

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Electrorremediación de suelos arenosos contaminados con metales
pesados provenientes de un relave minero**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Leibnitz Galiany Ponce Ccopa
Catalina Ccapa Ari

Asesor:

MSc. Rose Adeline Callata Chura

Juliaca, octubre de 2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo MSc. Rose Adeline Callata Chura, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“ELECTORREMEDIACIÓN DE SUELOS ARENOSOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS PROVENIENTES DE UN RELAVE MINERO”** de los autores **Leibnitz Galiany Ponce Ccopa** y **Catalina Ccapa Ari**, tiene un índice de similitud de 12% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca a los 06 días del mes de noviembre del año 2024.



MSC. Rose Adeline Callata
Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 31 día(s) del mes de octubre del año 2024 siendo las 12:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del

(de la) presidente(a): Msc. Miguel Ángel Salgado Enriquez, el (la) secretario(a): Msc. Loyda Abigail Gondoni Turpo y los demás miembros: Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera Ing. Nancy Purasi Rapael y el (la) asesor(a) Msc. Rose Adeline Pallata Bhura con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

"Electroremediación de suelos arenosos contaminados con metales pesados provenientes de un relave minero"

del(los) bachiller(es): a) Leibnitz Baliany Ponce Escapa
 b) Batalina Escapa Ari
 c) _____

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Ambiental
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Leibnitz Baliany Ponce Escapa

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (b): Batalina Escapa Ari

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (c): _____

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma] Presidente/a
[Firma] Asesor/a
[Firma] Bachiller (a)
[Firma] Miembro
[Firma] Miembro
[Firma] Bachiller (b)
[Firma] Secretario/a
[Firma] Miembro
[Firma] Bachiller (c)

Índice

I.	INTRODUCCIÓN.....	8
II.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
2.1.	Muestreo de suelo.....	11
2.2.	Caracterización de suelo.....	11
2.3.	Equipo de electroremediación.....	12
2.4.	Técnica de electroremediación.....	13
2.5.	Diseño estadístico experimental.....	14
2.6.	Análisis estadístico.....	14
III.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	15
3.1.	Caracterización de suelo provenientes de relaves mineros.....	15
3.2.	Variabilidad del Ph.....	17
3.3.	Remoción de metales pesados.....	19
3.4.	Efecto del voltaje y tiempo.....	23
3.5.	Pruebas inter-sujetos.....	24
IV.	CONCLUSIONES.....	26
V.	REFERENCIAS.....	27
VI.	ANEXOS.....	35
6.1.	Evidencia de sumisión del artículo en la revista Ciencia de Suelo.....	35

6.2. Copia de la resolución de inscripción del perfil de proyecto en formato articulo aprobado por el consejo de la Facultad de ingeniería y Arquitectura	36
6.3. Modificación de denominación del proyecto de tesis.....	37
6.4. Fotografías del desarrollo experimental	38
6.5. Fotografías de informes de laboratorio.....	39

Electrorremediación de suelos arenosos contaminados con metales pesados provenientes de un relave minero

RESUMEN

Los suelos contaminados con alta concentración de metales pesados son peligrosos en el medio ambiente, y es por ello, que la presente investigación tuvo por objetivo evaluar la técnica de la electroremediación en la remoción de metales pesados en suelos arenosos contaminados con relaves mineros. Se utilizó tres reactores cada uno con dimensiones de 40 x 10 x 10 cm, equipadas con placas de acero inoxidable de 9 x 9 cm en el ánodo y cátodo, conectado a fuentes de alimentación, además se utilizó como agente NaOH a 0.1 M para el catolito y anolito. En el reactor se agregó 4 kg de muestra previamente caracterizada (humedad, conductividad eléctrica, textura, color e intercambio iónico), la muestra se saturó y humedeció con ácido cítrico a 0.1 M. Luego se aplicó corriente eléctrica con distintos voltajes de 20, 25, y 30 V durante 6, 8, y 10 días, para un diseño experimental factorial 32. Los resultados experimentales mostraron una remoción de 44.06 %, 63.32 %, 57.19 %, 72.87 %, 61.76 % y 41.62 % para el Al, Li, Mg, Ni, V y Zn, respectivamente para 10 días a 30 V. En conclusión, a mayor voltaje y mayor tiempo de contacto se obtiene mejores resultados en la electroremediación de metales pesados en suelos arenosos provenientes de relaves mineros.

Palabras clave: electroremediación, relaves mineros, suelos arenosos, metales pesados.

Electroremediation of sandy soils contaminated with heavy metals from mining tailings

ABSTRACT

Soils contaminated with high concentration of heavy metals are dangerous in the environment, and that is why the present research aimed to evaluate the electroremediation technique in the removal of heavy metals in sandy soils contaminated with mine tailings. Three reactors were used, each with dimensions of 40 x 10 x 10 cm, equipped with 9 x 9 cm stainless steel plates on the anode and cathode, connected to power supplies, in addition NaOH was used as a 0.1 M agent for the catholyte and anolyte. In the reactor, 4 kg of previously characterized sample (humidity, electrical conductivity, texture, color and ion exchange) was added, the sample was saturated and moistened with citric acid at 0.1 M. Then, electric current with different voltages of 20, 25, and 30 V was applied for 6, 8, and 10 days, for a factorial experimental design 3². The experimental results showed a removal of 44.06 %, 63.32 %, 57.19 %, 72.87 %, 61.76 % and 41.62 % for Al, Li, Mg, Ni, V and Zn, respectively for 10 days at 30 V. In conclusion, the higher the voltage and the longer the contact time, the better the results obtained in the electroremediation of heavy metals in sandy soils from mine tailings.

Keywords: electroremediation, mine tailings, sandy soils, heavy metals.

I. INTRODUCCIÓN

El suelo es fundamental para la sostenibilidad ecológica, ofreciendo funciones y servicios esenciales para los ecosistemas (Ilyas et al., 2021). Los suelos arenosos, caracterizados por su alta permeabilidad y baja retención de agua, son especialmente vulnerables a la contaminación por metales pesados. Esta contaminación se origina en las descargas de desechos mineros e industriales, así como en el uso de fertilizantes, pesticidas y derrames de petroquímicos (Chang et al., 2020; Lacalle et al., 2020; Zhou et al., 2021). Metales como Al, Ni, Li y Hg persisten en el suelo afectando la salud del suelo, las plantas y los organismos (Wen et al., 2021). En suelos arenosos, la alta permeabilidad facilita la dispersión y movilización de estos metales, lo que complica la remediación y aumenta el riesgo de propagación ambiental (He et al., 2021).

Además, los suelos contaminados son degradados debido a la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos potencialmente tóxicos, resultado de actividades humanas insostenibles como la minería intensiva y uso excesivo de fertilizantes (Ayyanar y Thatikonda, 2021). Por otro lado, la ocurrencia de metales pesados por relaves mineros ha aumentado, esto ocasiona que las áreas degradadas aumenten en mayor extensión (Wang et al., 2021). Los relaves mineros contienen concentraciones altas de metales pesados como el Al, Li, Mg y Ni que pueden lixiviar al suelo y persistir durante meses, años y décadas (Hassan et al., 2024). Además, estos son peligrosos para la estructura química del suelo, plantas y los organismos debido a la bioacumulación, una vez que el suelo sufre contaminación por metales pesados es difícil pero no imposible remediarlo (Nasiri et al., 2020).

En el departamento de Puno, Perú, los principales pasivos ambientales mineros son los relaves mineros, escorias, drenaje ácido de minas y contaminación por metales pesados estos liberan contaminantes como Cu, Sn y Cd (Li et al., 2020; Lizée et al., 2024).

