

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas



**Aplicación de la técnica de electroremediación para el tratamiento de plomo
y arsénico en relaves provenientes del pasivo ambiental minero Kiowa, distrito
de Quequeña - Arequipa, 2024**

Tesis presentada por el Bachiller:

Farfán Espinoza, Rodrigo Joel

ORCID: 0009-0000-6750-9838

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Ortiz Romero, Derly David

ORCID: 0000-0003-1886-8206

Arequipa - Perú

2024

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 15 de Septiembre del 2024

Dictamen: 010644-C-EPIM-2024

Visto el borrador del expediente 010644, presentado por:

2013221821 - FARFAN ESPINOZA RODRIGO JOEL

Titulado:

**APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ELECTORREMEDIACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE
PLOMO Y ARSÉNICO EN RELAVES PROVENIENTES DEL PASIVO AMBIENTAL MINERO KIOWA,
DISTRITO DE QUEQUEÑA - AREQUIPA, 2024**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**29440909 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS
DICTAMINADOR**



**40656104 - LOPEZ CASAPERALTA DE DIAZ PATRICIA YANETH
DICTAMINADOR**



**40885101 - ARIAS QUISPE CESAR FABIAN
DICTAMINADOR**



Aplicación de la técnica de electrorremediación para el tratamiento de plomo y arsénico en relaves provenientes del pasivo ambiental minero Kiowa, distrito de Quequeña - Arequipa, 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

25%

INDICE DE SIMILITUD

24%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	5%
2	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	2%
4	repositorio.untels.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, Nicolas y Maritza por su amor y apoyo constante, por ser el pilar de mi vida y la mayor fuente de inspiración, cada consejo compartido y sacrificio realizado han sido mi guía en cada etapa de este largo camino, su dedicación y ejemplo moldearon mi carácter y han dado forma a mis sueños.

A mi hermano Héctor, por su compañerismo y por ser siempre un ejemplo a seguir, su apoyo ha sido fundamental en mi vida.

A mis sobrinos Valentino, Mateo y Emiliano, por traer alegría y luz a mi mundo. Gracias por llenar mi vida de risas y amor incondicional.

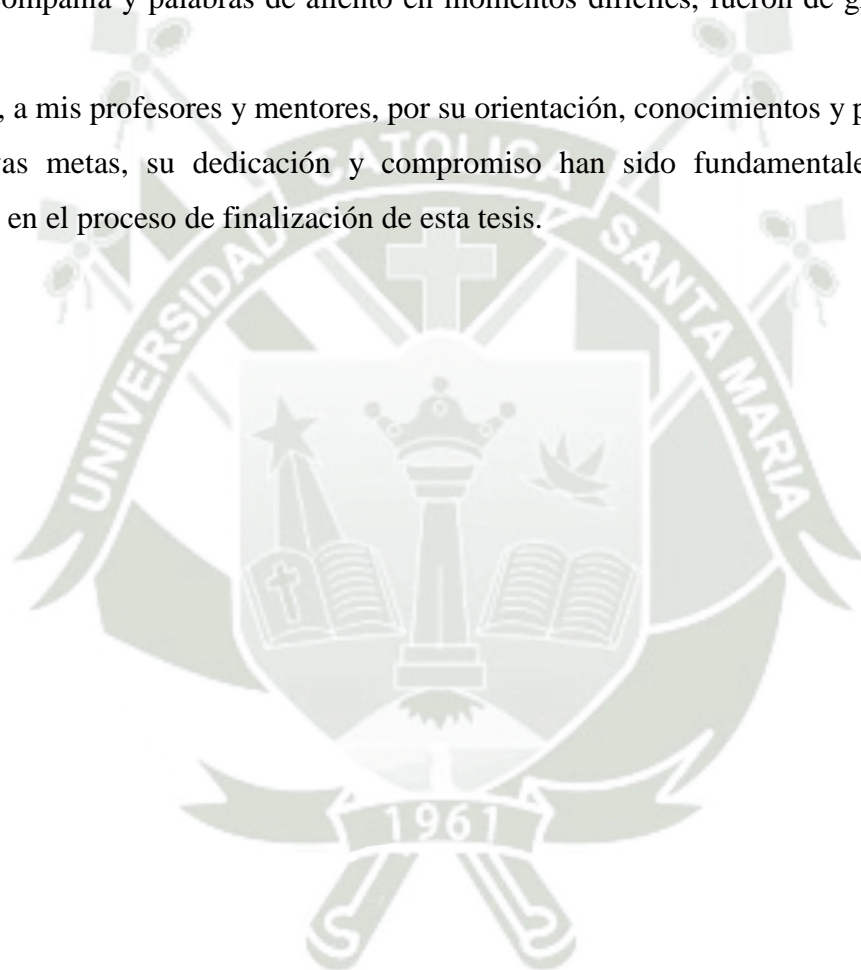


AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mis padres y hermano por estar siempre a mi lado, por creer en mí y ser mi constante fuente de inspiración y apoyo a lo largo de mi formación profesional, sus palabras de ánimo y sus sacrificios han sido fundamentales en mi camino hacia la culminación de la carrera.

A mis amigos, por su comprensión y paciencia, y por los momentos de alegría que me han brindado, su compañía y palabras de aliento en momentos difíciles, fueron de gran importancia para mí.

Finalmente, a mis profesores y mentores, por su orientación, conocimientos y por motivarme a alcanzar nuevas metas, su dedicación y compromiso han sido fundamentales en mi etapa universitaria y en el proceso de finalización de esta tesis.



RESUMEN

El pueblo tradicional Fernando Belaunde, ubicado en el distrito de Quequeña, provincia y región de Arequipa, enfrenta una elevada contaminación por metales pesados y sustancias tóxicas debido a los relaves del pasivo ambiental minero Kiowa. Estos relaves provienen de la planta de beneficio “Santa Rosa” de la Mina Yarabamba S.A., actualmente inoperativa y sin tratamiento para su mitigación. El objetivo de esta investigación fue evaluar la eficiencia de un sistema de electroremediación en el tratamiento de los relaves mineros que contienen metales pesados como plomo (Pb) y arsénico (As).

Para ello, se extrajeron muestras del relave y se caracterizaron sus propiedades fisicoquímicas, tales como humedad, pH, conductividad eléctrica, textura, granulometría y concentración de metales. El proceso de electroremediación se realizó en condiciones controladas, utilizando una celda de vidrio, placas de grafito como electrodos, agua destilada como electrolito del ánodo y ácido acético glacial a una concentración de 0.1M como electrolito del cátodo y agente humectante del relave. Esta tecnología aplica corriente eléctrica directa de baja intensidad para movilizar los contaminantes mediante fenómenos electroquímicos, como la oxidación-reducción y el transporte de agua.

Se aplicaron densidades de corriente específicas de 27.76 y 16.67 mA/cm², y tiempos de tratamiento de 2 y 5 días, realizando los experimentos por triplicado con un diseño factorial, sumando un total de 12 corridas. Los ensayos permitieron una disminución en la concentración de plomo (Pb) y arsénico (As) de hasta un 63.89 % y 22.72 %, respectivamente. Se determinó que mayores densidades de corriente y tiempos de proceso prolongados aumentan significativamente el porcentaje de remoción de estos metales. En particular, el tratamiento más óptimo se alcanzó con una densidad de corriente de 27.78 mA/cm² y un tiempo de tratamiento de 5 días. Estos parámetros maximizaron la eficiencia del proceso de electroremediación, destacando la importancia de aumentar tanto la densidad de corriente como la duración del tratamiento para mejorar la remoción de Pb y As en los relaves del PAM Kiowa.

Palabras clave: relave minero; plomo; arsénico; electroremediación; remediación; densidad de corriente

ABSTRACT

The traditional town of Fernando Belaunde, located in the district of Quequeña, province and region of Arequipa, faces high contamination from heavy metals and toxic substances due to the tailings from the Kiowa environmental mining liability. These tailings originate from the “Santa Rosa” beneficiation plant of Mina Yarabamba S.A., which is currently inactive and lacks treatment for its mitigation. The aim of this research was to evaluate the efficiency of an electrore-mediation system in treating the mining tailings containing heavy metals such as lead (Pb) and arsenic (As).

To this end, samples of the tailings were extracted and characterized for their physicochemical properties, such as moisture, pH, electrical conductivity, texture, granulometry, and metal concentration. The electroremediation process was carried out under controlled conditions, using a glass cell, graphite plates as electrodes, distilled water as the anode electrolyte, and glacial acetic acid at a concentration of 0.1M as the cathode electrolyte and wetting agent for the tailings. This technology uses low-intensity direct current to mobilize contaminants through electrochemical phenomena, such as oxidation-reduction and water transport.

Current densities of 27.76 and 16.67 mA/cm² were applied, and treatment times of 2 and 5 days were used, with the experiments conducted in triplicate using a factorial design, totaling 12 runs. The tests resulted in a reduction in lead (Pb) and arsenic (As) concentrations of up to 63.89% and 22.72%, respectively. It was determined that higher current densities and extended processing times significantly increase the removal percentage of these metals. Specifically, the optimal treatment was achieved with a current density of 27.78 mA/cm² and a treatment time of 5 days. These parameters maximized the efficiency of the electroremediation process, highlighting the importance of increasing both the current density and the duration of the treatment to improve the removal of Pb and As in the Kiowa PAM tailings.

Keywords: mining tailings; lead; arsenic; electroremediation; remediation; current density

INDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	2
1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION.....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Objetivos de la investigación	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Formulación del problema -Preguntas de investigación	5
1.3.1. Problema general	5
1.3.2. Problemas específicos.....	5
1.4. Justificación.....	5
1.5. Aporte.....	6
1.5.1. Aporte académico	6
1.5.2. Aporte a la restauración de ecosistemas	6
1.5.3. Aporte a la protección de la salud humana.....	6
1.6. Línea de investigación.....	6
1.7. Hipotesis.....	7
1.8. Variables.....	7
1.8.1. Variable independiente	7
1.8.2. Variable dependiente	7
1.8.3. Operacionalización de variables	8
CAPITULO II	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICO	11
2.1. Antecedentes de la investigación	11
2.2. Estado del arte	13
2.3. Bases teóricas	15

2.3.1. La industria minera en el Perú	15
2.3.1.1. Minera en Arequipa	15
2.3.2. Pasivos ambientales mineros	15
2.3.2.1. Pasivos Ambientales Mineros en Arequipa.....	16
2.3.3. Relaves.....	17
2.3.4. El Suelo.....	18
2.3.5. Características físicas del suelo	19
2.3.5.1. Textura.....	19
2.3.5.2. Granulometría.....	19
2.3.6. Contaminación por actividades mineras.....	21
2.3.6.1. Extracción de minerales.....	21
2.3.6.2. Residuos mineros.....	21
2.3.6.3. Derrames de productos químicos	22
2.3.6.4. Drenaje ácido de mina	22
2.3.7. Metales pesados	22
2.3.7.1. Plomo.....	23
2.3.7.2. Efectos del plomo en la salud	23
2.3.7.3. Arsénico.....	23
2.3.7.4. Efectos del arsénico en la salud	24
2.3.7.5 Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos	24
2.3.8. Tecnologías utilizadas para la remediación.....	25
2.3.8.1. Biorremediación	25
2.3.8.2. Fitorremediación.....	25
2.3.9. Electrorremediación o remediación electrocinética	26
2.3.9.1. Principio básico de la electrorremediación.....	27
2.3.9.2. Mecanismo de remoción.....	28
2.3.10. Factores que influyen en el proceso de electrorremediación.....	30
2.3.10.1. El potencial de hidrógeno (pH)	30
2.3.10.2. Contenido de agua	31
2.3.10.3. Conductividad eléctrica (CE)	31
2.3.10.4. Naturaleza y química del suelo.....	31
2.3.10.5. Permeabilidad	31

2.3.10.6. Naturaleza y arreglo de los electrodos.....	32
2.3.10.7. Densidad de corriente	32
2.3.10.8. Solución humectante.....	33
2.3.11. Tiempo y costos en el tratamiento.	33
2.3.12. Usos del relave post tratamiento.....	34
2.3.12.1. Reutilización en la minería	34
2.3.12.2. Construcción de infraestructura.....	34
2.3.12.3. Inactivación y disposición segura.....	34
CAPITULO III.....	35
3. MARCO METODOLÓGICO.....	36
3.1. Lugar donde se lleva a cabo la investigación	36
3.1.1. Vías de acceso	37
3.2. Características de la zona de estudio.....	37
3.2.1. Geología local.....	37
3.2.2. Clima	38
3.2.2. Historia	38
3.3. Alcances y Limitaciones	38
3.3.1. Alcances.....	38
3.3.2. Limitaciones	39
3.4.1. Tipo de investigación.....	39
3.4.2. Diseño de investigación.....	39
3.5. Porcentaje de disminución de plomo y arsénico	41
3.6. Tratamiento de datos	41
3.6.1. Análisis de varianza (ANOVA).....	41
3.7. Población y Muestra.....	41
3.7.1. Población	41
3.7.2. Muestra	42
3.8. Métodos ,instrumentos de recolección de datos y materiales	42
3.8.1. Métodos de recolección y análisis de datos experimentales.....	42
3.8.2. Instrumentos utilizados en la recolección de información	42
3.8.3. Materiales y equipos	42
3.8.4. Toma de muestras	43

3.8.4.1. Número de puntos de monitoreo	43
3.8.4.2. Método de cuarteo	44
3.8.4.3. Análisis de la muestra.....	45
3.9. Metodología usada en la investigación	46
3.9.1 Método científico.....	46
3.9.2. Diseño de la celda de electroremediación	46
3.9.3. Tratamiento de la muestra a remediar	47
3.9.3.1. Preparación de la solución humectantes.....	47
3.9.3.2. Pretratamiento de las muestras de relave.....	47
3.9.4. Determinación del área de los electrodos	47
3.9.5. Cálculos de la densidad de corriente durante el método de electroremediación.....	48
3.9.6. Instalación de la celda de electroremediación.....	48
3.9.7. Tiempo de tratamiento.....	49
3.9.8. Finalización de proceso y traslado de muestras.....	49
CAPITULO IV.....	51
4. RESULTADOS Y DISCUSION	52
4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información	52
4.2. Tipo de materiales en la ejecución de los ensayos de electroremediación.	52
4.3. Características de los relaves pertenecientes al PAM Kiowa	53
4.4. Resultado del análisis granulométrico de la muestra- relave Kiowa	54
4.6. Resultado del análisis de metales pesados de la muestra - relave Kiowa	57
4.7. Remoción de Pb y As en relaves del pasivo ambiental minero Kiowa.....	59
4.8. Resultados del plomo obtenidos después de la electroremediación	59
4.9. Resultados del arsénico obtenidos después de la electroremediación	68
4.10. Variación de pH y conductividad eléctrica	76
CONCLUSIONES	78
RECOMENDACIONES.....	79
REFERENCIAS.....	80
ANEXO.....	84

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables dependiente e independiente.....	8
Tabla 2. Inventario de pasivos ambientales mineros 2016	16
Tabla 3. Pasivos ambientales mineros en Yarabamba y Quequeña.....	17
Tabla 4. Clasificación de suelos según tamaños de sus partículas (medidas en mm).....	21
Tabla 5. Estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos.....	24
Tabla 6. Factores y niveles relacionados al diseño factorial.....	40
Tabla 7. Diseño factorial simple	40
Tabla 8. Coordenadas de los puntos de muestreo de identificación	43
Tabla 9. Número mínimo de puntos de muestreo de identificación	44
Tabla 10. Profundidad de muestreo	44
Tabla 11. Densidad de corriente usadas durante el proceso de electroremediación.....	48
Tabla 12. Parámetros iniciales del proceso de electroremediación de relaves	52
Tabla 13. Parámetros de análisis del suelo	53
Tabla 14. Análisis granulométrico por tamizado.....	54
Tabla 15. Peso fraccionado y porcentaje de tipo de suelos.....	56
Tabla 16. Parámetros de análisis de textura.....	57
Tabla 17. Metales pesados de la muestra de relave Kiowa.....	58
Tabla 18. Concentración inicial de Pb y As y estándares de calidad ambiental en suelos	59
Tabla 19. Resultados del plomo obtenidos después de la electroremediación	60
Tabla 20. Porcentaje de remoción de Pb.....	60
Tabla 21. Análisis de varianza para % remoción del plomo.....	62
Tabla 22. Coeficiente de regresión para % remoción del plomo	62
Tabla 23. Valor óptimo	67
Tabla 24. Factores.....	67
Tabla 25. Resultados del arsénico obtenidos después de la electroremediación.....	68
Tabla 26. Porcentaje de remoción de As.....	68
Tabla 27. Análisis de varianza para % remoción de arsénico.....	70
Tabla 28. Coeficiente de regresión para % remoción de arsénico	70
Tabla 29. Valor óptimo	75
Tabla 30. Factores.....	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un perfil típico de suelo.....	18
Figura 2. Triangulo textural	19
Figura 3. Pasivo ambiental minero Kiowa.....	22
Figura 4. Representación del proceso de electroremediación in situ	26
Figura 5. Electrolisis del agua en el tratamiento de electroremediación	28
Figura 6. Proceso de electromigración	29
Figura 7. Representación del proceso de electroósmosis en el suelo	29
Figura 8. Mecanismo de transporte en el proceso de electroremediación.....	30
Figura 9. Pasivo ambiental minero Kiowa y punto de muestreo	36
Figura 10. Método del cuarteo.....	44
Figura 11. Toma de muestras en el PAM Kiowa y cuarteo del relave	45
Figura 12. Diseño de celda de electroremediación.....	46
Figura 13. Dimensiones de electrodos utilizados	47
Figura 14. Proceso de experimentación del sistema de electroremediación	49
Figura 15. Finalización del proceso.....	49
Figura 16. Proceso experimental detallado.....	50
Figura 17. Análisis granulométrico por tamizado	55
Figura 18. Curva granulométrica.....	55
Figura 19. Promedio de remoción de Pb.....	61
Figura 20. Diagrama de Pareto estandarizado para % remoción de plomo.....	63
Figura 21. Gráfica de la superficie de respuesta estimada.....	64
Figura 22. Gráfica de efectos principales para % remoción de plomo	65
Figura 23. Gráfica de interacción para % remoción de plomo	66
Figura 24. Porcentaje de remoción de arsénico	69
Figura 25. Diagrama de Pareto estandarizado para % remoción de arsénico.....	71
Figura 26. Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada	72
Figura 27. Gráfica de efectos principales para % remoción de arsénico.....	73
Figura 28. Gráfica de interacción para % remoción de arsénico	74
Figura 29. Valores de pH.....	76
Figura 30. Valores de conductividad eléctrica.....	77

INTRODUCCION

La actividad minera es una de las principales fuentes de contaminación por metales pesados, causando graves efectos ambientales. La minería produce grandes cantidades de desechos, como los relaves, que afectan significativamente el entorno. La lixiviación natural de estos desechos contamina aguas subterráneas, superficiales, ríos y suelos cercanos mediante la liberación continua de ácidos y elementos tóxicos, representando una amenaza para los seres vivos.

Para enfrentar este desafío, se han desarrollado nuevas tecnologías destinadas al tratamiento de zonas contaminadas por residuos mineros, destacándose la electrorremediación como un proceso de remediación in situ. Esta técnica ha mostrado resultados positivos especialmente en relaves de baja permeabilidad y grano fino, y se considera prometedora, rentable y eficaz en la rehabilitación de sitios mineros afectados por metales pesados.

Esta técnica utiliza corriente eléctrica directa de baja intensidad para movilizar los contaminantes mediante fenómenos electroquímicos, como la oxidación-reducción y el transporte de agua.

El objetivo de esta investigación es evaluar la viabilidad de la electrorremediación para eliminar plomo y arsénico en los relaves del PAM Kiowa, ubicado en el distrito de Quequeña, provincia de Arequipa, Región Arequipa. Estos residuos contienen altas concentraciones de metales pesados y otras sustancias tóxicas, representando un riesgo significativo para el medio ambiente y los pobladores cercanos.

Para llevar a cabo el estudio, se realizó un análisis exhaustivo de la composición de los desechos del PAM Kiowa. Luego, se experimentó utilizando como variables la densidad de corriente y el tiempo de tratamiento, evaluando su influencia en la eficiencia de la remoción de Pb y As mediante electrorremediación.

Los experimentos se realizaron en condiciones controladas, en una celda de vidrio, utilizando placas de grafito como electrodos y ácido acético glacial como electrolito y agente humectante. Finalmente, las muestras tratadas fueron analizadas en el laboratorio para medir el nivel de remoción. Los resultados se procesaron con el software STATGRAPHICS para analizar la interacción de las variables y su influencia en el proceso.



CAPITULO I

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

1.1 Planteamiento del problema

Varias actividades económicas han afectado significativamente la calidad ambiental, incluyendo la agricultura intensiva y las actividades extractivas como la explotación petrolera, gasífera, tala y minería metálica y no metálica, siendo estas últimas especialmente perjudiciales para el medio ambiente (Pérez, 2014).

La minería es un pilar fundamental de la economía nacional. En 2022, el sector minero e hidrocarburos contribuyó con un 11% al Producto Bruto Interno (PBI), y las inversiones mineras alcanzaron los 62,441 millones de soles (Revista Estadística En Cifras, 2022). Sin embargo, esta actividad es también una de las principales fuentes de contaminación, lo que ha generado conflictos entre las empresas mineras y las comunidades cercanas. Hasta marzo de 2023, se han registrado 221 casos de conflictos sociales, de los cuales 90 son conflictos socioambientales (Plataforma del Estado Peruano, 2023).

Al finalizar sus operaciones, las minas dejan una serie de residuos, incluidos bocaminas, chimeneas, depósitos de desmonte, piques, desechos químicos, relaves, campamentos, y plantas de procesamiento, conocidos como pasivos ambientales mineros (PAM) (MEM, 2022). Los relaves mineros, en particular, son altamente nocivos debido a su alta concentración de metales y sulfatos. La lluvia provoca lixiviación y genera drenaje ácido que se dispersa en el talud, afectando suelos y cuerpos de agua cercanos (Coila, 2022).

Un ejemplo notable de contaminación por pasivos ambientales es la relavera Kiowa, ubicada en el distrito de Quequeña, a una hora de la ciudad de Arequipa. Estos relaves provienen de la planta de beneficio Santa Rosa, que perteneció a Minera Yarabamba S.A., actualmente inactiva. Tras el cierre de la empresa, quedaron grandes cantidades de relaves acumulados. Con el tiempo, los alrededores del PAM Kiowa se urbanizaron, situándolo en medio del pueblo tradicional Fernando Belaúnde.

Debido a las altas concentraciones de metales pesados y a la falta de cuidados en el manejo de estos desechos, el PAM Kiowa representa un grave problema ambiental. Por ello, es crucial aplicar nuevas técnicas para reducir los niveles de contaminación en estos relaves mineros.

Una de las técnicas prometedoras es la electrorremediación, también conocida como remediación electrocinética. Esta tecnología, ideal para suelos finos, utiliza campos eléctricos para aprovechar las propiedades conductivas del suelo y separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (Ortiz,2023)

Aunque se han realizado numerosos estudios sobre su aplicación en suelos contaminados, la investigación sobre su uso en relaves mineros es aún limitada. Esta brecha en la información nos motiva a explorar el potencial de la electrorremediación para tratar relaves mineros contaminados con metales pesados como plomo y arsénico.

El proyecto busca reducir los niveles de plomo y arsénico en los relaves del PAM Kiowa, que son los metales con mayor concentración en estos residuos. Para ello, se evaluarán muestras de campo para determinar sus parámetros físicos y químicos, y se realizará una experimentación a nivel de laboratorio.

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Aplicar la técnica de electrorremediación para reducir los niveles de contaminación por plomo (Pb) y arsénico (As) en los relaves mineros provenientes del pasivo ambiental Kiowa, ubicado en el distrito de Quequeña, Arequipa, evaluando su eficacia como método de tratamiento ambiental.

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar los parámetros físicos y químicos del relave, así como el porcentaje de concentración final de plomo y del arsénico.
- Determinar la influencia de la densidad de corriente en la electrorremediación del plomo y arsénico.
- Determinar la influencia del tiempo de tratamiento en la electrorremediación del plomo y arsénico.

1.3. Formulación del problema -Preguntas de investigación

1.3.1. Problema general

¿Cuál es la eficacia técnica de la electroremediación para la reducción de los niveles de plomo (Pb) y arsénico (As) en los relaves mineros del pasivo ambiental Kiowa, ubicado en el distrito de Quequeña, Arequipa?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cómo afectan los parámetros físicos y químicos del relave en la electroremediación y cuál es el porcentaje de concentración final de plomo y arsénico en el pasivo ambiental minero Kiowa?
- ¿Cómo influye la densidad de corriente en la reducción del plomo y arsénico?
- ¿Cómo influye el tiempo de tratamiento del relave en la reducción de plomo y arsénico?

1.4. Justificación

En el pasivo ambiental minero Kiowa, se encuentra una gran cantidad de relave superpuesto proveniente de las operaciones mineras realizadas anteriormente por Minera Yarabamba S.A. Este relave es altamente tóxico debido al tiempo que ha permanecido en la zona, afectando a la comunidad de Fernando Belaúnde.

El proyecto de investigación busca reducir los niveles de plomo y arsénico en estos relaves, ya que estos metales exceden los estándares de calidad ambiental establecidos por la normativa nacional (D.S. N° 011-2017-MINAM).

Para abordar este problema, es necesario utilizar tecnologías limpias, modernas, eficaces y de bajo costo que contribuyan al desarrollo sustentable. El proyecto, que se llevará a cabo a escala de laboratorio, se basa en estudios previos tanto nacionales como internacionales.

