

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Remediación electrocinética en la remoción de  
zinc de los suelos contaminados del Valle del  
Mantaro - 2021**

Yaneth Lily De la Cruz Caballon

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniera Ambiental

Huancayo, 2022

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

# **ASESOR**

Ing. Oscar Paul Huari Vila

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por haberme otorgado una familia, quienes siempre tienen fe en mí, quienes me inspiraron a seguir una carrera universitaria, quienes estuvieron en los momentos más difíciles de mi vida dándome el ejemplo de superación, sacrificio y humildad, enseñándome a valorar todo lo que tengo.

A mis maestros que siempre me han motivado en mis estudios, a seguir adelante con mis metas propuestas y siempre deseándome éxitos en mi vida profesional.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres, Emilia y Florentino por acompañarme y apoyarme a lo largo de mi formación académica, a mis hermanos por los consejos y palabras de aliento en cada tropiezo que tuve, a Dios por permitirme llegar a donde estoy, brindarme salud y guiarme a lo largo de mi camino.

## INDICE DE CONTENIDO

<b>PORTADA</b> .....	<b>i</b>
<b>ASESOR</b> .....	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iv</b>
<b>INDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>v</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>x</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>xi</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>13</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO</b> .....	<b>13</b>
1.1    Planteamiento y formulación del problema.....	13
1.1.1    Planteamiento del problema .....	13
1.1.2    Formulación del problema .....	16
1.2    Objetivos .....	16
1.2.1    Objetivo general .....	16
1.2.2    Objetivos específicos.....	16
1.3    Justificación e importancia .....	17
1.4    Hipótesis y descripción de variables.....	19
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>21</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
2.1    Antecedentes de la investigación. ....	21
2.2    Bases teóricas.....	27
2.2.1    Fundamentos teóricos .....	27
2.3    Definición de términos básicos.....	58
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>61</b>
<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>61</b>
3.1    Método y alcances de la investigación .....	61
3.1.1    Método de la investigación .....	61
3.1.2    Alcances de la investigación.....	63
3.2    Diseño de la Investigación .....	64

3.3	Población y muestra.....	64
3.3.1	Población.....	64
3.3.2	Muestra .....	64
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	66
3.4.1	Técnicas utilizadas en la recolección de datos .....	66
3.4.2	Instrumentos utilizados en la recolección de datos .....	66
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>67</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>67</b>
4.1	Resultados del tratamiento y análisis de la información .....	67
4.1.1	Características de los suelos contaminados del valle del Mantaro.....	67
4.1.2	Variación del voltaje en la remoción del zinc de los suelos contaminados ..... del valle del Mantaro.....	68
4.1.3	Variación del tiempo de proceso en la remoción del zinc de los suelos ..... contaminados del valle del Mantaro.....	70
4.1.4	Porcentaje de remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del..... Mantaro mediante la remediación electrocinética. ....	72
4.2.	Prueba de hipótesis .....	76
4.3.	Discusión de resultados .....	80
4.3.1.	Características de los suelos .....	80
4.3.2.	Variación del voltaje en la remoción de zinc .....	81
4.3.3.	Variación del tiempo de proceso en la remoción de zinc .....	83
4.3.4.	Remediación electrocinética en la remoción de zinc.....	83
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>85</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>86</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>87</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>94</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuentes potenciales de metales pesados en el medio ambiente.....	29
Figura 2. Fenómenos electrocinéticos en arcilla .....	34
Figura 3. Concepto de extracción electrocinética de contaminantes. ....	35
Figura 4. Disposiciones de electrodos ejemplificadas en la remediación electrocinética..... de suelos. ....	39
Figura 5. Aplicación de la remediación electrocinética en un sitio contaminado.....	40
Figura 6. Mecanismos de transporte en la remediación electrocinética .....	42
Figura 7. Esquema conceptual del movimiento de iones cargados en un sistema..... electrocinético.....	45
Figura 8. Esquema de un sistema de remediación electrocinética mejorado con..... surfactante.....	48
Figura 9. Esquema de la celda electrocinética con una membrana selectiva de cationes... para un proceso de ER mejorado con surfactante .....	49
Figura 10. Esquema del proceso de electrobiorremediación.....	50
Figura 11. (a) Configuración horizontal de lasaña; (b) configuración vertical de lasaña. ..	54
Figura 12. Diferencia esquemática entre el uso de un ánodo fijo y un proceso ER de ..... ánodo que se aproxima.. ..	55
Figura 13. La estructura transversal de un vertedero seguro. ....	57
Figura 14. Gráfica de los efectos principales con la variación del voltaje .....	69
Figura 15. Gráfica de cajas con la variación del voltaje.....	70
Figura 16. Gráfica de los efectos principales con la variación del tiempo.....	71
Figura 17. Gráfica de cajas con la variación del tiempo .....	72
Figura 18. Gráfica de efectos principales para la remoción del Zinc .....	73
Figura 19. Gráfica de interacción para la remoción del Zinc.....	74
Figura 20. Gráfica de media para la remoción del Zinc.....	74
Figura 21. Gráfica de superficie para la remoción del Zinc.....	75
Figura 22. Gráfica de contorno para la remoción del Zinc.....	75
Figura 23. Gráfica de dispersión de 3D para la remoción del Zinc .....	76
Figura 24. Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados .....	77
Figura 25. Gráfica de probabilidad .....	78

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	20
Tabla 2. Los fenómenos de diferentes mecanismos que ocurren en la remediación..... electrocinética.....	45
Tabla 3. Diseño factorial de $2^2$ .....	64
Tabla 4. Parámetros de análisis del suelo.....	67
Tabla 5. Parámetros de análisis de textura .....	68
Tabla 6. Remoción de Zn con la variación del voltaje .....	68
Tabla 7. Remoción de Zn con la variación del tiempo de proceso.....	70
Tabla 8. Remoción de Zn.....	73
Tabla 9. Análisis de varianza .....	77
Tabla 10. Comparación de Tukey para el voltaje .....	79
Tabla 11. Comparación de Tukey para el voltaje .....	79

## RESUMEN

El trabajo de investigación se enfocó en la aplicación de la remediación electrocinética para remover el zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro. Se trabajó con una metodología cuantitativa del tipo hipotético – deductivo, con un diseño factorial de  $2^2$ . Para el desarrollo del proceso de la remediación electrocinética, se trabajó con un reactor acrílico con dimensiones internas de 220 mm de largo, 110 mm de ancho y 120 mm de alto, el cual se dividió en tres compartimientos: el compartimiento del suelo, ubicado al centro, de 50 mm de largo, 110 mm de ancho y 40 mm de fondo y dos cámaras de electrolito, a los costados, de 170 mm de largo, 110 mm de ancho y 40 mm de alto cada una. Con electrodos de dimensiones de alto de 5.5 cm y diámetro de 0.5 cm. Se realizó un análisis de suelo y se obtuvo los siguientes valores de ph: 7.96, medianamente alcalino; conductividad de 44.40 mS/m, la cual es normal ya que no existe restricciones para ningún cultivo; materia orgánica de 4.22 % que representa un valor alto en el suelo; nitrógeno de 0.21 %, con una cantidad baja de fósforo de 3.04 ppm, un valor potasio alto de 343.93 ppm y un valor inicial de Zn de 15.74 mg/kg. También se realizó un análisis de textura de suelo, donde se encontró un 53.2 % de arena, 31.8 % de limo, 15 % de arcilla y una clase textural de franco arenosa. Luego de dicho análisis de suelo se procedió al proceso experimental donde se trabajó de 6 – 20 días, donde, a un tiempo de 6 días se obtuvo una remoción de zinc del 21.16 % y a un tiempo de 20 días se obtuvo una remoción de zinc del 79.35 %, con voltajes de 20 V – 30 V, a un voltaje de 20 V se obtuvo una remoción de zinc del 21.16 % y a un voltaje de 30 V se obtuvo una remoción de zinc del 79.35 %. Con la interacción de las dos variables se consiguió que, a un tiempo de 20 días y un voltaje de 30 V, se logra los mayores porcentajes de remoción del zinc con un 79.06 %.

Palabras claves: remediación, electrocinética, zinc y contaminación

## ABSTRACT

The research work focused on the application of electrokinetic remediation to remove zinc from contaminated soils in the Mantaro Valley. A quantitative methodology of the hypothetical-deductive type was used, with a factorial design of  $2^2$ . For the development of the electrokinetic remediation process, an acrylic reactor with internal dimensions of 220 mm long, 110 mm wide and 120 mm thick was used. mm high, which was divided into three compartments: the floor compartment, located in the center, 50 mm long, 110 mm wide and 40 mm deep, and two electrolyte chambers, on the sides, 170 mm deep. long, 110 mm wide and 40 mm high each. With electrodes of dimensions of height of 5.5 cm and diameter of 0.5 cm. A soil analysis was carried out and the following pH values were obtained: 7.96, moderately alkaline; conductivity of 44.40 mS/m, which is normal since there are no restrictions for any crop; organic matter of 4.22% that represents a high value in the soil; nitrogen of 0.21%, with a low amount of phosphorus of 3.04 ppm, a high potassium value of 343.93 ppm and an initial Zn value of 15.74 ppm. A soil texture analysis was also carried out, where 53.2% sand, 31.8% silt, 15% clay and a sandy loam textural class were found. After said soil analysis, we proceeded to the experimental process where we worked from 6 to 20 days, where, at a time of 6 days, a zinc removal of 21.16% was obtained and at a time of 20 days, a zinc removal of the soil was obtained. 79.35%, with voltages of 20 V - 30 V, at a voltage of 20 V a zinc removal of 21.16% was obtained and at a voltage of 30 V a zinc removal of 79.35% was obtained. With the interaction of the two variables, it was achieved that, at a time of 20 days and a voltage of 30 V, the highest percentages of zinc removal were achieved with 79.06%.

Keywords: remediation, electrokinetics, zinc and contamination

# INTRODUCCIÓN

A medida que la contaminación del suelo amenaza cada vez más la salud humana y el funcionamiento de los ecosistemas, la mitigación de suelos, sedimentos y relaves con metales pesados se ha convertido en un grave problema de ingeniería geoambiental del siglo XXI (1).

Los metales, potencialmente tóxicos, derivados de actividades industriales o de sitios mineros son contaminantes bastante comunes, especialmente en sitios industriales, y la contaminación del suelo resultante es una de las formas más críticas de contaminación ambiental, debido a los graves efectos que estos contaminantes ejercen sobre el ser humano, salud y ecosistemas. Además de su propia toxicidad, una vez dispersados en el suelo, estos metales y sus compuestos pueden permanecer biodisponibles durante largos períodos o migrar hacia los acuíferos, extendiendo así la contaminación a otras matrices ambientales. Se conocen varios métodos para la recuperación de suelos y aguas subterráneas contaminados por metales potencialmente tóxicos. sin embargo; las tecnologías que se utilizan actualmente son extremadamente invasivas, lo que resulta en un bajo nivel de sostenibilidad ambiental y social. Aunque el lavado del suelo sigue siendo la opción común, la Tecnología de Remediación Electrocinética (EKRT) probablemente representa la solución más prometedora, ya que, es un proceso *in situ* potencialmente capaz de permitir resultados similares a los obtenidos en el sitio y/o fuera de él. Estas intervenciones, generaría niveles sustancialmente más altos de sostenibilidad y aceptabilidad (2).

En el primer capítulo, se aborda la problemática de la contaminación de los suelos por medio de los metales pesados, en este caso el zinc. El Valle del Mantaro es considerado como la despensa de alimentos (hortalizas, tubérculos, cereales, leguminosas, etc.) en la zona central del país e incluso para Lima, que constituye su principal mercado de mayor importancia, ya que, aproximadamente el 40 % de la producción agrícola del valle se destina a la capital, un 30 % se comercializa en los mercados de las otras provincias de la región y el 30 % restante se destina al consumo y a la producción de semillas.

El segundo capítulo aborda los antecedentes de la investigación donde se encontró 10 artículos científicos relacionados al tema de investigación donde se describe el proceso de la remediación electrocinética en la remoción de zinc. Además, se describe las bases

teóricas partiendo de la contaminación del suelo, los metales como contaminantes ambientales y el proceso de remediación electrocinética.

El tercer capítulo trata sobre la metodología, la cual fue cuantitativa porque parte de las teorías que ya fueron comprobadas científicamente; en base a ello se relacionó las variables (remoción electrocinética y de zinc). Para el método general o teórico de la investigación se usó el hipotético – deductivo para poder obtener así los datos que se necesitarán para el procesamiento de la información. Además, se tuvo un diseño aplicativo con un nivel de investigación explicativo, siguiendo un diseño factorial de  $2^2$  con tres réplicas.

En el cuarto capítulo, se presentan las discusiones con diversos autores y los resultados de la investigación.

.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

### **1.1 Planteamiento y formulación del problema**

#### **1.1.1 Planteamiento del problema**

El suelo es uno de nuestros recursos más importantes, ya que respalda muchas funciones ecológicas y servicios ecosistémicos críticos. No obstante, debido a una amplia variedad de actividades antrópicas ambientalmente insostenibles, tales como la deforestación, la agricultura, la pesca y la mayoría de las emisiones de gases de carbono a la atmósfera (de origen fabril, vehicular, etc.); lamentablemente, nuestros suelos están actualmente contaminados a escala global con una miríada de compuestos orgánicos e inorgánicos potencialmente tóxicos (3). La ocurrencia de sitios contaminados con metales pesados ha aumentado como consecuencia de las descargas de desechos con alto contenido de metales en áreas industriales de rápido crecimiento, actividades mineras, aplicación de fertilizantes y pesticidas en la tierra, riego de aguas residuales, derrames de petroquímicos y deposición atmosférica de residuos de combustión de carbón. Los metales pesados son peligrosos para las plantas y los

organismos debido a la bioacumulación y biomagnificación en la cadena alimentaria. Una vez que el suelo sufre contaminación por metales pesados, es difícil, pero no imposible remediarlo (4).

El Valle del Mantaro es considerado como la despensa de alimentos (hortalizas, tubérculos, cereales, leguminosas, etc.) en la zona central del país e inclusive para Lima, que constituye su principal mercado de mayor importancia, ya que aproximadamente el 40 % de la producción agrícola del valle se destina a la capital; un 30 % se comercializan en los mercados de las otras provincias de la región y el 30 % restante se destina al consumo y a la producción de semillas (5). El río Mantaro, ubicado en la región central del Perú, se origina en el lago Junín a 4 115 msnm y en su recorrido cruza los departamentos de Junín (provincias de Junín, Yauli, Jauja, Concepción y Huancayo), Huancavelica y Ayacucho. El río Mantaro es el más contaminado (5), recibe efluentes de la actividad minera que contiene metales como As, Cd, Hg, Pb, Cu, Cr, Ni y Zn; así como aguas ácidas provenientes del túnel Kingsmill por más de 70 años, producto de las 67 mineras cerradas y de las explotaciones mineras de Morococha, que a su vez es efluente del río Mantaro, de esta manera se contamina los suelos del valle del Mantaro (5). Ante ello y como parte de un pasivo ambiental, la Compañía Minera Chinalco se comprometió a realizar el tratamiento del agua ácida generada. Para ello, se construyó una planta de tratamiento de agua ácida del túnel Kingsmill, usando la tecnología de lodos de alta densidad, denominado proceso HDS.

Los metales pesados se consideran contaminantes ambientales importantes debido a su alta densidad y alta toxicidad incluso a bajas concentraciones (6). El zinc (Zn) es un metal pesado, considerado un metal de transición, presenta un número atómico de 30. De manera natural, lo podemos encontrar en las rocas de la corteza aproximadamente con  $70 \text{ mg kg}^{-1}$ - $100 \text{ mg kg}^{-1}$ , pero ha aumentado de manera poco natural debido a las actividades antropogénicas. La cantidad de zinc presente varía mucho de suelos agrícolas a suelos contaminados. El Zn puede interrumpir la actividad de microorganismos y lombrices de tierra relacionadas con el proceso de descomposición de la materia orgánica; otro impacto es la contaminación de las aguas subterráneas debido a la lixiviación de metales pesados del suelo contaminado. Por lo tanto, se requieren esfuerzos para remediar los sitios

contaminados considerando las tecnologías más relevantes para las especies contaminantes, tales como reemplazo de suelos, aislamiento de suelos, lavado de suelos, solidificación/estabilización, vitrificación de suelos, fitorremediación, remediación electrocinética (EKR), etc. (4).

Por problemas ambientales y financieros, Doe Run Perú, actual propietario de la fundición, ha dejado de operar desde el año 2009; sin embargo, los pasivos ambientales aún persisten. En la cuenca alta del río Mantaro existe explotación de plomo, plata, cobre y zinc. La actividad minera es intensa, de modo que, un gran volumen de vertimientos es evacuado; algunos de ellos se vierten directamente a sus afluentes y otros usan canchas de relaves. Por estos motivos el río Mantaro se encuentra contaminado con metales pesados y debido a esto se contaminan los suelos, del valle del Mantaro (7).