Se tienen diferentes técnicas para la remoción de metales pesados, como el método fisicoquímico que incluye la excavación y relleno de terrenos donde el suelo arenoso contaminado se transporta a vertederos, causa problemas de disposición de residuos (Vargas et al., 2020) el método químico para la remoción de metales pesados emplea reacciones químicas como la solubilización química (Cameselle et al., 2021) y el método fisicoquímico mixto que menciona el lavado de suelos dentro de este método implica la solubilización de contaminantes, causa subproductos tóxicos, (Ji et al., 2020). También, se tiene la técnica de remediación de suelos contaminados con metales pesados, genera residuos adicionales que necesitan ser gestionados, pero técnicas como la electrorremediación ofrecen ventajas (Rahman et al., 2020). Es adecuada para suelos contaminados por metales pesados se adapta a diferentes tipos de contaminantes. Sin embargo, es costosa y requiere una infraestructura especializada (Beyrami, 2021).

Asimismo, la electrorremediación en suelos permite la migración de contaminantes a una profundidad mayor en menor tiempo que otros métodos, mejorando la eficiencia y la velocidad de la remoción (Gidudu y Chirwa, 2022). La técnica se basa en la generación de un campo eléctrico a partir de imponer corriente directa en el ánodo y cátodo (Sánchez et al., 2023), se aplica para tratar suelos contaminados con metales pesados como el Al, Li, Zn y entre otros estos conectados a corrientes eléctricas, lo principal es el proceso de migración de los metales (Paixão et al., 2020). La alta movilidad de metales dificulta su tratamiento con métodos tradicionales, destacando la necesidad de técnicas avanzadas como la electrorremediación para tratar de manera efectiva la contaminación en suelos arenosos afectados por relaves mineros (Kim et al., 2021).

Según Ortiz, (2023) mostró estudio de suelos arenosos contaminados por metales pesados, donde la eficacia de la remoción de la electroremediación se desarrolló a través de la migración, enfocándose en cómo los parámetros operacionales y las propiedades del suelo afectan el proceso. La aplicación en campo de la electroremediación en suelos arenosos contaminados con metales pesados, muestra que la técnica es efectiva a escala piloto, proporcionando una solución viable para la remediación a través de la migración en sitios de minería y otras áreas contaminadas (Haghighizadeh et al., 2024). El estudio se centró en la optimización de la electroremediación para suelos contaminados por minería, evaluando el rendimiento de la técnica en suelos arenosos a través de la migración. Se discutieron las mejoras en la eficiencia del proceso y la adaptación de la técnica para diferentes condiciones del suelo y niveles de contaminación (Ganbat et al., 2024).

El proceso de migración en la electroremediación es el principal mecanismo de transporte de partículas cargadas disueltas en el fluido de los poros del suelo. En un campo eléctrico, cargado positivamente los iones, atraídos por la electricidad estática que migran hacia el cátodo, mientras los iones cargados negativamente migran hacia el ánodo (Tauqeer et al., 2020). La migración se basa en dos mecanismos principales: electromigración es el movimiento de iones contaminantes bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado (Das et al., 2023), en este proceso, se establecen dos electrodos, uno positivo (ánodo) y uno negativo (cátodo), los contaminantes se disuelven a través del suelo debido a la aplicación de un campo eléctrico (Cherfi et al., 2023) y la electroósmosis que es el movimiento del agua a través del suelo inducido por el campo eléctrico. La corriente eléctrica aplicada genera un flujo de agua que transporta los contaminantes disueltos, incluidos los metales pesados, hacia los electrodos (Amipara et al., 2021).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la electrorremediación de suelos arenosos contaminados con metales pesados provenientes de un relave minero.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo arenoso empleado en la investigación se obtuvo de relaves mineros del departamento de Puno, Perú. Estos relaves son generados durante el proceso de extracción y procesamiento de minerales metálicos y no metálicos. La ganga y otros materiales no aprovechables, que quedan después de extraer y concentrar el mineral, se convierten en relaves. Dichos relaves se recolectaron de zonas con actividad minera.

2.1. Muestreo de suelo

Para el muestreo se siguió la normativa de la Guía para el Muestreo de Suelos según el D.S. N° 002-2013-MINAM. Las muestras se tomaron a una profundidad de 20 cm, empleando el método de muestreo por identificación en un área de 0.5 hectáreas, se establecieron seis puntos de muestreo. Se recolectó una muestra de 1 kg, que fue transportada al laboratorio en bolsas herméticas para su caracterización inicial y 16 kg adicionales para el desarrollo experimental.

2.2. Caracterización de suelo

El análisis fisicoquímico del suelo para la caracterización y los tratamientos se realizaron de acuerdo a los procedimientos establecidos por De la Cruz, (2022).

Tabla 1*Metodología de análisis fisicoquímica de suelo*

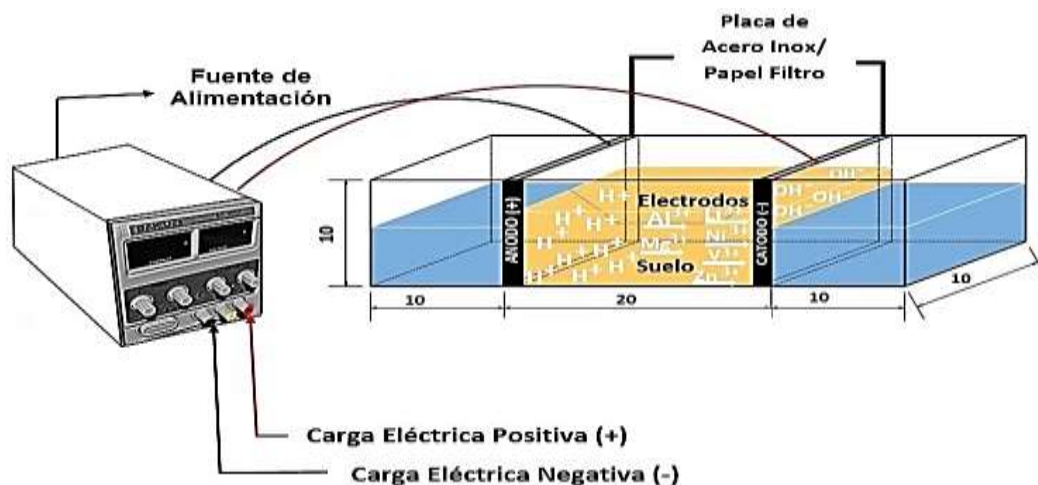
Caracterización	Metodología
Humedad* (%)	NTP 339.127.1998 (revisada el 2019) - Contenido de Humedad del suelo
pH	NTP 339.176 - Determinación del PH en Suelos
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Sensor de Conductividad (Vernier GoDirect™), FCC ID: QOQ-BGM113, IC: 5123A-BG113
Textura	Aquino, R Métodos para análisis de aguas, suelos y residuos solidos
Color	Escala de Munsell (1975)
Intercambio iónico	Método del acetato de amonio

2.3. Equipo de electroremediación

Se diseñó tres reactores de vidrio modificados de Casazola et al. (2023) cada uno con dimensiones 40 cm de largo, 10 cm de alto y 10 cm de ancho, como electrodo se utilizó placas de Al y papel filtro ambos con dimensiones de 9 cm x 9 cm. El sistema eléctrico se conformó por tres fuentes de alimentación modelo BK-305D, que distribuía energía eléctrica a los reactores a través de dos conductos, uno alimentado con carga eléctrica positiva y el otro con carga eléctrica negativa.

Figura 1

Diseño del reactor de electroremediación



2.4. Técnica de electroremediación

El proceso de electroremediación, inicio con la carga de 4 kg de muestra a cada reactor, se utilizó como agente al NaOH a una concentración constante de 0.1 M a un volumen de 400 ml en el anolito y católico asegurando condiciones uniformes en ambos compartimentos, antes de encender las fuentes de alimentación, el suelo se saturó y humedeció con ácido cítrico ($C_6H_8O_7$) 0.1 M, enseguida se suministró energía mediante los reguladores de voltaje a cada reactor. En el primer reactor se aplicaron 20 V, en el segundo 25 V, y en el tercero 30 V (Ghobadi et al., 2021). Con tiempos de 6, 8 y 10 días (Chang et al., 2020; Kim et al., 2021).