La investigación evaluará la concentración de plomo y arsénico mediante la técnica de electroremediación, que ofrece ventajas significativas en comparación con otros métodos de remediación ambiental para metales pesados (Alcaíno, 2012).

1.5. Aporte

1.5.1. Aporte académico

Contribuye al desarrollo de tecnologías para remediar la contaminación ambiental causada por los relaves mineros y amplía el conocimiento disponible para futuras investigaciones.

1.5.2. Aporte a la restauración de ecosistemas

Los relaves mineros, que contienen metales pesados y productos químicos tóxicos, representan un peligro significativo para el medio ambiente. La electroremediación puede reducir la concentración de estos contaminantes mediante la aplicación de corriente eléctrica, que moviliza los iones y facilita su extracción o neutralización. Así, es posible recuperar los ecosistemas afectados por la actividad minera al disminuir la toxicidad de los relaves (Ghobadi et al., 2021).

1.5.3. Aporte a la protección de la salud humana

Los relaves mineros representan un riesgo para la salud humana debido a la inhalación de polvo contaminado y al consumo de alimentos contaminados (Araujo, 2022). La electroremediación puede mitigar este riesgo al reducir la presencia de plomo y arsénico en los relaves. Esto, a su vez, disminuye la bioacumulación de metales pesados en la cadena alimentaria y sus efectos negativos en la salud de los organismos consumidores (Ortiz, 2023).

Como resultado, se reduce la acumulación de metales pesados en los tejidos de los organismos vivos y su presencia en el entorno ambiental. De esta manera, se contribuye a la protección de la salud del pueblo tradicional Fernando Belaúnde, ubicado cerca del PAM Kiowa.

1.6. Línea de investigación

Este proyecto está asociado a la línea de investigación de remediación, cuyo objetivo es aplicar métodos de investigación experimental para eliminar o transformar contaminantes en el medio ambiente a formas menos tóxicas, promoviendo tecnología para la protección ambiental en las operaciones mineras.

1.7. Hipotesis

La aplicación de la electroremediación, en función de la densidad de corriente y el tiempo de proceso, podría reducir los niveles de plomo y arsénico presentes en los relaves del PAM Kiowa perteneciente a la ex mina Yarabamba S.A.

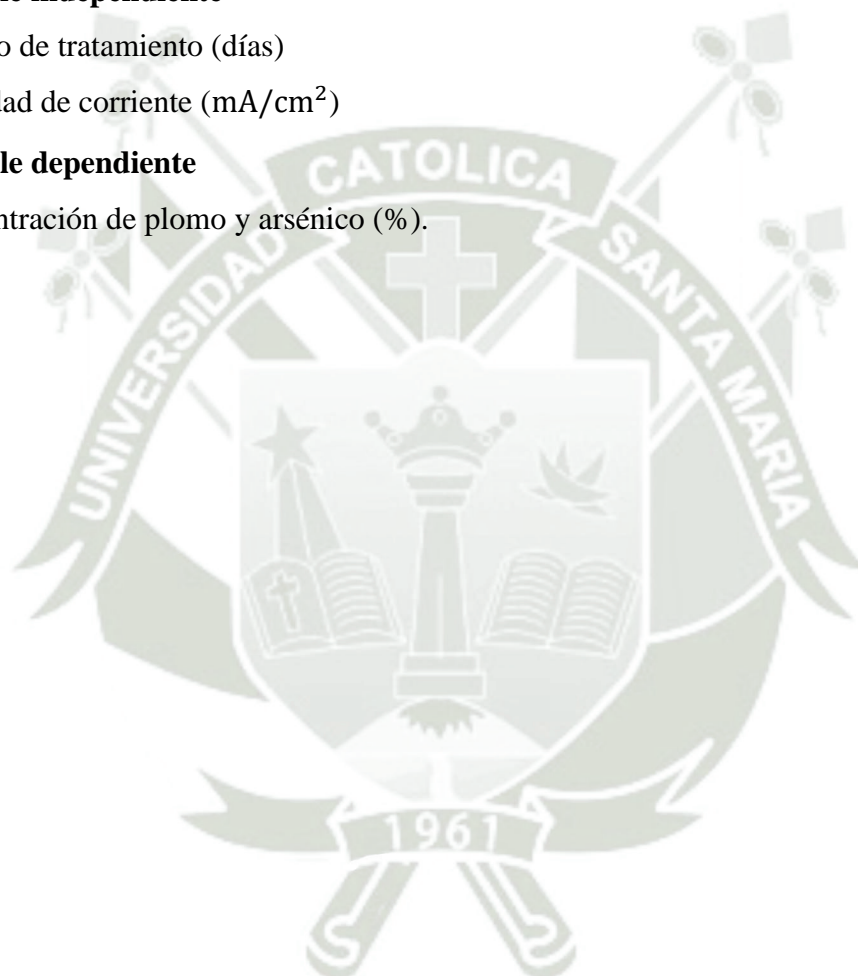
1.8. Variables

1.8.1. Variable independiente

- Tiempo de tratamiento (días)
- Densidad de corriente (mA/cm^2)

1.8.2. Variable dependiente

- Concentración de plomo y arsénico (%).



1.8.3. Operacionalización de variables

Tabla 1

Operacionalización de variables dependiente e independiente

Variables de la investigación	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Recolección de datos
Variable independiente Parámetros para reducir metales pesados mediante electroremediación	Este proceso elimina y separa contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esto se logra mediante el uso de corriente eléctrica, voltaje y un período de tiempo determinado, utilizando mecanismos de transporte electrocinética. Es una técnica efectiva para restaurar la calidad del suelo. (Ghobadi et al.,2021)	La electroremediación será evaluada en función a la densidad de corriente (mA/cm^2) y el tiempo (días) de tratamiento para reducir los metales pesados en el relave	Densidad de corriente (mA/cm^2)	Intensidad de corriente	A	Multímetro
				Voltaje	V	
			Tiempo	Área del electrodo	cm^2	Cronometro
				5 días de tratamiento	horas	
				2 días de tratamiento	horas	

Variables de la investigación	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Recolección de datos
Variable dependiente: Remoción de los metales pesados en los relaves del PAM kiowa	Reducir el porcentaje de plomo y arsénico que existe en los relaves del PAM Kiowa, mediante la técnica de electrorremediación.	La remoción del plomo y arsénico en los relaves del PAM kiowa está en función de sus características químicas, físicas y la concentración de los metales.	Disminución de la concentración de plomo	% de reducción de Pb en suelo tratado	mg/Kg	ICP MS
			Disminución de la concentración de arsénico	% de reducción de As en suelo tratado	mg/Kg	ICP MS



CAPITULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Zulfiqar et al. (2017). El artículo científico titulado: “La perturbación de la movilidad de los iones por partículas de hierro durante la remediación electrocinética de suelos contaminados”, investigaron el impacto del Fe^{2+} sobre la movilidad de los iones Pb^{2+} durante el proceso de electroremediación en suelos donde se ha añadido intencionalmente nitrato de plomo $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ como contaminante. Se efectuaron dos experimentos, utilizando electrodos fabricados de hierro y grafito. Los hallazgos indican que los iones Fe^{2+} , generados por los electrodos de hierro como resultado del entorno ácido en la zona del ánodo, afectaron el desplazamiento de las partículas de plomo. Además, los iones Fe^{2+} de menor conductividad iónica redujeron la movilidad de otras partículas en el suelo. La investigación evidenció que la electroremediación utilizando electrodos de hierro resulta menos efectiva en la eliminación del plomo. Mientras tanto, los electrodos de grafito fueron hasta 15 veces más eficaces en la extracción del plomo en comparación con los de hierro.

Beyrami (2020). En el artículo científico titulado “Efecto de diferentes tratamientos en la remediación electrocinética de Zn, Pb y Cd de un suelo calcáreo contaminado”, se investigó la electroremediación de un suelo calcáreo contaminado con zinc (Zn), cadmio (Cd) y plomo (Pb), en los alrededores de la provincia de Zanjan, en Irán. El suelo presentó elevadas concentraciones de Zn (1400 mg/Kg), Cd (15 mg/Kg) y Pb (250 mg/Kg). El estudio de electroremediación consistió en dos series de experimentos. Para la primera serie de experimentos se utilizó agua destilada, ácido acético y soluciones de electrolitos EDTA, con diferentes gradientes de voltaje (1,33 V/cm y 2,66 V/cm). La segunda serie investigó el efecto del contenido de humedad (saturado, medio, bajo) con un gradiente de voltaje de 1,33 V/cm. Tras 5 días de exposición a corriente eléctrica, se observó que aumentar el gradiente de voltaje mejoró la eficacia de remoción de metales pesados. El tratamiento más efectivo fue el que utilizó EDTA, logrando una remoción del 40.11% para zinc, 43.10% para cadmio y 24.7% para plomo. Con humedad saturada, se extrajo el 32.62% de cadmio, 31.33% de zinc y 18.82% de plomo después de 120 horas. Reduciendo la humedad, los porcentajes de remoción fueron 20.97%, 18.44% y 12.25% para cadmio, zinc y plomo, respectivamente. El cadmio fue el metal pesado más removido, seguido por el zinc y el plomo.

Aragón (2013). En el artículo científico "Diseño a escalas laboratorio y piloto de un sistema de remediación cinética de suelos contaminados con metales pesados", su objetivo fue emplear la técnica de remediación cinética para descontaminar suelos afectados por la actividad minera. Además, diseño métodos de remediación in situ económicamente viables para su implementación. Este estudio examinó la migración de iones en suelos contaminados con cobre, cromo, plomo y zinc mediante la aplicación de un campo eléctrico de 10 V. Para el estudio se usó tres tipos de suelos (suelo contaminado con materiales de construcción, suelo agrícola y relave minero), empleándose tres tipos de agentes humectantes (sulfato de sodio, sulfato ferroso y ácido acético). El sistema contó con tres pares de electrodos de grafito dispuestos en pozos, una fuente de alimentación y un sistema para distribuir los agentes humectantes. Los resultados demostraron una migración efectiva de metales pesados (cobre, cromo, plomo y zinc) hacia las áreas cercanas a los electrodos. El suelo agrícola tuvo los mejores resultados de remoción, usando sulfato ferroso como agente humectante. Para el caso del relave minero tratado con pozos y utilizando electrodos de grafito a 10 V y sulfato ferroso como agente humectante durante 104 horas, logró eliminar el 95% del cobre y el 74% del zinc en las áreas intermedias de la celda, siendo el mejor resultado obtenido.

Gholamreza et al. (2021), tesis "Comparación de diferentes agentes extractivos para la recuperación de Pb y Zn mediante remediación electrocinética de relaves mineros", se llevó a cabo una investigación dirigida a reducir los niveles de plomo y zinc en relaves mineros con altas concentraciones de metales pesados mediante el uso de remediación electrocinética. Los relaves fueron obtenidos de una planta de flotación ubicada en la provincia de Markazi, Irán. Se realizaron 11 experimentos en laboratorio utilizando una celda electrolítica. Se empleó 800 g de relave previamente humectado con 160 ml de solución electrolítica. El material de los electrodos fue grafito como parte del proceso de tratamiento. Se implementaron gradientes de voltaje constante de 2 V/cm durante 9 días, y varios electrolitos para mejorar la efectividad como el EDTA, ácido cítrico, ácido clorhídrico y ácido acético. Después de acondicionar los electrolitos, se comprobó que el ácido cítrico 1M fue la técnica con mejores resultados de remoción de Plomo (51.31%) y Zinc (38.34%). Además, el consumo de energía para el Pb fue de 481.37 kW/m³ y para el Zn de 938.71 kW/m³, demostrando que la electrorremediación es una tecnología económica.

2.2. Estado del arte

En el estudio llevado a cabo por García et al. (2011), titulado "Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de residuos mineros, utilizando agua y ácido acético como electrolitos", se investigó la electroremediación usando suelos arenosos contaminados con plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As) provenientes de la oxidación de desechos mineros. Las muestras se recolectaron en Zimapán, Hidalgo, México. Se llevaron a cabo ensayos en una celda experimental utilizando un suelo arenoso real compuesto principalmente por arena (93%). Durante el proceso, se aplicó una potencia constante de 20 V durante 24 horas. Se utilizaron agua destilada, ácido acético (CH_3COOH) y acetato de amonio ($\text{NH}_4\text{CH}_3\text{CO}_2$) como electrolitos y agente humectante del suelo. Se observó una disminución en la conductividad eléctrica del suelo y un aumento en la zona de los electrolitos, atribuido a la migración iónica de los contaminantes inducida por el potencial eléctrico aplicado. Al finalizar el experimento, se logró remover el 12% del Pb (98 ppm), el 20% del Cd (7 ppm) y el 22% del As (79 ppm). El ácido acético como anolito y catolito, y el agua destilada como agente humectante produjeron mejores resultados en la remoción de Pb y Cd, mientras que el acetato de amonio como agente humectante y el ácido acético como anolito y catolito fueron efectivos para la remoción de As.

Caballero (2022), en el estudio de tesis titulado "Influencia de la densidad de corriente eléctrica y área efectiva en la remoción de arsénico de un relave minero mediante la electroremediación". La investigación se centró en evaluar cómo la densidad de corriente eléctrica y el área efectiva de los electrodos afectan la eliminación de arsénico de un relave minero mediante electroremediación. Los resultados mostraron una reducción óptima del 90.80% en el contenido de arsénico en el relave a nivel de laboratorio. Se concluyó que las variables estudiadas influyen significativamente en la reducción de arsénico, con valores que disminuyeron de 1197.65 mg/m^3 a 110.22 mg/m^3 , utilizando una densidad de corriente de 30 mA/cm^2 y un área efectiva de 159.2 cm^2 .

Escobar y Ocas (2016), en su tesis titulada "Electrorremediación en función de la densidad de corriente y la concentración de ácido acético, como alternativa para la disminución de plomo en relaves mineros –Mina Paredones, Cajamarca”, realizaron una investigación fisicoquímica utilizando una celda experimental de electroremediación con suelos arenosos (65%). Empleando agua destilada como humectante del suelo y ácido acético en diversas concentraciones (0.01, 0.02 y 0.03 M), como electrolito, se aplicó un potencial constante de 10 a 25 voltios durante 24 horas. Después de los experimentos, se recuperó el suelo y se determinó que tiene una notable capacidad de amortiguamiento del pH. Tras realizar 36 experimentos, se alcanzó una remoción del 45.85% de plomo con ácido acético al 0.03 M y 22.96 V, lo que redujo su toxicidad. Además, el análisis ANOVA reveló que tanto la concentración de ácido acético como la densidad de corriente tienen un impacto significativo en el proceso de electroremediación para la eliminación de plomo.

Ramos (2019). En su tesis “Evaluación de la influencia de distintos niveles de intensidad de corriente en la técnica de electroremediación para relaves mineros contaminados por pb y hg provenientes de Ponce Enríquez, Azuay.”, investigo el método más eficaz para tratar relaves mineros que estuvieran contaminados con plomo (Pb) y mercurio (Hg) mediante electroremediación. Se recolectaron muestras de relaves y se llevaron a cabo análisis preliminares (físicas, físico-químicas y mineralógicas). El proceso se realizó en una celda de vidrio, con electrodos ubicados a 15cm de distancia entre sí. Se colocó cada electrodo en pozos de 2.5 cm de profundidad y se añadieron 95 ml de soluciones electrolíticas, como ácido acético glacial 0.1 M y vinagre blanco. Se alternaron electrodos de grafito y acero cromado, con cada tratamiento durando 24 horas y aplicando un voltaje de 45 V, variando la intensidad de corriente entre 1 A y 2 A. Se utilizó una muestra de 600 g de relave minero, tratada con una solución humectante de sulfato de hierro 0.1 M. Tras realizar los cuatro tratamientos, se concluyó que utilizando una intensidad de corriente de 2 A, voltaje constante de 45 V, electrodos de grafito y ácido acético glacial como solución electrolítica, se logró una eficiencia de remoción del 51.52% para plomo y del 39.56% para mercurio. Además, los análisis de migración iónica indicaron que los metales tienden a dirigirse hacia la región anódica.

2.3. Bases teóricas

2.3.1. La industria minera en el Perú

La minería es una actividad extractiva de alcance global que se ha desarrollado en el Perú desde épocas precolombinas, gracias a la abundancia de metales en el territorio. En la actualidad, la minería es una de las principales actividades económicas del país, con perspectivas de crecimiento elevadas y gran atractivo para las inversiones privadas. Esto genera divisas, ingresos fiscales a través de impuestos, empleos directos e indirectos, y promueve inversiones en áreas remotas, mejorando así la calidad de vida de las comunidades cercanas a los yacimientos mineros (Cooper,2021).

Sin embargo, las operaciones de extracción y procesamiento de minerales han llevado a la acumulación de residuos. Además, muchos pasivos ambientales de unidades mineras inactivas están abandonados y sin remediar, lo que requiere acciones urgentes por parte del gobierno peruano (Diario La República, 2022).

2.3.1.1. Minera en Arequipa

El Perú se destaca como uno de los principales productores de cobre a nivel mundial. Arequipa lidera la producción nacional de este metal, contribuyendo con un 18.2% del total, principalmente gracias a las actividades de la empresa minera Cerro Verde S.A. Además, la región ocupa el segundo lugar en la producción nacional de oro con un 23% de participación.

Arequipa desempeña un papel crucial en la economía del país, siendo una de las regiones con mayor inversión minera ejecutada en el año 2023, alcanzando el 6.5% del total nacional. En cuanto a las transferencias económicas generadas, que incluyen el Canon Minero, las Regalías Mineras y el Derecho de Vigencia y Penalidad, hasta junio de 2023 ascendieron a S/ 1018 millones de soles, colocando a la región en el segundo lugar a nivel nacional (Boletín Estadístico Minero MEM, 2023).

2.3.2. Pasivos ambientales mineros

Los pasivos ambientales mineros son infraestructuras, descargas, emisiones, residuos o depósitos resultantes de actividades mineras que actualmente están abandonadas o fuera de operación. Estos constituyen un riesgo continuo y potencial para la salud pública, el medio ambiente y la propiedad.

El Ministerio de Energía y Minas tiene la responsabilidad de identificar los pasivos ambientales mineros, determinar los responsables del daño ambiental, financiar la remediación de las áreas afectadas, y mantener actualizados los inventarios de pasivos ambientales mineros (Art. 2° de la Ley N° 28271) (Ministerio de Energía y Minas ,2008).

La Resolución Ministerial N.° 510-2023-MINEM/DM, revela la existencia de 6128 pasivos Ambientales Mineros en todo el país de los cuales 341 pertenecen al sub tipo relave (Tabla 2).

En este contexto, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) ha establecido como prioridad la remediación de Pasivos Ambientales Mineros. Para lograr este objetivo, el MEM ha mantenido reuniones con expertos de la Agencia de Cooperación Internacional de Corea (Koica) y la Corporación de Recursos Minerales y Rehabilitación de Minas de Corea (Komir), con el propósito de mejorar los procesos de cierre de minas y la remediación de los pasivos ambientales. Este esfuerzo, que se extiende hasta el 2025, incluye la instalación de laboratorios y la capacitación de funcionarios (Diario oficial el peruano,2023).

Tabla 2
Inventario de pasivos ambientales mineros 2023

Sub tipo componente	Total, PAMs
Desmante de mina	2285
Relaves mineros	341
Material de desbroce	39
Residuos de carbón	31
Escorias	14
Pila de lixiviación	6
Lodos de neutralización	1
Suelo orgánico	1
Total, general	2718

Nota. Según el MEM existen más de 341 PAM del subtipo relave en todo el país, Información obtenida del MEM (2023)

2.3.2.1. Pasivos Ambientales Mineros en Arequipa

En Arequipa, existen 316 Pasivos Ambientales Mineros (PAMs), de los cuales solo 39 se han gestionado sus estudios ambientales (INEI,2022). Sumado a esta problemática hay un elevado porcentaje de concesiones mineras en la región, ocupando el 36 % de su territorio en el 2023 (CooperAccion, 2023).

Tabla 3
Pasivos ambientales mineros en Yarabamba y Quequeña

EUM	Tipo	Sub tipo	Distrito	Coordenadas UTM (WGS84)	
				Este	Norte
Medalla Milagrosa	Labor Minera	Bocamina	Yarabamba	241366	8163868
Medalla Milagrosa	Labor Minera	Chimenea	Yarabamba	241500	8163851
Medalla Milagrosa	Residuo Minero	Desmonte Mina	Yarabamba	241497	8163851
Kiowa	Infraestructura	Planta De Procesamiento	Quequeña	236172	8170534
Kiowa	Residuo Minero	Relaves	Quequeña	236165	8170408
Kiowa	Residuo Minero	Desmonte Mina	Quequeña	236370	8170502
Kiowa	Labor Minera	Bocamina	Quequeña	236260	8170433
Kiowa	Labor Minera	Tajeo Comunicado	Quequeña	236391	8170487
Kiowa	Labor Minera	Tajeo Comunicado	Quequeña	236286	8170442
Kiowa	Infraestructura	Líneas Eléctricas	Quequeña	236396	8170485
Kiowa	Labor Minera	Pique	Quequeña	236395	8170482

Nota. Lista de pasivos ambientales mineros en Quequeña y Yarabamba debido a actividades mineras desarrolladas hace varias décadas, generando impactos ambientales persistentes en el entorno. Información extraída de la resolución ministerial N° 510-2023-MINEM/DM

2.3.3. Relaves

Los relaves son residuos sólidos que se generan durante las operaciones mineras, resultado del proceso de trituración y molienda de rocas con contenido metálico. Posteriormente, se lleva a cabo un proceso fisicoquímico para obtener un concentrado de metales valiosos, que puede ser vendido como tal o refinado para obtener el metal puro. Los relaves consisten en material sólido de tamaño muy pequeño, incluso más fino que la arena (SNMPE, 2008).

La DGAAM (2008), define los relaves como residuos minerales sólidos, con dimensiones que van desde la arena hasta el limo, generados durante el proceso de concentración y depositados en forma de lodo.

Los relaves presentan características específicas que dependen del tipo de mineral involucrado en su proceso operativo. Estas características determinan el método adecuado para su tratamiento y posterior almacenamiento de manera segura y ambientalmente responsable (SNMPE, 2008).

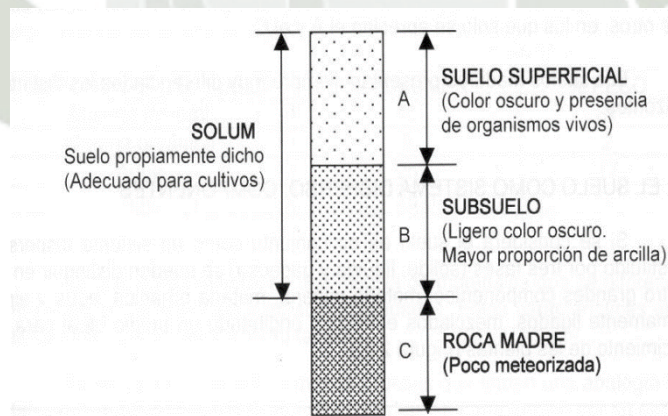
2.3.4. El Suelo

El suelo constituye la capa más superficial de la corteza terrestre, es esencial para el equilibrio de los ecosistemas al permitir el crecimiento de plantas y árboles, que son fuentes de alimento para los seres vivos (Alva,2020).

Desde una perspectiva edafológica, es un cuerpo tridimensional natural afectado por la meteorización mecánica (desagregación) y química (alteración) de la roca madre. Su formación depende del clima, la topografía, la biología, la composición litológica y el tiempo. El suelo interactúa con la geosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera, facilitando el intercambio de energía y materia. Debido a su lenta formación y regeneración, el suelo es un recurso no renovable y su degradación por contaminación reduce su capacidad para mantener ecosistemas a futuro .

Los relaves contaminan en mayor medida los suelos porque son depositados sobre estos, además las partículas finas se diseminan con el viento, afectando las zonas aledañas. La electroremediación también es útil para remediar suelos contaminados por relaves producto de la migración del contaminante (Alva,2020).

Figura 1
Esquema de un perfil típico de suelo



Nota. La imagen muestra un perfil del suelo con tres capas principales y sus características . Información obtenida de Guía metodológica para la evaluación de suelos, 2023

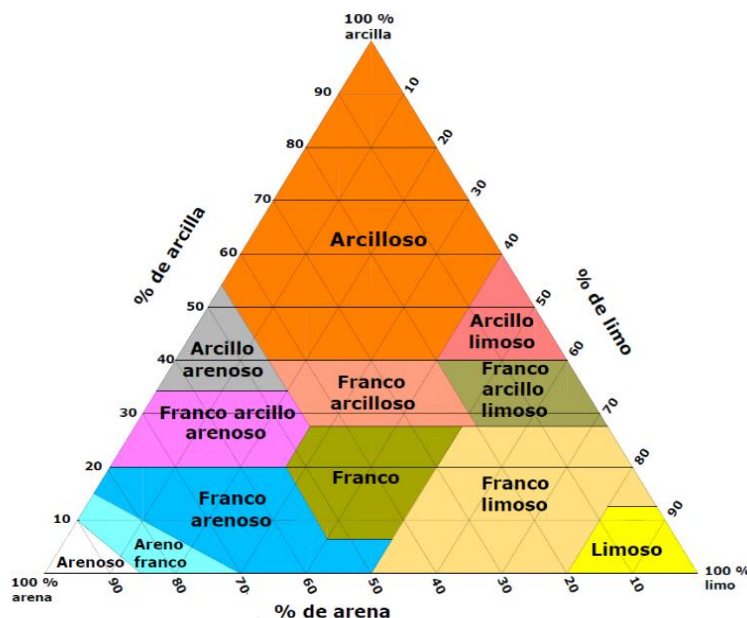
2.3.5. Características físicas del suelo

Los suelos y los relaves comparten características físicas similares, como la textura y la granulometría, siendo esto muy importante para poder caracterizar los relaves basándose en la extensa información disponible para clasificar los suelos (Alva,2020).

