



CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1.8. Discusión

El sector minero, como lo señala Chávez (2014), es una de las industrias que continúa persistiendo con el pasar de los años y debido a ello, la presencia y concentración de metales pesados en el suelo sigue siendo un aspecto alarmante en la contaminación ambiental. De este modo, se ve reflejado en los resultados obtenidos en la figura N°3, la concentración elevada del Pb, Cd y As en la muestra de suelo agrícola, llegando a superar los ECA suelo.

Sin embargo, posterior al tratamiento realizado en la muestra contaminada por metales pesados, el porcentaje de remoción obtenido mediante el proceso de vitrificación, fue altamente satisfactorio para los tres metales pesados en ambas submuestras. Asimismo, se comprobó la eficiencia de la vitrificación ex situ en el trabajo de Arisqueta y Simbaña (2021), logrando la inertización del Cd, Pb y As al 100% en las muestras tratadas. Por otro lado, en la investigación de Corral y Salguero (2017), los resultados de la técnica de vitrificación también presentaron una alta efectividad de inertización, redondeando el 100% para Zn, Pb y Cu, mientras que para el As solo se obtuvo el 6,88%.

Cabe destacar, que de acuerdo a lo indicado por Prieto et al. (2009) en su investigación, el porcentaje de absorción de metales está directamente relacionado o condicionado por el nivel de pH que presenta el suelo. Por lo tanto, en este trabajo de investigación, se determinó el pH inicial de la muestra de suelo, previo a ser tratada, arrojando un valor de 2.61, indicando que es un suelo ácido; es decir, se evidencia que la disponibilidad de los metales en el suelo tiende a ser mucho mayor debido a su pH ácido, tal y como lo señala el autor.

Las condiciones ambientales, tanto como los parámetros y características fisicoquímicas del suelo, son fundamentales para lograr el crecimiento y desarrollo de cualquier tipo de flora. En esta investigación, se detallaron los resultados obtenidos de la siembra de la planta de frijol en tres muestras de suelo diferentes. La muestra testigo no involucró ningún tratamiento ni adición de enmiendas; por lo cual, se trabajó con las concentraciones iniciales de metales pesados encontradas en la misma. Tal y como lo sostiene Prieto et al. (2009) en su artículo, cuando el contenido de metales pesados en el suelo alcanza niveles que superan los límites máximos permitidos, causan efectos inmediatos como inhibición en el crecimiento y el desarrollo normal de las plantas. Por ello, se pudo evidenciar en los resultados de la muestra testigo, la ineffectividad del suelo para generar el desarrollo de la especie, calificándolo como un suelo infértil.

Los análisis del suelo realizados siguieron metodologías descritas en el ECA suelo 2017; sin embargo, se establecen implicancias para tratamientos en blanco que se realizan como referencia en los tratamientos con estímulo.

1.9. Conclusiones

Se consiguió desarrollar la técnica de vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con la posterior aplicación de enmienda en la muestra de suelo recolectada de la cuenca del río Moche, en el distrito de Quiruvilca.

Se logró analizar la muestra de suelo para determinar la presencia de compuestos inorgánicos, dando como resultado la concentración de 1500 mg/kg para plomo, 100 mg/kg para cadmio y 2000 mg/kg para arsénico. Los valores obtenidos para cada compuesto excedieron los estándares de calidad ambiental indicados para el tipo de suelo agrícola, demostrando la alta contaminación presente en la muestra.

Se analizó la muestra de suelo post- tratamiento de vitrificación, la cual se aplicó para dos submuestras, llevando al horno la muestra 1 por 2 horas y la muestra 2 por 5 horas. Se comprobó la reducción en la concentración de metales pesados para ambas muestras.

Se obtuvo el porcentaje de remoción para las muestras 1 y 2, siendo 80% en plomo y 80% en arsénico para la muestra 1; asimismo, se mostró la remoción al 86.7% para plomo y 90% para arsénico en la muestra 2. Sin embargo, los resultados obtenidos siguieron mostrando que superaban los ECA para suelo agrícola.

Se determinó la altura de crecimiento de la planta de frijol, sembrada en la muestra testigo y en las muestras 1 y 2 con la aplicación de humus como enmienda. Los resultados obtenidos después de 21 días de observación, mostraron la efectividad del desarrollo normal de la planta en la muestra 2, llegando a medir 21 cm de altura; mientras que en la muestra testigo y en la muestra 1 no se obtuvo ningún resultado positivo.

Se logró comprobar la hipótesis 1 mediante los resultados obtenidos en el análisis de datos, lo cual ayudó a reafirmar que la vitrificación ex situ sí dejó inactivo a los contaminantes del relave minero y se logró el crecimiento de la planta de frijol con la aplicación de humus.

1.10. Limitaciones y Recomendaciones

En el presente estudio de investigación aparecieron algunas limitaciones como la falta de acceso a información local, antecedentes actuales y el impedimento de realizar viajes o visitas de manera presencial a la zona de estudio. A pesar de las limitaciones presentadas, el estudio cuenta con una búsqueda de información, teorías y fundamentos de nivel nacional e internacional, respaldando la gran mayoría de ellos, los resultados y conclusiones de la investigación. Asimismo, el presente documento podrá ser utilizado como base para futuras

investigaciones y proyectos. Por último, es recomendable seguir evaluando y analizando el proceso de vitrificación con mercurio, cadmio y cromo; así como la aplicación de otro tipo de enmienda y la siembra de diferentes especies para obtener mayor alcance de opciones.