2.5. Diseño estadístico experimental

El diseño experimental empleado en la investigación se basa en un diseño factorial 3^2 (Fernández, 2020) en la tabla 2 se observan dos factores principales: en función a (Wen et al., 2021) voltaje y tiempo, cada uno con tres niveles de tratamiento, siendo 9 unidades experimentales con tres replicas, dando un total de 27 unidades experimentales. Asimismo, el análisis se realizó utilizando el software Minitab.

Tabla 2

Diseño factorial 3^2

Niveles	Max.	Medio	Min.
Voltaje (V)	30	25	20
Tiempo (días)	10	8	6

2.6. Análisis estadístico

Se empleo un diseño factorial 3^2 con tres replicas, con un total de 27 unidades experimentales, tomado de Navarro y Soler (2020):

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

μ : Efecto promedio global

τ_i : Efecto del factor A

β_j : Efecto del factor B

$(\tau\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción entre A y B

ϵ_{ijk} : Error experimental

III.RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Caracterización de suelo provenientes de relaves mineros

Los resultados de la caracterización de suelo provenientes de relaves mineros presentan los siguientes valores atípicos de Aliaga et al. (2023); De la Cruz, (2022):

Tabla 3

Resultados de suelo proveniente de relaves mineros

Caracterización	Resultado	Referencia
Humedad	3.35 ± 0.07	Este estudio
	3.40 ± 0.06	De la Cruz, (2022)
	3.22 ± 0.04	Aliaga et al., (2023)
pH	6.03 ± 0.55	Este estudio
	6.05 ± 0.45	De la Cruz, (2022)
	6.13 ± 0.35	Aliaga et al., (2023)
Conductividad	525 ± 3.51	Este estudio
	514 ± 3.61	De la Cruz, (2022)
	533 ± 2.71	Aliaga et al., (2023)
Textura	Arena 85 %	Este estudio
	Franco arena 95 %	De la Cruz, (2022)
	Arena 70 %	Aliaga et al., (2023)
	Negro	Este estudio

Color	Negro	De la Cruz, (2022)
	Negro	Aliaga et al., (2023)
Intercambio iónico	8.13152 meq/100gr	Este estudio
	8.141529 meq/100gr	De la Cruz, (2022)
	8.14851 meq/100gr	Aliaga et al., (2023)

En la tabla 3, se observa que la baja humedad facilita una mayor concentración de contaminantes en áreas específicas, lo que permite una aplicación más eficiente de la electroremediación y una mayor remoción de metales pesados (Aliaga et al., 2023). La alta conductividad eléctrica del suelo mejora la movilidad de contaminantes metálicos y su respuesta a estímulos eléctricos, siendo crucial para la efectividad de la electroremediación (De la Cruz, 2022). Una alta conductividad indica una mayor disponibilidad de iones, lo que optimiza la transferencia de corriente eléctrica y potencia la movilización de metales pesados. Esto asegura una distribución uniforme del campo eléctrico, contribuyendo a una remoción más eficiente y homogénea de los metales pesados (Amipara et al., 2021).

La textura arenosa del suelo, con su estructura porosa, facilita la infiltración de contaminantes y la movilización de iones metálicos durante el proceso de electroremediación (Aliaga et al., 2023). Además, el color negro del suelo, asociado con la presencia de materiales orgánicos o carbonosos, mejora la capacidad del suelo para adsorber y estabilizar contaminantes, contribuyendo así a una remoción más efectiva (Ghobadi et al., 2021). Finalmente, un alto valor de intercambio iónico en el suelo refleja su capacidad para movilizar metales pesados y actúa como un indicador clave de la eficacia del proceso de remoción. Esta propiedad mejora la eficiencia de

la electroremediación al permitir una captura y estabilización más efectiva de los metales (Wang et al., 2021).

La concentración inicial de los metales pesados fue de 9812.15 (Al), 41.60 (Li), 4116.92 (Mg), 13.34 (Ni), 11.90 (V) y 57.16 kg/mg (Zn), estos elementos son provenientes de relaves mineros. Los relaves mineros, son residuos generados durante el procesamiento de minerales, liberan metales en su entorno generando una fuente significativa de contaminación ambiental (Lysenka et al., 2020).

3.2. Variabilidad del Ph

En la Tabla 4, se observa la variabilidad del pH en el ánodo fluctúa de 4.2 a 3.1, indicando un proceso de acidificación que favorece la solubilización de metales pesados. Por otro lado, en el cátodo, el pH aumenta de 8.3 a 9.5, lo que promueve la precipitación de metales y la neutralización de ácidos. Estas variaciones son fundamentales para remoción de metales.

Tabla 4

Variabilidad de pH en el ánodo y cátodo

Día	Ánodo (+)			Cátodo (-)		
	Tto 1	Tto 2	Tto 3	Tto 1	Tto 2	Tto 3
	(20 V)	(25 V)	(30 V)	(20 V)	(25 V)	(30 V)
1	4.2	4.1	4.3	8.5	8.3	8.7
2	3.8	3.6	3.8	9	9.2	9.1
3	3.5	3.2	3.3	8.8	8.6	8.9
4	4	4.1	4.2	9.2	9	9.1

5	3.9	3.7	3.5	8.7	8.5	8.8
6	3.6	3.5	3.1	9.5	9.4	9.3
7	4.1	4.2	3.9	8.7	8.9	8.8
8	3.7	3.6	3.8	9.3	9.1	9.4
9	3.4	3.1	3.5	8.6	8.4	8.3
10	3.3	3.1	3.4	9.1	8.9	8.8

Estudios recientes de electroremediación han mostrado que el pH en el ánodo (+) oscila entre 3.1 y 4.3, indicando la prevalencia de reacciones de oxidación que facilitan la disolución de metales pesados y la liberación de iones contaminantes en la solución (Beyrami, 2021). En contraste, en el cátodo (-), donde el pH fluctúa entre 8.3 y 9.5, predominan las reacciones de reducción, incluyendo la conversión de agua en hidrógeno, lo que influye notablemente en la migración de contaminantes (Ji et al., 2020). La generación de hidrógeno en el cátodo, junto con el incremento del potencial en esta región, facilita la reducción de iones metálicos y promueve su precipitación, optimizando así la remoción de metales del suelo (Das et al., 2023). La interacción entre estas reacciones en el ánodo y el cátodo mejora la efectividad general del proceso de electroremediación, facilitando la migración y eliminación de contaminantes (Selvi et al., 2019).Final del formulario

3.3. Remoción de metales pesados

En la tabla 5, se muestra los resultados de concentración final de los metales pesados. Asimismo, en la figura 2, se visualiza los resultados en porcentajes de la remoción de los diferentes elementos.