La remediación electrocinética consiste en la migración de iones contaminantes al electrodo con la carga opuesta en el ambiente contaminado bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado a través de los electrodos del ánodo (polo positivo) y el cátodo (polo negativo) ubicado en el suelo. Este fenómeno ocurre cuando el suelo se carga con una corriente eléctrica de bajo voltaje (8). Se eligió esta tecnología debido a que se desea recuperar suelos contaminados con metales pesados, la remediación electrocinética ha sido bien conocida como un método apropiado, especialmente en suelos con baja conductividad hidráulica. Cabe resaltar que la electrocinética es una tecnología avanzada cuyo objetivo es separar y extraer metales pesados, radiolúcidas y contaminantes orgánicos de suelos, lodos, sedimentos y aguas subterráneas. Esta tecnología fue utilizada en la remoción de Zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021, mediante una celda de remediación electrocinética, donde ocurrió la migración de iones contaminantes al electrodo con la carga opuesta en el ambiente contaminado bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado a través de los electrodos del ánodo (polo positivo) y el cátodo (polo negativo) ubicado en el suelo (4).

### 1.1.2 Formulación del problema

Debido a la contaminación de los suelos que se genera mediante los metales pesados, uno de ellos es el zinc, por ello urge responder las siguientes preguntas:

#### A) Problema general

¿Cuánto es el porcentaje de remoción de zinc de los suelos contaminados en el valle del Mantaro en el año 2021, mediante la remediación electrocinética?

#### B) Problemas específicos

- ¿Cuál es la concentración inicial de zinc que presentan los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021?
- ¿Cómo la variación del voltaje remueve el zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021, mediante la remediación electrocinética?
- ¿Cómo el tiempo de proceso remueve el zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021, mediante la remediación electrocinética?

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Determinar el porcentaje de remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021, mediante la remediación electrocinética.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la concentración inicial de zinc que presentan los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021.
- Determinar la variación del voltaje en la remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021, mediante la remediación electrocinética.
- Determinar el tiempo de proceso en la remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021, mediante la remediación electrocinética.

### **1.3 Justificación e importancia**

#### **Justificación ambiental**

La contaminación del suelo es una amenaza seria y un desafío ambiental en todo el mundo (3). El suelo es tanto un ecosistema altamente complejo como un recurso no renovable en una escala de tiempo humano, que alberga una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos que respaldan funciones claves y servicios ecosistémicos esenciales. Asimismo, el suelo es un sistema vivo dinámico que sirve como hábitat para una miríada de organismos (micro, meso y macrofauna) con roles esenciales en el ciclo de nutrientes y la mineralización de la materia orgánica. Lamentablemente, diferentes actividades antrópicas son responsables del estado actual de degradación del suelo por erosión, compactación, contaminación, sellado, salinización y pérdida de materia orgánica y biodiversidad (3).

Se ha propuesto la remediación electrocinética como una tecnología eficaz para la remediación de suelos contaminados con metales. La contaminación del suelo está asociada a actividades industriales, explotaciones mineras y vertidos de residuos.

La contaminación del suelo es un problema grave para los ambientalistas de todo el mundo. Diferentes tipos de contaminantes amenazan suelos y sedimentos. Se han desarrollado varias técnicas para purificar suelos y sedimentos basadas en métodos fisicoquímicos, térmicos y biológicos. Sin embargo, a menudo resultan costosos, intensivos en energía, ineficaces y podrían crear por sí mismos otros impactos ambientales adversos cuando se trata de condiciones difíciles del subsuelo y contaminantes (9). La remediación electrocinética (EKR) es un método innovador que consiste en la aplicación de un campo eléctrico de corriente continua (CC) en un suelo, produciendo diferentes fenómenos de transporte a través del medio poroso. Además de los propósitos de remediación, en la ingeniería civil, el uso de gradientes eléctricos a través de suelos arcillosos es una forma clásica de estabilizar grandes excavaciones. La electrocinética se ha utilizado para la consolidación del suelo (consolidación por electroósmosis) y la estabilización y mejora del suelo. Durante el EKR, la corriente aplicada provoca oxidación y reducción en el ánodo y el cátodo, respectivamente, y luego conduce a una serie de fenómenos de transporte acoplado como migración iónica, electroósmosis y electroforesis. En consecuencia, los contaminantes se enriquecen cerca de los

electrodos y se eliminan del suelo. La migración iónica es el transporte de complejos cargados bajo un campo eléctrico (9).

### **Justificación social**

Se considera un problema grave ya que afecta a los organismos vivos y la salud humana. Los riesgos asociados con la contaminación del suelo y la remediación del suelo son puntos importantes en la agenda de políticos, técnicos y comunidad científica. La legislación actual establece un marco legal para proteger el suelo de actividades potencialmente contaminantes; sin embargo, la situación actual de contaminación del suelo es el resultado de malas prácticas en el pasado, especialmente relacionadas con la mala gestión de residuos (10). Por ello, la descontaminación de los suelos contaminados por el metal del zinc será de provecho para los pobladores del valle del Mantaro.

### **Justificación económica**

La contaminación del suelo es un grave problema que no solo afecta al medio ambiente, los organismos vivos y la salud humana, sino también a las actividades económicas asociadas al uso del suelo (10). Por ello, esta investigación permitirá a las municipalidades aledañas al valle del Mantaro, replicar dicho método de remediación de los suelos, minimizando costos y generando desarrollo en cuanto a la producción de alimentos del valle del Mantaro.

### **Justificación Legal**

Mediante la ley N° 28611, Ley General del Ambiente en el artículo 31 sobre los estándares de calidad ambiental con respecto a los suelos en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente, así como el artículo 91 donde el Estado es responsable de promover y regular el uso sostenible del recurso suelo, buscando prevenir o reducir su pérdida y deterioro por erosión o contaminación, Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo. Decreto Supremo N° 002-2014-MINAM que aprueban disposiciones complementarias para la aplicación de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo. Resolución Ministerial N° 085-2014-MINAM que aprueba la Guía para el Muestreo de suelos y la Guía para la elaboración de Planes de Descontaminación de Suelos. Resolución Ministerial N° 125-2014-MINAM que aprueba el Protocolo de muestreo por

emergencia ambiental. Son documentos legales los cuales servirán como base legal de presente trabajo de investigación.

### **Importancia**

La importancia de este trabajo de investigación aportará con mayores alcances para posteriores investigaciones en la consideración de criterios para la remoción de zinc mediante el proceso de electrocinética.

## **1.4 Hipótesis y descripción de variables**

### **Hipótesis de investigación**

El porcentaje de remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021, son altos mediante la remediación electrocinética.

### **Hipótesis nula**

La remediación electrocinética no presenta un alto porcentaje de remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021.

### **Hipótesis alterna**

Si aplicamos la remediación electrocinética, entonces podemos remover el zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021.

### **Hipótesis secundarias**

- Las características iniciales de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021 presentan elevados niveles de zinc.
- A mayor voltaje mayor es la remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021, mediante la remediación electrocinética.
- A mayor tiempo de proceso mayor es la remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021, mediante la remediación electrocinética.

## Descripción de las variables

**Tabla 1.** Operacionalización de variables

Variable	Tipo de Variable	Conceptualización	Categoría o dimensión	Indicador	Unidad de medida
Remediación Electrocinética	Cuantitativa Compleja Independiente	La remediación electrocinética es una tecnología en desarrollo que aprovecha las propiedades conductivas del suelo, cuyo objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos (9).	Voltaje	V1=20 V2=30	V
			Tiempo de proceso	T1=6 T2=20	Días
Remoción de Zinc	Cuantitativa Compleja Dependiente	La remoción es un proceso que se llevará a cabo mediante la electrocinética, donde se removerá Zinc de los suelos contaminados (4).	Porcentaje de remoción de zinc	Porcentaje final de remoción de zinc	%

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de la investigación.

El artículo científico titulado: *Remediación electrocinética mejorada de suelos contaminados con zinc mediante el cambio de electrolito compuesto* La combinación de electrolitos de cloruro de potasio (KCl) 0.1 M y ácido cítrico (CA) 0.1 M se investigó en un reactor a escala de banco para la eliminación de zinc (Zn) del suelo usando remediación electrocinética (EKR). El estudio se llevó a cabo durante un período de 144 horas para diferentes configuraciones experimentales. Cuando se usó KCl como un solo electrolito, se obtuvo un 49.38 % de eliminación de zinc con el cambio de electrolito cada 24 horas, en comparación con el 12.5 %, cuando el reactor funcionó como reactor discontinuo sin cambio. El uso de electrolito compuesto en el compartimiento del cátodo y un electrolito en el compartimiento del ánodo mostró una remoción del 79.06 %, mientras que el uso de electrolito compuesto en el compartimiento del ánodo y del cátodo dio un 21.74 % de remoción (4).

El artículo científico titulado: *Remediación electrocinética mejorada para la eliminación de metales pesados de suelos contaminados* se estudió la remediación

electrocinética de un suelo agrícola contaminado con metales pesados utilizando ácidos orgánicos como agentes facilitadores. El tratamiento electrocinético no mejorado utilizando agua desionizada como fluido de procesamiento no mostró ninguna movilización y remoción significativa de metales pesados debido a la baja solubilización de metales y precipitación en condiciones de pH alto cerca del cátodo. Se utilizaron EDTA y ácido cítrico 0,1 M como agentes facilitadores para favorecer la disolución y transporte de metales. Los ácidos orgánicos se agregaron al catolito y penetraron en la muestra de suelo por electromigración. EDTA formó complejos cargados negativamente. El ácido cítrico formó complejos metálicos neutros en las condiciones de pH del suelo ( $\text{pH} = 2-4$ ). El ácido cítrico fue mucho más eficaz en la disolución y el transporte fuera de la muestra de suelo de metales complejados. Para mejorar la remoción de metales, la concentración de ácido cítrico se incrementó hasta 0.5 M, resultando en la remoción de 78.7 % de Cd, 78.6 % de Co, 72.5 % de Cu, 73.3 % de Zn, 11.8 % de Cr y 9.8 % de Pb (11).

El artículo científico titulado: *Efecto de diferentes tratamientos sobre la remediación electrocinética de Zn, Pb y Cd de un suelo calcáreo contaminado* investigaron la remediación de un suelo calcáreo contaminado con muestras de Zn, Cd y Pb de los alrededores de la provincia de Zanja en Irán, utilizando un método electrocinético. En este trabajo, el suelo contiene una alta concentración de Zn ( $1400 \text{ mg kg}^{-1}$ ), Cd ( $15 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y Pb ( $250 \text{ mg kg}^{-1}$ ). La descontaminación electrocinética consiste en dos series de experimentos como sigue: (1) el efecto de cinco tratamientos que incluyen el uso de agua destilada, ácido acético y soluciones de electrolito EDTA, y sistemas de ánodos de aproximación, y el flujo de circulación del electrolito a dos gradientes de voltaje diferentes ( es decir,  $1,33$  y  $2,66 \text{ V cm}^{-1}$ ), y (2) el efecto del contenido de humedad (saturado, FC y  $0,7 \text{ FC}$ ) con un gradiente de voltaje de  $1,33 \text{ V cm}^{-1}$  Después de aplicar corriente eléctrica durante 5 días, los resultados de los experimentos indicaron que la eficiencia de eliminación de metales pesados puede aumentarse elevando el gradiente de voltaje. En este sentido, la remediación más alta se puede observar entre los diferentes tratamientos en el tratamiento con EDTA (40.11 %, 43.10 % y 24.7 % para Zn, Cd y Pb, respectivamente). Además, la remoción de metales pesados en la humedad saturada estuvo en el nivel más alto, por lo que 32.62 % de cadmio, 31.33 % de zinc y 18.82 % de plomo fueron removidos después de 120 horas de aplicación de corriente eléctrica. Al disminuir la humedad a  $0.7\text{FC}$ , el porcentaje de remoción para

los tres metales pesados obtuvo 20.97 %, 18.44 % y 12.25 %, respectivamente. Además, Cd tuvo la mayor remoción, y Zn y Pb fueron los siguientes entre los tres metales pesados en cuestión (8).

El artículo científico titulado: *Eliminación simultánea de Pb, Cd y Zn del suelo de relaves de mina muy contaminado mediante un proceso electroquímico mejorado* su objetivo fue examinar la eficacia de la remediación electrocinética de suelos de relaves de minas quelados con una mezcla de metales pesados. Los experimentos electrocinéticos se llevaron a cabo en un reactor de banco no tradicional que contenía interfaces de recolección de líquido intermedias dentro de las zonas de tratamiento entre los electrodos. Las pruebas se realizaron usando 0,05 M de Na<sub>2</sub>EDTA como permeante quelante. Se usó agua del grifo en los experimentos de control. Se aplicó un voltaje de corriente continua constante de 20 V (campo eléctrico y 0,625 V/cm) a través de los electrodos de trabajo durante 48 h. Se midieron la distribución transitoria y espacial del pH, la conductividad, el potencial de oxidación-reducción (Eh) y la masa acumulada de las especies metálicas en solución. En todos los experimentos, incluidos los controles, se encontró una mayor porción de metales solubles en el depósito del ánodo, lo que indica la transformación de los metales en especies complejas de carga negativa, advección electroosmótica inversa hacia el ánodo y / o transporte asistido coloidalmente. Se esperaba que Na<sub>2</sub>EDTA aumentara la extracción de metales en el analito ya que producía complejos cargados negativamente con los metales. La masa soluble de los metales fue marcadamente baja en el catolito, con una fuerte precipitación de sales de hidróxido de metal en el entorno de pH alto y Eh bajo resultante. Las remociones totales de los tres metales no cambiaron o fueron menores, durante la misma duración del tratamiento con 0.05 M Na<sub>2</sub>EDTA que con agua del grifo. Los resultados mostraron que los agentes quelantes, como se ejemplificó con un ligando comúnmente utilizado aquí, pueden no ser ventajosos para mejorar la remediación electrocinética de relaves de minas muy contaminados. En tales sustratos, el régimen de transporte y remoción de metales (es decir, velocidad, secuencia y preferencia de extracción) parece estar más influenciado por el tipo de metal y la distribución transitoria del pH-Eh bajo el campo eléctrico que por el efecto solubilizante de un ligando dentro de la zona de tratamiento (1).

El artículo científico titulado: *Remediación electrocinética de suelos contaminados por metales potencialmente tóxicos: herramientas analíticas*

*dedicadas para evaluar la línea base de contaminación en un escenario complejo* su objetivo es aún más desafiante cuando están presentes diferentes contaminantes, que difieren mucho tanto en términos de naturaleza como de concentración. Al referirnos a un sitio industrial contaminado principalmente por As, Cd, Cu, Pb, Sb, Tl y Zn, se presenta un nuevo enfoque para el procesamiento necesario de los datos de muestreo, con el fin de establecer la línea de base previa a la intervención: una estimación de la contaminación promedio. se ha obtenido mediante una adecuada integración del volumen subyacente a la curva de distribución de cada especie contaminante. Esta información, que de otro modo no sería accesible mediante el muestreo de puntos discretos, es útil para evaluar la eficacia de la tecnología de remediación que se está investigando y también se puede considerar para otros enfoques de rehabilitación. Dado que los resultados químicamente aceptables generalmente se logran aumentando el número de muestras (con inversiones analíticas relacionadas), el enfoque propuesto puede ayudar a mantener bajos estos costos auxiliares, al tiempo que proporciona resultados que son más confiables (2).

El artículo científico titulado: *Tratamiento electrocinético de un suelo agrícola contaminado con metales pesados* la remediación electrocinética se probó en un suelo agrícola contaminado con  $\text{Co}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ , Cr (VI),  $\text{Pb}^{+2}$  y  $\text{Hg}^{+2}$ . El tratamiento electrocinético no mejorado no pudo eliminar los metales pesados del suelo debido a la formación de precipitados en el ambiente alcalino en la sección del suelo cerca del cátodo. Además, la interacción entre metales y materia orgánica probablemente limitó el transporte de metales bajo el efecto del campo eléctrico. Se utilizaron ácido cítrico y ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) en el catolito como agentes complejantes para mejorar la capacidad de extracción y eliminación de metales pesados del suelo. Estos agentes complejantes formaron complejos cargados negativamente que migraron hacia el ánodo. El frente ácido electrogenerado en el ánodo favoreció la disolución de los metales pesados que eran transportados hacia el cátodo. El efecto combinado del pH del suelo y los agentes complejantes resultó en la acumulación de metales pesados en el centro de la muestra de suelo (12).