Referencias

- Arisqueta, L. y Simbaña, K. (2021). *Inertización de metales pesados de un lodo de la industria metalmeccánica, utilizando el proceso de vitrificación ex situ* [Tesis de maestría]. Universidad Internacional SEK.
<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/4191/1/Karina%20Jaqueline%20Simba%c3%b1a%20Farinango.pdf>
- Corral, K. y Salguero, K. (2017). *Inertización de relaves mineros utilizando la vitrificación para su aprovechamiento en la construcción* [Tesis de grado]. Universidad Internacional SEK.
<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3086/1/tesis%20kimberly%20salguero.pdf>
- Corredor, C. (2016). *Revisión bibliográfica sobre ensayos de métodos de transferencia de calor al suelo de in situ* [Tesis de Grado]. Universidad de los Andes.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/flexpaper/handle/1992/61835/13219.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=1>
- Domínguez, C. (2015). La contaminación ambiental, un tema con compromiso social. *Producción + Limpia*, 10(1), pp. 9-21.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000100001&lng=en&tlng=es
- European Soil Data Centre. (2014). Contaminación de suelos en Europa.
<https://www.grupoecoindustria.com/contaminacion-de-suelos-en-europa/>
- García, L. (2009). *Capacidad remediadora y bioacumuladora de los órganos de Helianthus Annuus L. "girasol" cuando son sometidas a diferentes concentraciones de*

plomo [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Trujillo.

<https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/4924/TESIS%20MAESTRI>

[A%20-%20Liz%20Garc%c3%ada%20Zare.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/4924/TESIS%20MAESTRI/A%20-%20Liz%20Garc%c3%ada%20Zare.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.).

México: McGrwall Hill Education. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>

Instituto Nacional de Ecología y cambio climático. (2007). Tecnologías de remediación.

México. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html>

International Council on Mining and Metals. (2020). *Acerca de los relaves*.

<https://www.icmm.com/es/gestion-ambiental/gestion-de-desechos/acerca-de-los-relaves>

Londoño Franco, L., Londoño Muñoz, P. y Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales

pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), pp. 145-153.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612016000200017&lng=en&nrm=iso&tlng=es

López, P. (2004). Población, muestra y muestreo. *Punto Cero*, 9(8). 69-74.

http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012

Manrique, H. y Sanborn, C. (2021). La minería en el Perú: Balance y perspectivas de cinco

décadas de investigación. <https://fondoeditorial.up.edu.pe/uncategorized/la-investigacion-sobre-mineria-en-el-peru/>

Ministerio del Ambiente. (2014). *Guía para el muestreo de suelos.*

<https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>

Ministerio del Ambiente. (2017). *Aprueban Estándares De Calidad Ambiental (ECA) para Suelo.* Sistema Nacional de Información Ambiental.

<https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-suelo-0>

Navarro, A., Cañadas, I., Martínez, D. y Rodríguez, J. M. (2009). Vitrificación solar de lodos de flotación de la zona minera de Sierra Almagrera (Almería). *Residuos: revista técnica*, 19(114), 50-57. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/6279>

Organización de las Naciones Unidas. (2016). El daño ambiental aumenta en todo el planeta, pero aún hay tiempo para revertir el peor impacto si los gobiernos actúan ahora: PNUMA. <https://www.unenvironment.org/es/noticias-y-reportajes/noticias/el-dano-ambiental-aumenta-en-todo-el-planeta-pero-aun-hay-tiempo>

Ortega, C. (2022). *¿Qué es la metodología de la investigación?* <https://www.questionpro.com/blog/es/metodologia-de-la-investigacion/>

Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M. y Villar, S. (2007). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados.* VT miod.

<http://www.madrid.org/cs/BlobServer?blobkey=id&blobwhere=1196191019103&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadervalue1=filename%3DCapitulo+8.pdf&blobcol=urldata&blobtable=MungoBlobs>

Prieto, J., González, C., Román, A. y Prieto, F. (2009). *Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua*. Tropical and Subtropical

Agroecosystems.

10(1),29-44.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>

Roqueta, D. (2016). *Estudio Bibliográfico de los Criterios Base para la Selección del*

Método de Recuperación de un Suelo Contaminado [Tesis de grado]. Universidad

Politécnica

de

Valencia.

[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72603/ROQUETA%20-](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72603/ROQUETA%20-%20Estudio%20bibliogr%3a1fico%20de%20los%20criterios%20base%20para%20la%20selecci%3ab3n%20del%20m%3a9todo%20de%20recuperaci%3b3...pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[%20Estudio%20bibliogr%3a1fico%20de%20los%20criterios%20base%20para](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72603/ROQUETA%20-%20Estudio%20bibliogr%3a1fico%20de%20los%20criterios%20base%20para%20la%20selecci%3ab3n%20del%20m%3a9todo%20de%20recuperaci%3b3...pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[%20la%20selecci%3ab3n%20del%20m%3a9todo%20de%20recuperaci%3b3](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72603/ROQUETA%20-%20Estudio%20bibliogr%3a1fico%20de%20los%20criterios%20base%20para%20la%20selecci%3ab3n%20del%20m%3a9todo%20de%20recuperaci%3b3...pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[...pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72603/ROQUETA%20-%20Estudio%20bibliogr%3a1fico%20de%20los%20criterios%20base%20para%20la%20selecci%3ab3n%20del%20m%3a9todo%20de%20recuperaci%3b3...pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2018). *Preguntas frecuentes sobre relaves*.