Tabla 5

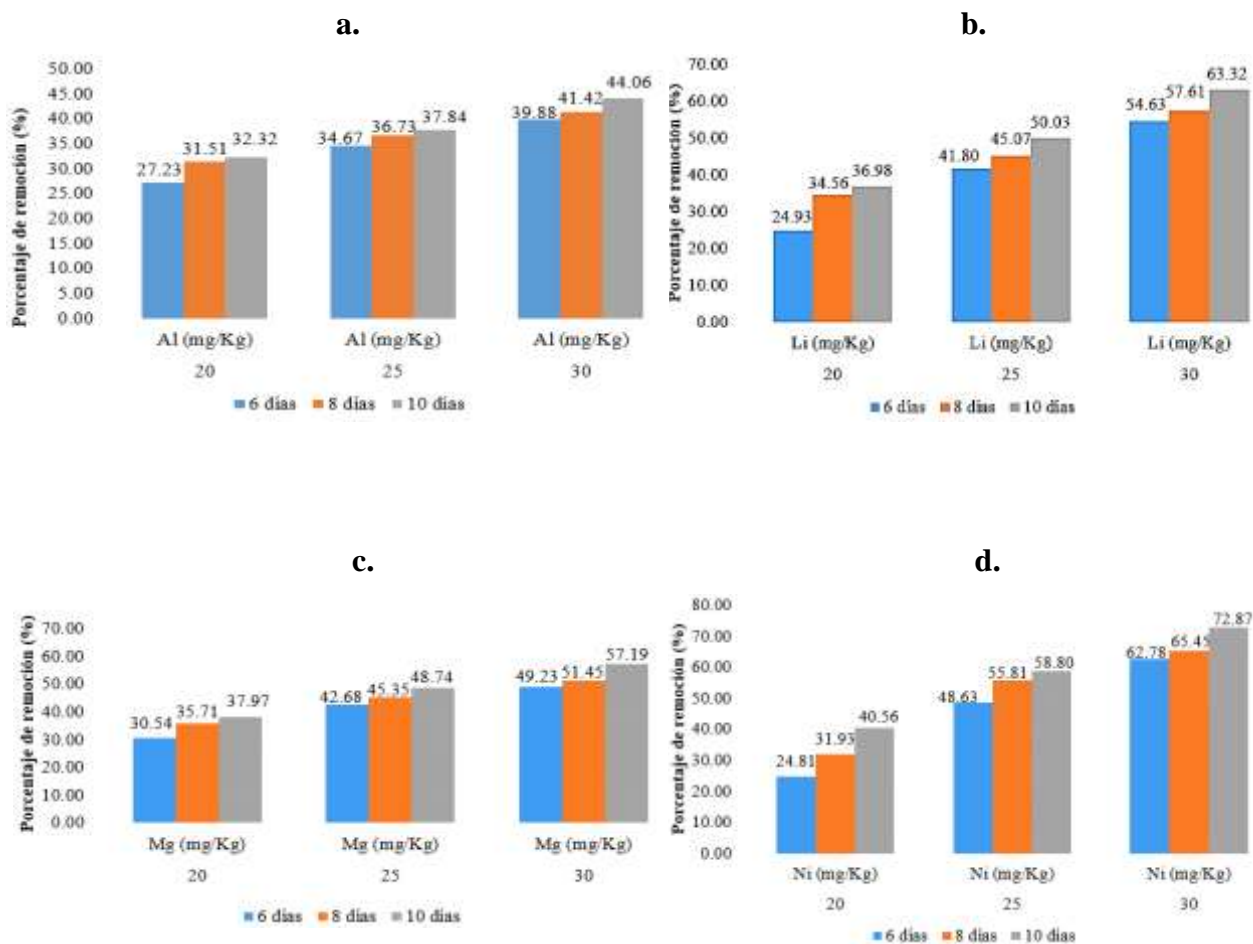
Resultado de concentración final de metales pesados

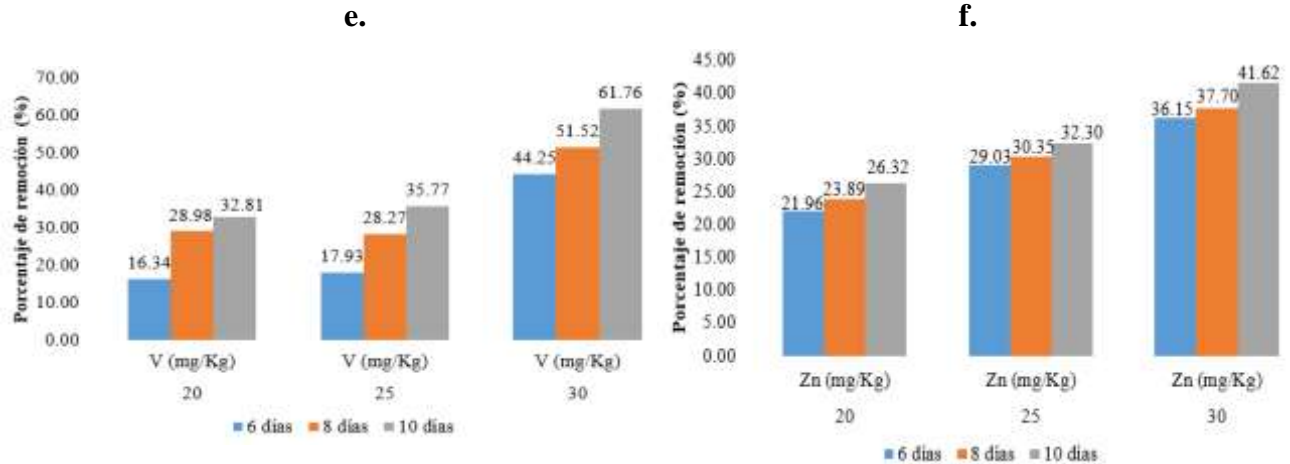
N° de tratamiento	Corriente eléctrica (Voltios)	Tiempo (días)	Resultado de concentración final					
			Al (mg/kg)	Li (mg/kg)	Mg (mg/kg)	Ni (mg/kg)	V (mg/kg)	Zn (mg/kg)
1	20	6	7140.30	31.21	2860.20	10.02	9.94	44.60
2	20	8	6730.10	27.21	2650.21	9.10	8.65	43.43
3	20	10	6610.50	26.22	2560.23	7.99	8.00	42.10
4	25	6	6410.20	24.21	2360.21	7.00	9.75	40.60
5	25	8	6209.17	22.92	2250.10	6.00	8.55	39.98
6	25	10	6099.55	20.81	2110.11	5.60	7.74	38.78
7	30	6	5899.45	18.98	2090.75	5.00	6.67	36.59
8	30	8	5747.77	17.77	1998.12	4.74	5.80	35.25
9	30	10	5489.65	15.33	1769.58	3.79	4.59	33.58
1	20	6	7139.33	31.23	2858.21	10.03	9.95	44.61
2	20	8	6720.21	27.22	2640.23	9.12	8.34	43.59
3	20	10	6630.99	26.21	2540.10	7.82	8.00	42.11
4	25	6	6410.33	24.21	2359.22	6.79	9.67	40.60
5	25	8	6209.33	22.91	2250.58	5.88	8.53	39.65
6	25	10	6098.55	20.82	2110.32	5.50	7.65	38.66
7	30	6	5898.23	18.65	2089.48	4.90	6.27	36.20
8	30	8	5748.78	17.97	1999.77	4.75	5.85	35.79
9	30	10	5488.45	15.12	1759.53	3.59	4.59	33.37
1	20	6	7140.31	31.23	2860.21	10.03	9.96	44.60
2	20	8	6710.52	27.22	2650.11	9.02	8.35	43.49
3	20	10	6680.77	26.21	2560.61	7.98	7.99	42.12
4	25	6	6410.22	24.20	2359.99	6.77	9.88	40.49
5	25	8	6206.58	22.71	2249.57	5.81	8.52	39.79
6	25	10	6098.23	20.72	2110.79	5.39	7.54	38.64

7	30	6	5899.52	18.99	2090.45	5.00	6.97	36.70
8	30	8	5746.96	17.17	1998.56	4.35	5.65	35.79
9	30	10	5489.12	15.32	1758.43	3.49	4.48	33.16

Figura 2

Datos de remoción de metales a diferentes voltajes de tratamiento (20, 25, y 30 V) Al (a), Li (b), Mg (c), Ni (d), V(e) y Zn (f)