El artículo científico titulado: *Remediación eficaz de suelos co-contaminados con cadmio y zinc mediante una barrera reactiva permeable electrocinética con un pretratamiento de agentes complejantes y microorganismos* La combinación de

barrera reactiva permeable electrocinética (EK-PRB) se considera una tecnología prometedora para la remediación de suelos contaminados con metales pesados. En este estudio, considerando la conveniente operación y reciclaje, se preparó y caracterizó una nueva hoja de material PRB de alginato de sodio/alcohol polivinílico/atapulgita mediante microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X y espectros infrarrojos por transformada de Fourier. Posteriormente, se investigó el efecto de un pretratamiento de ácido cítrico (CA) y *Shewanella oneidensis* (MR-1) sobre la remoción de zinc (Zn (II)) y cadmio (Cd (II)) de los suelos por EK-PRB. Los resultados mostraron que Zn (II) y Cd (II) migraron gradualmente de ánodo a cátodo en el campo eléctrico dentro de los 8 días de remediación de EK-PRB. La adición simultánea de CA y MR-1 resultó en la corriente eléctrica más alta, el pH más bajo y la potencial zeta del suelo más negativo. En consecuencia, la mayor eficiencia de eliminación de Zn (II) y Cd (II) también se produjo en el grupo CA + MR-1. La nueva hoja de material PRB capturó efectivamente Zn (II) y Cd (II) de los suelos, y la mayor adsorción ocurrió en el grupo CA + MR-1: 1108.36 mg/kg Zn (II) y 53.84 mg/kg Cd (II) cerca el cátodo después de 8 días de remediación. Específicamente, tanto para Zn (II) como para Cd (II), el grupo CA + MR-1 mostró la mayor reducción en las fracciones intercambiables y de carbonato y el mayor aumento en la oxidación de Fe-Mn y las fracciones residuales. En general, con un pretratamiento de CA y MR-1, el Zn (II) y Cd (II) residuales en los suelos se redujeron considerablemente después de la remediación de EK-PRB, debido a la migración en el campo eléctrico y la adsorción de la nueva lámina PRB (13).

El artículo científico titulado: *Remediación electrocinética de suelos contaminados con mercurio, de la mina El Alacrán-Cuenca del río San Jorge, Córdoba- Colombia* tuvo como objetivo evaluar la técnica electrocinética para la remediación de suelos contaminados con mercurio de la mina El Alacrán, ubicada en la cuenca del río San Jorge del departamento colombiano de Córdoba. Se utilizaron soluciones de KI y NaCl como agentes complejantes para eliminar el mercurio a dos concentraciones 0.01 M y 0.05 M, aplicando voltajes de 30 y 40 V respectivamente. Los mejores resultados se obtuvieron cuando se utilizó KI como agente complejante, alcanzando porcentajes de recuperación de hasta el 98.7 %. Los tratamientos donde se usó NaCl como agente complejante no lograron recuperaciones significativas (<1 %), excepto cuando se usó una concentración de NaCl 0.05 M con un voltaje aplicado de 40 V alcanzando una recuperación del 38

%). En todos los experimentos, el mercurio se movió hacia el ánodo debido a la complejación del complejo de naturaleza aniónica y se observó que al aumentar las concentraciones y los voltajes se logró una remoción más eficiente y rápida del mercurio en el suelo. Los resultados mostraron que el yoduro presenta propiedades que lo convierten en una solución electrolítica prometedora para la eliminación del mercurio en el suelo (14).

El artículo científico titulado: *Acondicionamiento de electrolitos para la remediación electrocinética de suelos contaminados con As, Cu y Pb* tuvo como objetivo realizar remediación electrocinética con acondicionamiento y pretratamiento de electrolitos utilizando soluciones ácidas y básicas para remediación de suelos contaminados con Cu, As y Pb a escala de laboratorio. En determinadas condiciones, el pH del suelo se hizo más ácido o más básico, y el cambio de pH influyó en la fuerza de la unión de metales y metaloides en la superficie del suelo. El acondicionamiento de catolitos con una solución ácida incrementó la remoción de Cu y Pb del suelo, y la remoción máxima fue de 60.1 % para Cu y 75.1 % para Pb. El acondicionamiento de anolitos utilizando una solución básica mejoró el transporte de arsénico (As), que existe en forma aniónica. Aunque la mayor parte del As se unió fuertemente a la matriz del suelo en forma residual ( $\geq 95$  %), el 43.1 % se eliminó mediante electrocinética bajo acondicionamiento de anolitos con una solución básica. Se intentó la eliminación simultánea mediante un cambio en la solución de purga. Sin embargo, se produjeron fenómenos de bloqueo debido al cambio repentino del pH del electrolito de ácido a básico, y el transporte electrocinético de las especies iónicas se interrumpió en el compartimento del suelo. Así, el acondicionamiento de catolitos o anolitos eliminó los metales catiónicos o aniónicos del suelo, pero no se logró la eliminación simultánea de ambos, y un cambio repentino en la solución de acondicionamiento provocó la precipitación de hidróxidos metálicos y el bloqueo de los poros (15).

En la tesis titulado: *Influencia de la densidad de corriente en la concentración de ácido oxálico sobre la remoción de plomo por electroremediación de relave de la empresa minera Paredones* tuvo como objetivo principal el tratamiento de suelos contaminados, y eliminación de metales pesados, como el plomo presente en relaves de mina de la empresa minera Paredones. Para la remoción de este metal pesado, se hizo uso del proceso de electrorremediación, colocando como variables

en este proceso la densidad de corriente de 10 mA/cm<sup>2</sup>, 20 mA/cm<sup>2</sup> y 30 mA/cm<sup>2</sup> y con concentraciones de ácido oxálico de 5 mol/L, 10 mol/L, 15 mol/L y con un tiempo de residencia de 24 horas como mínimo y según antecedentes. Se realizaron mediciones de pH, entre las distancias de los electrodos, observando que el pH se incrementó del ánodo hacia el cátodo, considerando una distancia de 10 cm entre ambos. Por otra parte, antes y después del proceso de electrorremediación, se realizó un análisis de contenido de plomo (ppm), siendo el contenido de plomo inicial de 4641.80 ppm. De los resultados obtenidos se concluyó que la eficiencia máxima en la remoción de metal pesado de Pb, presentes en relave fue del 83.77 %, con variables de 30 mA/cm<sup>2</sup> densidad de corriente y de ácido oxálico al 15 M, y por último el análisis estadístico confirma que la variable de mayor influencia en el presente proceso de tratamiento de suelo, fue la densidad de corriente (16).

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Fundamentos teóricos**

#### **2.2.1.1 Contaminación del suelo**

La contaminación del suelo, junto con otros procesos de degradación, puede afectar negativamente la salud del suelo, a menudo definida como la capacidad de un suelo dado para realizar sus funciones como un sistema vivo capaz de mantener la productividad biológica, promover la calidad ambiental y mantener las plantas y los animales salud (3). Pero el suelo es una matriz ambiental enormemente compleja que realiza numerosas funciones, a veces conflictivas, tanto desde una perspectiva ecocéntrica como antropocéntrica y, en consecuencia, deben tenerse en cuenta muchos aspectos diferentes para evaluar adecuadamente la salud del suelo. Más importante aún, para evaluar adecuadamente la salud del suelo: (i) las propiedades físicas, químicas y biológicas con potencial como indicadores del funcionamiento del suelo siempre deben incluirse en la evaluación (después de todo, los procesos físicos, químicos y biológicos en el ecosistema del suelo no son independientes pero procesos interactivos); (ii) se deben incorporar a la evaluación enfoques químicos, (eco) toxicológicos y ecológicos; (iii) se debe tener muy en cuenta el uso previsto para el sitio contaminado, ya que el concepto mismo de salud del suelo es

relativamente teleológico y subjetivo; (iv) se debe tener en cuenta la variabilidad intrínseca temporal y espacial del sistema (es decir, heterogeneidad espacial, dinámica temporal), así como la escala tanto de los procesos del suelo como de la propia evaluación y (v) se debe identificar la selección de un suelo de referencia “saludable” adecuado (inevitablemente, a menudo lejos de ser perfecto), para la comparación y el establecimiento de los propósitos objetivo (17).

Las propiedades fisicoquímicas del suelo como el pH, el potencial redox, el contenido de materia orgánica, la textura, etc., son parámetros relevantes con potencial como indicadores de la salud del suelo que pueden alterar fuertemente la biodisponibilidad de los contaminantes y, por lo tanto, la ecotoxicidad en el suelo. Desafortunadamente, para la mayoría de las legislaciones ambientales, la concentración total de contaminantes es el factor clave para la Evaluación de Riesgos Ambientales (ERA) de suelos contaminados. Sin embargo, tal aspecto (es decir, la concentración total de contaminantes del suelo) no es suficiente para evaluar o estimar adecuadamente el impacto potencialmente dañino de los contaminantes en el funcionamiento del suelo (18). De hecho, tanto la movilidad como la biodisponibilidad de los contaminantes del suelo juegan un papel determinante en su absorción por los organismos y, por tanto, en su ecotoxicidad (19). La biodisponibilidad de los contaminantes es posiblemente un factor mucho más relevante, en comparación con las concentraciones totales de contaminantes, para una adecuada protección del suelo y evaluación de riesgos, ya que representa la fracción que puede ser absorbida por los organismos del suelo y/o lixiviada a otros compartimientos ambientales. En concreto, la biodisponibilidad de los metales (aceite) está condicionada principalmente por las propiedades fisicoquímicas del suelo como el pH, el potencial redox, el contenido de humedad, el contenido de materia orgánica, el contenido de arcilla, la presencia de compuestos aniónicos, etc. (20).

#### **2.2.1.2 Los metales como contaminantes ambientales**

Los metales pesados son elementos naturales que se encuentran en toda la corteza terrestre. La contaminación por metales pesados se produce como resultado de actividades tanto naturales como antropomórficas como la minería, la fundición, la producción industrial, el uso de metales y compuestos que contienen metales para aplicaciones domésticas y agrícolas. Se informó que estas fuentes contribuyen a la exposición humana y la contaminación ambiental por varios investigadores (21). Las posibles fuentes de contaminación ambiental se muestran en la Figura 1. Las propiedades toxicológicas de los metales pesados se caracterizan por la persistencia del metal (vida media prolongada), el tiempo de residencia en el suelo (> 1000 años), los efectos crónicos y subletales del metal. bioacumulación, biomagnificación, propiedades teratogénicas y cancerígenas del metal (22).

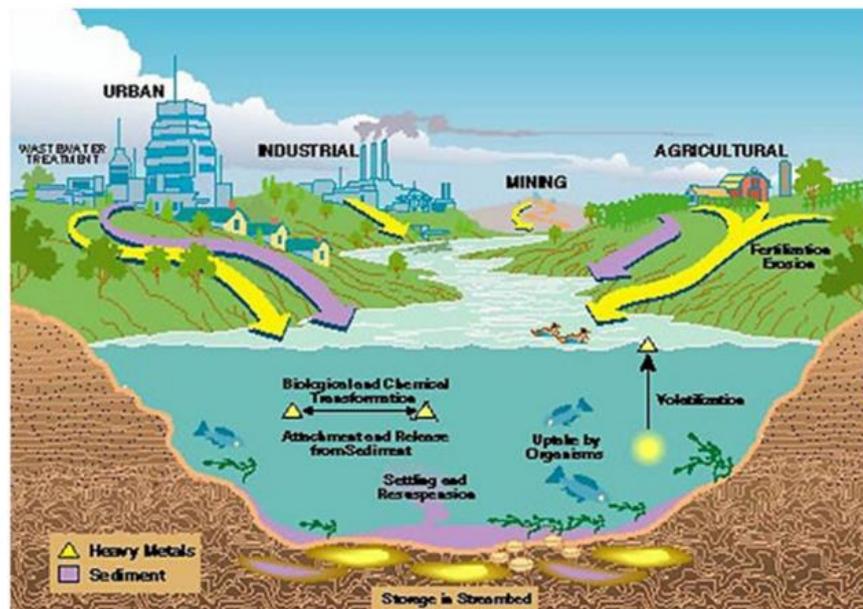


Figura 1. Fuentes potenciales de metales pesados en el medio ambiente. Tomado de (6)

### 2.2.1.3 Metales pesados en suelos

Las rocas se desintegran en partículas finas o suelo por la influencia del hielo, el agua, la temperatura, etc. La matriz del suelo es un reservorio importante o medio de transporte de metales

pesados, porque el suelo y las asociaciones de metales pesados tienen características de unión ricas y diversas. Los metales no se biodegradan como los contaminantes orgánicos, sino que se bioacumulan en el medio ambiente. La matriz del suelo puede adsorber, oxidar, intercambiar, catalizar, reducir o precipitar los iones metálicos. Estos procesos dependen de varios factores como el pH, el contenido de agua, la temperatura, la distribución del tamaño de las partículas, la naturaleza del metal y el contenido de arcilla. Esta composición determinará la movilidad, solubilidad y toxicidad de los metales pesados presentes en el suelo (6).

Generalmente, los minerales se disuelven interactuando con el ácido carbónico y el agua. Los minerales insolubles se dispersan en partículas finas. Los suelos están contaminados por metales y metaloides provenientes de desechos metálicos, gasolina, estiércol animal, lodos, aguas residuales de riego, deposición atmosférica, etc.

#### **2.2.1.4 Evaluación de la contaminación del suelo por metales pesados**

En el suelo, los metales pesados existen en diferentes formas: iones disueltos (p. Ej.,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  y  $\text{MoO}_4^{2-}$ ) y complejos orgánicos (p. Ej.,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  y  $\text{Hg}^{2+}$  que se unen a la materia orgánica disuelta) en la solución del suelo, iones intercambiables (p. ej.,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  y  $\text{Pb}^{2+}$ ) adsorbidos en partículas sólidas del suelo y (co-) precipita como parte de los sólidos del suelo (p. ej.,  $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{PbCO}_3$  y  $\text{HgSO}_4$ ). Estas tres formas amplias mantienen un equilibrio termodinámico en actividad y concentración entre sí, con precipitados insolubles como la especie predominante (23). La investigación ha demostrado claramente que no es la concentración total sino la fracción reactiva de los metales pesados en el suelo lo que determina su toxicidad para las plantas, los microbios y los seres humanos. Las formas solubles en agua e intercambiables de metales pesados son mucho más reactivas y biodisponibles que las especies precipitadas (24). Sin embargo, la distribución de las especies de metales pesados está influenciada por una serie de factores ambientales, en particular el pH del suelo,

el potencial redox, el contenido de arcilla, el contenido de óxido de Fe / Mn, el contenido de materia orgánica y la presencia de otros cationes y aniones en la solución del suelo (25). Para evaluar con precisión la biodisponibilidad de los metales pesados en el suelo, se deben considerar estos factores de influencia.

### **2.2.1.5 Zinc**

El zinc es un metal de transición con las siguientes características: período 4, grupo IIB, número atómico 30, masa atómica 65.4, densidad  $7.14 \text{ g cm}^{-3}$ , punto de fusión  $419.5 \text{ °C}$  y punto de ebullición  $906 \text{ °C}$ . El zinc se encuentra naturalmente en el suelo (aproximadamente  $70 \text{ mg kg}^{-1}$  en rocas de la corteza), pero sus concentraciones están aumentando de forma no natural, debido a adiciones antropogénicas. La mayor parte del Zn se agrega durante las actividades industriales, como la minería, el carbón y la combustión de desechos y el procesamiento del acero. Muchos productos alimenticios contienen determinadas concentraciones de este elemento. El agua potable también contiene ciertas cantidades, que pueden ser mayores cuando se almacena en tanques metálicos. Las fuentes industriales o los sitios de desechos tóxicos pueden hacer que las concentraciones de Zn en el agua potable alcancen niveles que pueden causar problemas para la salud. El zinc es un oligoelemento esencial para la salud humana. Su escasez puede provocar defectos de nacimiento. Su producción mundial sigue aumentando, lo que significa que cada vez más acaba en el medio ambiente. El agua está contaminada con este elemento, debido a la presencia de grandes cantidades presentes en las aguas residuales de las plantas industriales. Una consecuencia notoria es la aparición de zn en el lodo de las orillas de los ríos. El zinc también puede aumentar la acidez de las aguas. Algunos peces pueden acumular Zn en sus cuerpos cuando viven en cursos de agua contaminadas. Cuando el Zn entra en los cuerpos de estos peces, puede biomagnificarse en la cadena alimentaria. El zinc soluble en agua, que se encuentra en el suelo, puede contaminar el agua subterránea. Las plantas a menudo tienen una absorción de Zn que sus sistemas

no pueden manejar debido a la acumulación de este en el suelo. Finalmente, el Zn puede interrumpir la actividad en los suelos, ya que influye negativamente en la actividad de microorganismos y lombrices de tierra, retardando así la degradación de la materia orgánica (26).