[https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-](https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf)

[sobre-relaves.pdf](https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf)

United States Environmental Protection Agency. (1991). *Site Characterization for surface*

remediation. Center for Environmental Research Information Office of Research and

Development.

[https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/sitchasu.pdf)

[12/documents/sitchasu.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-12/documents/sitchasu.pdf)

Velásquez, A. (2018). *¿Qué es un diseño experimental en una investigación?*

<https://tesisymasters.com.ar/disenio-experimental-definicion/>

Vidal, F. (2003). *Desarrollo de una metodología de selección eco-eficiente de técnicas para*

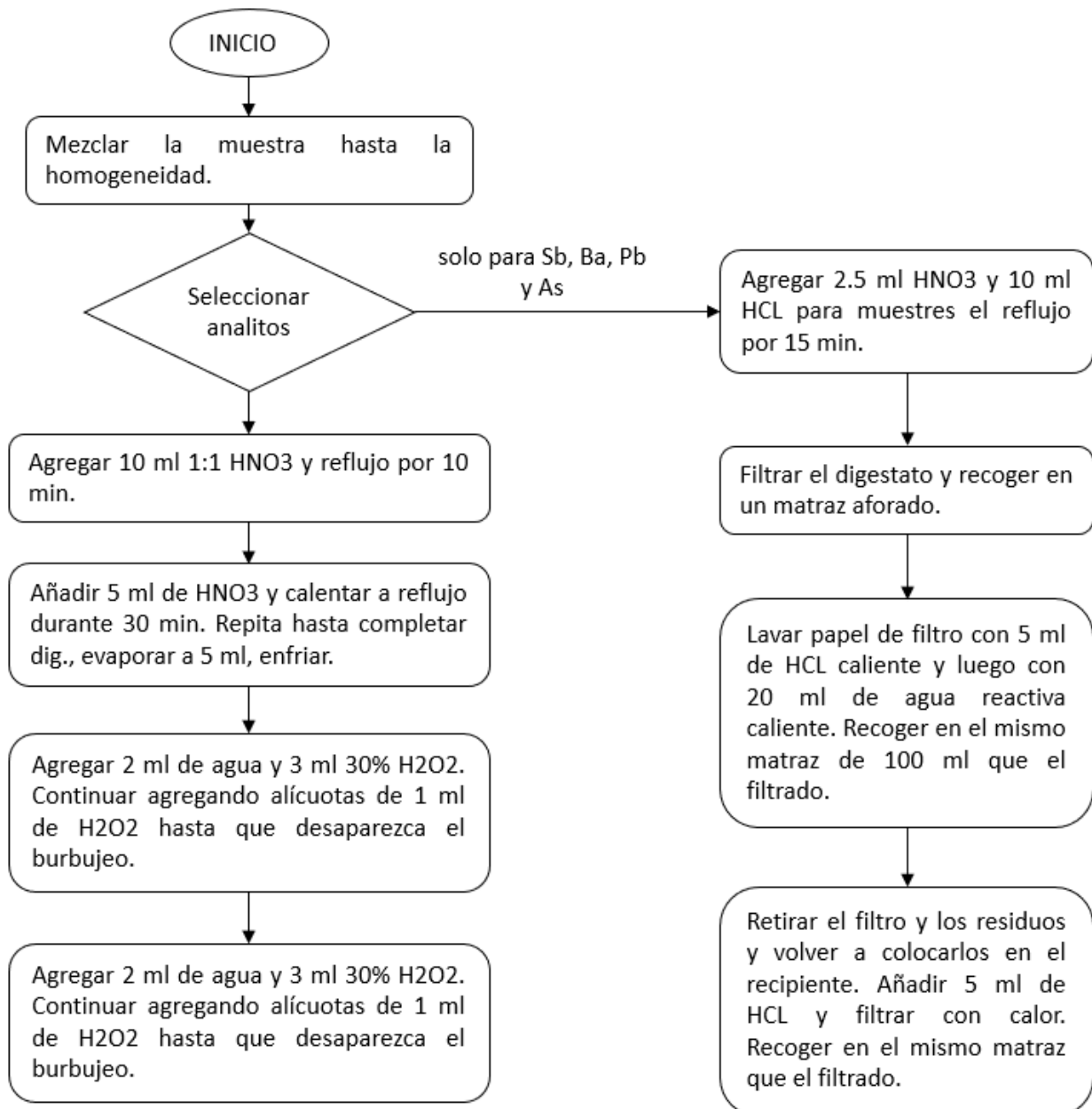
remediar suelos contaminados con metales pesados [Tesis de maestría] Instituto