El Al disminuye con el incremento del voltaje y tiempo, hasta alcanzar un porcentaje de remoción del 44.06 % a 30 V (grafico a), se asemeja con los estudios de He et al. (2021) que obtuvo el 43. 01 % a 30 V demostrando la mayor eficiencia del Al a niveles de tratamientos más altos. Los datos del Li disminuyen en la remoción hasta 63.32 % a 30 V en 10 días (grafico b), a mayor voltaje la eficiencia es mejor (Lysenka et al., 2020) quien obtuvo una remoción de 64.15 % a 25 V en 10 días. El resultado para el Mg es de 44.06 % (grafico c), el cual se asemeja con los resultados de Fitch et al. (2020) quien obtuvo 45.21 %. En cuanto al V (grafico e), muestra los resultados del 61.76 % de remoción en mayor tiempo, lo que concuerda con Azhar et al. (2022) quien obtuvo resultados similares de 62.57 % en 8 días. El Zn con resultados de 41.62 % a 30 V (grafico f), muestra una mayor remoción con el aumento del voltaje en el tratamiento, lo concuerda con los resultados de Worood et al. (2023) quien obtuvo el 41.68 % a 30 V. Finalmente, el Ni con resultados de 72.87 % (grafico d), muestra el mejor porcentaje de remoción, debido a la influencia del voltaje y tiempo (Ghobadi et al., 2021), quien obtuvo resultados de 75.23 % en una operación de trabajo de 20 V a 8 días.

Tabla 6*Comparación de metales pesados con normas internacionales*

Parámetro	Result. inicial	Result. Final*	Canadá**	Europa***	Sector	EPA
		Valores (mg/k)				Valores (Max. concentración diaria)
Al	9812.15	5489.65	-	1000	Acabado de metales	2 - 2 (mg/L)
Li	41.60	15.33	-	100	-	-
Mg	4116.92	1769.58	-	500	-	-
						4,1 - 4,1 (mg/L)
Ni	13.34	3.77	89	30	Acabado de metales	2,6 - 2,6 (mg/L) (4 días)
V	11.90	4.59	130	130	-	-
Zn	57.16	33.58	410	2500 a 4000		4,2 - 4,2 (mg/L) 2,6 - 2,6 (mg/L) (4 días)

**Ontario Ministry of Environment, Conservation and Parks (MECP) bajo la Environmental Protection Act (EPA).

***Directiva de la Unión Europea 2006/21/EC.

En la tabla 6, se muestra los valores obtenidos en los ensayos a 30 V durante 10 días muestran variaciones significativas en las concentraciones de los metales pesados analizados. Los

elementos como el Li, Ni, V y Zn cumplen con las normativas vigentes tanto en Canadá como en Europa, lo que indica que su presencia en el suelo es aceptable y no representa un riesgo para la salud ambiental. Por otro lado, Al y Mg muestran resultados que superan los límites permitidos, lo que implica una preocupación sobre la calidad del suelo en las áreas analizadas. Estos resultados sugieren la necesidad de implementar medidas correctivas para reducir las concentraciones de estos metales y asegurar que el suelo cumpla con los estándares de calidad requerido.

3.4. Efecto del voltaje y tiempo

El voltaje a 30 V y el tiempo a 10 días tienen un impacto significativo. La concentración de Al disminuye con el aumento en el voltaje y tiempo, esta tendencia se observa en todos los elementos. El incremento en el voltaje y el tiempo de exposición conduce a una mayor movilización de metales (Wen et al., 2021) el aumento en el voltaje acelera la movilidad de los iones de metales pesados hacia los electrodos, facilitando la migración de los metales con esto mejora la eficiencia de remoción metales (Lizée et al., 2024). Un mayor voltaje incrementa el potencial eléctrico en el sistema, lo que impulsa los iones de los metales pesados hacia los electrodos (Xiao y Zhou, 2019). Esto se debe a que el campo eléctrico generado por el voltaje arrastra los iones cargados, promoviendo su movimiento hacia el electrodo opuesto (Tauqeer et al., 2020).

El tiempo de exposición prolongado disminuye la concentración de metales en soluciones, destacando la importancia de estos factores en la optimización de procesos químicos y de separación (Sun et al., 2023). A un tiempo de exposición prolongado reduce la concentración de metales en soluciones, debido a la formación de complejos metálicos menos solubles o a la

saturación del medio (Johnson, 2022). El incremento en el tiempo da como resultado niveles de remoción más altas (Sánchez et al., 2023).

No obstante, la técnica de la electroremediación presenta limitaciones. Primero, la aplicabilidad de los resultados a gran escala puede ser incierta (Pedersen et al., 2018). Los efectos observados en un entorno de laboratorio pueden no ser directamente transferibles a sistemas industriales debido a las variaciones en las condiciones operativas y la escala del tratamiento (Gidudu y Chirwa, 2022). Además, la implementación industrial de estas técnicas puede enfrentar desafíos como altos costos de operación, la necesidad de equipos especializados y la complejidad en el manejo de grandes volúmenes de suelo contaminado (Ganbat et al., 2024). Las limitaciones deben ser consideradas al evaluar la viabilidad en contextos industriales y gran escala (Abou-Shady et al., 2024).

3.5. Pruebas inter-sujetos

La tabla 7, muestra la significancia de las variables y sus interacciones debido a que el ($p < 0.05$), además en el resultado de F se observa la mayor influencia que voltaje sobre el tiempo en la remoción de los elementos metálicos, dando a conocer un efecto confiable sobre la variable dependiente.

Tabla 7*Prueba de efectos inter – sujetos*

Variable dependiente	Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajuste.	Valor F	Valor P.
^a Aluminio (Al)	Voltaje	2	5668540	2834270	18133.45	0.000
	Tiempo	2	762645	381323	2439.67	0.000
	Interacciones de 2 términos	4	76764	19191	122.78	0.000
^b Litio (Li)	Voltaje	2	2475665	1237833	52688.45	0.000
	Tiempo	2	390361	195181	8307.88	0.000
	Interacciones de 2 términos	4	22474	5618	239.15	0.000
^c Magnesio (Mg)	Voltaje	2	2475665	1237833	52688.45	0.000
	Tiempo	2	390361	195181	8307.88	0.000
	Interacciones de 2 términos	4	22474	5618	239.15	0.000
^d Níquel (Ni)	Voltaje	2	98.23	49.11	3486.17	0.000
	Tiempo	2	11.56	5.78	410.21	0.000
	Interacciones de 2 términos	4	0.93	0.23	16.41	0.000
^e Vanadio (V)	Voltaje	2	56.7	28.38	1335.57	0.000
	Tiempo	2	19.19	9.59	451.42	0.000
	Interacciones de 2 términos	4	0.51	0.13	6.04	0.000
^f Zinc (Zn)	Voltaje	2	307.13	153.57	5486.74	0.000
	Tiempo	2	28.68	14.34	512.37	0.000
	Interacciones de 2 términos	4	1.53	0.38	13.72	0.000

Dónde: ^aR= 99.96%, ^bR=99.99%, ^cR= 99.77%, ^dR= 99.50%, ^eR= 99.85%, ^fR=99.85%

La corriente eléctrica y tiempo son significativos para todos los elementos metálicos, la corriente eléctrica ejerce un impacto más pronunciado. con significancias más bajas en todos los elementos metálicos. La diferencia en los valores de F de Fisher entre la corriente eléctrica y el tiempo los valores para la corriente eléctrica son mayores que los del tiempo en todos los elementos metálicos. La corriente eléctrica muestra una significancia extremadamente alta en todos los elementos metálicos, lo que indica un efecto confiable sobre la variable dependiente (Gonzales, 2021) al enfatizar que los valores en la significancia tan bajos reflejan una fuerte evidencia contra la hipótesis nula. Por otro lado, el tiempo también muestra significancia, pero con valores menores, lo que indica efectos menos elevados comparados con la corriente eléctrica (Smith et al., 2022). Según, Field, (2022) destaca que los valores del tiempo tienen un impacto significativo, pero no tan pronunciado como el de factores de valores de significancia extremadamente bajos. Ambos factores son importantes, la corriente eléctrica ejerce un efecto considerablemente más intenso sobre la variable dependiente en comparación con el tiempo.