#### **2.2.1.6 Historia de la electrocinética**

El movimiento del agua a través de capilares y poros, como resultado de la aplicación de potencial eléctrico, es conocido como fenómeno electrocinético y fue descrito por primera vez por FF Reuss en Rusia en 1808. Este fenómeno fue tratado analíticamente por primera vez por Helmholtz en 1879, que luego fue modificado por Pellat en 1903 y Smoluchowski en 1921. Este fenómeno es ampliamente conocido como el modelo de Helmholtz-Smoluchowski que relaciona la velocidad electro-osmótica de un fluido de cierta viscosidad y constante dieléctrica, a través de un medio poroso cargado bajo un gradiente eléctrico. El modelo de Helmholtz-Smoluchowski es la descripción teórica más común de la electro-ósmosis y se basa en el supuesto de transporte de fluido en los poros del suelo o sedimento debido al transporte del exceso de carga positiva en la doble capa difusa hacia el cátodo (27). Se aplica a sistemas con poros que son grandes en relación con el tamaño de la doble capa difusa eléctrica y proporciona predicciones razonables para el flujo electroosmótico en la mayoría de los suelos. La tasa de flujo electro-osmótico está controlada por el coeficiente de permeabilidad electro-osmótica de los medios porosos y el equilibrio entre la fuerza eléctrica sobre el líquido y la fricción entre el líquido y la superficie de las partículas del medio poroso. La primera aplicación de electrocinética fue realizada por Casagrande en 1939 para la consolidación y estabilización de suelos blandos de grano fino. Se han realizado numerosos estudios de laboratorio y muy pocas aplicaciones de campo para investigar los procesos electrocinéticos hasta la fecha. Las áreas en las que la electrocinética se ha aplicado con éxito hasta cierto punto incluyen el aumento de la resistencia del pilote, la estabilidad del suelo durante la excavación y los terraplenes,

el aumento de la tasa de flujo de la producción de petróleo, la eliminación de sales de los suelos agrícolas, la eliminación de objetos metálicos del fondo del océano, la inyección de lechadas, microorganismos y nutrientes en los estratos del subsuelo de baja permeabilidad, barreras y sistemas de detección de fugas en revestimientos de arcilla, deshidratación de formaciones arcillosas durante la excavación, control y descontaminación de desechos peligrosos, remoción de especies químicas del medio poroso saturado e insaturado, remoción de gasolina hidrocarburos y tricloroetileno de arcilla y eliminación o separación de radionucleidos y contaminantes inorgánicos y orgánicos (27).

### **2.2.1.7 Antecedentes y conceptos**

Los procesos electrocinéticos son una tecnología relativamente nueva y prometedora que se está investigando por sus posibles aplicaciones en la gestión de residuos peligrosos, específicamente en el caso de suelos con alto contenido de arcilla. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) ha designado el método electrocinético como un proceso viable *in situ* y las partes interesadas están intentando aplicar este método en sitios contaminados que tienen suelos inherentemente de baja permeabilidad y por lo demás difíciles de descontaminar. Los flujos electrocinéticos ocurren cuando se aplica un gradiente eléctrico en un sistema suelo-fluido-contaminante debido a la existencia de la doble capa difusa en la superficie de la partícula del suelo-interfaz del fluido poroso. Varios fenómenos electrocinéticos surgen en la arcilla cuando hay acoplamientos entre fuerzas impulsoras y flujos hidráulicos y eléctricos de corriente continua (CC). Estos fenómenos pueden clasificarse ampliamente en dos pares por las fuerzas impulsoras que provocan el movimiento relativo entre las fases líquida y sólida. El primer par consta de electroósmosis y electroforesis, donde la fase líquida o sólida se mueve con relación a la otra, bajo la influencia de un potencial eléctrico impuesto. El segundo par consiste en el potencial de flujo y el potencial de migración o sedimentación, donde la fase líquida o sólida se mueve

con relación a la otra, bajo la influencia de la fuerza hidráulica o de la gravedad y, por lo tanto, induce un potencial eléctrico. Estos cuatro fenómenos electrocinéticos en la arcilla se representan en la Fig. 2 (27).

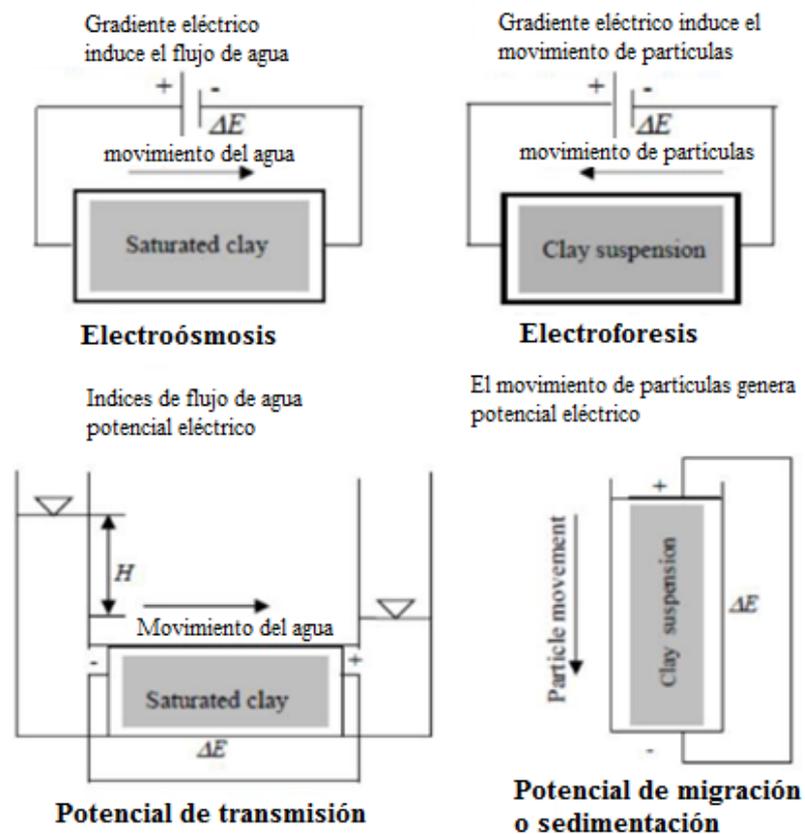
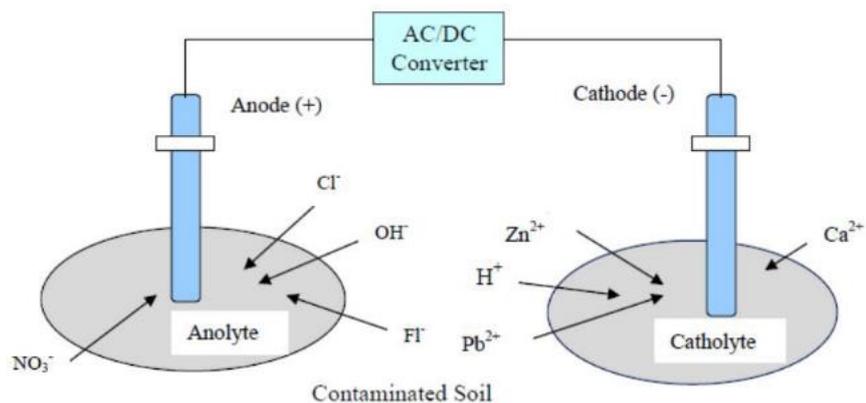


Figura 2. Fenómenos electrocinéticos en arcilla Tomado de (27)

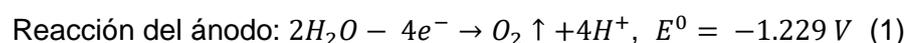
La técnica de extracción, denominada de forma variable, remediación electrocinética, electrorremediación, electrorrecuperación, electrorrestauración, procesamiento electroquímico del suelo o descontaminación electroquímica, utiliza una fuente de alimentación de CC de voltaje constante de bajo nivel, gradientes de potencial en el rango de  $20 \text{ V m}^{-1} - 200 \text{ V m}^{-1}$  o alternativamente una densidad de corriente constante en el rango de  $0.025 \text{ A m}^{-2} - 5 \text{ A m}^{-2}$ , entre los electrodos colocados al final de la muestra de suelo contaminado. Cuando se impone un campo eléctrico a una masa de suelo húmedo, los iones positivos se mueven hacia el cátodo (el electrodo negativo) y los iones negativos hacia el ánodo (electrodo positivo) como se ilustra en la Fig. 3. Debido a la

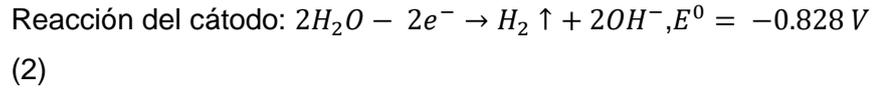
sustitución isomorfa y la presencia de enlaces rotos en las estructuras del suelo, se requieren cationes móviles en exceso para equilibrar las cargas fijas negativas en las superficies de las partículas del suelo. Por lo tanto, los cationes móviles ejercen más impulso sobre el fluido de los poros que los aniones móviles. Como resultado, se genera un movimiento neto de fluido con relación a las partículas del suelo bajo la influencia del gradiente de potencial eléctrico impuesto que se llama electro-ósmosis (convección de agua inducida por el campo a través de un medio poroso con una carga superficial). A diferencia del flujo de agua a presión, la electro-ósmosis depende de la corriente eléctrica a través del suelo, la resistencia al flujo del suelo y el arrastre de fricción ejercido por los iones migratorios en la molécula de agua y este flujo se origina en la doble capa eléctrica de los poros del suelo.



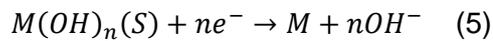
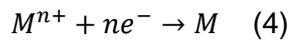
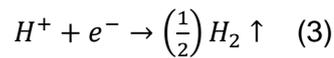
*Figura 3.* Concepto de extracción electrocinética de contaminantes. Tomado de (27).

Cuando la técnica electrocinética se aplica sin acondicionar el fluido del proceso en los electrodos, lo que se denomina remediación electrocinética no mejorada, la corriente eléctrica aplicada conduce a reacciones de electrólisis en los electrodos, generando un medio ácido en el ánodo y un medio alcalino en el cátodo. Las reacciones de electrólisis de los electrodos primarios se presentan en las siguientes ecuaciones (27):





donde  $E^0$  es el potencial electroquímico de reducción estándar, que es una medida de la tendencia de los reactivos en sus estados estándar a pasar a productos en sus estados estándar. Aunque algunas reacciones secundarias pueden ocurrir en el cátodo debido a su menor potencial electroquímico, la semirreacción de reducción de agua ( $H_2O/H_2$ ) es dominante en las primeras etapas del proceso. En los primeros días del proceso, la reacción de electrólisis reduce el pH en el ánodo por debajo de 2 y aumenta el pH en el cátodo por encima de 10, dependiendo de la corriente total aplicada. Las siguientes son las reacciones secundarias que pueden existir dependiendo de la concentración de especies disponibles (27):



donde M se refiere a metales. El medio ácido (Ec. 1) generado en el ánodo avanza a través del suelo hacia el cátodo por migración iónica y electro-ósmosis debido al gradiente eléctrico, flujo de fluido de poro debido a cualquier gradiente hidráulico aplicado externamente o generado internamente y difusión debido a la sustancia química. gradientes desarrollados en el sistema. La base desarrollada en el cátodo avanza inicialmente hacia el ánodo por difusión y migración iónica. Sin embargo, el contraflujo debido a la electro-ósmosis retarda la retrodifusión y la migración del frente de la base. El avance de este frente es más lento que el avance del frente ácido debido al flujo electro-osmótico que contrarresta y también porque la movilidad iónica del  $H^+$  es aproximadamente 1.76 veces la del  $OH^-$ . Como resultado, el frente ácido domina la química a través de la muestra, excepto en una pequeña sección de la muestra cerca del cátodo, donde prevalece el frente de la base. Como la capacidad de amortiguación de ácido del suelo o sedimento es baja, el frente ácido

que se mueve a través del suelo reduce el pH del sistema; dado que, la mayoría de los metales pesados son solubles en un ambiente ácido, esta disminución del pH promueve la desorción de los metales pesados del suelo y la solubilización de los iones metálicos. Los iones en fase disuelta pueden eliminarse eficazmente mediante las acciones combinadas de electroósmosis y migración de iones. Sin embargo, la presencia de materia orgánica de alto peso molecular (sustancias de humus) dentro de los poros del suelo puede reducir la movilidad de los metales pesados debido a la formación de compuestos organometálicos. En estas circunstancias, podría ser necesaria una remediación electrocinética mejorada. Se han realizado numerosos estudios hasta la fecha utilizando diferentes agentes quelantes y complejantes para mejorar las técnicas de recuperación. El uso particular de los agentes potenciadores y acondicionadores se revisa e incluye en las secciones correspondientes (27).

#### **2.2.1.8 Extracción electrocinética**

La extracción electrocinética consiste en eliminar los metales pesados de los suelos contaminados mediante adsorción eléctrica. Cuando se aplica electricidad de corriente continua (CC) de baja densidad a través de electrodos insertados en el suelo, los cationes en la fase de solución del suelo contaminado migran al cátodo mientras que los aniones migran al ánodo con la fuerza de atracción del campo eléctrico establecido. Los contaminantes metálicos concentrados en los electrodos polarizados se eliminan posteriormente mediante galvanoplastia, (co) precipitación, bombeo de solución o complejación de resina de intercambio iónico (23).

A partir de finales de la década de 1980, se ha probado la extracción electrocinética para eliminar contaminantes del suelo. En general, la técnica es eficaz para descontaminar suelos de grano fino con baja conductividad hidráulica y es aplicable tanto a suelos saturados como insaturados de agua. Sin embargo, el éxito de la remediación electroquímica depende de las condiciones específicas que se encuentran en el campo, incluidos los tipos y la cantidad de

contaminantes presentes, el tipo de suelo, el pH y el contenido orgánico (12).

Dependiendo de la velocidad general a la que se mueven los iones metálicos en el suelo, la remediación electrocinética puede llevar de unos días a varios años. La migración de iones metálicos bajo un campo eléctrico de CC se produce principalmente a través de electroósmosis (movimiento de agua de ánodo a cátodo; incluso las especies no iónicas pueden transportarse junto con el flujo de agua inducido por electroósmosis), electromigración (movimiento de iones al electrodo homólogo), electroforesis (movimiento de partículas coloidales cargadas) y difusión (transporte inducido por gradientes de concentración). La dirección, velocidad y cantidad de migración de metales pesados están determinadas por las especies de metales, la movilidad de los iones metálicos (por la densidad de carga y el radio hidratado), la concentración acuosa de metales, el tipo de suelo, la estructura del suelo, el contenido de humedad del suelo y la química de la solución del suelo. La migración se ve además influenciada por la posible sorción, precipitación y disolución durante el curso (23).

Objetivos de extracción electrocinética en metales pesados, contaminantes aniónicos y orgánicos polares en suelo, sedimentos, lodos y dragados. Se han analizado suelos contaminados con metales pesados simples o combinados Pb, Cr, Cd, Co, Ni, Cu, Zn, Hg y Ur. La técnica es más efectiva para remediar suelos saturados o parcialmente saturados (por ejemplo, contenido de humedad 15 % - 25 %), de baja permeabilidad, baja conductividad eléctrica y suelos de textura fina al eliminar las fracciones solubles en agua e intercambiables de los contaminantes metálicos. Los materiales aislantes y conductores como gravas, depósitos de minerales y objetos metálicos en el suelo reducen la efectividad de la extracción electrocinética. En la práctica, las matrices de electrodos inertes hechos de cerámica, carbono, grafito, titanio, acero inoxidable o plástico se instalan en pozos de cerámica en el suelo contaminado con un espaciamiento de 1.0 a 1.5 m, con una corriente de CC

impuesta de  $1.0 \text{ V cm}^{-1}$  a  $1.5 \text{ V cm}^{-1}$ . o  $100\text{-}500 \text{ kWh m}^{-3}$ . Las bombas y unidades de tratamiento están equipadas en el cátodo para eliminar y tratar el agua contaminada. El sistema puede tener múltiples pares de ánodo / cátodo o múltiples ánodos / cátodo único desplegados en paralelo o en círculo (Fig. 4). El tamaño, la forma y la disposición de los electrodos influyen en la distribución y la fuerza del campo eléctrico establecido y, en consecuencia, en la eficacia del tratamiento. Además de la configuración óptima del electrodo, otras medidas como alargar el tiempo de tratamiento, elevar el gradiente de potencial eléctrico, cambiar el modo del campo eléctrico (de continuo a periódico) y agregar membranas de intercambio catiónico/aniónico a los electrodos pueden tomarse para mejorar la eficiencia de remoción de metal. El costo total de la remediación electrocinética del suelo varía drásticamente con la contaminación y las condiciones del campo (23).