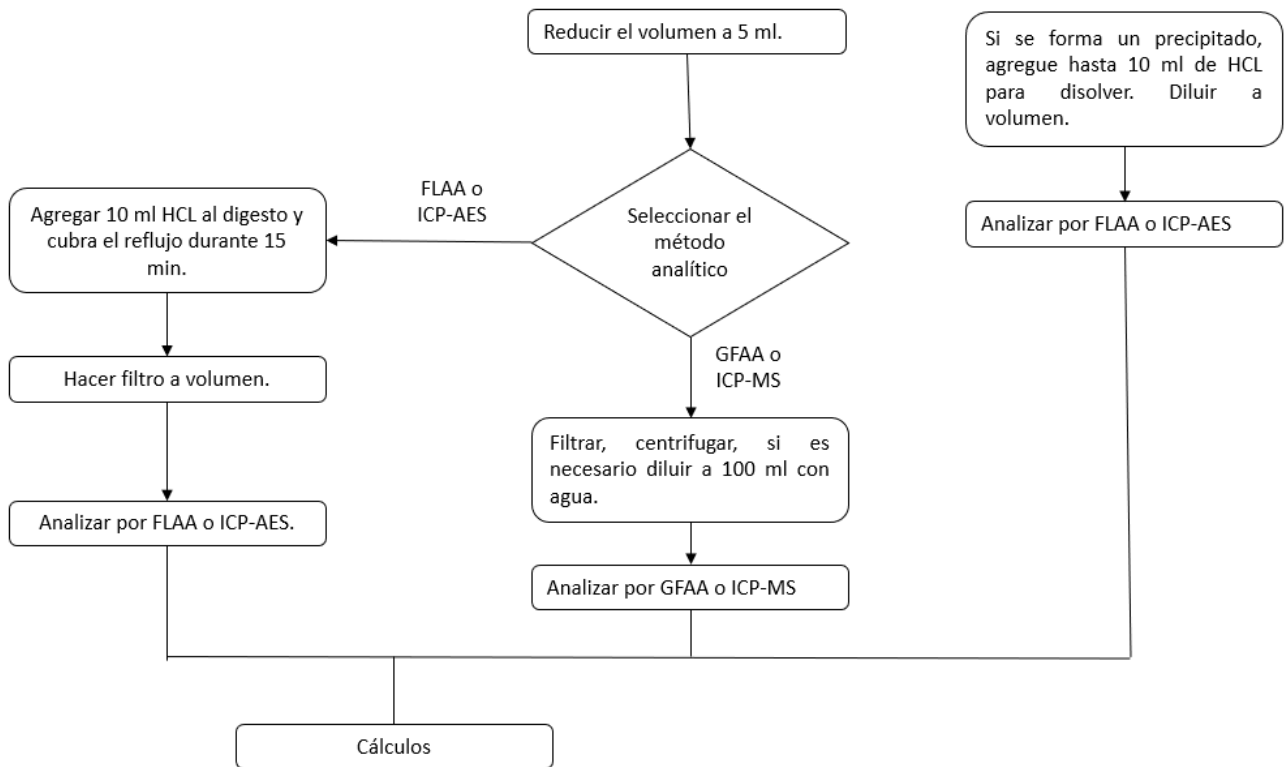
<https://repositorio.tec.mx/handle/11285/569687>

Volke, T., Velasco, J. y De la Rosa, D. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. [ebook].
<https://books.google.es/books?id=A50ITx37ScsC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