IV.CONCLUSIONES

La evaluación de la electroremediación en suelos arenosos contaminados con metales pesados provenientes de un relave minero, mostro que esta técnica es efectiva para la remoción de contaminantes en suelos arenosos. La alta permeabilidad de los suelos arenosos favorece la distribución uniforme del campo eléctrico, mejorando el proceso de remoción de metales pesados.

La aplicación de un voltaje de 30 V para la remoción de metales pesados en suelos arenosos obtuvo los resultados más relevantes en comparación con los otros voltajes evaluados. Este voltaje demostró ser el más efectivo, superando a los voltajes alternativos (20 y 25 V) en términos de

efectividad en el proceso de electroremediación. Los voltajes más altos mejoran la remoción de los metales pesados. Asimismo, el tiempo determina la remoción de metales pesados, a mayor tiempo prolongado mayor remoción.

Se obtuvo un porcentaje de remoción del 78.12 % para el Ni en comparación para los otros elementos Al, Li, Mg, Ni, V y Zn esto a condiciones de 30 V por un periodo de 10 días, esto se debe a la migración.

Finalmente, para futuras investigaciones se sugiere pruebas piloto teniendo en cuenta las características del suelo. A nivel industrial se debe adaptar el diseño de los equipos a gran escala. Estos enfoques permitirán mejorar la eficiencia de la técnica y garantizar su sostenibilidad y viabilidad a largo plazo.

V.REFERENCIAS

- Abou-Shady, A., El-Araby, H., El-Harairy, A., y El-Harairy, A. (2024). Utilizing the approaching/movement electrodes for optimizing the soil electrokinetic remediation: A comprehensive review. *South African Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.07.004>
- Aliaga, R. D., Condori, E. E., y Ore, P. E. (2023). *Remoción de metales pesados en los suelos contaminados usando el método electrocinético en el distrito de Matahuasi, Junín - 2022*. [Tesis de Pregrado, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe>
- Amipara, B., Galgale, A., y Shah, N. (2021). Enhanced electrokinetic remediation of Zinc contaminated soil by changeover of composite electrolyte. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 18(2). <https://doi.org/10.3233/AJW210019>

- Ayyanar, A., y Thatikonda, S. (2021). Experimental and Numerical studies on remediation of mixed metal-contaminated sediments by electrokinetics focusing on fractionation changes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(5). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09064-4>
- Azhar, U., Ahmad, H., Shafqat, H., Babar, M., Muhammad Shahzad Munir, H., Sagir, M., Arif, M., Hassan, A., Rachmadona, N., Rajendran, S., Mubashir, M., y Shiong Khoo, K. (2022). Remediation techniques for elimination of heavy metal pollutants from soil: A review. *Environmental Research*, 214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113918>
- 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*. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.09.011>
- Cameselle, C., Gouveia, S., y Cabo, A. (2021). Enhanced electrokinetic remediation for the removal of heavy metals from contaminated soils. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/app11041799>
- Casazola, J. A., Purca, A. J., y Valle, Y. R. (2023). *Sistema de electrorremediación con arreglo lineal para remoción de metales pesados de suelos contaminados caso San Miguel de Viso*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Callao]. <https://repositorio.unac.edu.pe>
- Chang, J. H., Dong, C. Di, Huang, S. H., y Shen, S. Y. (2020). The study on lead desorption from the real-field contaminated soil by circulation-enhanced electrokinetics (CEEK) with EDTA. *Journal of Hazardous Materials*, 383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121194>

- Cherfi, A., Maache-Rezzoug, Z., y Rezzoug, S. A. (2023). A full factorial design-based desirability function approach to investigate the transport of Ni²⁺, Co²⁺, Cr³⁺ and Zn²⁺ through polymer inclusion membranes. *Desalination and Water Treatment*, 308. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29917>
- Das, S., Sultana, K. W., Ndhhlala, A. R., Mondal, M., y Chandra, I. (2023). Heavy metal pollution in the environment and its impact on health: Exploring green technology for remediation. In *Environmental Health Insights* (Vol. 17). SAGE Publications Inc. <https://doi.org/10.1177/11786302231201259>
- De la Cruz, Y. L. (2022). Remediación electrocinética en la remoción de zinc de los suelos contaminados del Valle del Mantaro - 2021. [Tesis de Pregrado, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe>
- Fernández, S. (2020). Diseño de experimentos: Diseño factorial.
- Fitch, A., Baldera- Hernandez, P., y Ibanez, J. (2020). Electrochemical technologies combined with physical, biological, and chemical processes for the treatment of pollutants and wastes: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107810>
- Ganbat, N., Altaee, A., Hamdi, F. M., Zhou, J., Chowdhury, M. H., Zaidi, S. J., Samal, A. K., Almalki, R., y Tapas, M. J. (2024). PFOA remediation from kaolinite soil by electrokinetic process coupled with activated carbon/iron coated activated carbon - permeable reactive barrier. *Journal of Contaminant Hydrology*, 267, 104425. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104425>
- Ghobadi, R., Altaee, A., Zhou, J. L., Karbassiyazdi, E., y Ganbat, N. (2021). Effective remediation of heavy metals in contaminated soil by electrokinetic technology incorporating reactive

- filter media. *Science of the Total Environment*, 794.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148668>
- Gidudu, B., y Chirwa, E. M. (2022). The role of pH, electrodes, surfactants, and electrolytes in electrokinetic remediation of contaminated soil. In *Molecules* (Vol. 27, Issue 21). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/molecules27217381>
- Haghighizadeh, A., Rajabi, O., Nezarat, A., Hajyani, Z., Haghmohammadi, M., Hedayatikhah, S., Asl, S. D., y Aghababai Beni, A. (2024). Comprehensive analysis of heavy metal soil contamination in mining Environments: Impacts, monitoring Techniques, and remediation strategies. In *Arabian Journal of Chemistry* (Vol. 17, Issue 6). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2024.105777>
- Hassan, S., Bhadwal, S. S., Khan, M., Sabreena, Nissa, K. U., Shah, R. A., Bhat, H. M., Bhat, S. A., Lone, I. M., y Ganai, B. A. (2024). Revitalizing contaminated lands: A state-of-the-art review on the remediation of mine-tailings using phytoremediation and genomic approaches. In *Chemosphere* (Vol. 356). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141889>
- He, C., Hu, A., Wang, F., Zhang, P., Zhao, Z., Zhao, Y., y Liu, X. (2021). Effective remediation of cadmium and zinc co-contaminated soil by electrokinetic-permeable reactive barrier with a pretreatment of complexing agent and microorganism. *Chemical Engineering Journal*, 407. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126923>
- Ilyas, S., Srivastava, R., Kim, H., y Cheema, H. (2021). Enhanced electrokinetic techniques in soil remediation for removal of heavy. *Jeunju*.
<https://doi.org/doi:10.1002/9781119670186.ch13>