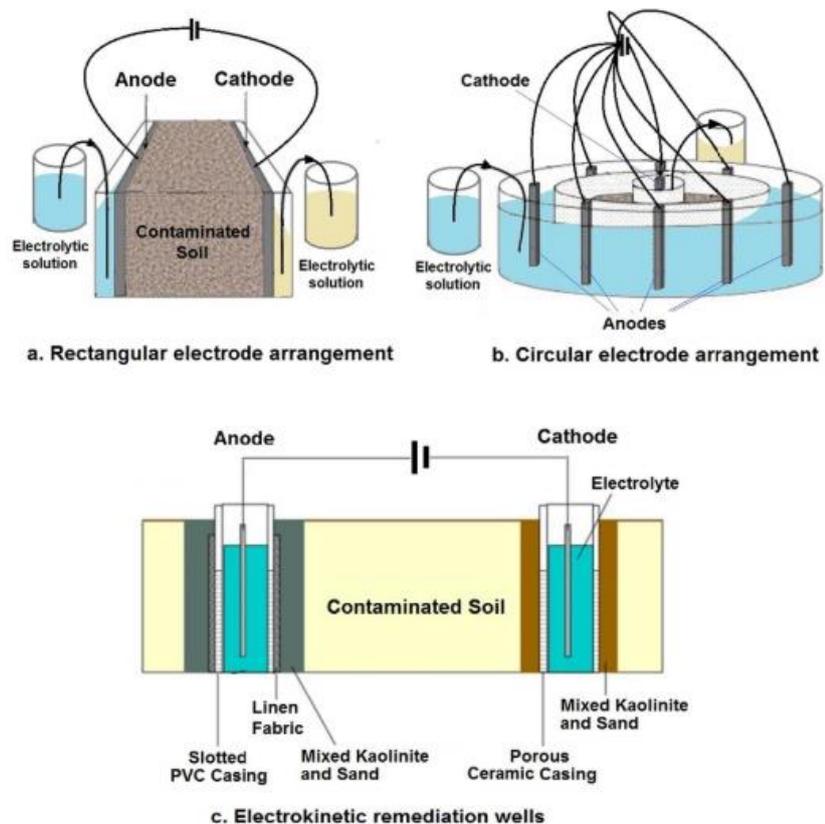


Figura 4. Disposiciones de electrodos ejemplificadas en la remediación electrocinética de suelos. Tomado de (23)

### 2.2.1.9 Remediación electrocinética: bases y aplicaciones

La remediación electrocinética es una técnica medioambiental especialmente desarrollada para la eliminación de contaminantes en suelos, sedimentos y lodos, aunque puede aplicarse a cualquier material sólido poroso (10). La remediación electrocinética se basa en la aplicación de una corriente eléctrica directa de baja intensidad a la matriz porosa a descontaminar (28). El efecto del campo eléctrico induce la movilización y el transporte de contaminantes a través de la matriz porosa hacia los electrodos, donde son recolectados, bombeados y tratados. Los electrodos principales, ánodo y cátodo, se insertan en la matriz del suelo, normalmente dentro de una cámara que se llena con agua o la solución adecuada para mejorar la eliminación de contaminantes (Figura 5). Normalmente, se aplica una caída de voltaje de 1 VCC/cm a los electrodos principales.

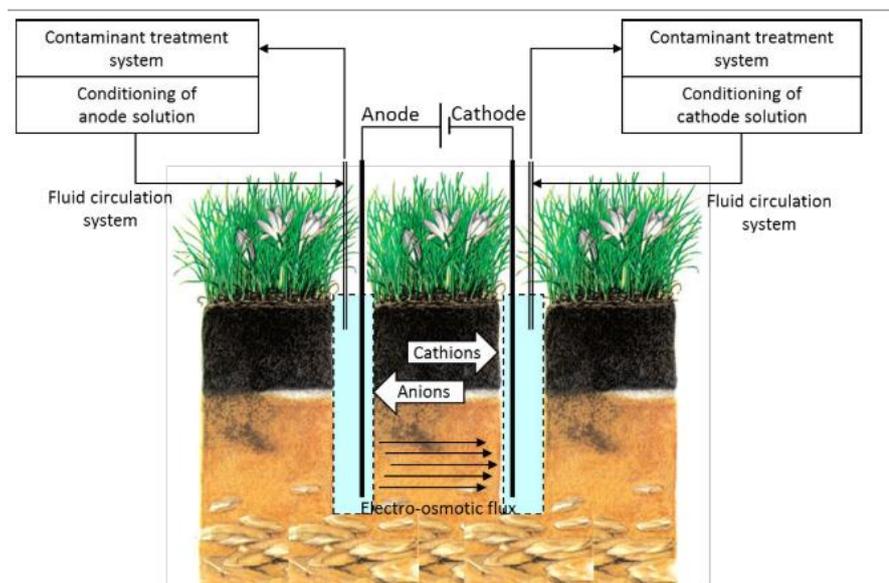
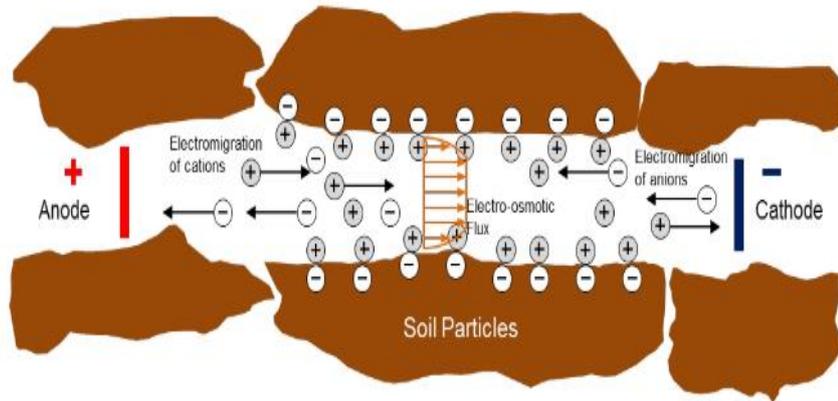


Figura 5. Aplicación de la remediación electrocinética en un sitio contaminado. Tomado de (10)

Los contaminantes se transportan fuera del suelo debido a varios mecanismos de transporte inducidos por el campo eléctrico (28).

- La electromigración se define como el transporte de iones en solución en el fluido intersticial en la matriz del suelo hacia el electrodo de carga opuesta (Figura 6). Los cationes se mueven hacia el cátodo (electrodo negativo) y los aniones se mueven hacia el ánodo (electrodo positivo). La migración iónica o electromigración depende del tamaño y la carga del ion y de la fuerza del campo eléctrico.
- La electroósmosis es el flujo neto de agua o líquido intersticial inducido por el campo eléctrico (Figura 6). Este es un mecanismo de transporte complejo que depende de las características eléctricas de la superficie sólida, las propiedades del fluido intersticial y la interacción entre la superficie sólida y los componentes en solución. El flujo electro-osmótico transporta, fuera de la matriz porosa, cualquier especie química en solución. Los suelos y los sedimentos suelen ser electronegativos (las partículas sólidas tienen carga negativa), por lo que el flujo electroosmótico se mueve hacia el cátodo. En el caso de matrices sólidas electropositivas, el flujo electroosmótico se mueve hacia el ánodo. Se puede encontrar información detallada sobre la electroósmosis en la literatura (29).
- La electroforesis es el transporte de partículas cargadas de tamaño coloidal y contaminantes ligados debido a la aplicación de una corriente continua baja o un gradiente de voltaje en relación con el fluido poroso estacionario. En comparación con la migración iónica y la electroósmosis, el transporte de masa por electroforesis es insignificante en los sistemas de suelo de baja permeabilidad. Sin embargo, el transporte masivo por electroforesis puede llegar a ser significativo en los sistemas de suspensión del suelo y es el mecanismo para el transporte de coloides (incluidas las bacterias) y micelas.
- La difusión se refiere al transporte de masa debido a un gradiente de concentración y no a un gradiente de voltaje como los mecanismos de transporte anteriores. Durante el tratamiento electrocinético de suelos contaminados, aparecerá difusión como resultado de los gradientes de concentración generados por la

electromigración y electroósmosis de contaminantes. El transporte difusivo a menudo se descuida considerando su menor velocidad en comparación con la electromigración y la electroósmosis.



*Figura 6.* Mecanismos de transporte en la remediación electrocinética Tomado de (10)

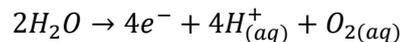
Los dos principales mecanismos de transporte en la remediación electrocinética son la electromigración y la electroósmosis (30). El grado de electromigración de un ion determinado depende de la conductividad del suelo, la porosidad del suelo, el gradiente de pH, el potencial eléctrico aplicado, la concentración inicial del ion específico y la presencia de iones competitivos. La electromigración es el principal proceso de transporte de metales iónicos, moléculas orgánicas polares, micelas iónicas y electrolitos coloidales.

El flujo electroosmótico depende de la constante dieléctrica y la viscosidad del fluido de los poros, así como de la carga superficial de la matriz sólida representada por el potencial zeta. Esta es una función de muchos parámetros, incluidos los tipos de minerales arcillosos y especies iónicas que están presentes, así como el pH, la fuerza iónica y la temperatura. La electroósmosis se considera el proceso de transporte dominante de contaminantes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en formas disueltas, suspendidas, emulsionadas o similares. Además, el flujo electroosmótico a través de regiones de baja permeabilidad es significativamente mayor que

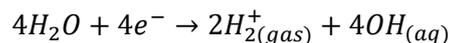
el flujo logrado por un gradiente hidráulico ordinario, por lo que el flujo electroosmótico es mucho más eficiente en suelos de baja permeabilidad (31).

La aplicación de un campo eléctrico a una matriz porosa húmeda también induce reacciones químicas en el suelo, sobre los electrodos que influyen decisivamente en el transporte químico, la especiación de los contaminantes y otros constituyentes del suelo. Las reacciones químicas incluyen reacciones ácido-alcalinas, reacciones redox, reacciones de adsorción-desorción y disolución-precipitación. Tales reacciones afectan drásticamente la especiación de los contaminantes y, por lo tanto, afectan la eficiencia del transporte y la eliminación de contaminantes (32). La principal reacción en los sistemas electroquímicos/electrocínéticos es la descomposición del agua que se produce en los electrodos. La descomposición electrolítica de las reacciones del agua genera gas oxígeno e iones de hidrógeno ( $H^+$ ) debido a la oxidación en el ánodo e iones de gas hidrógeno e hidroxilo ( $OH^-$ ) debido a la reducción en el cátodo como se muestra en las ecuaciones 1 y 2.

En el ánodo (oxidación): (1)



En cátodo (reducción): (2)

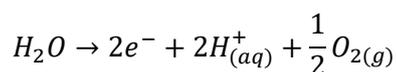


Esencialmente, el ácido se produce en el ánodo y la solución alcalina se produce en el cátodo, por lo tanto, el pH en el cátodo aumenta, mientras que el pH en el ánodo disminuye. La migración de iones  $H^+$  del ánodo y  $OH^-$  del cátodo al suelo conduce a cambios dinámicos en el pH del suelo.  $H^+$  es aproximadamente dos veces más móvil que  $OH^-$ , por lo que los protones dominan el sistema y un frente ácido se mueve a través del suelo hasta que se encuentra con el frente de hidroxilo en una zona cercana al cátodo donde los iones pueden recombinarse para generar agua. Por lo tanto, el suelo se divide en zonas de arrastre con un fuerte salto de pH entre: una zona de pH alto cerca del cátodo y una zona de pH bajo en el lado del ánodo. Los valores reales del pH del suelo dependerán de la

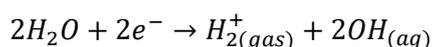
extensión del transporte de iones  $H^+$  y  $OH^-$  y de las características geoquímicas del suelo. Las implicaciones de estas reacciones de electrólisis son enormes en el tratamiento electrocinético ya que impactan en la absorción/desorción de los contaminantes, las reacciones de disolución / precipitación, la especiación química y la degradación de los contaminantes. Además, los cambios de pH en el suelo afectan la migración de contaminantes y la evolución del flujo electrosmótico que es decisivo en la eliminación de contaminantes orgánicos no cargados. En la remediación electrocinética, también es común el uso de productos químicos para mejorar la disolución y el transporte de los contaminantes. Los químicos potenciadores van a interactuar con el suelo y los contaminantes, por lo que es necesario evaluar la geoquímica del suelo y las posibles reacciones con los químicos potenciadores, considerando al mismo tiempo el efecto del pH, para diseñar una técnica satisfactoria que remueva o elimina los contaminantes manteniendo las propiedades naturales del suelo para su uso después del proceso de remediación (10).

#### 2.2.1.10 Mecanismo y fenómeno electrocinético

El mecanismo de trabajo conceptual de un sistema electrocinético se muestra en la Figura 6. Implica aplicar un gradiente de CC baja o de bajo potencial a los electrodos insertados en el suelo y que abarcan la zona contaminada. Debido a la corriente, las reacciones de electrólisis generan protones ( $H^+$ ) y oxígeno ( $O_2$ ) en el ánodo, mientras que en el cátodo se generan iones hidroxilo ( $OH^-$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ). Las reacciones de transferencia de electrones en un proceso electrocinético se pueden escribir como la electrólisis del agua en el ánodo (33).



y en el cátodo:



Además, los protones migran desde el ánodo a través del suelo como portadores hacia el cátodo, mientras que los iones  $OH^-$  en el cátodo migran hacia el ánodo. Dependiendo de la extensión de la migración de iones de protones e hidroxilo, el pH varía a lo largo

del suelo. La generación de protones disminuye el pH cerca del ánodo, mientras que un aumento simultáneo en la concentración de iones  $\text{OH}^-$  aumenta el pH cerca del cátodo. Tal cambio en el pH del suelo afecta significativamente la ocurrencia de procesos físico-químicos en la superficie del suelo (facilitando las reacciones de oxidación-reducción, adsorción-desorción y precipitación-disolución) que dictan la partición y especiación de los contaminantes de metales pesados en el suelo (34). Es imperativo señalar que debido a que la ER se basa en el transporte de iones, es preferible la existencia de contaminantes en forma iónica soluble. Tres tipos diferentes de mecanismos son los principales responsables del transporte de contaminantes hacia los electrodos: electroósmosis, electromigración y electroforesis.

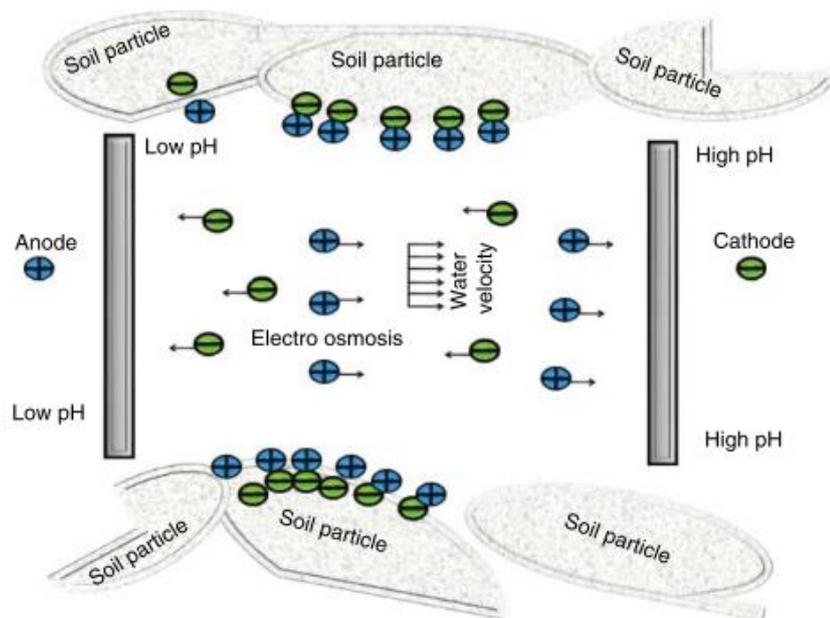


Figura 7. Esquema conceptual del movimiento de iones cargados en un sistema electrocinético. Tomado de (35)

Tabla 2. Los fenómenos de diferentes mecanismos que ocurren en la remediación electrocinética.

Mecanismo electrocinético	Fenómenos
Electroósmosis	El movimiento de la humedad del suelo o el agua subterránea desde el ánodo al cátodo en una celda electrolítica.

<b>Electromigración</b>	Transporte de iones y complejos de iones hacia la carga opuesta, que ocurre comúnmente cuando existen especies inorgánicas iónicas como los cationes de metales pesados.
<b>Electroforesis</b>	Transporte de partículas cargadas o coloides bajo la influencia de un campo eléctrico. Los contaminantes unidos al material particulado en movilidad se pueden transportar de esta manera.

Tomado de (33).

#### **2.2.1.11 Necesidad de mejora en el proceso de remediación electrocinética**

La escasa solubilidad de los metales pesados, la débil desorción de los contaminantes adsorbidos y la baja eficiencia de eliminación de los contaminantes no polares son las principales desventajas identificadas del proceso de ER. Para superar estos cuellos de botella, es deseable mejorar las técnicas de ER o integrar el proceso de ER con otras técnicas útiles, con un objetivo claro en términos de lo siguiente (36):

- Solubilización de contaminantes de metales pesados
- Ajustar / controlar el pH del suelo en un rango de trabajo adecuado para ER
- Descomponer, transformar o destruir los contaminantes.

La superficie del electrodo atrae el gas generado durante el proceso de ER y aumenta la resistencia, lo que ralentiza significativamente el proceso de remediación. Durante el proceso prolongado de ER, las burbujas de gas, liberadas por la disociación electrolítica, cubren lentamente toda la superficie del cátodo, lo que aumenta la resistencia. Por lo tanto, para promover el proceso de ER,

el voltaje de entrada debe aumentarse para suministrar la misma corriente, lo que resulta en un gradiente de voltaje incrementado. Los iones hidroxilo generados durante la disociación electrolítica reaccionan con los cationes para formar un sedimento que taponan los espacios entre las partículas del suelo, obstaculizando la corriente eléctrica y disminuyendo el flujo difusivo con el tiempo (37).