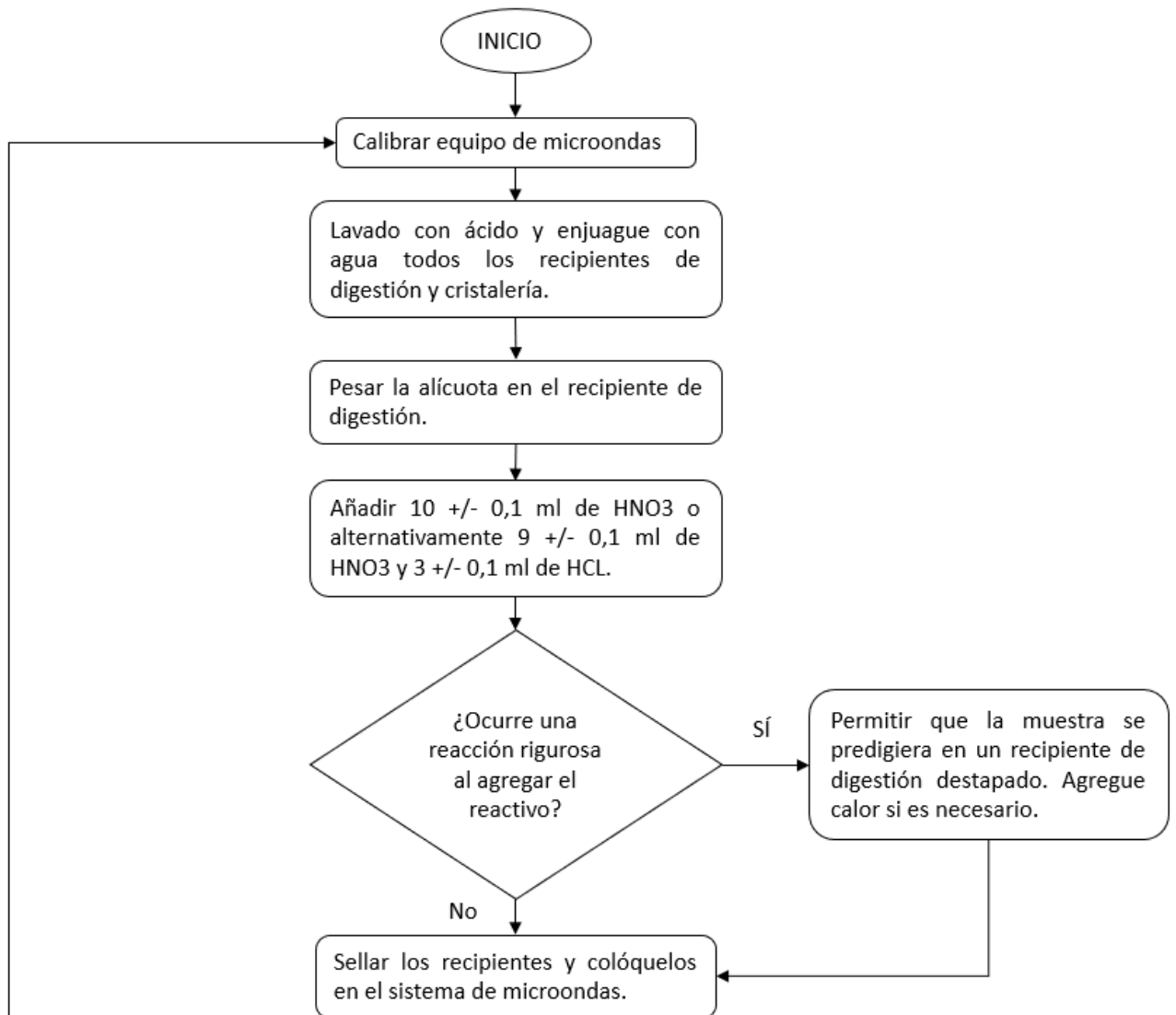
ANEXOS

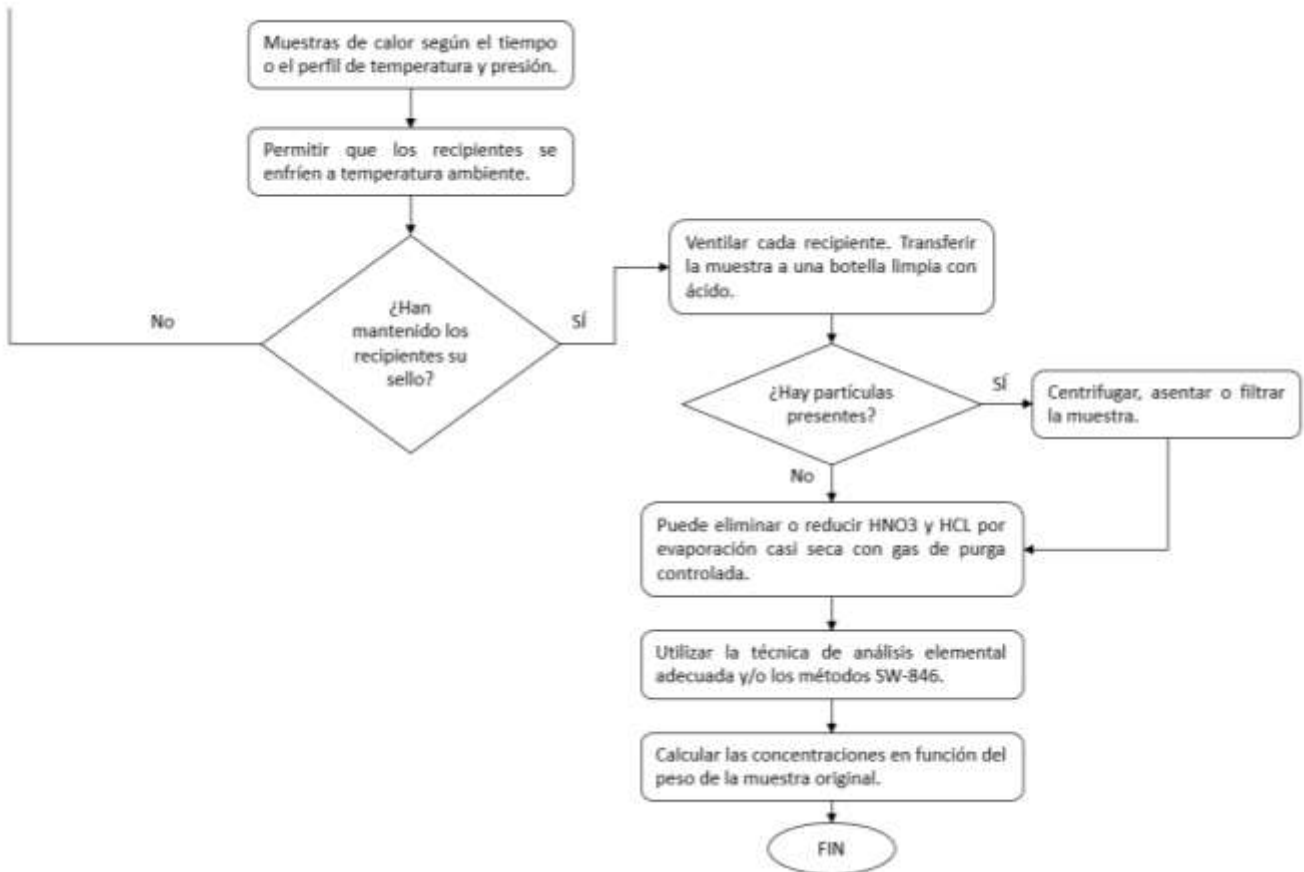
ANEXO N°1. Método EPA 3050



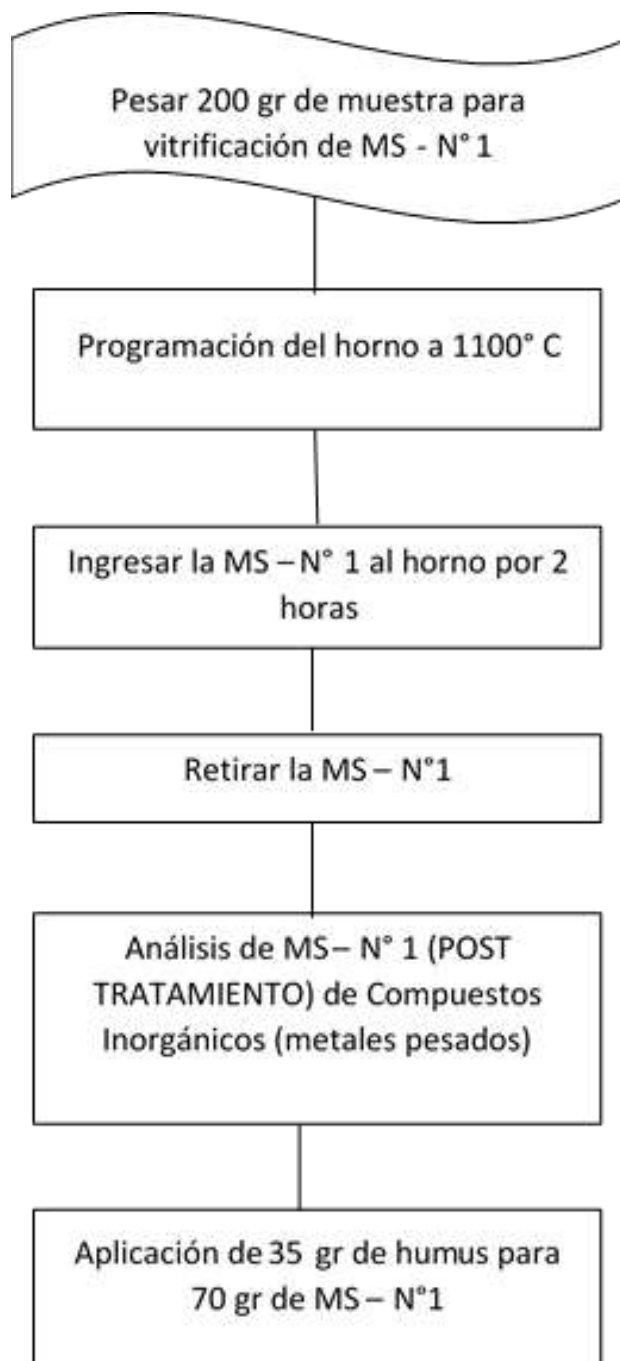


ANEXO N°2. Método EPA 3051

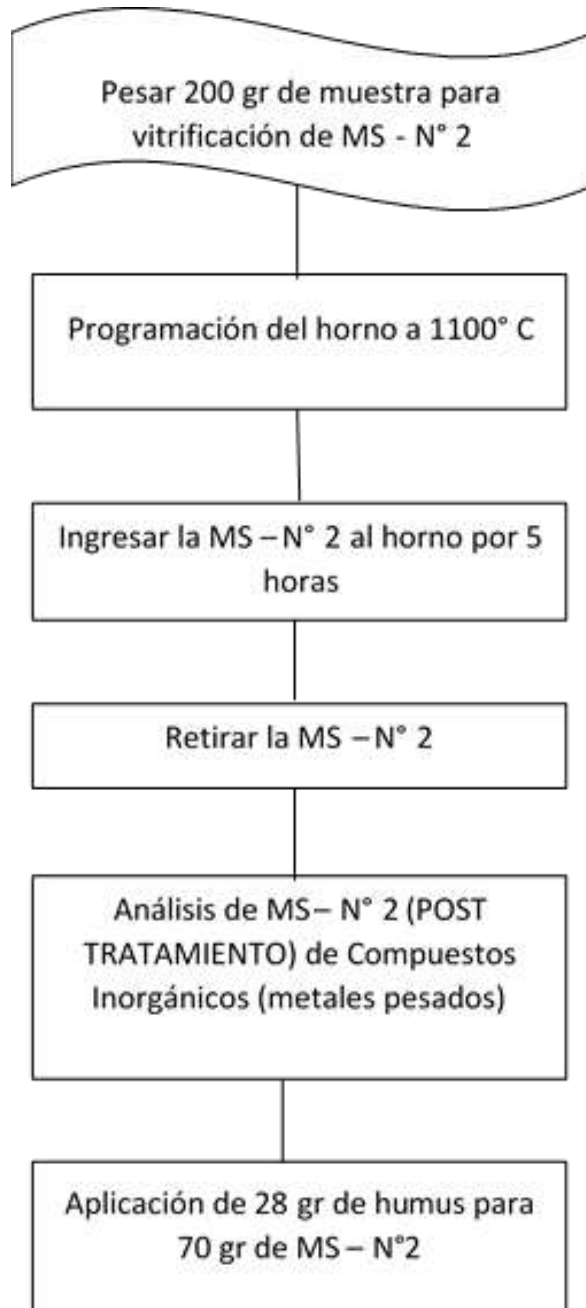




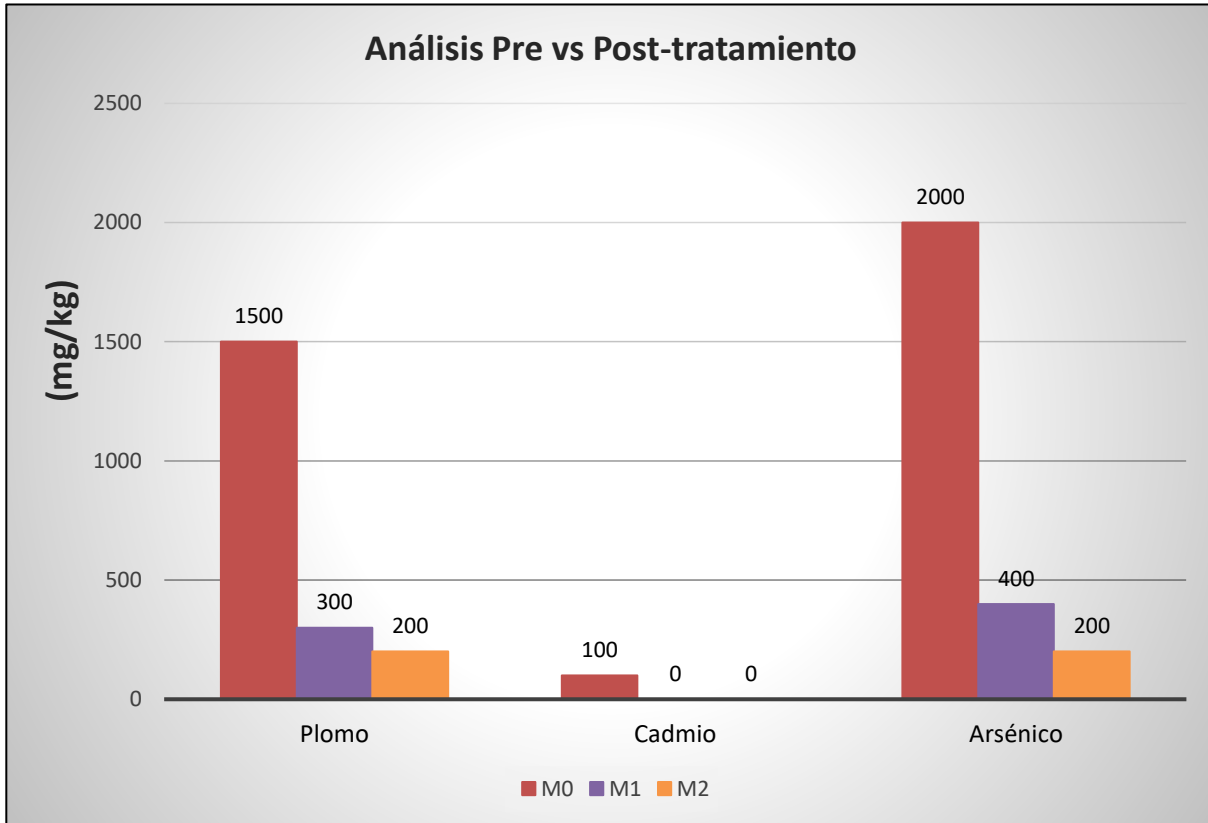