2.3.5.1. Textura

La textura del suelo se refiere al porcentaje de partículas de diferentes tamaños presentes en él. Dependiendo de estas proporciones, el suelo puede clasificarse en diversas categorías, como arenoso, limoso, arcilloso o franco. La determinación precisa de la textura del suelo se realiza mediante un análisis de laboratorio que mide las proporciones exactas de cada tipo de partícula (Alva,2020).

Figura 2
Triángulo textural



Nota. Triángulo textural usado para determinar el tipo de textura de suelo en base al porcentaje de arena, limo y arcilla. Adaptado del departamento de agricultura (USDA, sigla en inglés) para el tamaño de las partículas

2.3.5.2. Granulometría

La granulometría se refiere al tamaño de las partículas individuales en el suelo. La distribución de estos tamaños se puede representar mediante herramientas como la curva granulométrica, que muestra el porcentaje de partículas pasantes en función de su diámetro.

La composición granulométrica del suelo puede variar significativamente y tiene un impacto directo en propiedades como la capacidad de retención de agua (permeabilidad) y la estructura del suelo (Ghobadi et al., 2021). Tabla 4

Según el tamaño de las partículas, podemos diferenciar los siguientes tipos de suelos:

Gravas

Los granos son visibles a simple vista, no retienen el agua, pueden ser producidos por el hombre como la piedra partida o triturada que se utiliza en construcción (Zapata, 2018).

Arenosos

Es la fracción más grande de las partículas del suelo, con un tamaño de grano que oscila entre 0.05 y 2.0 milímetros de diámetro. Debido a su granulometría gruesa el agua desciende rápidamente a las capas más profundas. Con la humedad, las partículas de arena adquieren cierta cohesión uniéndose entre sí, aumentando su resistencia. Mayormente, son de color claro y no contienen mucha materia orgánica, siendo no aptos para la agricultura (Zapata, 2018).

Limosos

El suelo limoso tiene un tamaño de grano intermedio entre la arena y la arcilla, con diámetros de partículas que oscilan entre 0.002 y 0.05 milímetros. Tienen una capacidad razonable para retener agua (no filtra el agua rápidamente) aunque no retienen agua tan eficientemente como los suelos arcillosos. Suelen presentarse cerca de los ríos, estos suelos al retener el agua y nutrientes más tiempo los hace más fértiles, conteniendo mucho material orgánico (Zapata, 2018).

Arcillosos

El suelo arcilloso es la fracción más fina de las partículas del suelo, con un tamaño de grano inferior a 0.002 milímetros de diámetro. Generados por meteorización química, tiene una alta capacidad para retener agua, en la superficie, El suelo arcilloso puede volverse pegajoso cuando está mojado y duro cuando está seco, lo que dificulta el cultivo de plantas a pesar de retener nutrientes y ser rico en minerales (Zapata, 2018).

Suelo Franco

Se caracteriza por tener una textura intermedia entre los suelos arenosos y los suelos arcillosos. Están compuestos por una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla (Zapata, 2018).

Tabla 4

Clasificación de suelos según tamaños de sus partículas (medidas en mm)

Fracción del suelo	Sistema del Dpto. USA	Sistema Internacional
	Diámetro (mm)	Diámetro (mm)
Gravas	> 2.0	-
Arena gruesa	0.5 – 2.0	0.2 – 2.0
Arena mediana	0.25 – 0.5	-
Arena fina	0.1 – 0.25	0.02 – 0.2
Arena muy fina	0.05 – 0.1	0.002 – 0.02
Limo	0.002 – 0.05	-
Arcilla	< 0.002	<0.002

Nota. Clasificación del suelo de acuerdo al tamaño de partículas. Información obtenida de Remediaci3n electrocin3tica de suelos de baja permeabilidad contaminados con compuestos org3nicos hidr3fobos, de L3pez & L3pez ,2013

2.3.6. Contaminaci3n por actividades mineras

La contaminaci3n es una transformaci3n negativa que se denomina degradaci3n, esta se produce cuando el equilibrio natural se rompe. El origen del contaminante puede ser geog3nico o antropog3nico. Los geog3nicos proceden de la roca matriz en la que se form3 el suelo, ocasionado por la naturaleza, como la actividad volc3nica o lixiviaci3n natural. Los antropog3nicos son contaminantes que se producen por actividades humanas como la minera (Men3ndez,2021).

Las actividades mineras contaminan de diversas maneras. Algunas de las principales actividades que contribuyen a la contaminaci3n son:

2.3.6.1. Extracci3n de minerales

La remoci3n de grandes cantidades de suelo y roca durante la extracci3n de minerales puede alterar significativamente su composici3n y estructura. Esto puede conducir a la p3rdida de la capa f3rtil del suelo y a la degradaci3n del material restante (Men3ndez,2021).

2.3.6.2. Residuos mineros

Los residuos generados durante el procesamiento de minerales, como los relaves y desmontes, pueden contener metales pesados, productos qu3micos t3xicos y otros contaminantes. Estos residuos a menudo se depositan en 3reas designadas cerca de la mina, lo que puede provocar la contaminaci3n del suelo y el agua subterr3nea (Men3ndez,2021).

2.3.6.3. Derrames de productos químicos

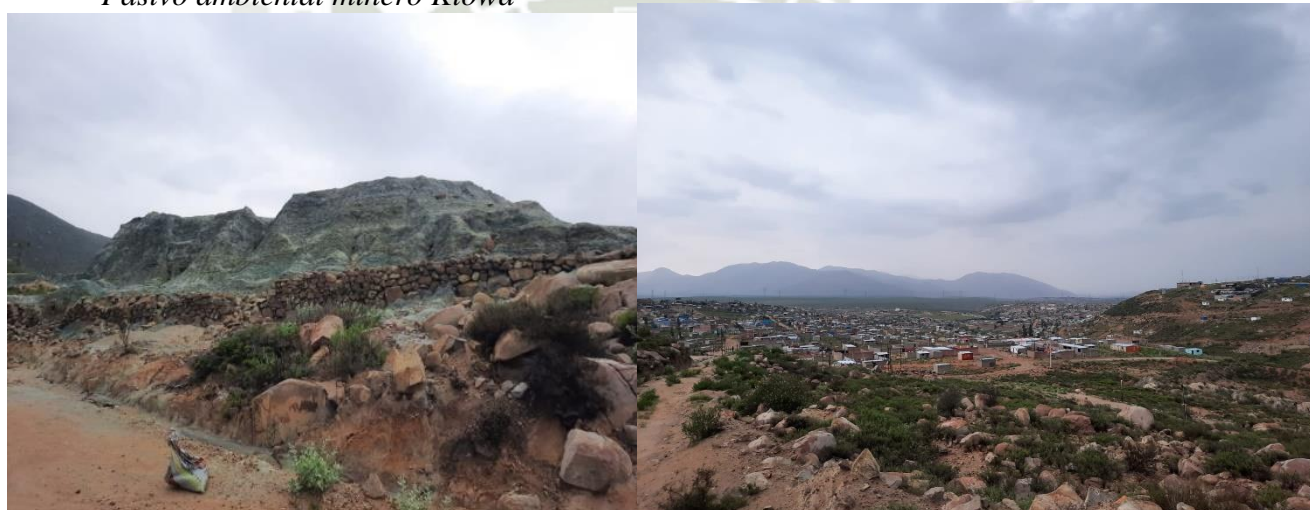
Los derrames de productos químicos utilizados en el proceso minero, como ácido sulfúrico, cianuro, mercurio y otros reactivos, pueden contaminar el suelo. Esto puede ocurrir durante el transporte, almacenamiento o manipulación de productos químicos en las instalaciones mineras (Menéndez,2021).

2.3.6.4. Drenaje ácido de mina

La exposición de minerales sulfurados puede provocar la oxidación de sulfuros, generando drenaje ácido de mina (DAM). Este drenaje ácido puede contaminar el suelo y el agua con altas concentraciones de metales pesados y productos químicos (Menéndez,2021).

Figura 3

Pasivo ambiental minero Kiowa



Nota. En la imagen de la izquierda se puede observar el pasivo ambiental minero Kiowa, en la imagen del lado derecho se muestra la cercanía del pueblo Fernando Belaunde al PAM.

2.3.7. Metales pesados

Un metal se clasifica como "pesado" si su densidad es igual o superior a 5 g/cm^3 en su forma elemental, o si su densidad es al menos cinco veces mayor que la del agua. En la corteza terrestre, la presencia de estos metales pesados es inferior al 0.1%, aunque están presentes en numerosos procesos de producción minera. Los metales pesados más importante incluyen arsénico, plomo, cadmio, cobalto, cromo, mercurio, cobre, níquel, estaño y zinc. Debido a su toxicidad y concentración en el ambiente pueden causar daños en la salud humana. Algunos metales son necesarios en bajas concentraciones para el buen funcionamiento del organismo del ser humano, como el zinc, molibdeno, cobalto o el hierro, que forma parte de la hemoglobina.

Su ausencia causa enfermedades y su exceso provoca intoxicación. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales no experimentan biodegradación, sino que tienden a acumularse en el medio ambiente (Ghobadi et al., 2021).

2.3.7.1. Plomo

El plomo, con número atómico 82 y peso atómico 207, está presente en muchos minerales. El más común es el sulfuro de plomo (galena - PbS), seguido en menor medida por la cerusita ($PbCO_3$) y la anglesita ($PbSO_4$). La galena es una mena importante en la Mina Kiowa, lo que explica las concentraciones elevadas de plomo en la zona (Rondoy & Sánchez, 2000). El plomo es un metal que difícilmente se moviliza. Cuando la galena se oxida, origina minerales como la cerusita y la anglesita (Febres, 2019).

2.3.7.2. Efectos del plomo en la salud

El envenenamiento por plomo se conoce como Saturnismo, Plombemia o Plumbosis. La Conferencia Americana de Higienistas Industriales (ACGIH) ha clasificado a compuestos de Pb^{2+} como cancerígenos para seres humanos (Febres, 2019).

El plomo ingresa al cuerpo humano por ingesta directa, inhalación de polvo contaminado y absorción percutánea al tener contacto con la piel. Se acumula principalmente en el tejido óseo, pero también en el hígado, médula renal y glóbulos rojos. Se elimina mayormente por la orina y en menor medida por el sudor, los excrementos, el cabello y la leche materna. La intoxicación por plomo afecta la producción de células sanguíneas, causando anemia, y provoca alteraciones en la función cerebral del sistema nervioso central. La exposición prolongada al plomo en niños afecta su capacidad cognitiva, causando problemas de atención, y en adultos puede llevar a enfermedades cardiovasculares. Los efectos del envenenamiento por plomo se manifiestan tanto a corto como a largo plazo, y no se requiere una exposición a concentraciones altas para experimentar síntomas. Una vez que se absorbe, el plomo puede tardar más de 20 años en ser eliminado y nunca se elimina por completo si se supera una cierta cantidad (Febres, 2019).

2.3.7.3. Arsénico

Con número atómico 33, símbolo As y masa atómica de 74.9216, el arsénico puede encontrarse en formas orgánicas e inorgánicas. La arsenopirita es una mena importante en la Mina Kiowa, lo que explica las concentraciones elevadas de arsénico en los relaves (Rondoy & Sánchez, 2000).

Este elemento, presente naturalmente en la corteza terrestre como un sólido semimetálico de color gris metálico, es altamente tóxico para los seres humanos debido a su interacción con proteínas, lípidos y otros componentes celulares. El arsénico inorgánico es generalmente más peligroso que el orgánico, pudiendo causar graves problemas de salud (Ecometales, 2017).

La extracción de cobre en Perú se caracteriza por altos niveles de arsénico, una situación derivada del agotamiento de minerales con alto contenido de cobre y pocas impurezas. Esto ha obligado a explotar depósitos más profundos, donde la concentración de arsénico es mayor, lo que genera desechos con un alto contenido de este elemento y requiere procesos adicionales (Ecometales, 2017).

2.3.7.4. Efectos del arsénico en la salud

La exposición al arsénico puede ocurrir a través de la ingesta de agua o alimentos contaminados, la inhalación de vapores de arsénico en el aire, o la absorción dérmica al contacto con sustancias que lo contienen. La intoxicación por arsénico puede causar efectos perjudiciales para la salud, incluyendo trastornos gastrointestinales y cardiovasculares, y efectos crónicos en la piel, pulmones y sistema nervioso. La exposición prolongada aumenta el riesgo de desarrollar cáncer de piel, pulmón y vejiga (Febres, 2019).

2.3.7.5 Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos

Para combatir la contaminación por metales pesados en suelos, el año 2017 el Ministerio del Ambiente de Perú aprobó los estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos mediante el Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM. Este decreto obliga a las empresas que realizan actividades mineras y otras actividades que impactan los ecosistemas a ajustar sus estándares de calidad ambiental a través de sus instrumentos de gestión ambiental.

Tabla 5

Estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos

Parámetros en mg/kg PS	Suelo Agrícola	Suelo Residencias/ Parques	Suelo Comercial/ Industrial/ Extractivo	Métodos de ensayo
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA3051
Plomo	70	140	800	EPA 3050 EPA3051

Nota. Información obtenida del Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM- Perú

2.3.8. Tecnologías utilizadas para la remediación

Las tecnologías para remediar buscan disminuir la concentración de contaminantes mediante procesos biológicos, químicos y físicos. La remediación implica acciones destinadas a limpiar lugares con contaminantes o residuos peligrosos, mejorando la calidad de vida de las personas expuestas y conservando su hábitat (Alcaíno, 2012).

Estas técnicas se clasifican según la ubicación del contaminante durante el tratamiento: las técnicas in situ se realizan directamente en el lugar contaminado, mientras que las técnicas ex situ implican extraer la muestra y trasladarla a otro lugar para su tratamiento (López & López, 2013). La elección de la tecnología adecuada depende de varios factores, incluyendo el objetivo de la remediación, el lugar del proceso, así como la eficiencia y la factibilidad técnico-económica del tratamiento (Alcaíno, 2012).

2.3.8.1. Biorremediación

La biorremediación es un proceso que utiliza organismos vivos, como bacterias, hongos o plantas, para eliminar o neutralizar contaminantes del ambiente. Estos organismos pueden degradar compuestos químicos tóxicos en formas menos dañinas, absorber contaminantes del suelo o agua, o transformarlos en productos menos nocivos. La biorremediación es una técnica respetuosa con el medio ambiente y puede ser utilizada para limpiar suelos contaminados, aguas residuales y ácidas, sitios industriales y entornos afectados por la contaminación (Alcaíno, 2012).

2.3.8.2. Fitorremediación

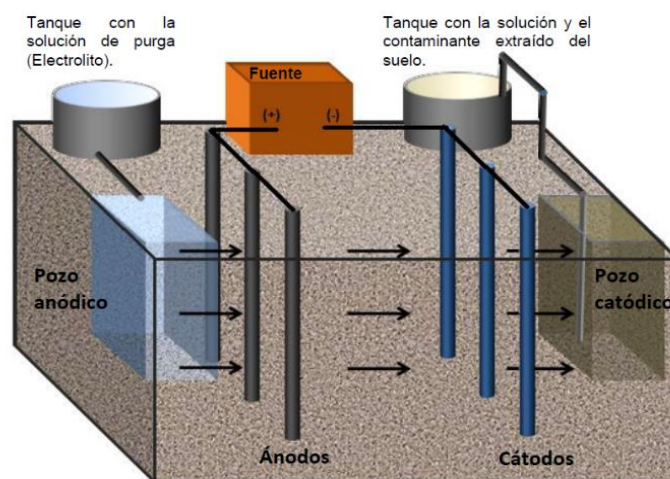
La fitorremediación es un método de remediación ambiental que emplea plantas para reducir o eliminar la toxicidad de contaminantes en el suelo y el agua. Las plantas fitorremediadoras pueden absorber y acumular estos contaminantes, disminuyendo su presencia en el entorno. Este método puede aplicarse en áreas industriales, vertederos, terrenos agrícolas contaminados, aguas residuales y sitios mineros. Entre sus ventajas destacan su eficacia en la limpieza, bajo costo, y la ausencia de reactivos químicos peligrosos, sin efectos adversos en la estructura del suelo. Además, al realizarse in situ, se evitan los costosos traslados (Alcaíno, 2012).

2.3.9. Electrorremediación o remediación electrocinética

La electrorremediación es una técnica nueva que se puede aplicar in situ o ex situ aprovechando las propiedades conductivas del suelo, para separar contaminantes orgánicos e inorgánicos (Ghobadi et al., 2021).

Esta técnica se emplea para recuperar suelos contaminados con metales pesados mediante la generación de un campo eléctrico con corriente directa. En este proceso, se instalan electrodos (ánodo y cátodo) en pozos excavados en el suelo y se aplica una diferencia de potencial o corriente directa. Para mejorar la conductividad del campo eléctrico, se humedecen los electrodos con un electrolito. El electrolito facilita el movimiento del contaminante hacia los pozos, donde puede ser removido. Este método permite una migración controlada del contaminante, evitando su dispersión hacia otras áreas no deseadas fuera del área de tratamiento (Ortiz, 2023).

Figura 4
Representación del proceso de electrorremediación in situ



Nota. Montaje de un sistema de electrorremediación en campo. Información extraída de “Caracterización y posterior remediación electro-cinética de suelo tipo vertisol contaminado con hidrocarburo procedente de una zona industrial” por, Delgado (2010).

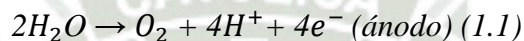
Durante el proceso de electrorremediación, se produce un flujo de agua, iones y partículas cargadas. El electrodo con carga positiva se conoce como ánodo, hacia el cual migran especies con carga negativa como cloruros, fluoruros, nitratos y iones de cianuro. Por otro lado, el electrodo con carga negativa es el cátodo, hacia el cual migran especies positivas como los iones metálicos (Ghobadi et al., 2021)

2.3.9.1. Principio básico de la electroremediación

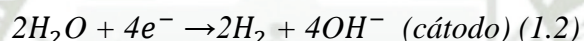
La electroremediación se fundamenta en el principio de la electrólisis, que implica la descomposición de sustancias donde se utiliza energía eléctrica para inducir una reacción química, que no es espontánea y solo ocurre cuando se suministra energía a través de corriente eléctrica externa. Esto implica esencialmente una separación inducida por electricidad (Ghobadi et al., 2021).

Cuando una corriente eléctrica se aplica, se desencadenan diversas reacciones químicas en los electrodos.

La oxidación del agua en el ánodo produce la liberación de iones de hidrógeno (H^+), oxígeno gas (O_2) y electrones (e^-), . (ecuación 1.1)

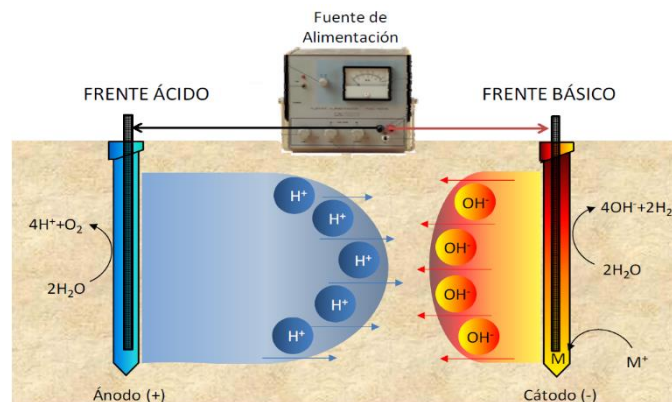


En el cátodo, la reducción de agua resulta en la formación de iones hidroxilo (OH^-), hidrógeno gas (H_2), los cuales migran al ánodo. (ecuación 1.2)



Los iones H^+ se desplazan a una velocidad superior en comparación con los iones OH^- . En el ánodo (electrodo positivo), ocurre la oxidación del agua, liberando iones de hidrógeno H^+ y oxígeno O_2 . Los iones de hidrógeno H^+ liberados migran hacia el cátodo (electrodo negativo). En el cátodo, los iones de hidrógeno H^+ y los electrones se combinan para formar moléculas de hidrógeno gaseoso H_2 . Al mismo tiempo, en el cátodo se generan iones hidroxilo OH^- como resultado de la reducción del agua. Estos iones OH^- pueden migrar hacia el ánodo. Cuando los iones OH^- llegan al ánodo, se encuentran con los iones de hidrógeno H^+ liberados durante la oxidación del agua en el ánodo. Esta interacción entre los iones OH^- y los iones H^+ resulta en la formación de un frente ácido. Este frente ácido es una región dentro del suelo donde se acumulan iones H^+ y OH^- debido a la migración y las reacciones electroquímicas. La formación de este frente ácido puede tener implicaciones en la movilización y la remediación de contaminantes en el suelo (Ortiz, 2023).

Figura 5
Electrolisis del agua en el tratamiento de biorremediación



Nota. Proceso electrolisis al aplicar corriente al sistema, generando el movimiento de partículas. Información obtenida de “Remediación electrocinética de suelos de baja permeabilidad contaminados con compuestos orgánicos hidrófobos” por, López y López (2013).

2.3.9.2. Mecanismo de remoción

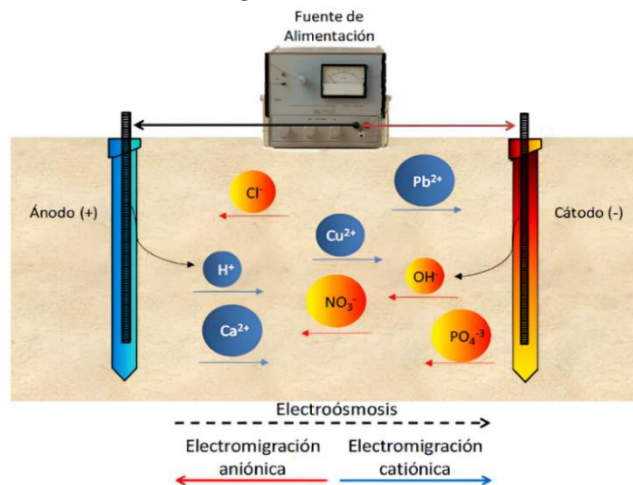
Hay varios mecanismos en los cuales el campo eléctrico conduce los contaminantes tóxicos hacia los electrodos estos son: electromigración, electroforesis y electroósmosis (Ortiz,2023).

Electromigración.

Es el proceso fundamental en la biorremediación, donde los iones en solución se desplazan debido al campo eléctrico creado entre el ánodo y el cátodo al aplicar corriente eléctrica al suelo contaminado

Este fenómeno facilita el transporte de iones con carga eléctrica hacia los electrodos de carga opuesta durante la remediación, incluyendo H^+ , OH^- , cationes como metales pesados y amonio, y aniones como cloruro, cianuro, fluoruro y nitrato. La velocidad de movilización de estos iones en la electromigración depende de su carga, la temperatura y la intensidad del campo eléctrico aplicado (gradiente eléctrico) (López & López, 2013). La electromigración se destaca especialmente en suelos de baja permeabilidad contaminados por compuestos inorgánicos, como metales pesados (Ortiz,2023).

Figura 6
Proceso de electromigración

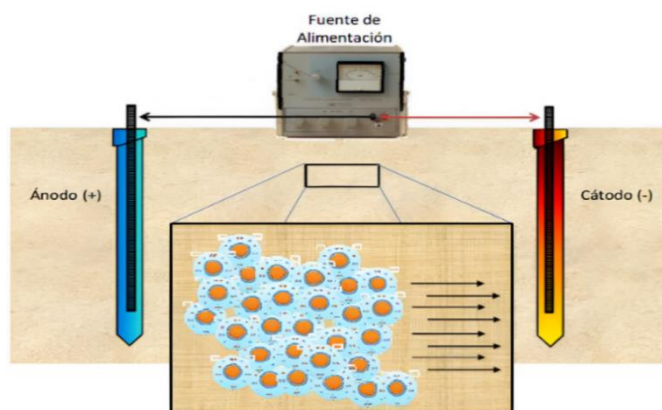


Nota. Intercambio de iones cargados debido a la generación de un campo eléctrico. Información obtenida de Remedación electrocinética de suelos de baja permeabilidad contaminados con compuestos orgánicos hidrófobos por, López y López (2013).

Electroósmosis.

Es un proceso que ocurre al aplicar un campo eléctrico, causando el movimiento del líquido presente en el suelo saturado y de los contaminantes disueltos. Este líquido tiende a migrar hacia uno de los electrodos, generalmente hacia el cátodo. Factores como el tipo de suelo, especialmente su permeabilidad, y el pH de los electrolitos utilizados, afectan el movimiento del líquido (López & López, 2013).