Para abordar estos problemas, se han examinado varias técnicas de mejora que emplean modificación de la superficie, agentes quelantes y complejantes, control del pH, biorremediación, ultrasonidos y barreras reactivas permeables en combinación con la técnica ER para mejorar la eficacia de la remediación del suelo. A continuación, se discuten las técnicas de mejora aplicadas a la remediación del suelo para eliminar metales pesados (33).

#### **2.2.1.12 Técnicas de mejora**

##### **A. Modificación superficial**

Para modificar la superficie de cualquier líquido o sólido cambiando la tensión superficial, los tensioactivos pueden actuar como agentes humectantes, adhesivos, agentes espumantes, agentes floculantes, detergentes, penetrantes, dispersantes y desemulsionantes. Se utilizan tres tipos principales de tensioactivos para estos fines: (i) tensioactivos catiónicos (por ejemplo, CTAC), (ii) tensioactivos aniónicos (por ejemplo, dodecilsulfonato de sodio, SDS) y (iii) tensioactivos no iónicos (por ejemplo, Tween 80). Sin embargo, debido a que los tensioactivos catiónicos exhiben una alta toxicidad y los tensioactivos aniónicos conducen a la electromigración en la dirección opuesta en comparación con la electroósmosis en el proceso de ER; se utilizan con menos frecuencia en urgencias. Por el contrario, los tensioactivos no iónicos y biológicos a menudo se seleccionan porque son menos tóxicos y son ambientalmente benignos. El esquema de la mejora electrocinética utilizando un tensioactivo se muestra en la Figura 8 (33).

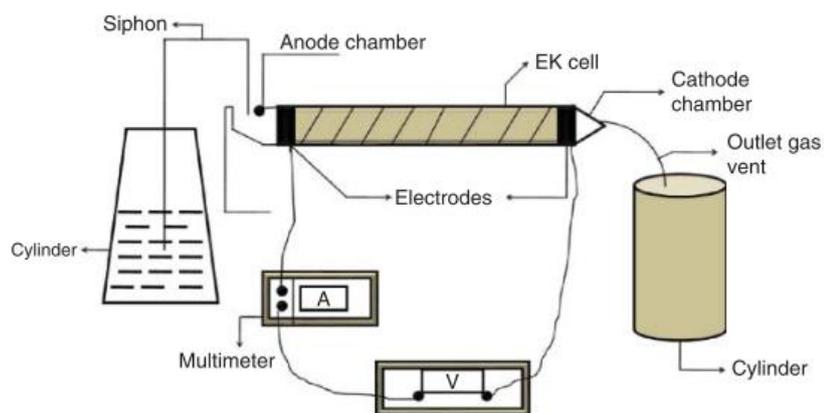
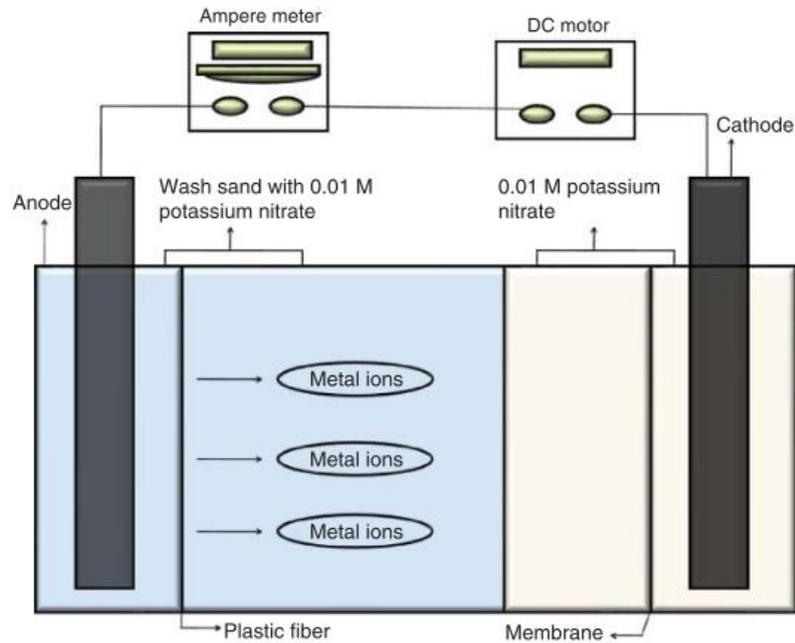


Figura 8. Esquema de un sistema de remediación electrocinética mejorado con surfactante. Tomado de (33)

El impacto negativo del agua dura, los tensioactivos adsorbidos sobre superficies sólidas, la degradación y la dificultad para recuperar o regenerar los tensioactivos son las principales limitaciones para mejorar el proceso de ER. Además, para superar tales limitaciones, la adición de codisolventes como alcoholes, acetona, tetrahidrofurano y butilamina puede mejorar la solubilidad acuosa de contaminantes orgánicos como el anillo de benceno y los hidrocarburos de cadena larga y permitir un mejor transporte con flujo de electroósmosis (38).

### B. Membranas selectivas de cationes

El pH alto debido a la acumulación de iones hidroxilo cerca del cátodo provoca la precipitación de hidróxido de la adsorción de metales pesados en las partículas del suelo, lo que dificulta todo el proceso de eliminación. Varios estudios revelaron la posibilidad de lidiar con el impacto del pH. Observaron que la capacidad amortiguadora de pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del medio y las interacciones solución-suelo podrían afectar la velocidad de avance de los frentes ácido y básico y la ubicación del salto de pH. Para reducir el volumen relativo de agua y solución conductora en el sistema, se coloca una membrana selectiva de cationes frente al cátodo, como se muestra en la Figura 9 (39).



*Figura 9.* Esquema de la celda electrocinética con una membrana selectiva de cationes para un proceso de ER mejorado con surfactante Tomado de (33)

Como se puede ver en la Figura 9, la celda electrocinética representa al compartimiento del suelo a la solución conductora entre el suelo y la membrana y el compartimiento del cátodo con la solución de electrolito entre la membrana y el cátodo. Los iones comienzan a moverse hacia los electrodos cuando se aplica una corriente eléctrica. La membrana selectiva de cationes se coloca entre la superficie del suelo y el cátodo, lo que ayuda selectivamente a que los cationes pasen a través de ella, manteniendo los iones hidroxilo que se producen en el cátodo en el mismo compartimento que la membrana celular. Los protones generados en el ánodo se mueven a través del suelo al pasar a través de la membrana, lo que impulsa el cambio de pH primario cerca de ella (40). El proceso mantiene un pH bajo del suelo durante el proceso de ER y reduce significativamente la cantidad requerida de solución conductora. Se ha encontrado que un volumen más pequeño de solución conductora genera un pH más alto y se filtran más aniones a través de ella. Una pequeña cantidad de aniones que atraviesan la membrana puede no tener ningún efecto adverso, ya que la precipitación con hidroxilo de metales pesados reduce simultáneamente su concentración en la

solución y reduce la retrodifusión de metales contaminantes porque su concentración cerca de la membrana no excede su solubilidad límite. Además, la precipitación de metales pesados provoca una disminución en el consumo de energía eléctrica debido a una caída potencial entre los electrodos, y el tiempo de remediación es proporcional a la distancia entre los electrodos (41).

### C. Electro biorremediación

Esta técnica emplea los efectos sinérgicos tanto de ER como de los procesos de degradación impulsados por microorganismos para eliminar los contaminantes del suelo (42). Los microorganismos absorben carbono, fósforo, nitrógeno y azufre del suelo como medio de crecimiento y secretan ácido biogénico, los metales pesados se movilizan aún más a través de su disolución en el ácido metabólico. Sin embargo, en casos como los suelos con baja conductividad hidráulica, el crecimiento de microorganismos en ausencia de los aceptores de electrones o nutrientes requeridos es difícil. Esto puede remediarse proporcionando contaminantes, como nutrientes, a los microorganismos a través del flujo electroosmótico para promover su crecimiento metabólico. En la Figura 10 se muestra un esquema típico de la tecnología de electro biorremediación (43).

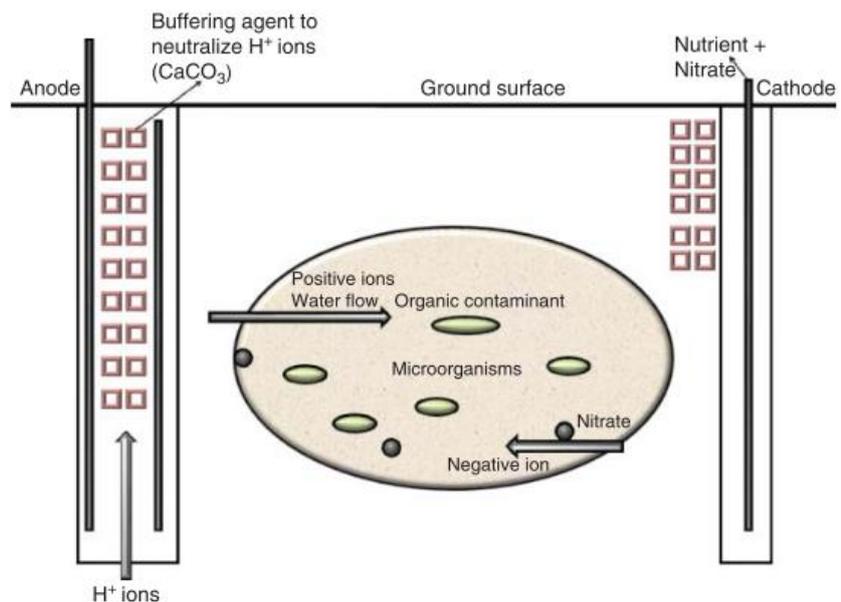


Figura 10. Esquema del proceso de electro biorremediación. Tomado de (33)

Aunque la tecnología microbiana es un proceso lento en comparación con otras técnicas físico-químicas, que a menudo dependen de la capacidad de los microorganismos utilizados y las condiciones de crecimiento microbiano, es un proceso de bajo costo y también degrada los contaminantes orgánicos en productos menos tóxicos y los oxida en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . El principal problema, al llevar a cabo la remediación de arcillas usando este método de combinación, es mantener las condiciones óptimas de degradación microbiana. La principal ventaja de un proceso de biorremediación, mejorado con electrocinética, es la mayor tasa de remediación de contaminantes biodegradables a través del fenómeno de transporte electrocinético. Este fenómeno también se conoce como electroforesis. En áreas con un clima frío, el calor producido por las altas gotas óhmicas, debido al campo eléctrico aplicado al suelo, aumenta la tasa de biorremediación y proporciona temperaturas de crecimiento adecuadas para los microbios según su clase (mesófilo, heterótrofo moderado o heterótrofo). Mena y col. (44) también han sugerido acoplar la tecnología de lavado electrocinético del suelo (EKSF) con un sistema de biorremediación que utiliza barreras reactivas permeables a los microbios. Observaron un transporte eficiente de nutrientes y dodecilsulfato de sodio en el proceso combinado a través de los procesos de electromigración y electroosmótico. Sin embargo, los microorganismos tienen una tolerancia limitada a los metales pesados. La toxicidad causada por una alta concentración de metales pesados afecta negativamente su crecimiento y pueden morir antes de lo habitual. Además, las condiciones aeróbicas son más favorables que el suministro de nitrato o sulfato como aceptores de electrones alternativos, aunque algunos estudios han demostrado la influencia del oxígeno disuelto en un proceso de electrobiorremediación. También se observa que la aplicación de una alta corriente eléctrica no incrementó la concentración de oxígeno disuelto en el suelo, posiblemente indicando una baja permeabilidad de los suelos arcillosos. Como resultado, el oxígeno generado en el compartimento del ánodo no podía transportarse a través del suelo y, por lo tanto, en el tratamiento anaeróbico de suelos de baja

permeabilidad, el oxígeno que se desprende en la superficie del ánodo no cumple adecuadamente los requisitos de oxígeno (45).

#### **D. Oxidación electrogeoquímica**

La tecnología geoquímica, junto con la electrocinética, desempeñan un papel activo en la iniciación de cambios físicos y / o químicos en el suelo y proporciona RE. También contribuye a mejorar las técnicas electrocinéticas para el transporte de especies de metales pesados y moléculas de agua a través de suelos de grano fino y baja permeabilidad (como arcillas) contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos. La aplicación de una corriente eléctrica a las sondas introducidas en el suelo crea condiciones favorables para las reacciones redox que conducen a la inmovilización de contaminantes de metales pesados en la matriz del suelo / agua subterránea entre las ubicaciones de los electrodos sin requerir la introducción de catalizadores externos para impulsar las reacciones redox. Utilizando como electrodo de ánodo para el refuerzo del suelo junto con electrogeocinético punzonado como cátodo. Se observó una mejora en la unión del refuerzo y la resistencia al corte de más del 200 % en comparación con el uso de la técnica de geosintéticos sin acoplarla con electrocinética. Principalmente, tres aplicaciones fundamentales funcionan en esta dirección (33):

- Acción electroforética para sedimentar rápidamente los metales pesados.
  - Acción electroosmótica para deshidratar el suelo
  - Mejora de la fuerza por consolidación con acción electroosmótica
- Sin embargo, el tiempo prolongado de remediación y la falta de resultados probados son las desventajas de esta técnica.

#### **E. Proceso de lasagna™**

Esta técnica fue desarrollada para eliminar metales pesados de suelos heterogéneos y de baja permeabilidad en Kentucky. Implica la creación de varias zonas de tratamiento permeables en estrecha proximidad a lo largo de la matriz del suelo mediante la adición de reactivos catalíticos, sorbentes, agentes oxidantes y

soluciones amortiguadoras, y aplicando una corriente eléctrica para transportar metales pesados a las zonas de tratamiento. La principal ventaja identificada de este proceso es la posibilidad de reciclar el efluente del cátodo de regreso al compartimiento del ánodo para neutralizar el pH y simplificar la gestión del agua y revertir el fluido al cambiar la polaridad. Al realizar el cambio de polaridad, múltiples contaminantes pueden pasar a través de las zonas de tratamiento y disminuir la posibilidad de potenciales no uniformes y saltos de pH en el sistema. En la Figura 11 a, b se muestran dos configuraciones diferentes, la Lasagna™ horizontal y vertical, respectivamente (46).

Debido a que las zonas de tratamiento están en capas, este enfoque se denomina Lasaña. La formación de fracturas horizontales en superficies de arcilla a través de electrodos horizontales y presión vertical permite la eliminación de contaminantes de metales pesados en las profundidades del suelo (47). Para contaminación superficial, la configuración de tratamiento vertical es más apropiada (46). Sin embargo, existen algunas limitaciones que incluyen el gas atrapado causado por la electrólisis. También se han hecho algunos intentos para introducir biorremediación en las zonas de tratamiento con el proceso de Lasaña para aumentar significativamente la eliminación general de metales pesados de suelos/arcillas contaminados (48).

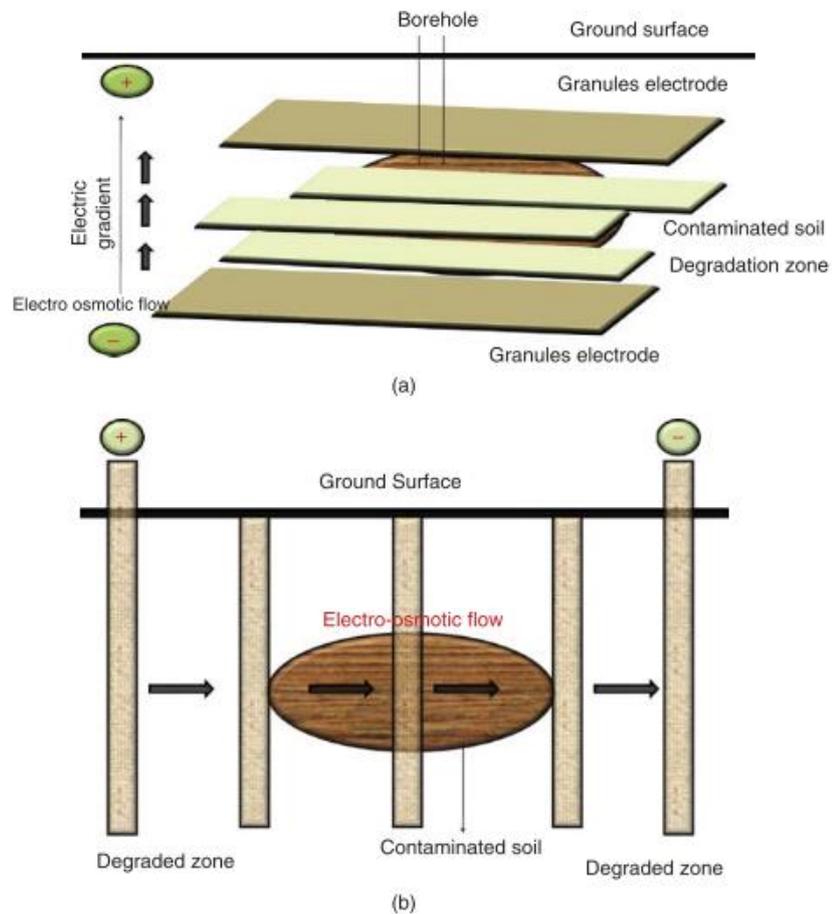


Figura 11. (a) Configuración horizontal de lasaña; (b) configuración vertical de lasaña. Tomado de (46)

## F. Otros procesos potenciales

La tecnología de electrosorb implica electrodos cilíndricos recubiertos con un material polimérico especialmente diseñado e impregnado con productos químicos reguladores del pH para evitar saltos de pH. Durante el proceso de ER, los iones se mueven a través del agua de los poros hasta el electrodo y quedan atrapados en la matriz del polímero. El proceso de intercambio iónico electroquímico es otra técnica prometedora, donde una serie de electrodos se colocan en piezas moldeadas porosas con electrolitos circulantes. Durante el proceso de ER, los iones contaminantes se capturan en electrolitos y se bombean a la superficie, donde pasan a través de un intercambiador de iones electroquímico. Aunque es caro, la eficacia de eliminación de bajas concentraciones de metales pesados es bastante buena. Electro-Klean es un nuevo enfoque para eliminar

metales pesados, radionúclidos y contaminantes orgánicos volátiles específicos de suelos y sedimentos. En él, dos electrodos de CC se aplican directamente a la masa de suelo contaminada. Para mejorar la eficiencia de ER, se agregan ácidos al suelo como fluidos de mejora. La alta capacidad amortiguadora del suelo y varios productos químicos coexistentes son las limitaciones significativas de este proceso (33).