- Ji, D., Zhang, J., Meng, F., Wang, Y., y Zhang, D. (2020). Species and distribution of arsenic in soil after remediation by electrokinetics coupled with permeable reactive barrier. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(12). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04935-x>
- Kim, S. O., Jeong, J. Y., Lee, W. C., Yun, S. T., & Jo, H. Y. (2021). Electrokinetic remediation of heavy metal-contaminated soils: performance comparison between one- and two-dimensional electrode configurations. *Journal of Soils and Sediments*, 21(8). <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02803-z>
- Lacalle, R., Becerril, J., y Garbisu, C. (2020). Biological methods of polluted soil remediation for an effective economically-optimal recovery of soil health and ecosystem services. *Journal of Environmental Science and Public Health*, 04(02). <https://doi.org/10.26502/jesph.96120089>
- Li, H., Tian, Y., Liu, W., Long, Y., Ye, J., Li, B., Li, N., Yan, M., & Zhu, C. (2020). Impact of electrokinetic remediation of heavy metal contamination on antibiotic resistance in soil. *Chemical Engineering Journal*, 400. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125866>
- Lizée, A., Loulergue, P., Pensel, A., y Szymczyk, A. (2024). Electrokinetic index: A new metric for advanced characterization of membranes with various geometries. *Journal of Membrane Science Letters*, 4(1). <https://doi.org/10.1016/j.memlet.2024.100069>
- Lysenka, L., Mishchuk, N., y Kovalchuk, V. (2020). Basic principles and problems in decontamination of natural disperse systems. The electrokinetic treatment of soils. *Advances in Colloid and Interface Science*, 310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102798>
- MECP. (2006). Environmental Protection Act (EPA), R.S.O. 2006.<https://www.ontario.ca/laws/statute/90e19>

MINAM. (2013). *Guía para el muestreo de suelos*. D.S. N° 002-2013-MINAM.
<https://www.minam.gob.pe>

Nasiri, A., Jamshidi-Zanjani, A., y Khodadadi Darban, A. (2020). Application of enhanced electrokinetic approach to remediate Cr-contaminated soil: Effect of chelating agents and permeable reactive barrier. *Environmental Pollution*, 266.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115197>

Navarro, F., & Soler, P. (2020). *Diseño factorial: dos variables independientes, A x B*.

Ortiz, C. P. (2023). *Métodos de electroremediación y fitorremediación para descontaminar los suelos por metales pesados en la planta metalúrgica de Yauris – UNCP - 2022*. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].

<https://repositorio.uncp.edu.pe>

Paixão, I. C., López-Vizcaíno, R., Solano, A. M. S., Martínez-Huitle, C. A., Navarro, V., Rodrigo, M. A., y dos Santos, E. V. (2020). Electrokinetic-Fenton for the remediation low hydraulic conductivity soil contaminated with petroleum. *Chemosphere*, 248.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126029>

Pedersen, K. B., Jensen, P. E., Ottosen, L. M., & Barlindhaug, J. (2018). The relative influence of electrokinetic remediation design on the removal of As, Cu, Pb and Sb from shooting range soils. *Engineering Geology*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.005>

Rahman, Z., Jagadheeswari, Mohan, A., Tharini, Selvendran, y Priya, S. (2020). Electrokinetic remediation: An innovation for heavy metal contamination in the soil environment. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.541>

Sánchez, I., Molina, L., Prieto, F., Ángeles, M., y Segura, A. (2023). Past, present and future trends in the remediation of heavy-metal contaminated soil - Remediation techniques

- applied in real soil-contamination events. In *Heliyon* (Vol. 9, Issue 6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16692>
- Selvi, A., Rajasekar, A., Theerthagiri, J., Ananthaselvam, A., Sathishkumar, K., Madhavan, J., y Rahman, P. K. S. M. (2019). Integrated remediation processes toward heavy metal removal/recovery from various environments-A review. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 7, Issue May). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00066>
- Sun, Z., Zhao, M., Chen, L., Gong, Z., Hu, J., y Ma, D. (2023). Electrokinetic remediation for the removal of heavy metals in soil: Limitations, solutions and prospection. *Science of the Total Environment*, 903(April), 165970. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165970>
- Tauqeer, H. M., Karczewska, A., Lewińska, L. K., Fatima, M., Khan, S. A., Farhad, M., Turan, V., Ramzani, P. M. A., y Iqbal, M. (2020). Environmental concerns associated with explosives (HMX, TNT, and RDX), heavy metals and metalloids from shooting range soils: Prevailing issues, leading management practices, and future perspectives. In *Handbook of Bioremediation: Physiological, Molecular and Biotechnological Interventions* (pp. 569–590). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819382-2.00036-3>
- PECUE. (2006). Gestión de residuos de las industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE. *Diario Oficial de la Unión Europea*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32006L0021>
- Vargas, F., Lopez, M., y Rigamonti, L. (2020). Environmental impacts evaluation of treated copper tailings as supplementary cementitious materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104890>

- Wang, Y., Li, A., y Cui, C. (2021). Remediation of heavy metal-contaminated soils by electrokinetic technology: Mechanisms and applicability. In *Chemosphere* (Vol. 265). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129071>
- Wen, D., Fu, R., y Li, Q. (2021). Removal of inorganic contaminants in soil by electrokinetic remediation technologies: A review. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 401). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123345>
- Worood A., El-Mehalmey, y Mohamed, H. (2023). 8 - Electrokinetic remediation technique for soil contaminants. *Nanoremediation*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823874-5.00005-X>
- Xiao, J., y Zhou, S. (2019). Effect of electrode materials on electro kinetic remediation of uranium contaminated soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 300 (3). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/300/3/032074>
- Zhou, H., Liu, Z., Li, X., y Xu, J. (2021). Remediation of lead (II)-contaminated soil using electrokinetics assisted by permeable reactive barrier with different filling materials. *Journal of Hazardous Materials*, 408. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124885>

VI. ANEXOS

6.1. Evidencia de sumisión del artículo en la revista Ciencia de Suelo

Ciencia del Suelo

Estimados/as Leibnitz Galiany Ponce Ccopa:

El **Equipo Editorial** de **Ciencia del Suelo** y la **Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo** agradecen vuestro envío del manuscrito "Electrorremediación de suelos arenosos contaminados con metales pesados provenientes de un relave minero" para consideración de publicación en la revista. Con el sistema de gestión de publicaciones en línea que utilizamos (*Open Journal System*, OJS) podrán seguir el progreso del proceso editorial tras iniciar sesión en el sitio web de la publicación:

URL del manuscrito: <https://ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/authorDashboard/submission/891>

Nombre de usuario/a: leibnitz1

Cumplo en aclararle que este es sólo un acuse de recibo del manuscrito en el sistema y no significa que el manuscrito está ya listo para continuar con el proceso editorial. Este paso será dado sólo cuando se verifique que el manuscrito se encuadra en los enfoques y alcances de la revista y cumple con los formatos requeridos en las "Directrices para Autores/as".

Si tiene alguna duda, por favor no deje de ponerse en contacto conmigo.

En breve tendrá más noticias del proceso editorial.

¡Gracias por elegir a **Ciencia del Suelo** para publicar los resultados de vuestra investigación!

Un cordial saludo,

Ing. Agr. Guillermo A. Studdert, M.Sc., Dr.Ing.Agr.