Figura 7
Representación del proceso de electroósmosis en el suelo

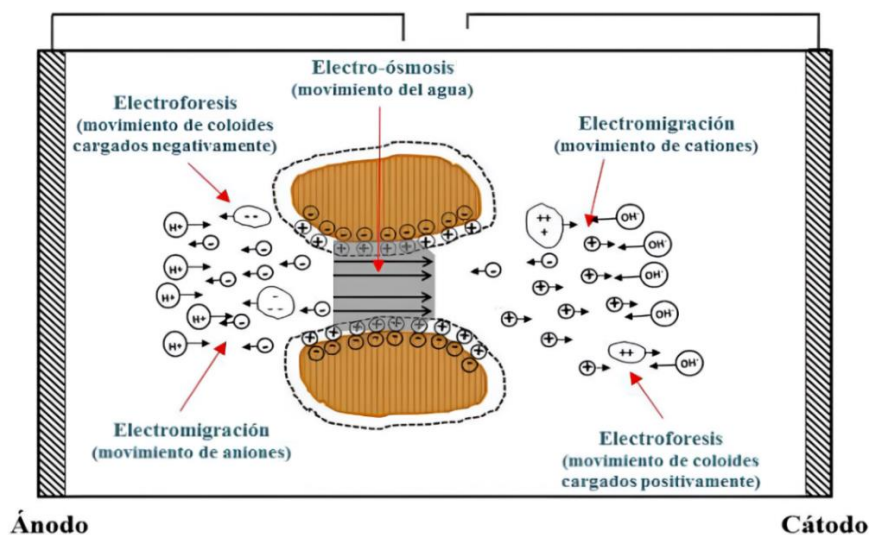


Nota. El campo eléctrico genera el movimiento del fluido. Información obtenida de Remedación electrocinética de suelos de baja permeabilidad contaminados con compuestos orgánicos hidrófobos por, López y López (2013).

Electroforesis

La electroforesis es el proceso mediante el cual partículas o coloides cargados en suspensión en un líquido se desplazan debido a un campo eléctrico aplicado. El sentido de su movimiento está determinado por su carga, moviéndose hacia el electrodo de carga opuesta. Estas partículas también pueden desplazarse debido al flujo osmótico. Su contribución al proceso es considerablemente menor en comparación con la electromigración y la electroósmosis (López & López, 2013).

Figura 8
Mecanismo de transporte en el proceso de Electrorremediación



Nota. El campo eléctrico genera el movimiento de partículas en suspensión. Información obtenida de Tratamiento de suelos contaminados con plomo mediante técnicas electrocinéticas selectivas por, Villen (2016).

2.3.10. Factores que influyen en el proceso de electrorremediación

Existen varios factores fisicoquímicos que influyen en la movilización de contaminantes.

2.3.10.1. El potencial de hidrógeno (pH)

Es esencial para la regulación del movimiento de los contaminantes en el proceso de electrorremediación. La electrolisis del agua conduce a la generación de iones hidrógeno H^+ en el ánodo y iones hidroxilo OH^- en el cátodo, resultando en la liberación de oxígeno e hidrógeno. Esta disociación provoca un pH ácido cerca del ánodo y alcalino cerca del cátodo. Debido al movimiento más rápido de los iones H^+ en comparación con los iones OH^- , el frente ácido avanza con mayor rapidez, lo que dirige el flujo electroosmótico hacia el cátodo. Como resultado, los metales adsorbidos son solubilizados por el frente ácido y transportados hacia el cátodo.

El frente alcalino avanza más lentamente que el frente ácido, cuando estos dos frentes se encuentran, se genera una "zona de transición" donde el pH cambia drásticamente. Con el tiempo, se observa una acidificación del suelo, excepto en la zona cercana al cátodo (Ortiz,2023).

2.3.10.2. Contenido de agua

La humedad es crucial para la electrorremediación, facilitando la electroósmosis al actuar como conductor para la transferencia eficiente de iones. La saturación del suelo es fundamental para llevar a cabo este proceso de manera efectiva. Tanto el pH como el campo eléctrico influyen en la distribución de la humedad en el suelo. La migración de electrolitos hacia los electrodos altera los niveles de humedad, aumenta en un electrodo y disminuye en el otro (Ortiz,2023).

2.3.10.3. Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica del suelo varía según su tipo y se refiere a su capacidad para conducir corriente eléctrica. Este atributo es influenciado por la presencia de sales en el suelo y puede ser medido utilizando un conductímetro cuando el suelo está en suspensión acuosa. Los cambios en el pH del suelo afectan su conductividad, lo cual resulta en la formación de perfiles de voltaje (Ortiz,2023).

2.3.10.4. Naturaleza y química del suelo

En la electrorremediación de suelos contaminados, factores como la capacidad de adsorción, el intercambio iónico y la capacidad de amortiguar el pH son cruciales. Los suelos arcillosos y limosos, por su extensa superficie de contacto, facilitan la adsorción de contaminantes (Ortiz,2023).

2.3.10.5. Permeabilidad

La permeabilidad del suelo se refiere a la facilidad o dificultad con la que un líquido puede fluir a través de él. En el caso de suelos de baja permeabilidad tratados mediante electrorremediación, se inyectan agentes químicos (electrolitos), se selecciona el electrodo más adecuado y se configura un sistema de corriente eléctrica para mejorar la movilidad de los contaminantes y facilitar su extracción. Esta técnica ha demostrado ser eficaz para suelos con baja y moderada permeabilidad (Ghobadi et al.,2021)

2.3.10.6. Naturaleza y arreglo de los electrodos

Los electrodos necesitan una estructura porosa para garantizar un buen contacto con los electrolitos y así poder liberar gases durante la electrólisis. Factores como la geometría, material, disposición y la distancia entre los electrodos afectan la eliminación de contaminantes del suelo. Para seleccionar los electrodos adecuados, se deben tener en cuenta su, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, disponibilidad y precio (Ortiz,2023).

En la práctica, los electrodos suelen ser de forma cilíndrica o plana, pudiendo ser sólidos o tener cavidades huecas. La geometría hueca facilita la inyección o extracción de fluidos, lo que promueve la circulación en el sistema. Los materiales de los electrodos pueden ser hierro, acero, grafito, cobre, entre otros, siendo el grafito el más destacado por sus óptimas condiciones y características (López & López, 2013).

Grafito

Es una variante del carbono, es un mineral inodoro, no tóxico, capaz de resistir altas temperaturas y con excelente conductividad eléctrica. En la electrorremediación, el grafito es ampliamente utilizado como material para electrodos debido a su alta conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión y estabilidad química (López & López, 2013).

La estructura porosa del grafito facilita la difusión de electrolitos y la transferencia de masa durante los procedimientos electroquímicos, mejorando la eficacia en la remediación de suelos contaminados (Ortiz,2023).

Las ventajas de emplear grafito en celdas de electrorremediación incluyen su alto punto de fusión, hasta 3300 °C, que previene su fundición durante el proceso y reduce el desgaste. Además, su densidad es aproximadamente cinco veces menor que la del cobre, lo que los hace más ligeros y con menor desgaste (Ortiz,2023).

2.3.10.7. Densidad de corriente

Es la cantidad de corriente eléctrica aplicada por unidad de área de la superficie del electrodo, medida en amperios por metro cuadrado (A/m^2). En este proceso, la densidad se ajusta en función del tipo de electrodo y su tamaño (Barba,2018).

Matemáticamente, la corriente y la densidad de corriente se relacionan como:

$$\int j \cdot dS$$

I es la corriente eléctrica en amperios A

J densidad de corriente mA/m²

S es la sección de la superficie de estudio m²

2.3.10.8. Solución humectante

En la electrorremediación, se usa una solución humectante para mejorar la solubilización y movilidad de contaminantes en el suelo, facilitando su transporte hacia los electrodos mediante corriente eléctrica (Ortiz,2023).

La solución debe solubilizar contaminantes, mejorar su movilidad y aumentar la conductividad eléctrica del suelo (Barba,2018).

Es crucial que sea químicamente estable, no genere residuos tóxicos adicionales, sea compatible con los electrodos y no interfiera con el proceso de electrorremediación. Elegir la solución correcta es clave para optimizar la limpieza de suelos contaminados (Barba,2018).

Ácido acético glacial

El ácido acético glacial es la forma pura del ácido acético, tiene una ventaja notable debido a su capacidad para neutralizar los iones hidroxilo producidos durante la reducción electroquímica del agua. Los acetatos metálicos son solubles en este ácido, lo que facilita la eliminación del plomo y arsénico al evitar su precipitación y permitir su migración hacia el cátodo ,además tiene alto rendimiento y bajo costo (Barba,2018).

Tiene muchos usos en la industria química , farmacéutica, petrolera , cosmética y alimentaria.

2.3.11. Tiempo y costos en el tratamiento.

El proceso de electrorremediación puede durar desde horas hasta varios meses, dependiendo de la extensión y profundidad del sitio contaminado. El costo del tratamiento varía según diversos factores, como el volumen del material a remediar, la naturaleza del contaminante, los tipos de electrodos, la conductividad eléctrica, la distancia entre los electrodos y el diseño utilizado, siendo el consumo de energía eléctrica uno de los factores más influyentes.

En Estados Unidos, se han realizado estimaciones de costos para la electrorremediación de metales pesados, y los costos directos pueden alcanzar los 50 dólares por metro cúbico, con un consumo energético aproximado de 500 KW h/m³ (Ghobadi et al.,2021).

2.3.12. Usos del relave post tratamiento

Después del proceso de electrorremediación, los relaves tratados pueden ser destinados a diferentes usos dependiendo de su grado de contaminación y características específicas. Aquí algunos usos comunes:

2.3.12.1. Reutilización en la minería

Si los relaves han sido tratados adecuadamente y cumplen con los estándares de calidad y seguridad, pueden ser utilizados nuevamente en actividades mineras. Por ejemplo, pueden ser empleados como relleno en minas abandonadas, lo cual reduce la necesidad de disponer de más relaves. Además, los relaves tratados pueden ser utilizados en operaciones mineras subterráneas para la producción de "schocrete", una forma sostenible de hormigón (Vargas & Rigamonti 2020).

2.3.12.2. Construcción de infraestructura

Los relaves tratados pueden ser empleados en la construcción para fabricar ladrillos, bloques de cemento o materiales de pavimentación. Esta práctica reduce la extracción de materiales naturales y proporciona una opción de disposición final beneficiosa para los relaves tratados (Vargas & Rigamonti 2020).

2.3.12.3. Inactivación y disposición segura

Los relaves también pueden ser inactivados, estabilizando los contaminantes y, posteriormente, dispuestos de manera segura en instalaciones de disposición final diseñadas para este propósito (Vargas & Rigamonti, 2020).



CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Lugar donde se lleva a cabo la investigación

El PAM Kiowa se encuentra en las inmediaciones del pueblo tradicional Fernando Belaunde Terry en el distrito de Quequeña, perteneciente a la provincia de Arequipa, departamento de Arequipa, Perú. Donde se albergaba proyectos mineros subterráneos como la Mina Kiowa, dedicada a la extracción de oro y cobre. Esta unidad minera se encuentra muy cerca del pasivo ambiental minero del mismo nombre, así como canteras de materiales de construcción a los alrededores.

- Distrito: Quequeña
- Provincia: Arequipa
- Departamento: Arequipa
- País: Perú
- Latitud: -16.533459
- Longitud: -71.472324
- Altitud: 2561 m.s.n.m.

Figura 9

Pasivo ambiental minero Kiowa y punto de muestreo



Nota. Imagen satelital del PAM Kiowa donde se puede apreciar la magnitud de la contaminación. Información obtenida de Google Earth

3.1.1. Vías de acceso

El PAM Kiowa está ubicada a 16 km al sureste de la ciudad de Arequipa, en el distrito de Quequeña. Sus coordenadas geográficas son : -16.533459 de latitud y -71.472324 de longitud. El recorrido es por carretera asfaltada hasta la Avenida Yarabamba, se ingresa por un desvío al pueblo tradicional Fernando Belaunde, el recorrido final es de 2 km aproximadamente.

El pasivo ambiental minero se encuentra a menos de 100 metros del pueblo tradicional Fernando Belaunde, y las áreas de cultivo están a una distancia inferior a los 400 metros, lo que representa un grave riesgo para la población.

3.2. Características de la zona de estudio

3.2.1. Geología local

El área presenta características geológicas que indican presencia mineral, como estructuras y formaciones magmáticas, junto con distintos tipos de alteraciones hidrotermales. Se destaca una mineralización principal de pirita en vetas y calcopirita diseminada en granodiorita que actúa como roca encajonante (Kevin et al., 2000).

En el área de estudio se forman rocas ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas, las últimas datan de la era precámbrica. (Kevin et al., 2000).

El pasivo ambiental minero Kiowa se encuentra dentro del Plutón "Churajón", el cual exhibe una diferenciación magmática gradual desde diorita porfirítica hasta granodiorita. Las brechas observadas en esta área están asociadas con este proceso de diferenciación magmática. Las rocas sedimentarias que afloran en la parte noreste de Quequeña parecen corresponder a sedimentos depositados en un posible ambiente lacustre, por el descubrimiento de rocas evaporitas en la zona (Kevin et al., 2000).

La mineralización predominante en esta área es de oro y cobre. La zonificación de la mineralización muestra en las capas superficiales una zona de óxido de hierro, mientras que en profundidad se encuentra una zona rica en sulfuros primarios (pirita, calcopirita). En algunas labores mineras, se localizaron vetillas mineralizadas. (Rondoy & Sánchez, 2000).

3.2.2. Clima

Según datos proporcionados por SENAMHI, la zona de Quequeña experimenta precipitaciones moderadas a intensas durante los meses de enero a marzo. Estas lluvias son características de la temporada de verano en la región, con intensidades que van desde moderadas a fuertes pudiendo impactar significativamente en las actividades agrícolas y la estabilidad de los suelos, aumentando el riesgo de erosión y deslizamientos (SENAMHI,2024).

Por otro lado, en los meses de junio a agosto, la zona se ve afectada por la presencia de vientos predominantes, que pueden alcanzar velocidades de hasta 30 km/h. Estos vientos, típicos de la temporada invernal, no solo influyen en la sensación térmica, haciendo que las temperaturas percibidas sean más bajas, sino que también pueden generar efectos adversos en la vegetación y en la calidad del aire, al levantar polvo y partículas finas (SENAMHI,2024)

3.2.2. Historia

Los yacimientos polimetálicos en la zona de Yarabamba y Quequeña, fueron explotados en el pasado por la pequeña y mediana minería, con el apoyo del Banco Minero.

Según el informe N° 183 emitido por el MEM en 2014, señala que dichos relaves fueron generados por la mina Yarabamba S.A., la cual ya no existe y solo se tiene registro en dicho informe. Sin embargo en el inventario de recursos minerales realizado por el INGEMMET el año 1999 indica la existencia de la mina Kiowa desde antes del año 1972 donde hace mención de dichos relaves por lo cual se estima que tienen más de 52 años (Kevin et al., 2000).

3.3. Alcances y Limitaciones

3.3.1. Alcances

Mediante la aplicación de la electrorremediación en relaves, se mostrarán a la industria minera nuevas técnicas de remediación ambiental. Esta técnica permite la reducción de la concentración de metales pesados en los relaves mineros, lo que a su vez facilita la reutilización de estos en otros procesos industriales. El uso de la electrorremediación ofrece una solución sostenible y económicamente viable para el manejo de residuos mineros.

3.3.2. Limitaciones

A pesar de las diversas investigaciones, la información sobre la aplicación de la electroremediación en relaves mineros sigue siendo limitada, especialmente en Arequipa, donde no se han realizado estudios previos sobre esta tecnología.

Los tratamientos con electroremediación suelen requerir una duración prolongada para obtener resultados significativos, ya que cada ensayo puede demandar varios días de tratamiento continuo, lo que representa un desafío técnico y logístico.

3.4. Tipo y diseños de la investigación

3.4.1. Tipo de investigación

Los estudios explicativos tratan de establecer una conexión de causa y efecto entre dos o más fenómenos. Este tipo de investigación identifica las causas (variables independientes) que han ocasionado efectos observables y medibles (variable dependiente). En las tesis de nivel explicativo, se necesita sustentar las hipótesis (Hernández et al., 2014).

3.4.2. Diseño de investigación

Se empleó una investigación de tipo experimental puro. Es importante recordar que en un experimento se realizan observaciones bajo condiciones controladas, esto se consigue manipulando la variable independiente (densidad de corriente y tiempo de tratamiento) para visualizar sus efectos en la variable dependiente (disminución de la concentración de plomo y arsénico en relaves) (Hernández, et al., 2014).

Para comprobar la hipótesis propuesta en la investigación se utilizó un diseño experimental de tipo factorial de 2^2 (Tabla 6), ya que se considera el efecto de dos factores (X =densidad de corriente y Y =tiempo de tratamiento) con dos niveles de estudio (X_1 y X_2 ; Y_1 y Y_2), y tres replicas en cada combinación dándonos un tamaño experimental de 12 corridas. Tabla 7

Tabla 6
Factores y niveles relacionados al diseño factorial

Factores	Nombre	Niveles	Unidades
X	Densidad de corriente	X_1	mA/cm^2
		X_2	mA/cm^2
Y	Tiempo	Y_1	Días
		Y_2	Días

Variable dependiente de estudio

Concentración de Plomo (% de remoción)

Concentración de Arsénico (% de remoción)

Nota. Se consideró dos factores, dos niveles y tres replicas dándonos un tamaño experimental de 12 corridas

Tabla 7
Diseño factorial simple

Densidad de corriente (mA/cm^2)	Tiempo (días)	
	Y_1	Y_2
X_1	R_{111}	R_{121}
	R_{112}	R_{122}
	R_{113}	R_{123}
X_2	R_{211}	R_{221}
	R_{212}	R_{222}
	R_{213}	R_{223}

Nota. La tabla presenta un diseño factorial simple para evaluar la concentración de Pb y As ($R_{i,j,k}$) en función de dos factores: densidad de corriente $i = (X_1, X_2)$, tiempo de tratamiento $j = (Y_1, Y_2)$ y numero de réplicas $k = (1, 2 \text{ y } 3)$

3.5. Porcentaje de disminución de plomo y arsénico

Estas muestras fueron llevadas al laboratorio donde se analizaron para obtener las concentraciones de estos metales antes y después del tratamiento de electroremediación. Los resultados obtenidos serán posteriormente analizados para determinar el porcentaje de remoción de plomo y arsénico (Hernández et al., 2014).

$$\% \text{ remocion} = \frac{(C_o - C_f)}{C_o} \times 100$$

C_o = concentración inicial del contaminante

C_f = concentración final del contaminante

3.6. Tratamiento de datos

Se ha optado por utilizar el programa STATGRAPHICS para el diseño experimental, donde se aplicará el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar estadísticamente cada una de las variables relacionadas con la reducción de plomo y arsénico. También, se utilizarán diagramas de Pareto, contornos de superficie de respuesta, efectos principales e interacciones. Estas herramientas permitirán visualizar y analizar diversos aspectos de los datos obtenidos en el experimento.

3.6.1. Análisis de varianza (ANOVA)

Es una técnica estadística utilizada en la investigación para contrastar hipótesis (Hernández, et al., 2014).

El análisis de varianza (ANOVA), se emplea cuando se tiene dos o más variables independientes (densidad de corriente y tiempo de tratamiento), estas variables serán evaluadas con el fin de determinar si hay o no efectos sobre la variable dependiente (concentración de plomo y arsénico).

3.7. Población y Muestra

3.7.1. Población

La población está constituida por la superficie total del relave siendo aproximadamente 2170.25 m² y 8941.43 m³ de relave del pasivo ambientales minero Kiowa abandonados por la ex unidad minera Yarabamba S.A. ubicado en el distrito de Quequeña, provincia de Arequipa.

3.7.2. Muestra

La muestra consiste en 25 kg de relave, obtenidos de seis puntos de muestreo a una profundidad de 20 cm. De cada uno de estos puntos se extrajeron submuestras que se combinaron para formar una muestra compuesta, la cual se dividió en muestras representativas. Todo el procedimiento se realizó conforme a los lineamientos establecidos en la guía para muestreo de suelo R.M. N° 085-2014-MINAM.

3.8. Métodos ,instrumentos de recolección de datos y materiales

3.8.1. Métodos de recolección y análisis de datos experimentales

- Se realizó una observación directa del fenómeno. Posteriormente, se tomaron muestras en campo para analizar los parámetros.
- Análisis de las corridas experimentales en laboratorio.
- Desarrollo de múltiples repeticiones del proceso experimental, "corrida experimental".

3.8.2. Instrumentos utilizados en la recolección de información

- Informes de las muestras llevadas a laboratorio para su análisis.
- Mapas de ubicación y de campo ayudaron a identificar el lugar de trabajo donde fueron extraídas las muestras.
- Legislación vigente del Ministerio de Energía y Minas y Ministerio Del Ambiente que aporta al proyecto de investigación:
- Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo D.S. N° 011-2017-MINAM.
- Ley Que Regula Los Pasivos Ambientales En Minería Ley N° 28271
- Reglamento de pasivos ambientales en actividad minería D.S. N° 059 - 2005 - EM.
- Guía para el muestreo de suelos R.M. N° 085 – 2014 – MINAM

3.8.3. Materiales y equipos

- Equipos: Cámara fotográfica, impresora, computadora, GPS, pH metro, multímetro, balanza, fuente de alimentación, telemetro laser, equipos de protección personal.
- Materiales de gabinete: Útiles de escritorio, libros, papers, artículos científicos, tesis.
- Materiales para muestreo: Wincha, pala, pico, libreta de campo, bolsas de plástico, saco, balanza de mano.
- Materiales para tratamiento de relaves. Electrodo de grafito, cables cocodrilo y banano, pipeta, piceta, vaso precipitado, espátula, bolsas de ziploc.
- Reactivos: Agua destilada, ácido acético glacial al 99.5%.

3.8.4. Toma de muestras

El muestreo se realizó conforme a lo establecido por el Ministerio del Ambiente mediante la Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM (guía para muestreo de suelo). Se empleó el tipo de muestreo de identificación según las pautas de la guía, debido a la disponibilidad de información previa del sitio.

La ubicación de los puntos de muestreo de identificación fue escogida aleatoriamente, debido a que el área es homogénea y menor a cinco hectáreas, si el área supera las cinco hectáreas se sigue otros lineamientos (N° 085-2014-MINAM, Tabla 8).

Tabla 8
Coordenadas de los puntos de muestreo de identificación

Puntos de muestreo	Coordenadas Geográficas	
	Latitud	Longitud
M-1	-16.533343	-71.472387
M-2	-16.533544	-71.472458
M-3	-16.533389	-71.472229
M-4	-16.533608	-71.472195
M-5	-16.533459	-71.472324
M-6	-16.533651	-71.471731

Nota. Coordenadas del PAM Kiowa tomadas con GPS

3.8.4.1. Número de puntos de monitoreo

El número de puntos de muestreo depende del área de interés en hectáreas. El área de la superficie total del PAM Kiowa es de 2170.25 m², equivalente a 0.217 hectáreas, superando las 0.1 hectáreas, por lo que le corresponden seis puntos de muestreo (N° 085-2014-MINAM, Tabla 8). Las seis submuestras representativas fueron tomadas a una profundidad de 20 cm para obtener muestras frescas. Tabla 9

Tabla 9
Número mínimo de puntos de muestreo de identificación

Área de potencial Interés (ha)	Puntos de Muestreo En total
0.1	4
0.5	6
1	9
2	15
3	19
4	21
5	23
10	30
15	33
20	36
25	38
30	40
40	42
50	44
100	50

Nota. Número de puntos de muestreo a partir del área de interés en hectáreas. Información obtenida de Guía para muestreo de suelos MINAM 2014

Tabla 10
Profundidad de muestreo

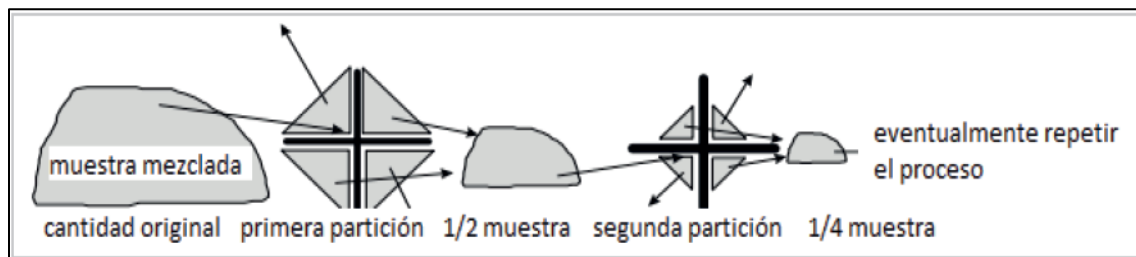
Uso del suelo	Profundidad del muestreo (capas)
Suelo Agrícola	0 – 30 cm
	30 – 60 cm
Suelo Residenciales / Parque	0–10 cm
	0– 30 cm
Suelo Comercial/ industrial / Extractivo	0 – 20 cm

Nota. Los procesos mineros están dentro de suelos de uso industrial. Información obtenida de Guía para muestreo de suelos MINAM 2014.

3.8.4.2. Método de cuarteo

Se tomaron manualmente seis submuestras a una profundidad de 20 cm, extrayendo aproximadamente 4.2 kg por punto. Estas submuestras se mezclaron para obtener una muestra compuesta de 25 kg. La muestra compuesta se dividió utilizando el método del cuarteo, conforme a la Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM, para obtener muestras representativas que serán llevadas al laboratorio y utilizadas en la investigación (Figura 10).

Figura 10
Método del cuarteo



Nota. Este método divide la muestra en cuatro partes iguales y se descartan dos partes opuestas. Las dos partes restantes se mezclan y se repite hasta obtener la cantidad deseada para el análisis. Información obtenida de Guía para muestreo de suelos MINAM 2014

Figura 11
Toma de muestras en el PAM Kiowa y cuarteo del relave



Nota. En la imagen de la izquierda se están extrayendo las muestras de relave siguiendo los lineamientos de la guía de muestreo de suelo. En la imagen de la derecha se observa el método de cuarteo, utilizado con el fin de obtener una mezcla homogénea para su posterior análisis.