Para disminuir el efecto de enfoque en el área donde se encuentran los frentes ácido y base, algunos investigadores emplean una técnica de ánodo de aproximación. El esquema de la remediación del suelo residual de un sitio de procesamiento de mineral de cromita utilizando la técnica del ánodo de aproximación se muestra en la Figura 12. Implica acercarse secuencialmente al ánodo cerca del cátodo fijo después de iniciar el proceso electrocinético, para disminuir continuamente el pH cerca del ánodo y comprimir la zona de precipitación (49).

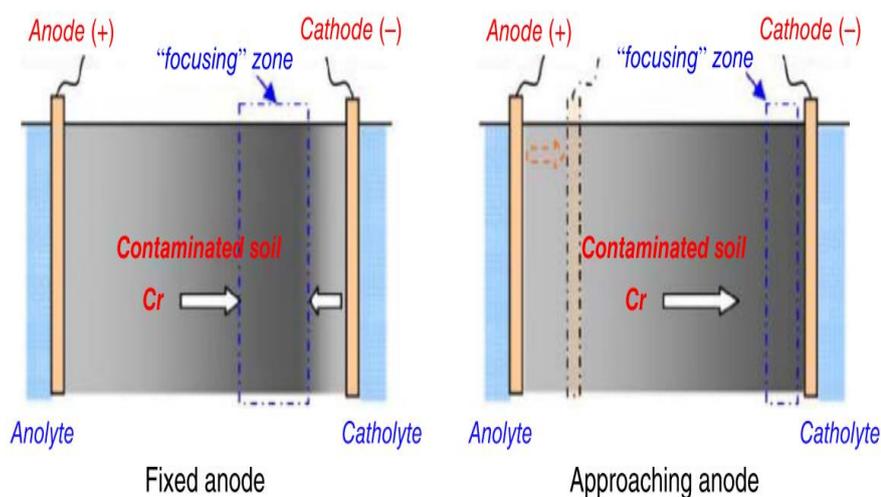


Figura 12. Diferencia esquemática entre el uso de un ánodo fijo y un proceso ER de ánodo que se aproxima. Tomado de (49).

### 2.2.1.13 Técnicas de remediación *ex situ*

La remediación del suelo *ex situ* implica la excavación del suelo del sitio contaminado, el transporte del suelo contaminado a una instalación de tratamiento fuera del sitio y la eliminación del suelo tratado en los lugares permitidos. Con relación a la remediación *in*

*situ*, el tratamiento *ex situ* requiere costos adicionales de excavación del suelo, transporte, eliminación y relleno del sitio, pero el tratamiento se puede controlar y acelerar, logrando mejores resultados en menos tiempo.

#### **A. Relleno sanitario**

El relleno sanitario, o "excavar y transportar", es la técnica más simple de remediación del suelo mediante la cual el suelo contaminado se retira de su sitio original y se transporta a un relleno sanitario seguro para su eliminación. Un relleno sanitario seguro es una estructura diseñada con revestimientos impermeables, drenajes de lixiviados y cerramientos de diques (Fig. 13). Los revestimientos dobles (una capa de plástico y una capa de arcilla) y el sistema de recolección y monitoreo de lixiviados son componentes integrales de la instalación para prevenir posibles fugas y contaminación de las aguas subterráneas. El sistema de revestimiento / tapa superior minimiza la infiltración de lluvia y mantiene la escorrentía superficial alejada del relleno. El diseño, la construcción y el uso de un relleno sanitario seguro están sujetos a las leyes y regulaciones gubernamentales (50).

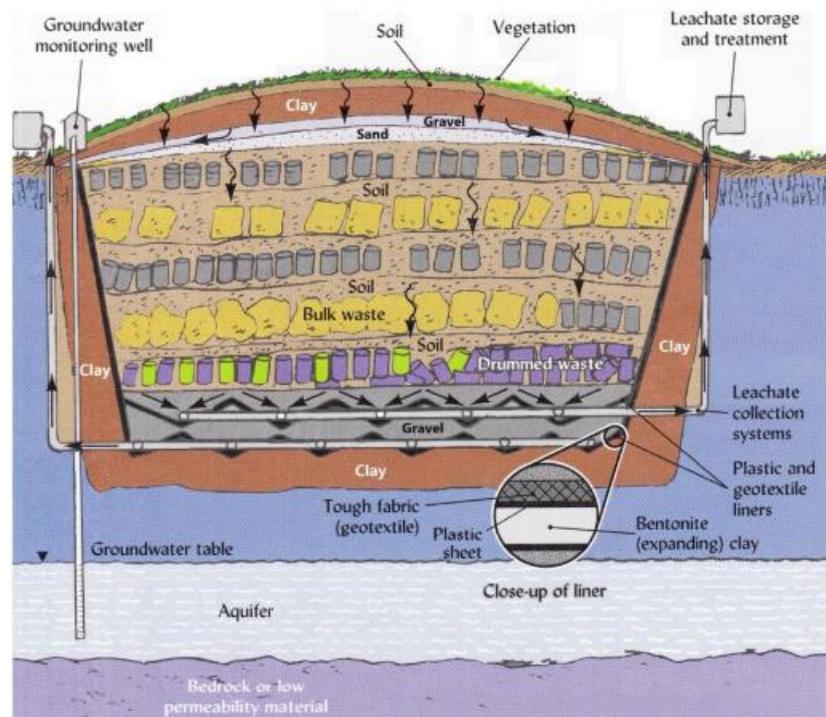


Figura 13. La estructura transversal de un vertedero seguro. Tomado de (50).

## B. Lavado de suelos

El lavado del suelo es un proceso físico y químico mixto para eliminar los metales pesados del suelo contaminado mediante el lavado del suelo *ex situ* con soluciones especialmente formuladas. En funcionamiento, el suelo excavado de un sitio contaminado primero se tritura y se tamiza para eliminar materiales gruesos como residuos plásticos, maderas y piedras. Los materiales magnéticos del suelo se eliminan mediante imanes. El suelo cribado (p. Ej. < 5 mm) se mezcla a fondo con una solución de lavado mediante disonicación o lavado mecánico y luego se tamiza o hidrociclona para separar la arena gruesa y las gravas (< 0.05 mm) de la fracción de limo fino y arcilla (> 0.05 mm). La fracción gruesa está menos contaminada y normalmente se devuelve al sitio original después del enjuague con agua. Las partículas de limo y arcilla que se suspenden en la solución de lavado se recuperan por sedimentación, se aclaran con agua y se devuelven al sitio original. La solución de lavado de residuos y el agua de enjuague se reutilizan, reciclan o transportan a una instalación de tratamiento de aguas residuales para su eliminación.

Los lodos de tratamiento de aguas residuales se tratan adicionalmente mediante solidificación/estabilización antes de su vertido (23).

### **C. Solidificación**

En la solidificación del suelo *ex situ*, el suelo contaminado con metales se retira del sitio, se transporta a una instalación de tratamiento, se tamiza para excluir materiales gruesos (por ejemplo, > 5 cm) y se mezcla con una sustancia aglutinante en una extrusora. La sustancia aglutinante se dispersa a través del suelo, formando una entidad sólida a prueba de agua que encierra los contaminantes. La tecnología a veces se denomina microencapsulación. Si se utiliza un agente estabilizador en lugar de una sustancia aglutinante para inmovilizar contaminantes mediante reacciones químicas, el método se denomina estabilización *ex situ*(23).

Los materiales aglutinantes para la encapsulación de contaminantes incluyen betún fundido, asfalto emulsionado, cemento de azufre modificado (un material termoplástico que se funde a 127 °C - 149 °C), polietileno, cemento de puzolana (cenizas volantes, polvo de horno, piedra pómez o escoria de alto horno) y Portland cemento. Si se usa fosfato / cal soluble, el material inmoviliza los metales pesados en el suelo en lugar de solidificar el suelo en sí. Otra opción es encapsular directamente los suelos contaminados en envolturas de polietileno o betún para formar bloques de desechos sólidos que se pueden eliminar en un vertedero no peligroso (23).

## **2.3 Definición de términos básicos**

- **Electrocinética**

Es el tratamiento donde se incorpora el paso de un flujo eléctrico de bajo amperaje entre un movimiento de cátodos y ánodos implantados en el suelo contaminado (35).

- **Suelo**

El suelo es una matriz ambiental enormemente compleja que realiza numerosas funciones, a veces conflictivas, tanto desde una perspectiva ecocéntrica como antropocéntrica y, en consecuencia, deben tenerse en cuenta muchos aspectos diferentes para evaluar adecuadamente la salud del suelo (3).

- **Metales pesados**

Los metales pesados son elementos naturales que se encuentran en toda la corteza terrestre (21).

- Metales pesados en suelo

Las rocas se desintegran en partículas finas o suelo por la influencia del hielo, el agua, la temperatura, etc. La matriz del suelo es un reservorio importante o medio de transporte de metales pesados, porque el suelo y las asociaciones de metales pesados tienen características de unión ricas y diversas (6).

- Zinc

El zinc es un metal de transición con las siguientes características: período 4, grupo IIB, número atómico 30, masa atómica 65.4, densidad  $7.14 \text{ g cm}^{-3}$ , punto de fusión  $419.5 \text{ °C}$  y punto de ebullición  $906 \text{ °C}$  (26).

- Historia de la electrocinética

El movimiento del agua a través de capilares y poros como resultado de la aplicación de potencial eléctrico se conoce como fenómeno electrocinético y este fenómeno fue descrito por primera vez por FF Reuss en Rusia en 1808 (27).

- Procesos electrocinéticos

Son una tecnología relativamente nueva y prometedora que se está investigando por sus posibles aplicaciones en la gestión de residuos peligrosos, específicamente en el caso de suelos con alto contenido de arcilla (27).

- Extracción electrocinética

La extracción electrocinética consiste en eliminar los metales pesados de los suelos contaminados mediante adsorción eléctrica (23).

- Remediación electrocinética

La remediación electrocinética es una técnica medioambiental especialmente desarrollada para la eliminación de contaminantes en suelos, sedimentos y lodos, aunque puede aplicarse a cualquier material sólido poroso (10).

- Electromigración

Se define como el transporte de iones en solución en el fluido intersticial en la matriz del suelo hacia el electrodo de carga opuesta. Los cationes se mueven hacia el cátodo (electrodo negativo) y los aniones se mueven hacia el ánodo (electrodo positivo). La migración iónica o electromigración depende del tamaño y la carga del ion y de la fuerza del campo eléctrico (29).

- Electroósmosis

Es el flujo neto de agua o líquido intersticial inducido por el campo eléctrico (Figura 6). La electroósmosis es un mecanismo de transporte complejo que depende de las características eléctricas de la superficie sólida, las propiedades del fluido intersticial y la interacción entre la superficie sólida y los componentes en solución (29).

- Electroforesis

Es el transporte de partículas cargadas de tamaño coloidal y contaminantes ligados debido a la aplicación de una corriente continua baja o un gradiente de voltaje en relación con el fluido poroso estacionario (31).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Método y alcances de la investigación**

##### **3.1.1 Método de la investigación**

Método científico, es un método de investigación usado principalmente en la producción de conocimiento en las ciencias. Para ser llamado científico, un método de investigación debe basarse en lo empírico y en la medición, y estar sujeto a los principios específicos de las pruebas de razonamiento (51).

##### **A) Método general o teórico de la investigación**

Se utilizó el método hipotético- deductivo. Es el camino lógico para buscar la solución a los problemas que nos planteamos. Consiste en emitir hipótesis acerca de las posibles soluciones al problema planteado y en comprobar con los datos disponibles si estos están de acuerdo con aquellas (52).

## **B) Método específico de la investigación**

### **a) Método de la observación:**

Adaptado de (4), (11) y (12)

Según la guía para muestreo de suelos del MINAM

- 1 El muestreo del suelo se realizó en la provincia de Concepción, anexo de Palia a las orillas del río Mantaro. Con el tipo de muestreo de identificación.
- 2 Se tomó muestras del suelo de la capa superior de suelo (0 cm - 30 cm de profundidad) después de retirar la cubierta vegetal, para suelos agrícolas.
- 3 Se eliminó manualmente piedras, palos y raíces grandes (> 1 cm).
- 4 Luego la muestra recaba a una cantidad de 500 g fue transportada al laboratorio en una bolsa de plástico hermética para la caracterización inicial, donde obtendremos la cantidad de Zn, pH, conductividad eléctrica, etc.
- 5 Se recabo un total de 10 kg de suelo para poder hacer el desarrollo de la parte experimental.

### **b) Método analítico:**

Adaptado de (4), (11) y (12)

- Laboratorio
  1. Se construyó un reactor acrílico con dimensiones internas de 220 mm de largo, 110 mm de ancho y 120 mm de alto, el cual se dividió en tres compartimientos: el del suelo de 50 mm de largo, 110 mm de ancho y 40 mm de fondo y dos cámaras de electrolito de 170 mm de largo, 110 mm de ancho y 40 mm de alto cada una.
  2. Se compró dos barras de grafito con dimensiones de alto de 5.5 cm y diámetro de 0.5 cm, los cuales serán usados como electrodos de trabajo.
  3. Los electrodos se conectaron a una fuente de alimentación de corriente continua a voltajes constantes de 20 V a 30 V.
  4. Se instaló un multímetro en el circuito eléctrico para leer continuamente la intensidad de corriente eléctrica

5. Las cámaras de suelo y electrolitos se separaron utilizando papel filtró whatman-42.
  6. Aproximadamente 725 g de suelo fueron mezclados con 200 mL de agua destilada colocados en el compartimiento del suelo.
  7. Todos los experimentos se trabajaron por un tiempo de 6 días y 20 días.
  8. El electrolito fue reemplazado con un nuevo lote del mismo electrolito cada 24 horas.
  9. Se usó una solución de cloruro de potasio a 0.1 M, para preparar dicha solución se usará 1,31 g de KCl en un volumen de 175 mL. Dicho electrolito proporcionó conductancia para mejorar el proceso de la electrocinética y también para tener una mayor concentración de potasio en el suelo.
  10. Luego de transcurrido los tiempos del experimento se retiró la tierra del reactor y se mezclará de una manera homogénea para analizar la nueva concentración de zinc.
  11. Dichas muestras retiradas del reactor se llenaron en bolsas herméticas a cantidades de 500 g para el análisis de sus características finales.
- Gabinete:
    - 1 Se procesó la información obtenida de los reportes de los laboratorios, de la concentración de zinc.
    - 2 Se realizó el análisis de varianza más conocida como ANOVA para realizar la comprobación de las hipótesis, utilizaremos el método de Tukey para evaluar las diferencias entre las medias.

### **3.1.2 Alcances de la investigación**

#### **A) Tipo de investigación**

El tipo de diseño fue aplicativo ya que implica desarrollar y probar teorías e hipótesis que son intelectualmente desafiantes para el investigador pero que pueden tener o no una aplicación práctica en el presente o en el futuro. Por lo tanto, este trabajo a menudo implica la prueba de hipótesis que contienen conceptos muy abstractos y especializados (53).

## B) Nivel de investigación

Nivel explicativo, ya que, establecen hipótesis (es decir, supuestos en forma directa o indirecta) que constituyen el núcleo de su encuadre teórico, *a priori* de las mediciones (54).

### 3.2 Diseño de la Investigación

El diseño de investigación que se utilizó fue de tipo experimental para determinar la causal en una situación controlada. Debemos recordar que un experimento es una observación en condiciones controladas o, en otras palabras, podemos decir que es un diseño en el que se manipulan algunas de las variables que se estudian o que buscan controlar la condición en la que se observan las personas (51).