Leibnitz Galiany Ponce Ccopa
leibnitzponce@upeu.edu.pe

Ciencia del Suelo

Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo
E-mail: revista.cienciadelsuelo@gmail.com
Sitio web: <https://cienciadelsuelo.suelos.org.ar/>

6.2. Copia de la resolución de inscripción del perfil de proyecto en formato artículo aprobado por el consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura



"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

RESOLUCIÓN N° 0241-2024/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Fecha 23 de abril de 2024

VISTO:

El expediente de **Catalina Ccapa Ari**, identificado(a) con Código Universitario N° 201421090 y **Leibnitz Galliany Ponce Coopa** identificado(a) con Código Universitario N° 202014054, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Catalina Ccapa Ari** y **Leibnitz Galliany Ponce Coopa**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Electrorremediación de suelos arenosos contaminado por metales pesados provenientes de un área degradada" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 23 de abril de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "Electrorremediación de suelos arenosos contaminado por metales pesados provenientes de un área degradada" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a **MSc. Rose Adeline Callata Chura** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera** y **Ing. Nancy Curasi Rafael**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Ph.D. Silvia Pilco Quesada
SECRETARIA ACADÉMICA

CC:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo

6.3. Modificación de denominación del proyecto de tesis



"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

RESOLUCIÓN N° 0542-2024/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 15 de julio de 2024

VISTO:

El expediente de **Leibnitz Galiany Ponce Ccopa**, identificado(a) con código universitario N° 202014054 y **Catalina Ccapa Ari** identificado(a) con código universitario N° 201421090 de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO:

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del proyecto de tesis;

Que **Leibnitz Galiany Ponce Ccopa** y **Catalina Ccapa Ari**, han solicitado la modificación de la denominación del proyecto de tesis titulado "Electrorremediación de suelos arenosos contaminado por metales pesados provenientes de un área degradada";

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 15 de julio de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar la modificación de la denominación del proyecto de tesis titulado "Electrorremediación de suelos arenosos contaminado por metales pesados provenientes de un área degradada", por el de: "Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por metales pesados provenientes de un relave minero", en el registro respectivo y disponer que con la orientación de su asesor el(la) **MSc. Rose Adeline Callata Chura**, sea desarrollado y ejecutado el proyecto de tesis por **Leibnitz Galiany Ponce Ccopa** y **Catalina Ccapa Ari**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución, a partir de la inscripción inicial.

Regístrese, comuníquese y archívese.



Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA



Ph.D. Silvia Pilco Quesada
SECRETARIA ACADÉMICA

- CC:
- Interesado
 - Asesor
 - DGI
 - Archivo

6.4. Fotografías del desarrollo experimental



SOLICITANTE : LEBNITZ GAUKNY PONCE COOPA
DIRECCIÓN : RAUL PORRAS Nº 200
PRODUCTO DECLARADO : SUELO
DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO : Tierra con líquido color marrón.
CODIFICACIÓN / MARCA : No especificada.
DATOS DECLARADOS POR EL CLIENTE : Proyecto: Electromediación de suelos arenosos contaminado por metales pesados provenientes de un área degradada - 25 V - 10 días. Fecha y hora de muestreo: 03/04/24 15:00
TAMAÑO DE MUESTRA RECIBIDA : 01 muestra de 1267 g aprox. para análisis FQ.
PRESENTACIÓN, ESTADO Y CONDICIÓN : En bolsa de polietileno transparente con cierre hermético cerrada. A una temperatura de 22.1 °C.
CONDICIONES DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : Recibida en el Laboratorio
CONTRAMUESTRA Y PERICOLO DE CUSTODIA : Ninguna (por ser muestra única)
FECHA PRODUCCIÓN : No especificada
FECHA DE VENCIMIENTO : No especificada
CONTRATO N° : 0912-2024
FECHA DE RECEPCIÓN : 04/05/2024

CONDICIONES DE USO DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS:

El presente Informe de Ensayos tan solo es válido únicamente para la Muestra analizada / el Lote muestreado / según sea el caso. No deben referirse a la Muestra analizada o al Lote muestreado otros parámetros que no estén consignados en el presente Informe de Ensayos.

En caso de que el producto haya sido muestreado por el cliente (Muestra recibida en laboratorio), BHIOS LABORATORIOS no se responsabiliza si las condiciones de muestreo no fueron las adecuadas, los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió. En caso de que el producto haya sido muestreado por BHIOS LABORATORIOS, la presentación, estado y condición del lote corresponden a las encontradas al momento del muestreo.

Los datos declarados por el cliente son consignados a solicitud expresa del mismo cliente y no son necesariamente verificados por el Laboratorio, por lo que BHIOS LABORATORIOS no asume responsabilidad por el uso de los mismos.

El Periodo de Custodia es dependiente del tipo de ensayo y de la disponibilidad de la Muestra.

BHIOS LABORATORIOS no guarda contramuestras de productos perecibles o de productos cuyas características pudieran variar durante el almacenamiento.

El presente Informe de Ensayos no es un certificado de conformidad, ni certificado del sistema de calidad del producto. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial de este Informe de Ensayos sin el consentimiento y la autorización escrita de BHIOS LABORATORIOS.

Cualquier modificación, borrón o emenda, anula al presente Informe de Ensayos.

Metales Totales por ICP-MS

LAB	DETERMINACIÓN	LD	LC	SUELO No especificado.	UNIDADES
FQ	Pb (Plomo)	<0.000	<0.000	0.0499	mg/kg
FQ	Al (Aluminio)	<0.01	<0.01	6912.58	mg/kg
FQ	As (Arsénico)	<0.000	<0.000	85.0047	mg/kg
FQ	B (Boro)	<0.00	<0.00	13.999	mg/kg
FQ	Ba (Bario)	<0.00	<0.00	11.7799	mg/kg
FQ	Be (Berilio)	<0.000	<0.000	0.0767	mg/kg
FQ	Bi (Bismuto)	<0.000	<0.000	0.0027	mg/kg
FQ	Ca (Calcio)	<0.01	<0.01	286.87	mg/kg
FQ	Ca (Calcio)	<0.000	<0.000	5.1072	mg/kg
FQ	Ca (Calcio)	<0.000	<0.000	12.6299	mg/kg
FQ	Ca (Calcio)	<0.000	<0.000	8.8549	mg/kg
FQ	Cl (Cloro)	<0.000	<0.000	0.9002	mg/kg
FQ	Cl (Cloro)	<0.000	<0.000	1.1479	mg/kg
FQ	Co (Cobalto)	<0.00	<0.00	16.996	mg/kg
FQ	Co (Cobalto)	<0.01	<0.01	17.153	mg/kg
FQ	Cr (Cromo)	<0.000	<0.000	<0.000	mg/kg
FQ	K (Potasio)	<0.01	<0.01	332.89	mg/kg
FQ	K (Potasio)	<0.000	<0.000	29.8972	mg/kg
FQ	Mg (Magnesio)	<0.01	<0.01	2711.70	mg/kg
FQ	Mg (Magnesio)	<0.000	<0.000	162.149	mg/kg
FQ	Mn (Manganeso)	<0.000	<0.000	0.007	mg/kg
FQ	Mn (Manganeso)	<0.01	<0.01	739.92	mg/kg
FQ	Ni (Níquel)	<0.000	<0.000	10.0193	mg/kg
FQ	P (Fósforo)	<0.01	<0.01	229.84	mg/kg
FQ	Pb (Plomo)	<0.000	<0.000	0.2429	mg/kg
FQ	Pb (Plomo)	<0.000	<0.000	0.0073	mg/kg
FQ	Pb (Plomo)	<0.000	<0.000	0.6932	mg/kg
FQ	Pb (Plomo)	<0.01	<0.01	233.62	mg/kg
FQ	Si (Silicio)	<0.000	<0.000	0.0261	mg/kg
FQ	Si (Silicio)	<0.000	<0.000	2.0987	mg/kg
FQ	Si (Silicio)	<0.000	<0.000	28.3340	mg/kg
FQ	Si (Silicio)	<0.000	<0.000	0.02119	mg/kg
FQ	S (Azufre)	<0.000	<0.000	0.2049	mg/kg
FQ	S (Azufre)	<0.000	<0.000	10.0064	mg/kg
FQ	Zn (Zinc)	<0.00	<0.00	45.559	mg/kg

ABREVIATURAS:

mg/kg

Migramas por kilogramo

MÉTODOS UTILIZADOS:

Metales Totales por ICP-MS

: Digestión + EPA METHODO 6020 B, Rev. 2 2014 Inductively Coupled Plasma- Mass Spectrometry

OBSERVACIONES:

LD: Límite de detección del método.

LC: Límite de cuantificación del método.

Cualquier valor precedido por "L" indica menor al límite de cuantificación del método.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS : FQ 04/05/2024 al 14/05/2024

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS : 14/05/2024

Miguel Valdivia Martínez
Gerente Técnico

Fin del Informe