3.8.4.3. Análisis de las muestras

Las muestras representativas obtenidas por muestreo de identificación serán llevadas al laboratorio, esto permitirá verificar el contenido de metales pesados y la caracterización del suelo (textura, % de humedad, granulometría, pH, conductividad eléctrica).

3.9. Metodología usada en la investigación

3.9.1 Método científico

Es un enfoque de investigación sistemático y estricto utilizado para generar conocimiento .

El método hipotético-deductivo se emplea en la investigación científica para formular teorías o hipótesis basadas en teorías existentes, con el fin de resolver problemas planteados y verificar estas ideas mediante la observación y la experimentación (Hernández et al., 2014).

Se planearon procesos, los cuales se detallan a continuación:

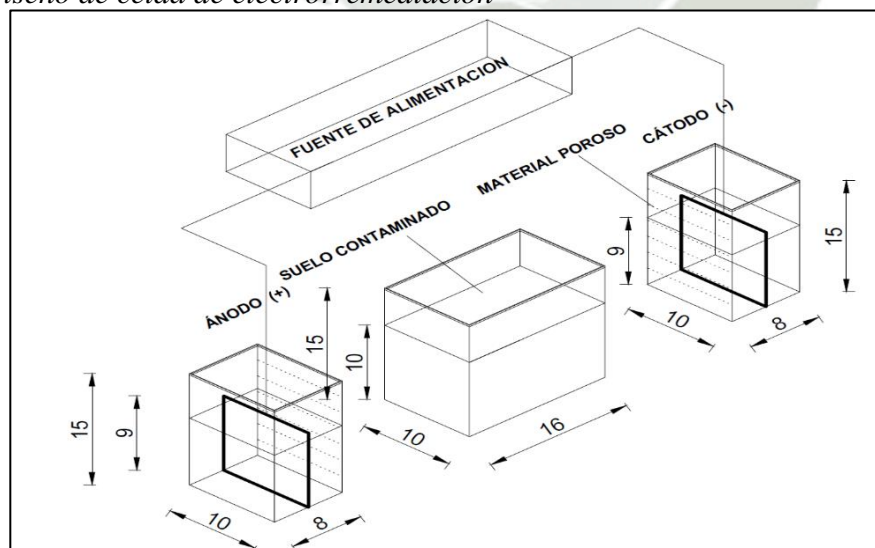
3.9.2. Diseño de la celda de electroremediación

Se construyó una celda rectangular de electroremediación utilizando vidrio de 5 mm de grosor, con dimensiones de 32 cm de largo, 10 cm de ancho y 15 cm de alto. Esta celda se dividió en tres secciones: una central para la muestra (relave Kiowa) previamente hidratada, con dimensiones de 16 cm de largo, 10 cm de ancho y 15 cm de alto, y dos cámaras anódica y catódica de 8 cm de largo, 10 cm de ancho y 15 cm de alto cada una. Para evitar la contaminación de las cámaras electrolíticas por la muestra de relave, se utilizaron dos placas de material acrílico de 10 cm de ancho y 17 cm de alto, perforadas con orificios de medio centímetro de diámetro y envueltas con papel filtro Whatman N° 41.

Se utilizaron placas de grafito, con dimensiones de 10 cm de largo y 10 cm de ancho, y un espesor de 6 mm, las cuales se usaron como electrodos.

Figura 12

Diseño de celda de electroremediación



Nota. Esquema de un sistema de electroremediación con ánodo, cátodo y suelo contaminado conectados a una fuente de alimentación.

3.9.3. Tratamiento de la muestra a remediar

3.9.3.1. Preparación de la solución humectantes

Se preparó la solución de ácido acético glacial (CH_3COOH) al 0.1 M, (Anexo 8) siendo una concentración baja. El ácido acético glacial al 99.5 % es útil en experimentos químicos que requieren acidez moderada (Ramos, 2019). Se midió 5.75 mL de ácido acético glacial con concentración 99.5%, y se aforó a 1000 mL en agua destilada.

3.9.3.2. Pretratamiento de las muestras de relave

El relave se desfragmentó de manera manual y se dejó secar durante un día completo, posteriormente, se humectó en relación 1:0.3 (g de suelo: mL de solución), lo que indica que por cada gramo de suelo se necesitan 0.3 mililitros de la solución (Ramos, 2019).

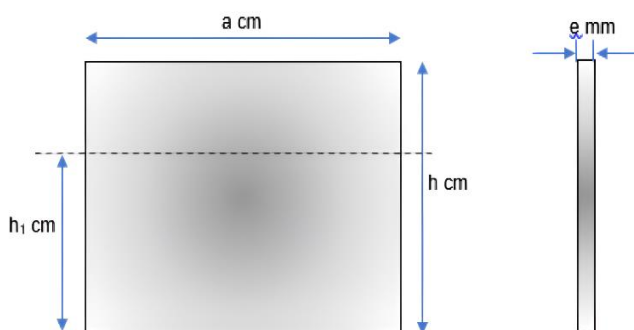
Posteriormente se mezcló uniformemente por varios minutos hasta obtener una pasta. La mezcla homogeneizada se dejó en reposo por 12 horas.

3.9.4. Determinación del área de los electrodos

Los electrodos de grafito tienen dimensiones de 10 cm x 10 cm. De estos, la porción sumergida en la solución mide 9 cm x 10 cm, lo que resulta en un área efectiva de 90 cm² por electrodo. Con dos electrodos, el área total efectiva es de 180 cm² (Caballero, 2022).

Figura 13

Dimensiones de electrodos utilizados



Nota. Las dimensiones del electrodo utilizado en el proceso experimental se definen por la altura total del electrodo h y la altura sumergida h_1 en centímetros. Información extraída de "Influencia de la densidad de corriente eléctrica y área efectiva en la remoción de arsénico de un relave minero mediante la electrorremediación" (Caballero, 2022).

3.9.5. Cálculos de la densidad de corriente durante el método de electroremediación

Para el cálculo de la densidad de corriente utilizaremos las siguientes fórmulas

$$\text{Densidad de corriente (mA/cm}^2\text{)} = \frac{\text{Amperaje (mA)}}{\text{area de electrodos (cm}^2\text{)}}$$

Se instaló una fuente de alimentación a 30 V usando 3000 mA y 5000 mA, las densidades de corriente obtenidas son:

Tabla 11

Densidad de corriente usadas durante el proceso de electroremediación

Voltaje aplicado (V)	Amperaje aplicado (mA)	Área de electrodos (cm ²)	Densidad de corriente (mA/cm ²)
30	3000	180	16.67
	5000	180	27.78

Nota. El amperaje y voltaje nos da la fuente de poder. Para calcular la densidad de corriente se divide el amperaje con el área de electrodos

3.9.6. Instalación de la celda de electroremediación

La figura 14 muestra el proceso de experimentación del sistema de electroremediación, donde se observan tres compartimentos. En el central se colocó el relave previamente humectado hasta una altura de 10 cm (2 kg). En las celdas anódica y catódica se colocaron los electrodos de grafito, distanciados 24 cm uno del otro.

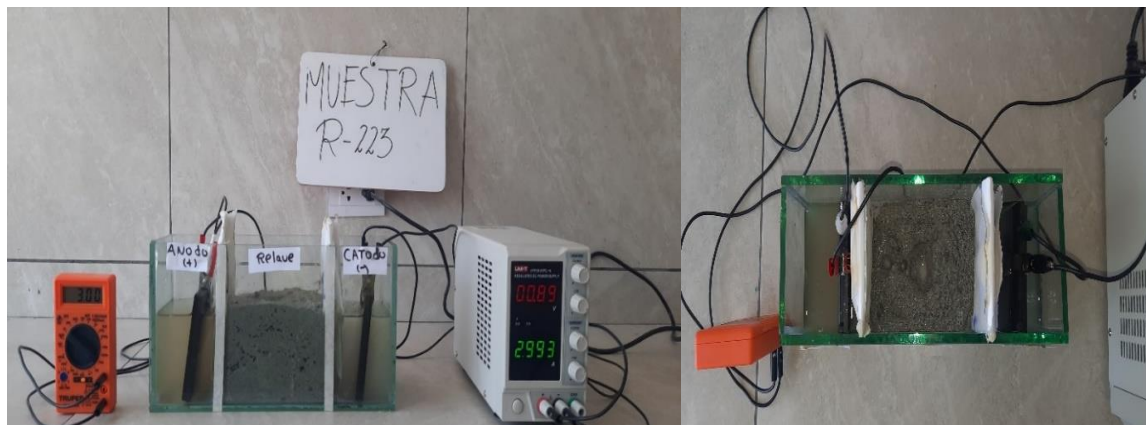
Estas celdas electrolíticas se llenaron hasta una altura de 9 cm, quedando 1 cm por debajo del nivel del relave a tratar, para evitar que la mezcla se combinara con las soluciones. Además, el volumen de agua destilada en el ánodo y de ácido acético en el cátodo se cambió cada 24 horas para mantener la conductividad eléctrica y controlar el pH del fluido catódico (Ghobadi et al., 2021).

Los electrodos de grafito estaban conectados a una fuente de alimentación (marca UNI-T 32/5A) y a un multímetro digital (Truper) para medir la intensidad de corriente.

Se empleó un medidor de pH Hanna HI-98103 para controlar el pH tanto del relave como de los líquidos, y se midió la conductividad eléctrica (CE) del ánodo y cátodo utilizando un conductímetro de la marca TDS&CE. La medición de pH y conductividad eléctrica de los fluidos anódicos y catódicos se realizó cada 12 horas al insertar directamente los sensores. (Anexo 7)

Figura 14

Proceso de experimentación del sistema de electroremediación



Nota. En la imagen de la izquierda, se observa el sistema de electroremediación en funcionamiento, y en la derecha se muestra una vista superior de la celda electrolítica, donde la zona anódica presenta un color más oscuro en comparación con la zona del cátodo.

3.9.7. Tiempo de tratamiento

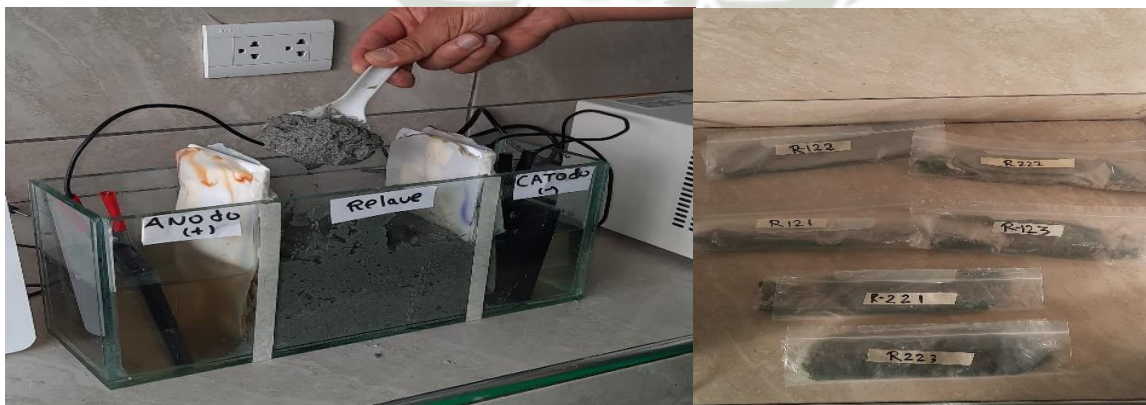
Los tiempos de tratamiento se ajustaron en función de los resultados obtenidos en estudios anteriores. El tiempo de tratamiento usado en esta investigación fueron de 2 días y 5 días.

3.9.8. Finalización de proceso y traslado de muestras

Transcurridos los días de experimentación se retiró el relave de la celda y se mezcló de manera homogénea, dichas mezclas se llenaron en bolsas herméticas en cantidades de 200 g para ser llevadas al laboratorio y analizar la nueva concentración de plomo y arsénico.

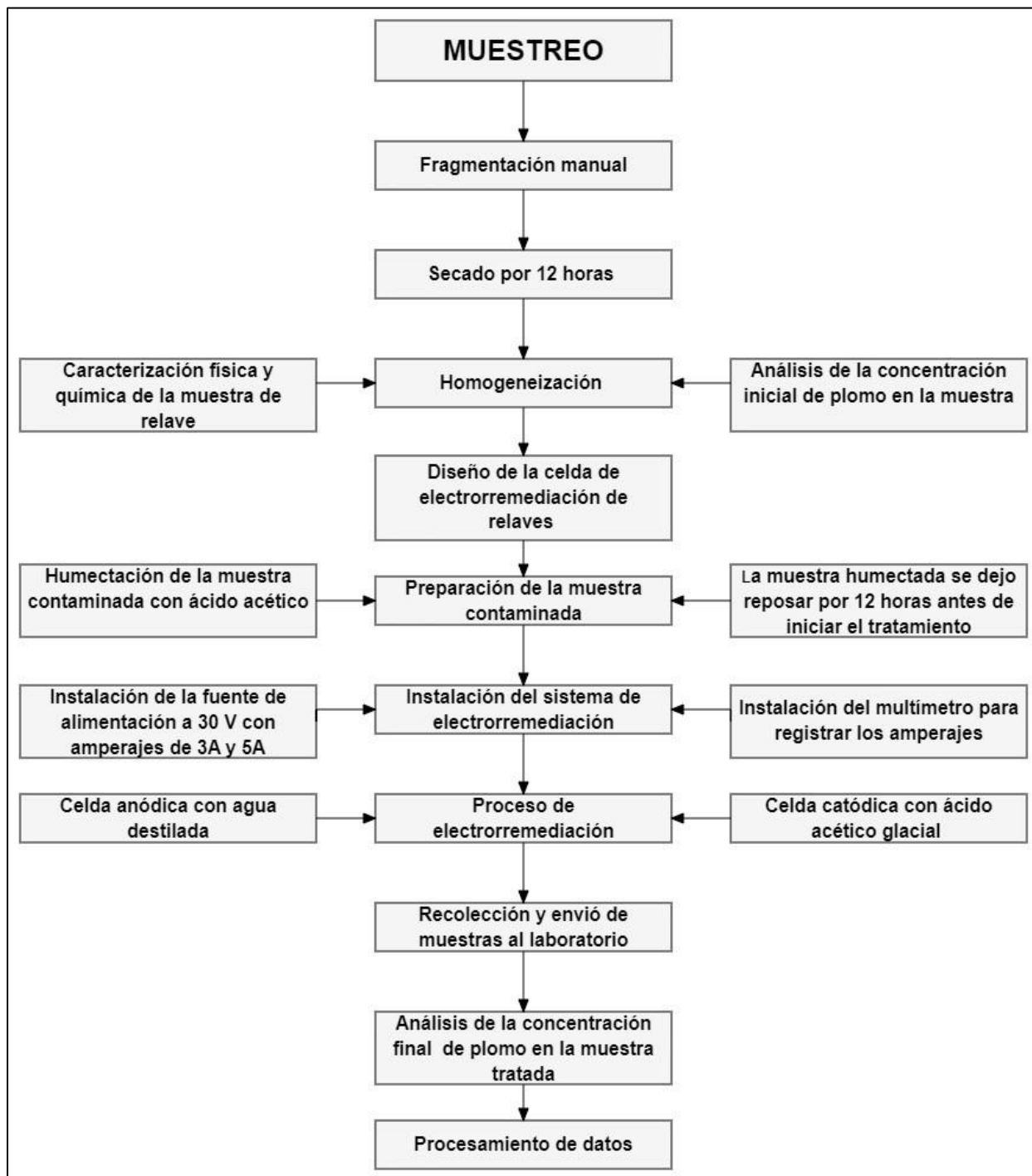
Figura 15

Finalización del proceso



Nota. En la imagen de la izquierda se aprecia término del proceso de electroremediación donde la muestra es retirada y homogeneizada. En la izquierda se observa el etiquetado de muestras para trasladarlo al laboratorio.

Figura 16
Proceso experimental detallado



Nota. Proceso experimental detallado, realizado desde la toma de muestra hasta la finalización del proceso



CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la remoción de plomo y arsénico en relaves provenientes del pasivo ambiental minero Kiowa, mediante remediación electrocinética, variando la densidad de corriente y el tiempo de proceso.

4.2. Tipo de materiales en la ejecución de los ensayos de electroremediación.

Las especificaciones de los materiales utilizados en la construcción de la celda de electroremediación se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 12

Parámetros iniciales del proceso de electroremediación de relaves

Parámetros	Variable
Masa del relave a tratar	2 kg
Relación de la humectación (g/ml)	1/0.3
Solución del ánodo	Agua destilada
Solución del cátodo	Ácido acético glacial al 0.1 M
Concentración inicial de plomo	1084.4 mg/kg
Concentración inicial de arsénico	539.25 mg/kg
Diferencia de potencial (V)	30 V
Amperaje (mA)	3000 mA
Amperaje (mA)	5000 mA
Electrodos	Grafito
Separación de electrodos	24 cm
Área sumergida de los electrodos	$(10 \text{ cm} * 9 \text{ cm}) = 90 \text{ cm}^2$
Área total de los electrodos	$(90 \text{ cm}^2 * 2) = 180 \text{ cm}^2$
Tiempo de proceso (días)	2
Tiempo de proceso (días)	5

Nota. Parámetros a tomar en cuenta al momento de realizar el proceso de electroremediación

4.3. Características de los relaves pertenecientes al PAM Kiowa

Se realizaron pruebas de caracterización en una muestra de relave de 200 gramos, la cual fue enviada al laboratorio de análisis (Anexo 2 y 3). Los resultados de esta caracterización proporcionaron los siguientes parámetros:

Tabla 13
Parámetros de análisis del suelo

Ensayo	Valor	Unidad
pH	5.89	
Conductividad	815.00	uS/cm
Humedad	7.31	%

Nota. Las muestras fueron evaluadas antes de iniciar el proceso de electroremediación para obtener los parámetros iniciales.

En la Tabla 13 se muestran los resultados del análisis de los relaves antes de iniciar el proceso de electroremediación, registrando un pH de 5.89. Este valor indica una ligera acidez, aunque no es extremadamente baja. Esto sugiere la posible presencia de minerales sulfurados, como la pirita, que podrían estar liberando ácido sulfúrico y sulfato de hierro, lo que llevaría a la acidificación del entorno circundante (Contreras & Ramírez, 2023).

Una conductividad eléctrica de 815 $\mu\text{S}/\text{cm}$ es considerablemente elevada, implica una marcada concentración de sales disueltas. Esto puede ser el resultado de la lixiviación de minerales y la disolución de sales durante las operaciones de procesamiento del mineral (Contreras & Ramírez, 2023).

Los resultados del análisis revelan que el relave minero tiene un contenido de humedad del 7.31 %, lo que sugiere una notable capacidad de absorción de agua en sus poros, favoreciendo la electroósmosis (Contreras & Ramírez, 2023).

4.4. Resultado del análisis granulométrico de la muestra- relave Kiowa

Se realizó un análisis granulométrico utilizando el método de tamizado para identificar la composición de la muestra a tratar y comprender cómo la distribución del tamaño de las partículas en el relave podría afectar la efectividad del proceso de electroremediación (Anexo 1). Para el análisis se emplearon 500 g de relave.

Tabla 14

Análisis Granulométrico por Tamizado

Tamiz N°	Abertura (mm)	Peso retenido (gf)	Porcentaje retenido (%)	Peso retenido acumulado (%)	Pasante (%)
6 "	150.0	-	-	-	100.00
5"	125.0	-	-	-	100.00
4"	100.0	-	-	-	100.00
3 ½ "	89.0	-	-	-	100.00
3"	75.0	-	-	-	100.00
2 ½"	63.0	-	-	-	100.00
2"	50.0	-	-	-	100.00
1 ½	37.5	-	-	-	100.00
1"	25.0	-	-	-	100.00
¾"	19.0	-	-	-	100.00
½"	12.5	-	-	-	100.00
⅜"	9.5	-	-	-	100.00
¼"	6.3	-	-	-	100.00
N°4	4.75	-	-	-	100.00
N°8	2.36	-	-	-	100.00
N°10	2.00	-	-	-	100.00
N°20	0.85	0.43	0.09	0.09	99.91
N°30	0.60	0.28	0.06	0.15	99.85
N°40	0.425	0.54	0.11	0.26	99.74
N°50	0.300	0.75	0.15	0.41	99.59
N°60	0.250	0.80	0.16	0.57	99.43
N°80	0.180	4.79	0.96	1.53	98.47
N°100	0.150	8.52	1.70	3.23	96.77
N°200	0.075	69.07	13.81	17.04	82.96
Bandeja		414.82	82.96	100.00	0.00

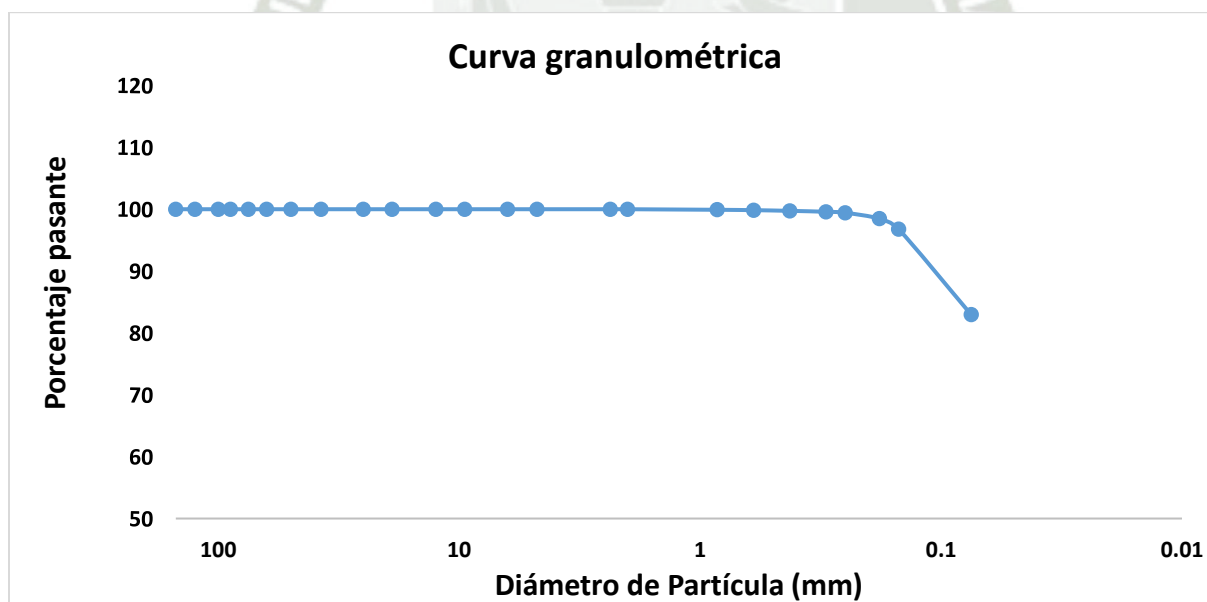
Nota. El 82.96 % de las partículas alcanzó la bandeja, mientras que el 17.04 % permaneció en los tamices, lo que indica una distribución granulométrica fina. El peso fraccionado (gf) corresponde a la masa del material retenido en los tamices, expresada en gramos.

Figura 17
Análisis granulométrico por tamizado



Nota. En la imagen de la izquierda se observa el pesaje del relave con contenido de humedad, mientras que en la derecha se muestra el proceso de tamizado de las muestras para determinar la distribución granulométrica

Figura 18
Curva granulométrica



Nota. La curva demuestra que casi todas las partículas son retenidas hasta alcanzar un diámetro de partícula de aproximadamente 0,1 mm, momento en el cual el porcentaje de paso disminuye. Esto indica una presencia sustancial de partículas finas en la muestra.

Tabla 15

Peso fraccionado por cada intervalo de tamiz y porcentaje de bloques, grava, arena y finos en la Muestra

Peso total (gf)	500.00	Granulometría	Porcentaje (%)
Peso > 3"	0.0	Bloque	0.00
Peso < 3" y > 3/4"	0.0	Bloque	0.00
Peso < 3/4" y > N°4	0.0	Arena	0.00
Peso < N°4 y > N°200	85.2	Arena	17.04
Peso < N°200	414.8	Finos	82.96

Nota. El 82.96 % de las partículas alcanzó la bandeja, mientras que el 17.04 % permaneció en los tamices, lo que indica una distribución granulométrica fina. De los 500 g de muestra, 414.8 g pasaron a la bandeja, mientras que 85.2 g quedaron retenidos en los tamices.

En la Tabla 15 se muestra que los relaves contienen un 17.04 % de arena y un 82.96 % de finos. La granulometría de los finos está compuesta por limos y arcillas, que se caracterizan por su baja a moderada permeabilidad.

La curva granulométrica en la Figura 18 muestra la distribución del tamaño de las partículas, indicando que el 82.96 % del material pasó por todos los tamices. Este dato es relevante para el proceso, ya que los relaves con una alta proporción de partículas finas tienen una mayor capacidad para retener contaminantes (Caballero,2022).

Los relaves del PAM Kiowa, al contener partículas más finas que la arena, pueden ser fácilmente transportados por el viento a distancias mayores, lo que aumenta el riesgo de contaminación de suelos agrícolas cercanos y causar daños al medio ambiente. Además, la inhalación de estas partículas podría ocasionar problemas respiratorios e intoxicación por metales pesados en los residentes del pueblo Fernando Belaunde y en otras comunidades cercanas

Los relaves con partículas finas, complica la separación y extracción de los metales valiosos, resultando en costos más elevados. Por ende, los relaves del PAM Kiowa son muy difíciles de explotar y el beneficio es limitado (Caballero,2022).