ANEXO N°3. Diagrama de Flujo para la muestra de suelo 1



ANEXO N°4. Diagrama de Flujo para la muestra de suelo 2



ANEXO N°5. Análisis Pre-tratamiento vs Post-tratamiento



ANEXO N°6. Concentración final de Cadmio, Plomo y Arsénico para las muestras de suelo antes de la aplicación de enmienda

Parámetros (mg/kg)	Muestras de suelo		
	T0	M1	M2
Cadmio	100	<100	<100
Plomo	1500	300	200
Arsénico	2000	400	200

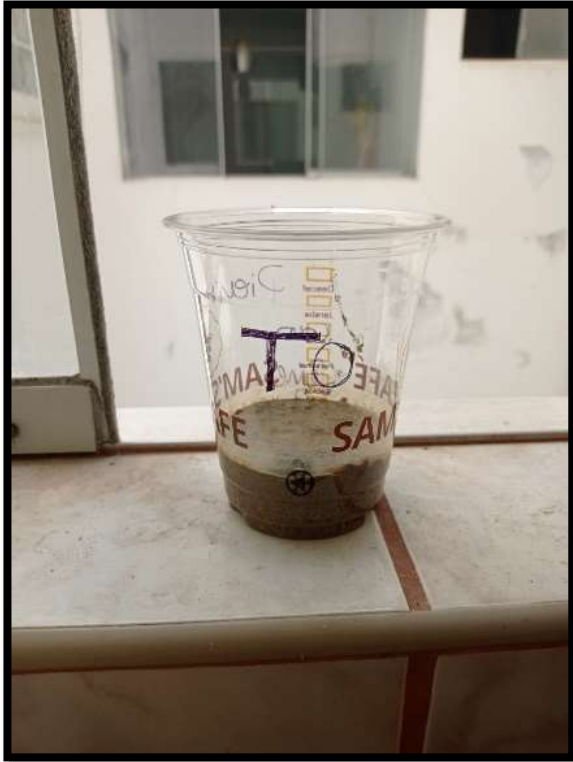
ANEXO N°7. Registro fotográfico del día 1 del crecimiento de la planta de frijol