4.5. Resultado del análisis de clase textural de la muestra - relave Kiowa

Para el análisis, se tomaron 250 gramos de relave y se llevaron al laboratorio, donde se sometieron al método de Bouyoucos, siguiendo las pautas establecidas en la norma NOM-021-RECNAT, AS-09 (2001). (Anexo 4)

Tabla 16
Parámetros de análisis de textura

Clase textural	Resultados	Unidad
Arena	30	%
Limo	65	%
Arcilla	5	%
Clase textural	Franco limoso	

Nota: Los resultados fueron corroborados en el triángulo textural USDA

El triángulo textural USDA nos releva una clase textura franco limosa, compuesta por diferentes proporciones de arena, limo y arcilla. Los suelos de textura franco limosa tienen una permeabilidad moderada, lo que permite ciertos flujos a través de ellos. Este aspecto es ventajoso durante el proceso de electroremediación, ya que facilita la circulación del electrolito y la distribución uniforme de la corriente eléctrica (Saini et al., 2021).

La capacidad de retención de agua de este tipo suelo es notable, lo que contribuye a mantener la humedad requerida durante el proceso de electroremediación, facilitando la movilidad de los contaminantes y la transferencia de iones durante la aplicación de corriente eléctrica (Saini et al., 2021).

En un depósito de relave franco limoso, las partículas finas tienden a sedimentarse lentamente en las capas inferiores. Con el tiempo, esto provoca que la concentración de metales pesados sea mayor en las partes profundas del relave, debido a la sedimentación de partículas finas y la adsorción de contaminantes (Saini et al., 2021).

4.6. Resultado del análisis de metales pesados de la muestra - relave Kiowa

La composición del relave del PAM Kiowa muestra una alta concentración de plomo (Pb) y arsénico (As), como se detalla en la Tabla 17 (Anexo 3). Para determinar sus contenidos, se empleó la técnica ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente), la cual permite cuantificar la concentración de diversos elementos metálicos en la muestra analizada.

Tabla 17

Metales pesados de la muestra de relave Kiowa

Parámetros de Calidad	Unidad	Resultados
Aluminio	mg/kg	1105.40
Antimonio	mg/kg	< 0.20
Arsénico	mg/Kg	539.26
Bario	mg/Kg	21.79
Berilio	mg/Kg	<0.03
Bismuto	mg/Kg	3.48
Boro	mg/Kg	<0.10
Cadmio	mg/Kg	2.36
Calcio	mg/Kg	908.4
Cerio	mg/Kg	7.29
Cobalto	mg/Kg	2.31
Cobre	mg/Kg	478.99
Cromo	mg/Kg	13.30
Estaño	mg/Kg	<0.10
Estroncio	mg/Kg	11.69
Fosforo	mg/Kg	357.59
Hierro	mg/Kg	16133.76
Litio	mg/Kg	<0.010
Magnesio	mg/Kg	308.28
Manganeso	mg/Kg	33.33
Mercurio	mg/Kg	<0.04
Molibdeno	mg/Kg	<0.10
Níquel	mg/Kg	0.83
Plata	mg/Kg	<0.10
Plomo	mg/Kg	1084.40
Potasio	mg/Kg	1265.83
Selenio	mg/Kg	<0.20
Silicio	mg/Kg	114.19
Sodio	mg/Kg	580.05
Talio	mg/Kg	<0.04
Titanio	mg/Kg	71.81
Torio	mg/Kg	<0.03
Uranio	mg/Kg	<0.03
Vanadio	mg/Kg	5.22
Zinc	mg/Kg	129.56

Nota. Contenido de metales pesados en los relaves del PAM Kiowa antes de iniciar con el proceso de electroremediación.

En la Tabla 18 se comparan los límites establecidos en las regulaciones ambientales para la conservación de suelos con la concentración de Pb y As, debido a las características físicas similares entre el relave y el suelo (Saini et al., 2021).

Los resultados muestran que las concentraciones de estos metales exceden los límites permitidos.

Tabla 18

Concentración inicial de Pb y As y estándares de calidad ambiental en suelos

Metal	Concentración inicial (mg/kg)	Suelo agrícola	Suelo residencias/ parques	Suelo comercial/ industrial/ extractivo
Arsénico	539.26	50	50	140
Plomo	1084.40	70	140	800

Nota. Estándares de calidad ambiental para suelo, DS N° 011-2017

4.7. Remoción de Pb y As en relaves del pasivo ambiental minero Kiowa

La eliminación de plomo y arsénico de los relaves mineros se evaluó mediante el indicador de porcentaje de remoción. Este se calculó a partir de la diferencia entre las concentraciones inicial y final de estos metales después de aplicar electrorremediación. Las concentraciones finales y los porcentajes de remoción se compararon con los estándares de calidad ambiental para suelo establecidos en el DS N° 011-2017.

4.8. Resultados del plomo obtenidos después de la electrorremediación

La Tabla 19 muestra la concentración final de plomo, mientras que la Tabla 20 presenta el porcentaje de remoción de plomo (ver Anexo 5).

Tabla 19
Resultados del plomo obtenidos después de la Electrorremediación

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (días)	
	Concentración de plomo (mg/kg)	
	2 días	5 días
16.67	828.92	604.88
	821.54	589.05
	827.83	597.61
	681.11	391.58
27.78	689.14	404.26
	696.08	398.52

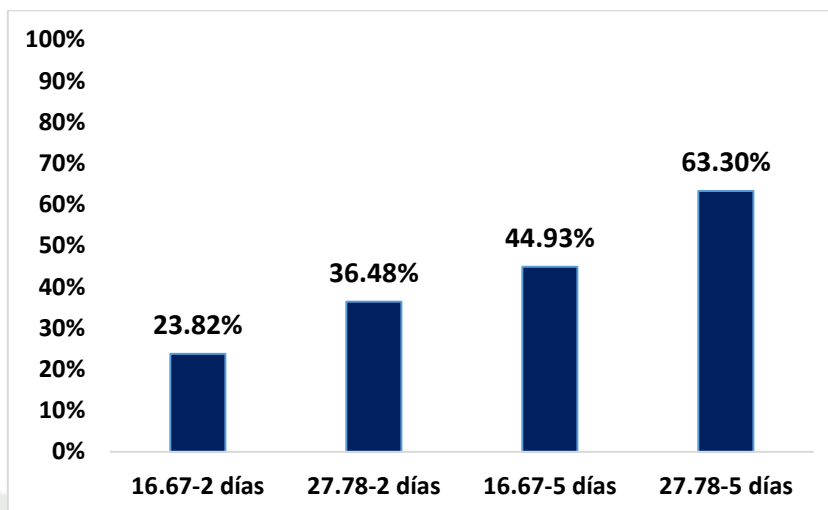
Nota. La concentración inicial de plomo antes de comenzar la experimentación es de 1084.40 mg/kg, observándose una reducción significativa tras el proceso.

Tabla 20
Porcentaje de remoción de Pb

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (días)	Porcentaje de remoción de Plomo			
		R1	R2	R3	Promedio
16.67	2	23.56%	24.24%	23.66%	23.82%
27.78	2	37.19%	36.45%	35.81%	36.48%
16.67	5	44.22%	45.68%	44.89%	44.93%
27.78	5	63.89%	62.72%	63.28%	63.30%

Nota. Porcentaje de remoción de plomo en función de las variables (densidad de corriente y días de proceso) y el número de replicas.

Figura 19
Promedio de remoción de Pb



Nota. Porcentaje de remoción de plomo en promedio por tratamiento Tabla 19

Los estándares de calidad ambiental para suelos (ECA) (Tabla 18) establecen límites específicos para la concentración de contaminantes según el uso del suelo: 800 mg/kg (23.23%) para uso industrial, 140 mg/kg (87.09%) para uso residencial, y 70 mg/kg (93.54%) para uso agrícola.

Los resultados del tratamiento para la remoción de plomo en relaves muestran que, para suelos industriales, el promedio de remoción cumple con la normativa establecida. Sin embargo, para suelos residenciales y agrícolas, el promedio de remoción no alcanza el estándar requerido. A pesar de esto, el máximo porcentaje promedio alcanzado fue del 63.30%, lo que indica una mejora significativa en la reducción de plomo.

Esto sugiere que, mediante la optimización de los procesos de tratamiento, es posible obtener resultados más favorables, especialmente para suelos destinados a uso residencial y agrícola, donde actualmente no se cumplen los estándares establecidos por los ECA.

Tabla 21

Análisis de varianza para % remoción del plomo

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Densidad de corriente	722.146	1	722.146	1621.05	0.0000
B: Días de proceso	1722.48	1	1722.48	3866.58	0.0000
AB	24.396	1	24.396	54.76	0.0003
bloques	0.30365	2	0.151825	0.34	0.7241
Error total	2.67288	6	0.445481		
Total (corr.)	2472.0	11			

Nota. El análisis de varianza es una técnica estadística que compara las medias de dos o más grupos para determinar si son significativamente diferentes, donde el valor de R² es 99.892 %

La densidad de corriente (A) y los días de proceso (B) son factores altamente significativos en la remoción del plomo, con valores-P mucho menores que 0.05. La interacción entre estos factores (AB) también es significativa, con un valor-P de 0.0003, indicando que el efecto de la densidad de corriente depende del número de días de proceso y viceversa. Los bloques no tienen un efecto significativo, lo que sugiere que su variabilidad es insignificante en comparación con los otros factores.

El valor de R² es del 99.892%, lo que indica que aproximadamente el 99.892% de la variabilidad en la remoción del plomo es explicada por la densidad de corriente, los días de proceso y su interacción. Esto demuestra una alta capacidad del modelo para explicar la variabilidad observada. El análisis de varianza (ANOVA) confirma que la densidad de corriente, los días de proceso y su interacción tienen efectos significativos en el porcentaje de remoción de plomo, con valores-P menores a 0.05, lo que indica significancia con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 22

Coefficiente de Regresión para % remoción del plomo

Coefficiente	Estimado
Constante	-3.549
A: Densidad de corriente	0.796
B: Días de proceso	4.184
AB	0.171

Nota. Los coeficientes permiten entender cómo la densidad de corriente y los días de proceso influyen individualmente y conjuntamente en el porcentaje de remoción de plomo.

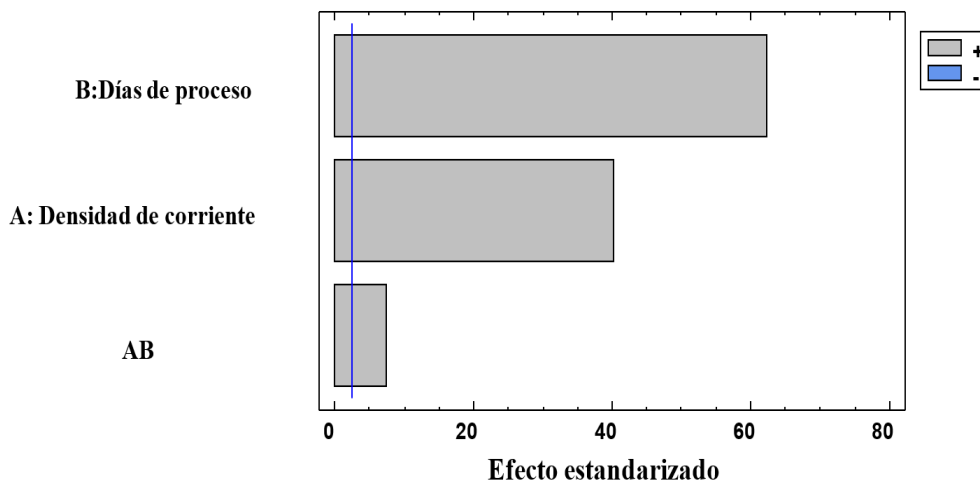
$$\% \text{ Remoción plomo} = -3.549 + 0.796A + 4.184B + 0.171(AB)$$

Los coeficientes en un modelo de regresión se utilizan para predecir el porcentaje de remoción de plomo en función de la densidad de corriente y los días de proceso. La constante representa el porcentaje de remoción de plomo estimado cuando tanto la densidad de corriente como los días de proceso son cero. El efecto de la densidad de corriente (Factor A) muestra cuánto cambia el porcentaje de remoción por cada unidad adicional de densidad de corriente, manteniendo constantes los días de proceso. De manera similar, el efecto de los días de proceso (Factor B) indica cuánto cambia el porcentaje de remoción por cada día adicional de proceso, manteniendo constante la densidad de corriente.

La interacción entre la densidad de corriente y los días de proceso refleja cómo la combinación de estos factores afecta al porcentaje de remoción de plomo. Si esta interacción es significativa, sugiere que el efecto de la densidad de corriente depende del número de días de proceso y viceversa.

Figura 20

Diagrama de Pareto estandarizado para % remoción de plomo



Nota. Los valores positivos (en gris), indican un aumento en la remoción de plomo, los valores negativos (en azul) indican que el factor disminuye la remoción de plomo, aunque no se observan en el gráfico,

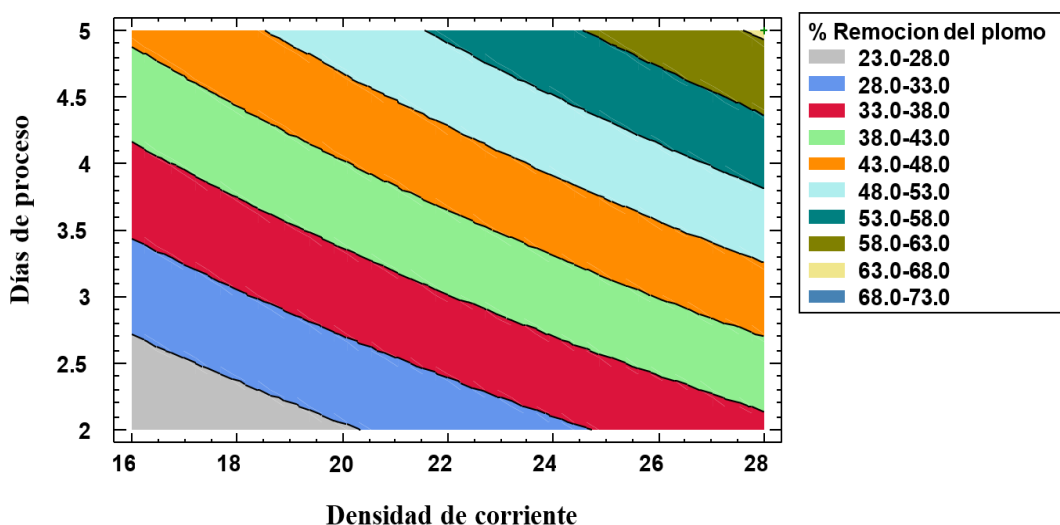
El diagrama de Pareto es una medida de cuánto cambia la variable de interés (remoción de plomo) en respuesta a un cambio en el factor específico, ajustado por la desviación estándar.

El factor Días de proceso (B) sobrepasa la línea de valor crítico, indicando un efecto significativo y el mayor impacto positivo estandarizado en la remoción de plomo. Aumentar los días de proceso aumenta notablemente la remoción de plomo.

El factor Densidad de corriente (A) también supera la línea de valor crítico, mostrando un efecto significativo, aunque menor en comparación con los días de proceso. Incrementar la densidad de corriente también incrementa la remoción de plomo, aunque en menor medida que los días de proceso.

La interacción entre la densidad de corriente y los días de proceso (AB) tiene un efecto menor que los factores individuales, pero sigue siendo relevante. Esto indica que la combinación óptima de ambos factores puede tener beneficios adicionales en la remoción de plomo.

Figura 21
Gráfica de la superficie de respuesta estimada



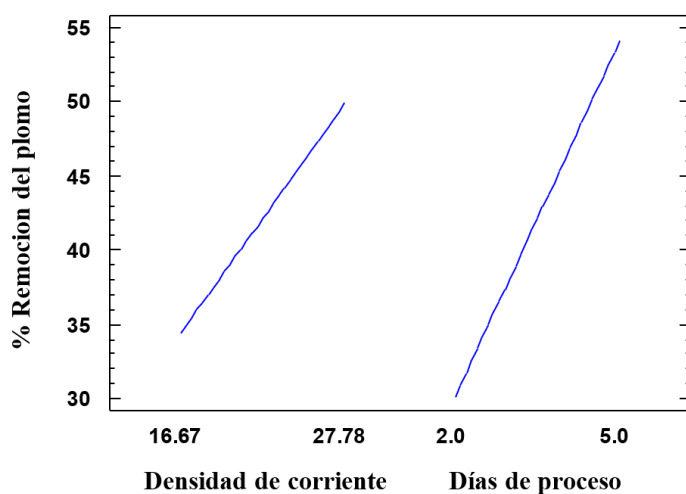
Nota. El gráfico de contornos ilustra cómo la densidad de corriente y los días de proceso influyen en el porcentaje de remoción de plomo.

En el rango de densidades de corriente menores (16-20 mA/cm²) y tiempos de proceso cortos (2-3 días), la remoción de plomo es relativamente baja, entre intervalos de 23-33%. Sin embargo, al extender el tiempo de proceso a 4-5 días manteniendo las mismas densidades de corriente, la eficiencia de remoción mejora considerablemente, alcanzando intervalos entre 33-43% de remoción, siendo el tiempo de proceso el factor más influyente.

En un rango intermedio de densidades de corriente (20-24 mA/cm²) y tiempos de proceso (3-4 días), se observa una mejora moderada en la eficiencia de remoción, con intervalos entre 38-48%. Las mayores eficiencias de remoción de plomo, (48-63%), se logran combinando densidades de corriente altas (24-28 mA/cm²) y tiempos de proceso prolongados (4-5 días). Esto indica que, para mejorar la remoción de plomo, es preferible operar con altas densidades de corriente y largos tiempos de proceso.

La interacción entre la densidad de corriente y los días de proceso es claramente positiva, ya que las combinaciones de estos valores resultan en mayores porcentajes de remoción de plomo. Se concluye que, para maximizar la remoción de plomo, se debe operar con densidades de corriente altas, en el rango de 26-28 mA/cm² o superiores, y extender el tiempo de proceso a 5 días.

Figura 22
Gráfica de efectos principales para % remoción de plomo



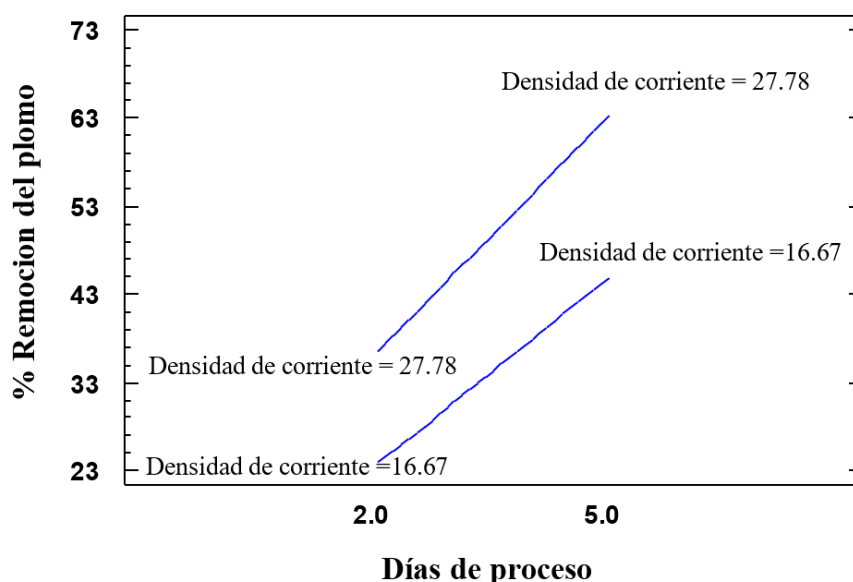
Nota. En el eje X (horizontal), la gráfica está dividida en dos secciones. La sección izquierda representa la densidad de corriente con dos niveles: 16.67 mA/cm² y 27.78 mA/cm². La sección derecha muestra los días de proceso con dos niveles: 2 días y 5 días.

La línea que representa el efecto de la densidad de corriente muestra que, aumentar la densidad de corriente de 16.67 a 27.78 mA/cm², incrementa el porcentaje de remoción de plomo aproximadamente del 35% al 50%. La pendiente positiva indica que la remoción de plomo mejora con el aumento en la densidad de corriente.

La línea que representa el efecto de los días de proceso muestra que, al aumentar el tiempo de proceso de 2 a 5 días, el porcentaje de remoción de plomo aumenta de manera significativa, pasando del 30% al 55%. La pendiente positiva en este caso también indica que un mayor número de días de proceso contribuye a una mayor remoción de plomo.

El aumento de la densidad de corriente y la extensión del tiempo de proceso resultan en una mayor remoción de plomo, y son parámetros críticos para optimizar el proceso.

Figura 23
Gráfica de interacción para % Remoción de plomo



Nota. Las dos variables independientes influyen conjuntamente en una variable dependiente, destacando como el efecto de una variable independiente cambia en función de los niveles de otra.

La interacción entre la densidad de corriente y los días de proceso influye significativamente en la remoción de plomo. No solo importan los valores individuales de cada factor, sino también su combinación para lograr una mayor eficiencia. La combinación de una alta densidad de corriente y un mayor número de días de proceso maximiza la eficiencia de remoción de plomo.

Se concluye que aumentar tanto los días de proceso como la densidad de corriente puede mejorar de manera efectiva los procesos electroquímicos y cumplir con los estándares de calidad requeridos.

Tabla 23*Valor óptimo*

Predicción	Inferior 95.0% Límite	Superior 95.0% Límite
63.6604	62.699	64.622

Tabla 24*Factores*

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Densidad de corriente	16.0	28.0	28.0
Días de proceso	2.0	5.0	5.0

Nota. El valor óptimo es el mejor resultado dentro de un conjunto de opciones, influenciado por diversos factores, que son elementos que contribuyen o afectan dicho resultado.

El análisis de optimización para maximizar la remoción de plomo indica que se puede alcanzar un valor óptimo de remoción del 63.660 %, con un intervalo de confianza del 95 % que varía entre el 62.699 % y el 64.622 %.

La densidad de corriente debe establecerse en aproximadamente 28 mA/cm², el valor más alto del rango evaluado (16.0 a 28.0 mA/cm²). Esto sugiere que una mayor densidad de corriente es favorable para la remoción de arsénico.

Es óptimo operar durante 5 días, el valor más alto dentro del rango evaluado (2.0 a 5.0 días). Esto sugiere que extender el tiempo de procesamiento al máximo proporciona los mejores resultados en términos de eficiencia de remoción.

4.9. Resultados del arsénico obtenidos después de la electroremediación

La Tabla 25 muestra la concentración final de arsénico, mientras que la Tabla 26 presenta el porcentaje de remoción de arsénico (ver Anexo 5).

Tabla 25

Resultados del arsénico obtenidos después de la Electroremediación

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (días)	
	% de reducción de arsénico (mg/kg)	
	2 días	5 días
16.67	472.66	437.18
	474.71	444.51
	469.43	446.35
	464.36	416.74
27.78	467.27	423.10
	459.56	420.73

Nota. La concentración inicial de arsénico antes de comenzar la experimentación es de 539.26 mg/kg, observándose una reducción significativa tras el proceso.

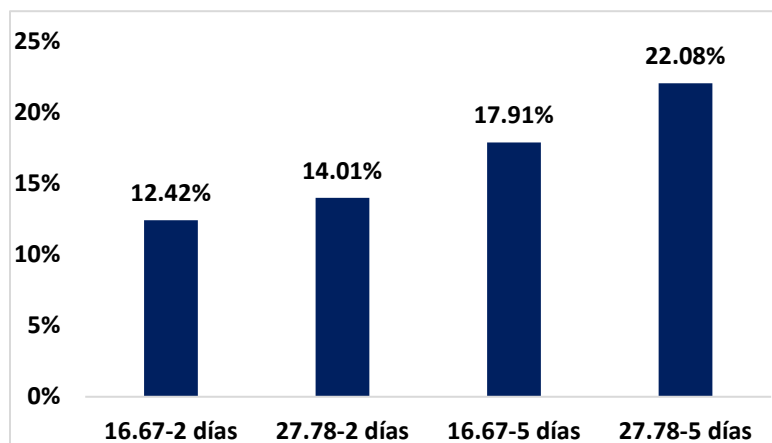
Tabla 26

Porcentaje de remoción de As

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo (días)	Porcentaje de Remoción de Arsénico			
		R1	R2	R3	Promedio
16.67	2	12.35%	11.97%	12.95%	12.42%
27.78	2	13.89%	13.35%	14.78%	14.01%
16.67	5	18.93%	17.57%	17.23%	17.91%
27.78	5	22.72%	21.54%	21.98%	22.08%

Nota. El promedio del porcentaje de remoción de arsénico está en función de las variables (densidad de corriente y días de proceso) y el número de replicas.

Figura 24
Porcentaje de remoción de arsénico



Nota. Porcentaje de remoción de arsénico en promedio por tratamiento Tabla 26.

Los estándares de calidad ambiental para suelos (ECA) (Tabla 18) establecen límites específicos para la concentración de contaminantes según el uso del suelo. Para suelos destinados a uso industrial, el límite máximo permitido es de 140 mg/kg (72.18 %); para uso residencial, el límite es de 50 mg/kg (90.73%); y para uso agrícola, se permite hasta 50 mg/kg (90.73%).

En cuanto al tratamiento para la remoción de arsénico, los resultados muestran que, para suelos industriales, residenciales y agrícolas, el promedio de remoción no alcanza el estándar requerido.

A pesar de esto, se observó que el máximo porcentaje promedio alcanzado fue del 22.08%, lo que indica que el proceso de electroremediación si logro reducir el arsénico.

Esto sugiere que, optimizando los procesos de tratamiento, es posible obtener resultados más favorables.

Tabla 27
Análisis de varianza para % remoción de arsénico

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Densidad de corriente	24.8256	1	24.8256	65.82	0.0002
B: Días de proceso	137.905	1	137.905	365.65	0.0000
AB	5.01813	1	5.01813	13.31	0.0107
bloques	1.59785	2	0.798925	2.12	0.2014
Error total	2.26288	6	0.377147		
Total (corr.)	171.61	11			

Nota. El análisis de varianza es una técnica estadística que compara las medias de dos o más grupos para determinar si son significativamente diferentes, donde el valor de $R^2 = 98.681\%$

La densidad de corriente (A) y los días de proceso (B) son factores altamente significativos en la remoción de arsénico, con valores-P menores que 0.05. La interacción entre estos factores (AB) también es significativa, con un valor-P de 0.0107, indicando que el efecto de la densidad de corriente depende del número de días de proceso y viceversa. Los bloques no tienen un efecto significativo, lo que sugiere que su variabilidad es insignificante comparada con la variabilidad explicada por los otros factores.

En este caso, el valor de R-cuadrada es del 98.681%, lo que significa que aproximadamente el 98.681% de la variabilidad en la remoción de arsénico puede ser explicada por los factores de densidad de corriente, días de proceso y su interacción. Esto indica una muy buena capacidad del modelo para explicar la variabilidad observada en los datos.

El análisis de varianza (ANOVA) confirma que la densidad de corriente, los días de proceso y su interacción tienen efectos significativos en el porcentaje de remoción de arsénico. En este caso, tres efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando un nivel de confianza del 95.0%.

Tabla 28
Coefficiente de regresión para % remoción de arsénico

Coefficiente	Estimado
Constante	8.977
A: Densidad de corriente	-0.013
B: Días de proceso	0.535
AB	0.078

Nota. Los coeficientes permiten entender cómo la densidad de corriente y los días de proceso influyen individualmente y conjuntamente en el porcentaje de remoción de arsénico.

$$\% \text{Remoción arsénico} = 8.977 - 0.013A + 0.535B + 0.078AB$$

La Constante representa el porcentaje estimado de remoción de arsénico cuando la densidad de corriente y los días de proceso son cero.

El efecto de la densidad de corriente (factor A) es negativo, reduciendo el porcentaje de remoción de arsénico en aproximadamente 0.013 unidades por cada unidad adicional de densidad de corriente, manteniendo constantes los días de proceso.

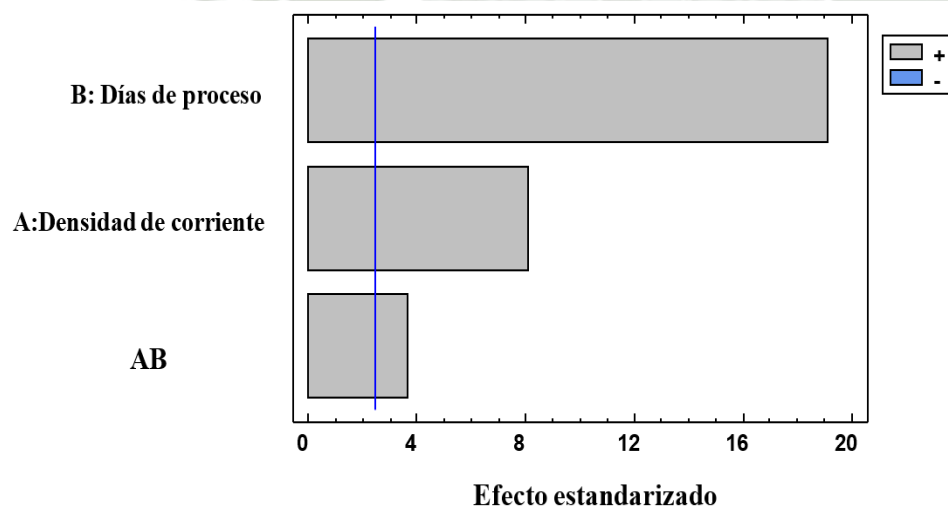
El efecto de los días de proceso (factor B) es positivo, incrementando el porcentaje de remoción de arsénico en aproximadamente 0.535 unidades por cada día adicional, manteniendo constante la densidad de corriente.

La interacción entre la densidad de corriente y los días de proceso es positiva, aumentando el porcentaje de remoción de arsénico en aproximadamente 0.078 unidades por cada unidad adicional de densidad de corriente y día de proceso juntos.

En resumen, extender la duración del proceso mejora la remoción de arsénico, mientras que aumentar la densidad de corriente tiene un efecto ligeramente negativo. Sin embargo, la interacción entre ambos factores tiene un efecto positivo en la remoción de arsénico.

Figura 25

Diagrama de Pareto estandarizado para % remoción de arsénico



Nota. Los valores positivos (en gris), indican un aumento en la remoción de arsénico, los valores negativos (en azul) indican que el factor disminuye la remoción de arsénico, aunque no se observan en el gráfico,

El diagrama de Pareto estandarizado se observa la magnitud y la importancia relativa de los efectos principales (A: Densidad de corriente, B: Días de proceso) y su interacción (AB) en la remoción de arsénico.

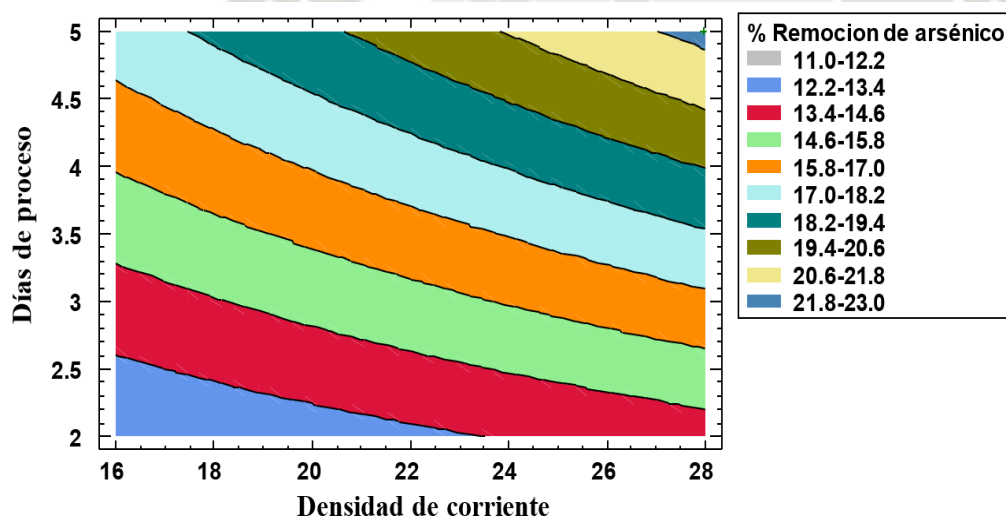
La barra de días de proceso cruza la línea de valor crítico por lo tanto tiene un efecto significativo en la remoción de arsénico. La longitud de la barra sugiere que los días de proceso es el factor más significativo, con un efecto mucho mayor comparado con los otros factores. Se puede inferir que aumentar los días de proceso tendrá un incremento significativo en la remoción de arsénico.

La densidad de corriente también tiene un efecto significativo en la remoción de arsénico, aunque no tan grande como el de los días de proceso. Lo que confirma que aumentar la densidad de corriente mejora la remoción de arsénico.

La interacción entre la densidad de corriente y los días de proceso también tiene un efecto significativo, pero menor comparado con los efectos principales individuales, lo que indica que hay una interacción entre estos dos factores.

Figura 26

Gráfica de contornos de la superficie de respuesta estimada



Nota. El gráfico de contornos ilustra cómo la densidad de corriente y los días de proceso influyen en el porcentaje de remoción de arsénico.

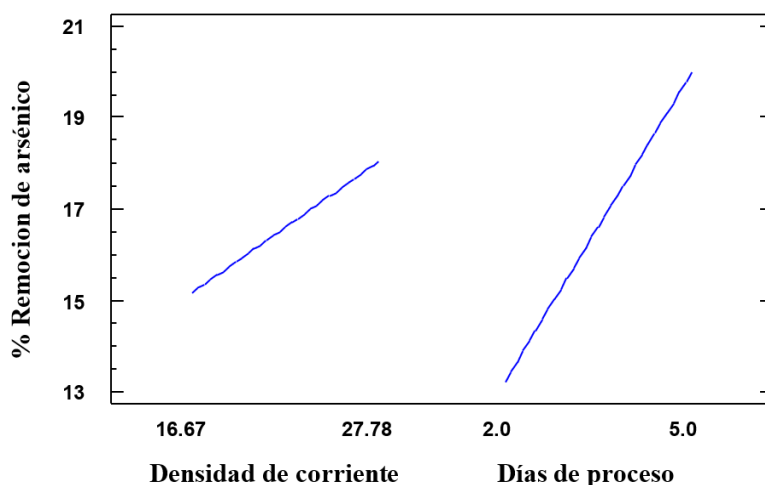
En el rango de densidades de corriente bajas ($16-20 \text{ mA/cm}^2$) y tiempos de proceso cortos (2-3 días), la remoción de arsénico es relativamente baja, entre intervalos de 11-15.8 %. Al extender el tiempo de proceso a 4-5 días manteniendo las mismas densidades de corriente bajas, la eficiencia de remoción mejora, alcanzando intervalos entre 15.8-19.4% de remoción.

En un rango intermedio de densidades de corriente ($20-24 \text{ mA/cm}^2$) y tiempos de proceso (3-4 días), se observa una mejora moderada en la eficiencia de remoción, con intervalos entre 14.6-19.4%. Las mayores eficiencias de remoción (15.8-23%), se logran combinando densidades de corriente altas ($24-28 \text{ mA/cm}^2$) y tiempos de proceso prolongados (4-5 días). Esto sugiere que, para mejorar la remoción de arsénico, es preferible operar con altas densidades de corriente y largos tiempos de proceso.

En la remoción de arsénico, el tiempo de proceso es el factor más influyente. La interacción entre la densidad de corriente y los días de proceso es claramente positiva, ya que las combinaciones de estos valores resultan en mayores porcentajes de remoción de arsénico.

Se concluye que, para optimizar la eliminación de arsénico, se sugiere trabajar con densidades de corriente elevadas y prolongar la duración del proceso a 5 días.

Figura 27
Gráfica de efectos principales para % remoción de arsénico



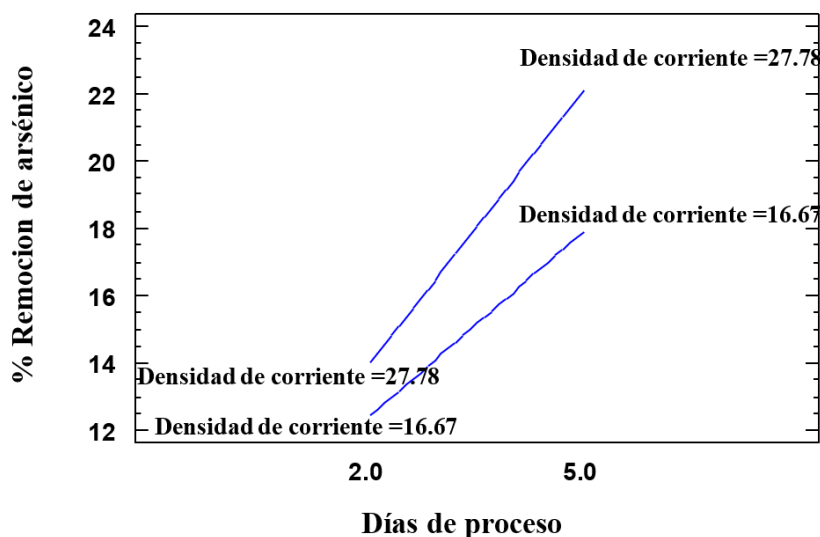
Nota. En el eje X (horizontal), la gráfica está dividida en dos secciones. La sección izquierda representa la densidad de corriente con dos niveles: 16.67 mA/cm^2 y 27.78 mA/cm^2 . La sección derecha muestra los días de proceso con dos niveles: 2 días y 5 días.

La línea que representa el efecto de la densidad de corriente indica que, al aumentar la densidad de corriente de 16.67 a 27.78 mA/cm², el porcentaje de remoción de arsénico se incrementa aproximadamente del 15.167% al 18.043%. La pendiente positiva sugiere que la remoción de arsénico mejora con el aumento en la densidad de corriente. La línea que representa el efecto de los días de proceso muestra que, al aumentar el tiempo de proceso de 2 a 5 días, el porcentaje de remoción de arsénico aumenta, pasando del 13.215% al 19.995%. La pendiente positiva en este caso también indica que un mayor número de días de proceso contribuye a una mayor remoción de arsénico.

El aumento de la densidad de corriente y la extensión del tiempo de proceso resultan en una mayor remoción de arsénico, y son parámetros críticos para optimizar el proceso.

Figura 28

Gráfica de interacción para % remoción de arsénico



Nota. Las dos variables independientes influyen conjuntamente en una variable dependiente, destacando como el efecto de una variable independiente cambia en función de los niveles de otra.

La interacción entre la densidad de corriente y los días de proceso tiene un impacto significativo en la remoción de arsénico. No solo importan los valores individuales de cada factor, sino también cómo se combinan para lograr una mayor eficiencia.

Utilizar una alta densidad de corriente (27.98 mA/cm²) junto con un mayor número de días de proceso (5 días) maximiza la eficiencia en la remoción de arsénico.

Esto indica que aumentar tanto los días de proceso como la densidad de corriente puede mejorar efectivamente los procesos electroquímicos, cumpliendo con los estándares de calidad requeridos.

Tabla 29

Valor óptimo

Predicción	Inferior 95.0% Limite	Superior 95.0% Limite
22.155	21.272	23.039

Tabla 30

Factores

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Densidad de corriente	16.0	28.0	27.981
Días de proceso	2.0	5.0	5.0

Nota. El valor óptimo es el mejor resultado dentro de un conjunto de opciones, influenciado por diversos factores, que son elementos que contribuyen o afectan dicho resultado.

El análisis de optimización para maximizar la remoción de arsénico indica que se puede alcanzar un valor óptimo de remoción del 22.155%, con un intervalo de confianza del 95% que varía entre el 21.272% y el 23.039%.

La densidad de corriente debe establecerse en aproximadamente 27.98 mA/cm², muy cercano al límite superior del rango evaluado (16.0 a 28.0 mA/cm²). Esto sugiere que una mayor densidad de corriente es favorable para la remoción de arsénico.

Es óptimo operar durante 5 días, que es el valor más alto dentro del rango evaluado (2.0 a 5.0 días). Esto implica que extender el tiempo de procesamiento al máximo proporciona los mejores resultados en términos de eficiencia de remoción.

4.10. Variación de pH y conductividad eléctrica

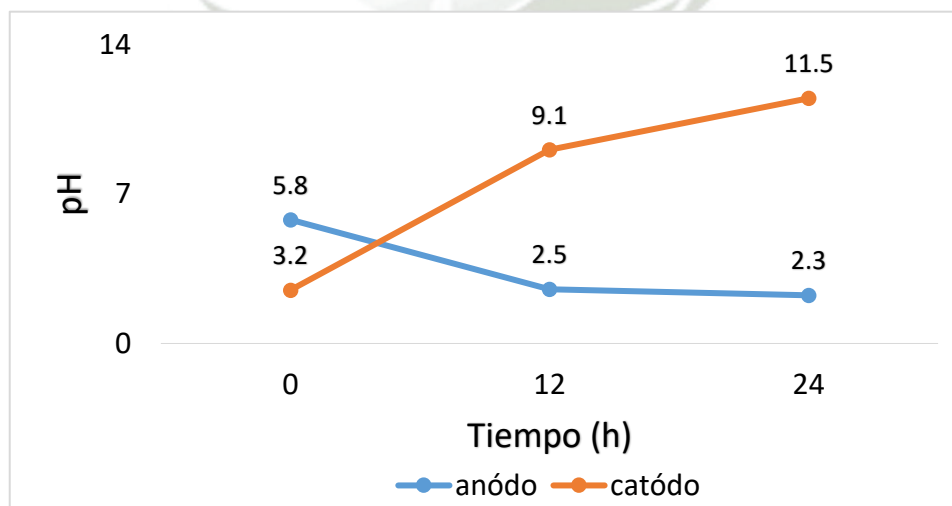
Los valores de pH medidos a los 2 y 5 días de tratamiento son prácticamente idénticos. Se realizó un reemplazo diario de los fluidos en los compartimentos anódico y catódico (Anexo 7). Este procedimiento es crucial ya que, con el tiempo, dichos fluidos pueden acumular contaminantes y calor reduciendo su efectividad (Saini et al., 2021).

La Figura 29 ilustra que el pH del fluido en el compartimento anódico (agua destilada) descendió progresivamente desde 5.8 hasta un promedio de 2.5 durante las primeras 12 horas del procedimiento. Después de este periodo, la disminución fue mínima, llegando a un promedio de 2.3 a las 24 horas, momento en el cual se procedió al reemplazo del fluido.

De igual manera, se observa que en el compartimento catódico (ácido acético glacial al 0.1 M) el pH aumentó de 3.2 a 9.1 en promedio durante las primeras 12 horas de tratamiento. A las 24 horas, el pH tuvo un incremento promedio hasta 11.5, momento en el cual se reemplazó el fluido. (Anexo 7)

Se demostró que la electrólisis del agua en el compartimento anódico produce iones hidrógeno (H^+), lo que resulta en condiciones ácidas, mientras que en el compartimento catódico se generan iones hidroxilo (OH^-), creando condiciones alcalinas. Si el pH se vuelve demasiado ácido o alcalino, en los compartimentos puede influir en la eficiencia de las reacciones electroquímicas (Saini et al., 2021).

Figura 29
Valores de pH

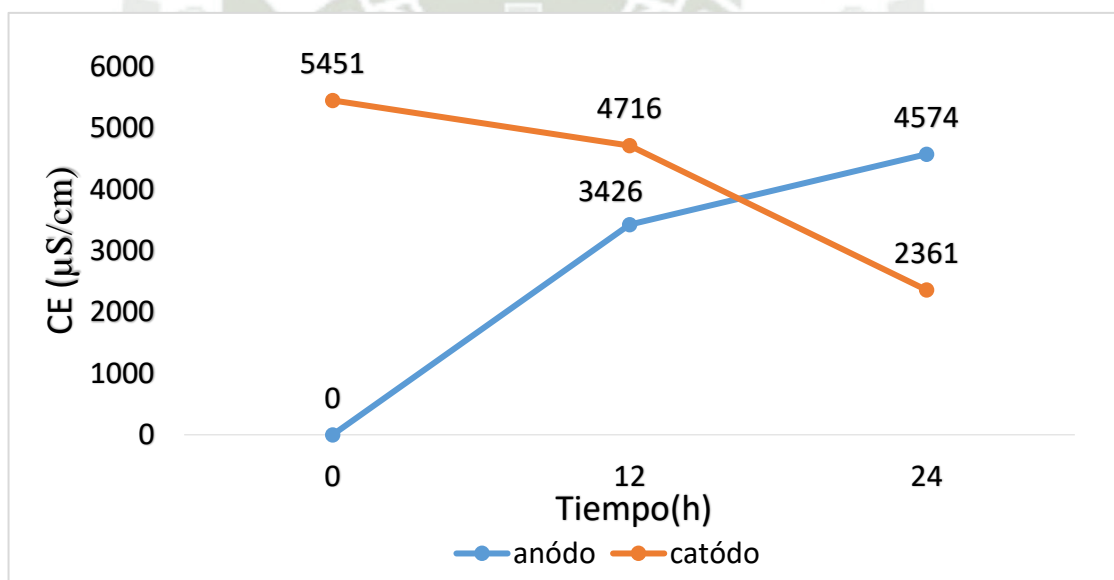


Nota. Valores del pH en el ánodo y cátodo después de 12 y 24 horas de tratamiento

La Figura 30 indica que la Conductividad Eléctrica del fluido anódico (agua destilada) aumentó gradualmente durante las primeras 12 horas, pasando de 0 a un promedio de 3426 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y alcanzó un promedio de 4574 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a las 24 horas del inicio del proceso, para luego descender a 0 debido a la renovación del fluido. Este ciclo se repitió cada 24 horas, resultando en valores similares.

La Conductividad Eléctrica del fluido catódico (ácido acético glacial al 0.1 M) disminuyó durante las primeras 12 horas de un promedio de 5451 a 4716 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y a las 24 horas llegó a un promedio de 2361 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Al igual que en el compartimento anódico, el fluido se renovó cada 24 horas, obteniendo resultados similares en los 12 ensayos. (Anexo 7)

Figura 30
Valores de conductividad eléctrica



Nota. Valores del C.E en el ánodo y cátodo después de 12 y 24 horas de tratamiento

CONCLUSIONES

- Primera: Los relaves presentaron altas concentraciones de metales pesados, con 1084.40 mg/kg de Pb y 539.26 mg/kg de As, excediendo los límites permitidos por las normativas ambientales. La textura fue clasificada como franco limoso, con 30% de arena, 65% de limo y 5% de arcilla, predominando partículas finas, lo cual es favorable para la electroremediación. El pH inicial fue de 5.89, indicando ligera acidez, posiblemente por la presencia de pirita. La conductividad eléctrica fue de 815 $\mu\text{S}/\text{cm}$, señalando una alta concentración de sales disueltas por la posible lixiviación de minerales, mientras que el contenido de humedad fue de 7.31%, mostrando una notable capacidad de retención de agua.
- Segunda: El aumento de la densidad de corriente optimiza la remoción de contaminantes, siendo los mejores resultados obtenidos a 27.78 mA/cm², concluyendo que el sistema opera de manera más eficiente con densidades más elevadas.
- Tercera: A medida que se incrementa el tiempo de tratamiento, la remoción de plomo y arsénico mejora significativamente, mostrando un mayor impacto en comparación con la densidad de corriente. Los mejores resultados se alcanzaron tras 5 días de tratamiento. Los ensayos de laboratorio y el análisis estadístico confirman que tanto el tiempo de tratamiento como la densidad de corriente influyen de manera significativa en la eficiencia de remoción.
- Cuarta: Finalmente, mediante la técnica electroremediación, se logró disminuir la concentración de Pb y As en los relaves del PAM Kiowa. logrando una remoción promedio del 63.30% para el plomo y del 22.08% para el arsénico.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la integración de la electrorremediación con tratamientos complementarios, tanto fisicoquímicos como biológicos, para mejorar la eficiencia en la remoción de metales pesados en relaves y suelos contaminados por actividades mineras. Entre las alternativas viables, la fitorremediación se presenta como una opción prometedora para potenciar los resultados del proceso.
2. Para lograr una mayor remoción de plomo y arsénico, se recomienda evaluar períodos de tratamiento más prolongados y mayores densidades de corriente.
3. Se propone explorar variables adicionales para incrementar la eficiencia del proceso de electrorremediación, como la variación de voltajes, el tiempo de humectación y la distancia entre electrodos. Asimismo, es recomendable evaluar la concentración molar y el uso de otros electrolitos, como el ácido láctico y oxálico. Estas estrategias contribuyen a ampliar el conocimiento sobre la optimización del proceso.
4. Es fundamental llevar a cabo investigaciones "in situ" para profundizar en la comprensión de los mecanismos de transporte de metales pesados y optimizar la eficiencia de la remediación ambiental en condiciones reales de campo. Esto permitirá ajustar los parámetros del proceso a las características específicas del entorno, mejorando así su aplicación en escenarios prácticos.
5. Los resultados obtenidos en esta investigación pueden ser usados como referencia para fortalecer los estudios de evaluación de riesgos ambientales en la zona de Quequeña. En este estudio, se ha llevado a cabo un análisis de la concentración de metales pesados presentes en los relaves, evaluando sus posibles efectos en organismos vivos y los impactos ambientales asociados.