ANEXO N°8. Registro fotográfico del día 8 del crecimiento de la planta de frijol



ANEXO N°9. Registro fotográfico del día 21 del crecimiento de la planta de frijol



ANEXO N°10: Matriz de Consistencia

TÍTULO: “Vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con aplicación de enmiendas en la cuenca del río Moche, Quiruvilca, 2022”

PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN
¿Cómo actúa la vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con aplicación de enmiendas en la cuenca del río Moche, Quiruvilca, 2022?	<p>H0: La vitrificación ex situ SÍ dejará inactivo a los contaminantes del relave minero con aplicación de enmiendas en la cuenca del río moche, Quiruvilca, 2022.</p> <p>H1: La vitrificación ex situ NO dejará inactivo a los contaminantes del relave minero con aplicación de enmiendas en la cuenca del río moche, Quiruvilca, 2022.</p>	<p>General: Desarrollar la técnica de vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con aplicación de enmiendas en la cuenca del río Moche, Quiruvilca, 2022.</p> <p>Específicos: - Analizar la Muestra de Suelo - MS (pre tratamiento) con el método del ICP para determinar la presencia de compuestos inorgánicos según ECA-SUELOS 2017. - Analizar la Muestra de Suelo - MS (post tratamiento de vitrificación) con el método del ICP para determinar la presencia de</p>	<p>Variable Independiente: Vitrificación ex situ</p> <p>Variable dependiente: Relaves mineros con aplicación de enmiendas</p>	<p>Tipo de investigación: Cuantitativa</p> <p>Diseño: Experimental</p> <p>Técnica: Medición y observación</p> <p>Instrumento: Método ICP y absorción atómica</p>	<p>Población: Los suelos agrícolas contaminados del distrito de Quiruvilca, provincia de Santiago de Chuco, departamento de La Libertad.</p> <p>Muestra: Porción de suelo agrícola ubicado a 3937 msnm: Zona: 17 L Longitud: 795868.53 este Latitud: 9°114, 400.18 sur</p>

compuestos inorgánicos según ECA-SUELOS 2017.

- Comparar los resultados post tratamiento con el ECA SUELOS 2017 para determinar los compuestos inorgánicos presentes en la muestra de suelo.
- Determinar la altura de la planta tanto en el tratamiento como en el testigo a través de la aplicación de abono orgánico como enmienda.

ANEXO N°11: Matriz de operacionalización de variables

TÍTULO: Vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con aplicación de enmiendas en la cuenca del río Moche, Quiruvilca, 2022

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
<p>Variable dependiente:</p> <p>Relaves mineros con aplicación de enmiendas.</p>	<p>Los relaves son un subproducto común del proceso de recuperación de los metales y los minerales. Este relave consiste en un lodo semilíquido compuesto de agua y partículas finas de metales y minerales, el cual se crea cuando el mineral extraído se tritura y se muele finamente en el proceso de molienda (ICMM, 2020).</p>	<p>Se registraron las concentraciones de plomo, cadmio y arsénico, obtenidas mediante el método ICP y absorción atómica, en los gráficos y tablas de resultados.</p>	<p>ECA SUELO 2017 MINAM.</p> <p>Valores máximos de contaminación del suelo.</p>	<p>Concentración de plomo (mg/kg suelo seco) en relaves mineros de la cuenca del río Moche, Quiruvilca.</p> <p>Concentración de cadmio (mg/kg suelo seco) en relaves mineros de la cuenca del río Moche, Quiruvilca.</p> <p>Concentración de arsénico (mg/kg suelo seco) en relaves mineros de la cuenca del río Moche, Quiruvilca.</p>

<p>Variable independiente: Vitrificación ex situ</p>	<p>Es la aplicación de corriente eléctrica para fundir el suelo junto con los contaminantes, originando luego su vitrificación. El proceso es efectivo contra compuestos orgánicos semivolátiles, compuestos inorgánicos, PCBs, pesticidas y dioxinas (Roqueta, 2016, p.8).</p>	<p>Se realizó la vitrificación ex situ de dos submuestras (M1 y M2) en el horno-mufla. Ambas muestras fueron sometidas a 1100°C pero a diferentes tiempos, llevándolas a 2 horas y 5 horas respectivamente. Con la técnica de vitrificación se consigue una eliminación casi al 99.9% de los contaminantes orgánicos y una inmovilización de los contaminantes inorgánicos (Ortiz et.al, 2007).</p>	<p>Tiempo de la vitrificación (horas).</p>	<p>Muestra 1: Horno-mufla a 1100°C por 2 horas Muestra 2: Horno-mufla a 110°C por 5 horas</p>
---	---	---	--	---