REFERENCIA

- Alcaíno, C. (2012). *Análisis y comparación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/113010>
- Aragón, T. (2013). *Diseño a escalas de laboratorio y piloto de un sistema de remediación electrocinética de suelos contaminados con metales pesados*. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7072>
- Alva, H. (2020). *Ingeniería geotécnica trabajos de campo, laboratorio y estudios*.
- Asadollahfardi, G., Sarmadi, M., Rezaee, M., Khodadadi-Darban, A., Yazdani, M., & Paz-García, J. (2021). *Comparison of different extracting agents for the recovery of Pb and Zn through electrokinetic remediation of mine tailings*. *Journal Of Environmental Management*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111728>
- Barba, P. (2018). *Electro-biorremediación de suelos contaminados con pesticidas*. Obtenido de Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=230519>
- Barrio, V. (2008). *Metales pesados en suelos y sus efectos sobre la salud*. Obtenido de <http://147.96.70.122/web/tfg/tfg/memoria/noelia%20barrio%20vega.pdf>
- Beyrami, H. (2021). *Effect of different treatments on electrokinetic remediation of Zn, Pb and Cd from a contaminated calcareous soil*. *Chinese Journal Of Chemical Engineering/Chinese Journal Of Chemical Engineering*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.09.011>
- Caballero, A. (2022). *Influencia de la densidad de corriente eléctrica y área efectiva en la remoción de arsénico de un relave minero mediante la electrorremediación*, [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/31963>
- Contreras, G., & Ramirez, L. (2023). *Evaluación de los métodos de biorremediación más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves de minas subterráneas polimetálicas en Pasco, 2020*, [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/33668>
- Coila, R. (2012). *Lixiviación de relaves oxidados de cobre y oro de la Minera Manuela Ite - Tacna*. Obtenido de <https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/1700>
- Cooper, F. (2021). *Minería y equilibrio económico*. INGEMMET.
- CooperAcción. (2023). *Geografías en conflicto*. Obtenido de <https://cooperaccion.org.pe/>

- Cueva, S., Cuno, B., & Huamani, C. (2000). *Estudio de ocurrencias de mineralización de cobre en los distritos de yarabamba y quequeña - arequipa*.
- Diario la Republica (2022). *Pasivos ambientales, los residuos de la minería que nadie quiere asumir*. Obtenido de <https://data.larepublica.pe/pasivos-ambientales-los-residuos-de-la-mineria-que-nadie-quiere-asumir/>
- Diario oficial el peruano (2023) *Expertos de Corea fortalecerán capacidades técnicas para la remediación de pasivos ambientales mineros en el Perú*. Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/716321-expertos-de-corea-fortaleceran-capacidades-tecnicas-para-la-remediacion-de-pasivos-ambientales-mineros-en-el-peru>
- Delgado, R. (2010). *Caracterización y posterior remediación electro-cinética de suelo tipo vertisol pélico contaminado con hidrocarburo procedente de una zona industrial*.
- Ecometales. (2017). *Lo que usted necesita saber sobre arsénico y minería del cobre*. Obtenido de <https://www.ecometales.cl/difusion/arsenico/lo-que-usted-necesita-saber-sobre-arsenico-y-mineria-del-cobre>
- Escobar, A., & Ocas, M. (2016) *Electrorremediación en función de la densidad de corriente y la concentración de ácido acético, como alternativa para la disminución de plomo en relaves mineros - Mina Paredones, Cajamarca, 2016*, [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/10682>
- Febres, F. (2019). *Remediación de suelos contaminados con plomo (Pb) mediante el empleo de girasol (Helianthus annuus) y estiércol de lombriz roja (Eisenia foetida) en condiciones controladas*. [Trabajo de Titulación de Ingeniero Ambiental]. UNSA, Arequipa. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/8322c40c-f67b-44aa-b5d4-73d6f52dc81c>
- Fernández, C., & Baptista, L. (2014). *Metodología de la investigación*, Edición 6° D.F., México: McGraw Hill Interamericana.
- García, H., Vargas, R., Reyes, C. (2011). *Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de residuos mineros, utilizando agua y ácido acético como electrolitos*. Obtenido de <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/2463/>
- Ghobadi, R., Altaee, A., Zhou, J. L., Karbassiyazdi, E., & Ganbat, N. (2021). *Effective remediation of heavy metals in contaminated soil by electrokinetic technology incorporating reactive filter media*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148668>

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022). *Anuario de estadísticas ambientales*.
https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1877/libro.
- López, R., & López, V. (2013). *Remediación electrocinética de suelos de baja permeabilidad contaminados con compuestos orgánicos hidrófobos*. Obtenido de
<https://hdl.handle.net/10578/3313>
- Menéndez, J. (2021). Contaminación del agua y suelo por relaves mineros . Obtenido de
<https://doi.org/10.31381/paideia.v11i1.3622>
- Ministerio del Ambiente (2008). Ley N° 28271, *Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera*. Obtenido de <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N-28271.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2017). Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM. *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*. Obtenido de
<https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-011-2017-minam/>
- Ministerio del Ambiente. (2014). Resolución ministerial N° 085-2014-MINAM. *Guía para el Muestreo de Suelos y la Guía para la Elaboración de Planes de Descontaminación de Suelos*. Obtenido de <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/resolucion-ministerial-n-085-2014-minam/>
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). *Plataforma del Estado Peruano*. Obtenido de
<https://www.gob.pe/institucion/minem/colecciones/1486-revista-en-cifras>
- Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Revista Estadística En Cifras*. Obtenido de
<https://www.gob.pe/institucion/minem/colecciones/1486-revista-en-cifras>
- Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Boletín Estadístico Minero*. Obtenido de
<https://www.gob.pe/institucion/minem/colecciones/6-boletin-estadistico-minero>
- Ministerio de energía y minas. (2014). *Informe sobre solicitud de reaprovechamiento del pasivo ambiental minero kiowa*. Obtenido de
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). Resolución Ministerial N° 510-2023-MINEM/DM. *Actualización del Inventario de Pasivos Ambientales Mineros*. Obtenido de
<https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/4961275-510-2023-minem-dm>
- Ortiz, J. (2023). *Metodología de electrorremediación y fitorremediación para descontaminar los suelos por metales pesados en la planta metalurgia de Yauris*. Obtenido de
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/9122>

- Pérez, C. (2014). *Tierra devastada. Historia de la contaminación minera*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/308021772_Tierra_devastada_Historia_de_la_contaminacion_minera
- Ramos, P. (2019) *Evaluación de la influencia de distintos niveles de intensidad de corriente en la técnica de electroremediación para relaves mineros contaminados por Pb y Hg provenientes de Ponce Enríquez, Azuay. Riobamba*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Obtenido de <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/13122>
- Rondoy, B., & Sánchez, M. (2000). *Estudio de los recursos minerales del Perú. Franja N°1 Su Bloque N°4*. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/4177>
- Saini, A., Bekele, D. N., Chadalavada, S., Fang, C., & Naidu, R. (2021). *Electrokinetic remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil (I). Environmental Technology & Innovation*. Obtenido de. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101585>
- Sociedad Nacional de Minería y Petróleo. (2008). *Informe quincenal de la snmpe*. Obtenido de <https://issuu.com/sociedadmineroenergetica/docs/snmpe-informe-quincenal-mineria-des>
- Vargas, F., Lopez, M., & Rigamonti, L. (2020). *Environmental impacts evaluation of treated copper tailings as supplementary cementitious materials. Resources, Conservation And Recycling*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104890>
- Villen, G. (2016). *Tratamiento de suelos contaminados con plomo mediante técnicas electrocinéticas selectivas*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10630/14167>
- Zapata, R. (2018). *Caracterización de suelos arcillosos y limos*. Universidad Nacional de Rosario.
- Zulfiqar, W., Iqbal, M., & Butt, M. (2017). *Pb²⁺ ions mobility perturbation by iron particles during electrokinetic remediation of contaminated soil*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.083>

ANEXO

Anexo 1: Granulometría de suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

Calle Paucarpata s/n - Teléfono 283143 - Arequipa - Perú



Nº 004921

DATOS DEL CLIENTE Y DEL PROYECTO:

SOLICITA (*): FARFAN ESPINOZA, RODRIGO JOEL.
PROYECTO (*): ELECTRO REMEDIACIÓN DE RELAVES - CONTROL DE CALIDAD.
UBICACIÓN (*): AREQUIPA

ENSAYO:

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

NORMA: ASTM D 422; NTP 339:128

ACTA RECEP:	B-2019-024	CONDICIÓN:	Muestra alterada
CALICATA:	-	F. RECEPCIÓN:	17/03/2023
MUESTRA:	M-1 (Relave minero)	F. EJECUCIÓN:	21/03/2023
PROFUNDIDAD:	-	F. EMISIÓN:	22/03/2023

Tamiz	Abertura	Peso Ret. (gf)	Retenido (%)	Ret. Acum. Acum. (%)	Pasante (%)	Espec. Técnica	PESO TOTAL (gf)	500.00		
6"	150.0						PESO DE FRACCIÓN (gf)	500.00		
5"	125.0						Peso >3" (gf)	0.0		
4"	100.0						Peso <3" y >3/4" (gf)	0.0		
3 1/2"	89.0						Peso <3/4" y >N°4 (gf)	0.0		
3"	75.0						Peso <N°4 y >N°200 (gf)	85.2		
2 1/2"	63.0						Peso <N°200 (gf)	414.8		
2"	50.0						PORCENTAJE DE:			
1 1/2"	37.5						Bloq. Bol.	Grava	Arena	Finos
1"	25.0						>3"	<3" y >N°4	<N°4 y >N°200	<N°200
3/4"	19.0						0.00	0.00	17.04	82.96
1/2"	12.5						D ₁₀	-	Cc	-
3/8"	9.5						D ₃₀	-	W _i	-
1/4"	6.3						D ₆₀	-	W _p	-
N°4	4.75						Cu	-	I _p	-
N°8	2.36						CLASIFICACION SUCS			
N°10	2.00				100.00		CLASIFICACION AASHTO			
N°20	0.85	0.43	0.09	0.09	99.91					
N°30	0.60	0.28	0.06	0.15	99.85					
N°40	0.425	0.54	0.11	0.26	99.74					
N°50	0.300	0.75	0.15	0.41	99.59					
N°60	0.250	0.80	0.16	0.57	99.43					
N°80	0.180	4.79	0.96	1.53	98.47					
N°100	0.150	8.52	1.70	3.23	96.77					
N°200	0.075	69.07	13.81	17.04	82.96					
Bandeja		414.82	82.96	100.00	0.00					

CURVA GRANULOMÉTRICA



OBSERVACIONES:

- (*) Datos proporcionados por el Solicitante.
- La muestra de suelo fue entregada al personal del laboratorio por el solicitante.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
LABORATORIO DE MECÁNICA
DE SUELOS Y PAVIMENTOS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
Jak
ING. JEAN PAUL PAREDES CUEVA
JEFE DE LABORATORIO
CIP Nº 94656

Anexo 2: Contenido de humedad



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

Calle Paucarpata s/n - Teléfono 283143 - Arequipa - Perú



Nº 004922

DATOS DEL CLIENTE Y DEL PROYECTO:

SOLICITA (*): FARFAN ESPINOZA, RODRIGO JOEL.
PROYECTO (*): ELECTRO REMEDIACIÓN DE RELAVES - CONTROL DE CALIDAD.
UBICACIÓN (*): AREQUIPA

ENSAYO:
CONTENIDO DE HUMEDAD
NORMA: ASTM D 2216

ACTA RECEP:	B-2019-024	CONDICION:	Muestra alterada
CALICATA:	-	F. RECEPCIÓN:	17/03/2023
MUESTRA:	M-1 (Relave minero)	F. EJECUCION:	21/03/2023
PROFUNDIDAD:	-	F. EMISIÓN:	22/03/2023

Humedad				
DESCRIPCION	UND.	1	2	3
Peso del recipiente	gf	29.81	31.11	26.76
Peso de la muestra húmeda + recipiente	gf	137.03	138.20	138.60
Peso de la muestra seca + recipiente	gf	129.87	130.99	130.75
Peso del agua en la muestra	gf	7.16	7.21	7.85
Peso de la muestra seca	gf	100.06	99.88	103.99
Contenido de humedad	%	7.16	7.22	7.55

Contenido de Humedad Promedio	%	7.31
-------------------------------	---	------

OBSERVACIONES

- (*) Datos proporcionados por el Solicitante.
- La muestra de suelo fue entregada al personal del laboratorio por el solicitante.



Anexo 3: Concentración de metales pesados, pH y conductividad eléctrica



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-4369

N° Id.: 0000072557

IV. RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-23-12887
CÓDIGO DEL CLIENTE:				R-1
COORDENADAS:				E:0238139.80
UTM WGS 84:				N:8170429.8
PRODUCTO:				Suelos
SUB PRODUCTO:				Suelo
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				NO APLICA
FECHA y HORA DE MUESTREO :				05-03-2023 16:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Conductividad (*)	µS/cm	NA	0,01	815,00
pH - Suelo (*)	Unidad de pH	NA	NA	5,89
Metales Totales en suelos				
ICP MS				
Aluminio (*)	mg/Kg	0,10	0,30	1 105,40
Antimonio (*)	mg/Kg	0,06	0,20	<0,20
Arsénico (*)	mg/Kg	0,02	0,10	539,28
Bario (*)	mg/Kg	0,01	0,03	21,79
Berilio (*)	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03
Bismuto (*)	mg/Kg	0,06	0,20	3,48
Boro (*)	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10
Cadmio (*)	mg/Kg	0,005	0,020	2,380
Calcio (*)	mg/Kg	0,1	0,4	908,4
Cerio (*)	mg/Kg	0,04	0,10	7,29
Cobalto (*)	mg/Kg	0,05	0,20	2,31
Cobre (*)	mg/Kg	0,005	0,020	478,990
Cromo (*)	mg/Kg	0,01	0,03	13,30
Estaño (*)	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10
Estroncio (*)	mg/Kg	0,05	0,20	11,89
Fosforo (*)	mg/Kg	0,04	0,10	357,59
Hierro (*)	mg/Kg	0,06	0,20	16 133,76
Litio (*)	mg/Kg	0,003	0,010	<0,010
Magnesio (*)	mg/Kg	0,06	0,20	308,28
Manganeso (*)	mg/Kg	0,01	0,03	33,33
Mercurio (*)	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04
Molibdeno (*)	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10
Niquel (*)	mg/Kg	0,01	0,04	0,83
Plata (*)	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



INFORME DE ENSAYO N°: IE-23-4369

N° Id.: 0000072557

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-23-12897
CÓDIGO DEL CLIENTE:				R-1
COORDENADAS:				E:0238139.80
UTM WGS 84:				N:8170429.8
PRODUCTO:				Suelos
SUB PRODUCTO:				Suelo
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				NO APLICA
FECHA y HORA DE MUESTREO:				05-03-2023 18:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Plomo (*)	mg/Kg	0,05	0,20	1 084,40
Potasio (*)	mg/Kg	0,30	1,00	1 285,83
Selenio (*)	mg/Kg	0,05	0,20	<0,20
Silicio (*)	mg/Kg	0,02	0,07	114,19
Sodio (*)	mg/Kg	0,03	0,10	580,05
Talio (*)	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04
Titanio (*)	mg/Kg	0,03	0,10	71,81
Torio (*)	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03
Uranio (*)	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03
Vanadio (*)	mg/Kg	0,01	0,04	5,22
Zinc (*)	mg/Kg	0,01	0,02	129,58

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica



Anexo 4: Análisis de clase textural



INFORME DE ENSAYO N°: IE-24-2810

N° Id.: 0000102473

V.- RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO				M-24-07381
CÓDIGO CLIENTE ^(A)				R-1
PRODUCTO ^(A)				Suelos
SUB PRODUCTO ^(A)				
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)				06-02-2024 15:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Clase Textural				
Arena ²	%	NA	NA	30
Arcilla ²	%	NA	NA	5
Limo ²	%	NA	NA	65
Clase Textural ²	no unidad	NA	NA	Fr,L

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<=" Menor que el L.D.M.

NA: No Aplica

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

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

Anexo 5: Concentración final de metales pesados



INFORME DE ENSAYOS Nº 2427- 2024
PÁGINA 2 DE 2

RESULTADOS

LAB	DETERMINACIÓN	ENSAYO	RELAVE	UNIDADES
FQ	Elemento Pb	R223	398.52	mg/Kg
FQ	Elemento Pb	R222	404.26	mg/Kg
FQ	Elemento Pb	R221	391.58	mg/Kg
FQ	Elemento Pb	R123	597.61	mg/Kg
FQ	Elemento Pb	R122	589.05	mg/Kg
FQ	Elemento Pb	R121	604.88	mg/Kg
FQ	Elemento As	R223	420.73	mg/Kg
FQ	Elemento As	R222	423.10	mg/Kg
FQ	Elemento As	R221	416.74	mg/Kg
FQ	Elemento As	R123	446.35	mg/Kg
FQ	Elemento As	R122	444.51	mg/Kg
FQ	Elemento As	R121	437.18	mg/Kg

ABREVIATURAS:

mg/Kg : Miligramos por kilogramo

MÉTODOS UTILIZADOS:

Elementos Pb,As : Environmental Protection Agency. Method 3050B. Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils. Revision 1996.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS: FQ 16/03/2024 al 15/04/2024

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS: 26/04/2024

Fin del Informe

Bigo Miguel Valdivia Martínez
Gerente Técnico

BIHOS LABORATORIOS ...calidad a su servicio



INFORME DE ENSAYOS N° 2428- 2024
PÁGINA 2 DE 2

RESULTADOS

LAB	DETERMINACIÓN	ENSAYO	RELAVE	UNIDADES
FQ	Elemento Pb	R113	827.83	mg/Kg
FQ	Elemento Pb	R112	821.54	mg/Kg
FQ	Elemento Pb	R111	828.92	mg/Kg
FQ	Elemento Pb	R213	696.08	mg/Kg
FQ	Elemento Pb	R212	689.14	mg/Kg
FQ	Elemento Pb	R211	681.11	mg/Kg
FQ	Elemento As	R113	469.43	mg/Kg
FQ	Elemento As	R112	474.71	mg/Kg
FQ	Elemento As	R111	472.66	mg/Kg
FQ	Elemento As	R213	459.56	mg/Kg
FQ	Elemento As	R212	467.27	mg/Kg
FQ	Elemento As	R211	464.36	mg/Kg

ABREVIATURAS:

mg/Kg : Miligramos por kilogramo

MÉTODOS UTILIZADOS:

Elementos Pb ,As : Environmental Protection Agency. Method 3050B. Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils. Revision 1996.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS: FQ 16/04/2024 al 23/04/2024

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS: 02/05/2024

Fin del Informe

Blgo. Miguel Valdivia Martínez
Gerente Técnico

BIHOS LABORATORIOS ...calidad a su servicio

Anexo 6: Estándares de calidad ambiental para suelos

14 **NORMAS LEGALES** Sábado 2 de diciembre de 2017 /  **El Peruano**

ANEXO
ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA SUELO

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 ⁽⁵⁾ / Industrial/ Extractivo ⁽⁶⁾	
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/ó ISO 17690:2015

Anexo 7: Medición de pH en el proceso de electroremediación

Ensayo	Tiempo	pH tomado cada 12 h		CE tomado cada 12h	
Replica	Días	Ánodo pH I=5.8	Cátodo pH I=2.5	Ánodo C.E =0	Cátodo oscila
R111	Día 1	5.8	3.2	0	5317
	12 horas	2.7	8.9	3471	4758
	24 horas	2.2	11.3	4521	2385
	Día 2	5.8	3.1	0	5258
	12 horas	2.5	9.4	3328	4458
	24 horas	2.3	11.5	4621	2321
R112	Día 1	5.8	2.8	0	5562
	12 horas	2.6	8.9	3410	4521
	24 horas	2.2	10.9	4498	2258
	Día 2	5.8	2.9	0	5147
	12 horas	2.5	9.2	3201	4632
	24 horas	2.3	11.7	4547	2481
R113	Día 1	5.8	3.0	0	5623
	12 horas	2.5	9.1	3309	4523
	24 horas	2.2	11.6	4469	2312
	Día 2	5.8	3.5	0	5821
	12 horas	2.6	9.1	3503	4632
	24 horas	2.4	12.01	4604	2286
R211	Día 1	5.8	3.2	0	5324
	12 horas	2.4	8.8	3302	4574
	24 horas	2.2	10.9	4598	2371
	Día 2	5.8	3	0	5419
	12 horas	2.5	9.1	3310	4398
	24 horas	2.2	11.3	4452	2425
R212	Día 1	5.8	3.4	0	5149
	12 horas	2.5	9.3	3278	4674
	24 horas	2.3	11.4	4610	2312
	Día 2	5.8	3.1	0	5701
	12 horas	2.6	8.9	3424	4701
	24 horas	2.4	12.04	4520	2244
R213	Día 1	5.8	3.3	0	5649
	12 horas	2.5	9	3365	4587
	24 horas	2.2	11.8	4423	2469
	Día 2	5.8	3.0	0	5415
	12 horas	2.6	9.2	3236	4523
	24 horas	2.2	11.4	4478	2285

Ensayo	Tiempo	pH tomado cada 12 h		CE tomado cada 12h	
Replica	Días	Ánodo pH I=5.8	Cátodo pH I=2.4	Ánodo C.E =0	Cátodo oscila
R121	Día 1	5.8	3.0	0	5709
	12 horas	2.5	9.2	3423	4874
	24 horas	2.2	11.8	4712	2215
	Día 2	5.8	2.8	0	5497
	12 horas	2.6	8.7	3642	4878
	24 horas	2.2	11.6	4623	2536
	Día 3	5.8	3.0	0	5434
	12 horas	2.5	9.1	3412	4756
	24 horas	2.3	11.7	4612	2263
	Día 4	5.8	3.2	0	5521
	12 horas	2.5	8.8	3236	4857
	24 horas	2.4	12.1	4574	2371
	Día 5	5.8	3.4	0	5729
	12 horas	2.5	9.3	3712	4946
	24 horas	2.2	11.9	4701	2236
R122	Día 1	5.8	3.5	0	5621
	12 horas	2.6	9.3	3632	4845
	24 horas	2.2	11.5	4627	2321
	Día 2	5.8	3.0	0	5297
	12 horas	2.7	9.4	3478	4778
	24 horas	2.2	11.5	4547	2421
	Día 3	5.8	3.1	0	5503
	12 horas	2.6	8.7	3463	4857
	24 horas	2.3	12.2	4801	2420
	Día 4	5.8	3.2	0	5423
	12 horas	2.7	8.8	3328	4845
	24 horas	2.2	11.4	4576	2430
	Día 5	5.8	3.3	0	5518
	12 horas	2.7	9.1	3487	4975
	24 horas	2.2	11.5	4623	2266
R123	Día 1	5.8	3.0	0	5687
	12 horas	2.8	9.2	3521	4842
	24 horas	2.4	11.4	4512	2226
	Día 2	5.8	3.1	0	5341
	12 horas	2.7	9.7	3687	4741
	24 horas	2.3	11.8	4728	2363
	Día 3	5.8	3.3	0	5496
	12 horas	2.7	9.2	3784	4771
	24 horas	2.2	11.5	4623	2395
	Día 4	5.8	3.3	0	5423
12 horas	2.5	8.9	3689	4885	

	24 horas	2.3	11.7	4412	2478
	Día 5	5.8	3.2	0	5421
	12 horas	2.6	9.1	3741	4942
	24 horas	2.1	11.6	4614	2472
R221	Día 1	5.8	3.0	0	5436
	12 horas	2.7	8.5	3412	4953
	24 horas	2.2	12.4	4712	2523
	Día 2	5.8	3.0	0	5298
	12 horas	2.6	9.1	3714	4821
	24 horas	2.3	11.5	4487	2398
	Día 3	5.8	2.9	0	5362
	12 horas	2.7	8.9	3412	4801
	24 horas	2.2	11.3	4561	2407
	Día 4	5.8	3.2	0	5423
	12 horas	2.7	9.1	3235	4731
	24 horas	2.2	11.5	4604	2202
	Día 5	5.8	3.3	0	5508
	12 horas	2.5	8.8	3483	4929
	24 horas	2.2	11.3	4584	2423
R222	Día 1	5.8	3.4	0	5499
	12 horas	2.5	8.2	3493	4882
	24 horas	2.3	10.6	4805	2498
	Día 2	5.8	3.4	0	5397
	12 horas	2.6	9.4	3410	4925
	24 horas	2.2	11.6	4497	2256
	Día 3	5.8	3.2	0	5478
	12 horas	2.6	9.2	3352	4832
	24 horas	2.3	11.5	4619	2452
	Día 4	5.8	3.3	0	5219
	12 horas	2.7	9.4	3701	4941
	24 horas	2.3	11.6	4709	2506
	Día 5	5.8	3.5	0	5503
	12 horas	2.6	8.7	3620	4725
	24 horas	2.2	11.4	4673	2287
R223	Día 1	5.8	3.0	0	5317
	12 horas	2.7	9.2	3470	4827
	24 horas	2.3	11.5	4478	2468
	Día 2	5.8	3.1	0	5471
	12 horas	2.6	8.6	3236	4787
	24 horas	2.3	11.7	4672	2398
	Día 3	5.8	3.2	0	5472
	12 horas	2.7	8.6	3412	4871
24 horas	2.4	11.4	4472	2402	

Día 4	5.8	3.0	0	5369
12 horas	2.6	9	3369	4913
24 horas	2.2	12.3	4678	2403
Día 5	5.8	3.2	0	5236
12 horas	2.5	8.9	3641	4778
24 horas	2.3	11.6	4742	2265



Anexo 8: Preparación de la solución de ácido acético 0,1 M para utilizarse en el tratamiento

Ácido acético glacial	CH ₃ COOH
Concentración	99.5%
Masa molar (M)	60.05 g/mol
Densidad (ρ)	1.05 g/cm ³

Cálculo del ácido acético glacial (CH₃COOH)

Cálculo de la molaridad (M) se hace mediante la fórmula:

$$M = \frac{\text{gramos de soluto}}{\text{litros de solución}} \times \frac{1}{\text{masa molar}} \times 1000 \text{ mL}$$

$$M = \frac{1.05 \text{ g}}{1 \text{ mL}} \times \frac{99.5 \text{ g}}{100 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ mol}}{60.05 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}}$$

Cálculos:

$$M = 1.05 \times 0.995 \times \frac{1}{60.05} \times 1000$$

$$M = 1.05 \times 0.995 \times 0.01665 \times 1000$$

$$M = 17.39 \text{ mol/L}$$

Formula de dilución

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{C_2 \times V_2}{C_1} = \frac{0.1 \text{ M} \times 1000 \text{ mL}}{17.39 \text{ M}} = 5.75 \text{ mL}$$

5.75 mL CH₃COOH → 1000 mL agua destilada