Se aplicó un diseño experimental del tipo factorial de  $2^2$  ya que se considera el efecto de dos factores (A=voltaje y B=tiempo de proceso) con dos niveles de estudio (voltaje de 20 V a 30 V y tiempo de proceso de 6 días a 20 días).

**Tabla 3.** *Diseño factorial de  $2^2$*

Tratamientos	A	B	Notación de Yates
1	-	-	(1)
2	+	-	a
3	-	+	b
4	+	+	ab

### 3.3 Población y muestra

La población estuvo constituida por los suelos contaminados del valle del Mantaro de la provincia de concepción y la muestra fue la porción (9kg) tomada para el análisis y experimentación.

#### 3.3.1 Población

La población estuvo constituida por los suelos contaminados del valle del Mantaro de la provincia de concepción.

#### 3.3.2 Muestra

Para la toma de muestra se utilizó la guía para el muestreo del suelo estipulados por el MINAM, cuyo muestreo fue de la clase probabilística de tipo aleatoria simple.

La fórmula para determinar el tamaño de muestra fue el de poblaciones finitas, donde el peso requerido para cada desarrollo experimental fue de 725 g. Con un total de 9 Kg.

Poblaciones finitas:

$$n = \frac{N \times Z_{\alpha}^2 \times P \times Q}{\varepsilon^2 \times (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \times P \times Q}$$

n: Tamaño de muestra

N: Tamaño de la población

$Z_{\sigma}$ : Valores de significancia

$\varepsilon$ : Error

Donde:

N: Es el tamaño de la población que para nuestro trabajo será de 9 kg.

$Z_{\sigma}$ : Para nuestro caso se trabajará a un nivel de confianza del 95 %, por hecho el nivel de significancia será:

$$\alpha = 1 - 0,95$$

$$\alpha = 0,05$$

$$1 - \frac{\alpha}{2} = 0,975$$

Se buscó el valor de 0,975 en la tabla de distribución normal del apéndice de la página 180 del libro de metodología de la investigación, tenido como valor  $Z_{\sigma} = 1,96$

$\varepsilon$ : el error para nuestro trabajo fue de 0,0349

P: La probabilidad a favor (0,5)

Q: La probabilidad en contra (0,5)

Reemplazando los valores en la ecuación 1 tenemos:

$$n = \frac{9000 \times 1,96^2 \times 0,5 \times 0,5}{0,0349^2 \times (9000 - 1) + 1,96^2 \times 0,5 \times 0,5}$$

$$n = 725,0$$

redondeando:

$$n = 725 \text{ g}$$

La cantidad requerido para las pruebas experimentales de la remediación electrocinética fue de 725 g.

### **3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

#### **3.4.1 Técnicas utilizadas en la recolección de datos**

- Observación *in situ*.
- Desarrollo de corridas experimentales.
- Análisis de laboratorio

#### **3.4.2 Instrumentos utilizados en la recolección de datos**

- Monitoreo en campo de parámetros
- Monitoreo en laboratorio.
- Informes de los reportes de análisis.
- Resúmenes de trabajos de información

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro, mediante la aplicación de la remediación electrocinética con la variación del voltaje y tiempo de proceso.

##### 4.1.1 Características de los suelos contaminados del valle del Mantaro

Para la caracterización del suelo se recabó una cantidad de 500 g los cuales fueron llevados al laboratorio de análisis de suelo LABSAF teniendo como resultados de la caracterización los siguientes parámetros:

**Tabla 4.** *Parámetros de análisis del suelo*

Ensayo	Valor	Unidad
pH	7.96	
Conductividad	44.40	mS/m
Materia Orgánica	4.22	%
Nitrógeno	0.21	%
Fosforo	3.04	ppm
Potasio	343.93	ppm
Zinc	15.74	mg/kg

En la tabla 4, se muestra los parámetros del análisis de suelo, donde se obtuvo un pH de 7.96 que es medianamente alcalino, conductividad de 44.40 mS/m la cual es normal ya que no existe restricciones para ningún cultivo, materia orgánica de 4.22 % que representa un valor alto en el suelo, nitrógeno de 0.21 %, con una cantidad baja de fósforo de 3.04 ppm, un valor de potasio alto de 343.93 ppm y un valor inicial de Zn de 15.74 mg/kg. Observando que la concentración de zinc en el Perú no cuenta con un ECA-suelo o LMP.

**Tabla 5.** *Parámetros de análisis de textura*

Análisis de textura	Valor	Unidad
Arena	53.2	%
Limo	31.8	%
Arcilla	15	%
Clase textural	Franco arenosa	

En la tabla 5, se muestra el análisis de textura del suelo, donde presenta un 53.2 % de arena, 31.8 % de limo, 15 % de arcilla y una clase textural de franco arenosa.

#### 4.1.2 Variación del voltaje en la remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro.

**Tabla 6.** *Remoción de Zn con la variación del voltaje*

Voltaje (V)	Remoción de Zn (%)
20	22.11 %
20	42.50 %
20	21.54 %
20	43.01 %
20	21.16 %
20	42.69 %
30	38.88 %
30	79.03 %
30	39.14 %
30	78.78 %
30	38.56 %
30	79.35 %
Promedio	45.56 %

En la tabla 6, se muestra la remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro con la variación del voltaje de 20 V a 30 V, donde a un voltaje de 20 V se obtuvo una remoción de zinc del 21.16 %

siendo la menor remoción de zinc obtenida y a un voltaje de 30 V se obtuvo una remoción de zinc del 79.35 % siendo el mayor valor de remoción de zinc. Con un promedio de remoción de zinc del 45.56 %.

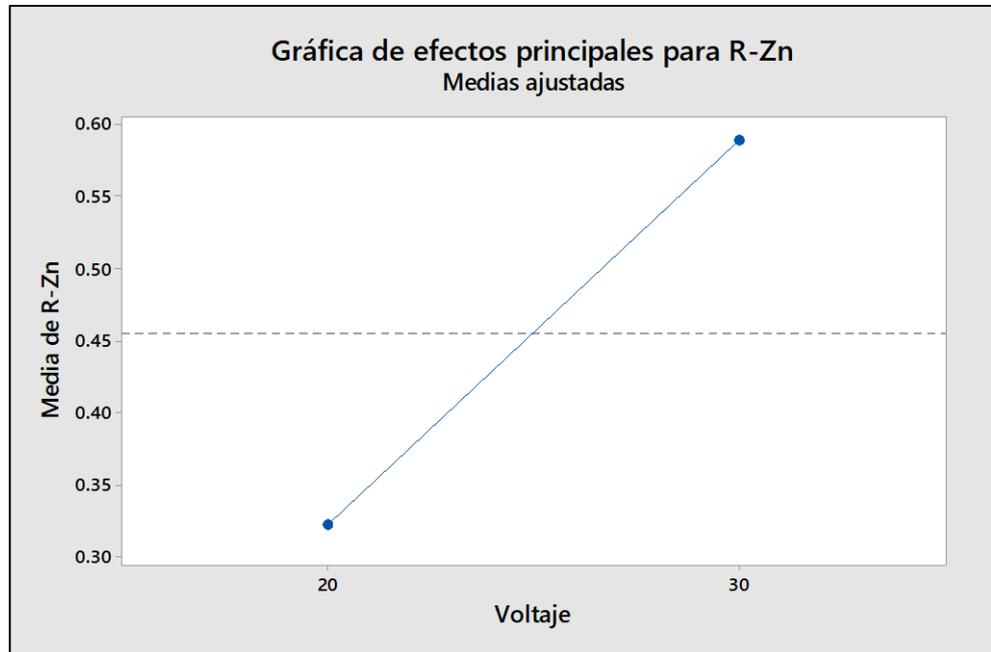


Figura 14. Gráfica de los efectos principales con la variación del voltaje

En la figura 14, se muestra la gráfica de los efectos principales para la remoción del zinc con la variación del voltaje, donde a 20 V se obtuvo una remoción promedio de 32.16 % y a 30 V se obtuvo una remoción promedio de 58.95 %.

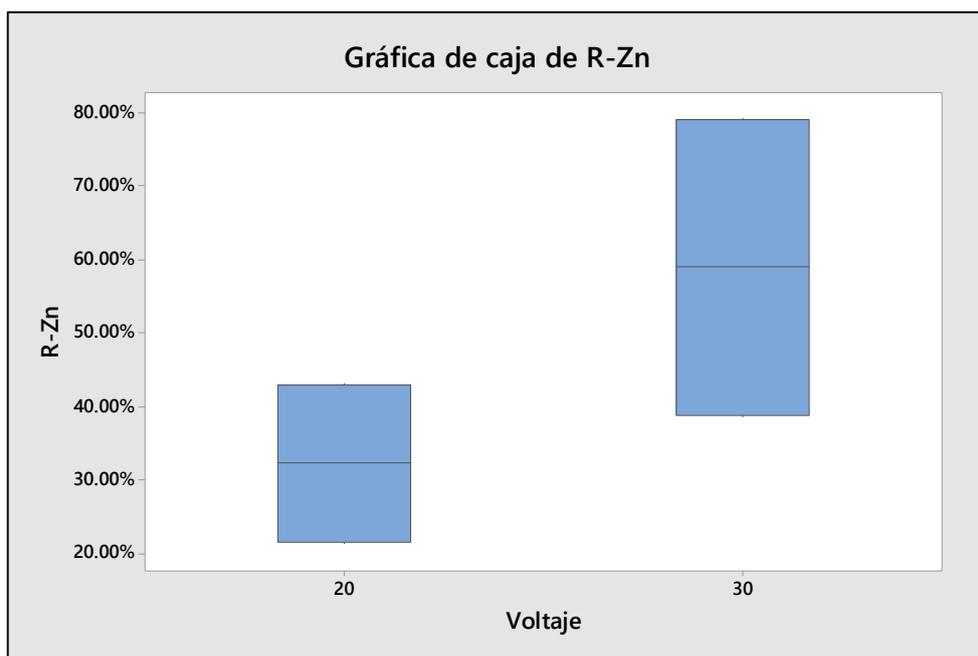


Figura 15. Gráfica de cajas con la variación del voltaje

En la figura 15, se muestra la gráfica de cajas para la remoción del zinc con la variación del voltaje, donde a 20 V se obtuvo una variación de la remoción de zinc de 21.44 % a 42.77 % y a 30 V se obtuvo una variación de la remoción de zinc de 38.80 % a 79.11 %.

#### 4.1.3 Variación del tiempo de proceso en la remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro.

Tabla 7. Remoción de Zn con la variación del tiempo de proceso

Tiempo de proceso (días)	Remoción de Zn (%)
6	22.11 %
6	38.88 %
6	21.54 %
6	39.14 %
6	21.16 %
6	38.56 %
20	42.50 %
20	79.03 %
20	43.01 %
20	78.78 %
20	42.69 %
20	79.35 %
Promedio	45.56 %

En la tabla 7, se muestra la remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro con la variación del tiempo de proceso de 6 días y 20 días; donde, a un tiempo de 6 días se obtuvo una remoción de zinc del 21.16 % siendo la menor remoción de zinc obtenida y a un tiempo de 20 días se obtuvo una remoción de zinc del 79.35 % siendo el mayor valor de remoción de zinc. Con un promedio de remoción de zinc del 45.56 %.

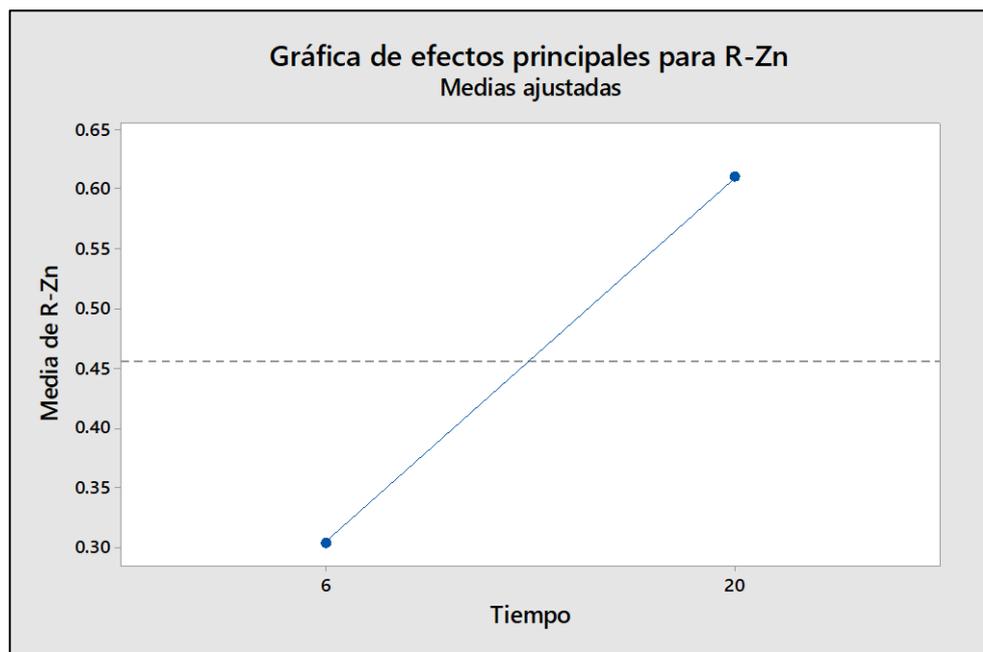


Figura 16. Gráfica de los efectos principales con la variación del tiempo

En la figura 16, se muestra la gráfica de los efectos principales para la remoción del zinc con la variación del tiempo de proceso, donde a 6 días se obtuvo una remoción promedio de 30.23 % y a 20 días se obtuvo una remoción promedio de 60.89 %.

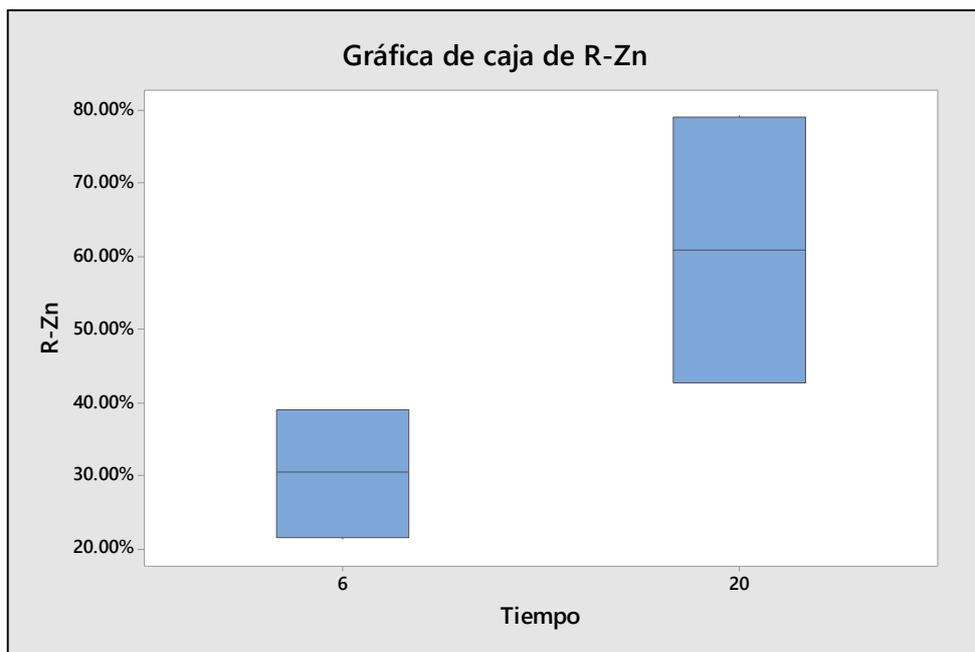


Figura 17. Gráfica de cajas con la variación del tiempo

En la figura 17, se muestra la gráfica de cajas para la remoción del zinc con la variación del tiempo de contacto, donde a 6 días se obtuvo una variación de la remoción de zinc de 21.44 % a 38.44 % y a 20 días se obtuvo una variación de la remoción de zinc de 42.64 % a 79.11 %.

#### 4.1.4 Porcentaje de remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro mediante la remediación electrocinética.

Para la determinación de la remoción de zinc, se trabajó con un reactor acrílico con dimensiones internas de 220 mm de largo, 110 mm de ancho y 120 mm de alto, el cual se dividió en tres compartimientos: el compartimiento del suelo de 50 mm de largo, 110 mm de ancho y 40 mm de fondo y dos cámaras de electrolito de 170 mm de largo, 110 mm de ancho y 40 mm de alto cada una. Con dimensiones de alto de 5.5 cm y diámetro de 0.5 cm, los cuales serán usados como electrodos de trabajo y una concentración inicial de zinc de 15.74 mg/kg.

**Tabla 8.** Remoción de Zn

Voltaje (V)	Tiempo (días)	Remoción de Zinc (%)			
		R1	R2	R3	Promedio
20	6	22.11%	21.54%	21.16%	21.60%
30	6	38.88%	39.14%	38.56%	38.86%
20	20	42.50%	43.01%	42.69%	42.74%
30	20	79.03%	78.78%	79.35%	79.06%

En la tabla 8, se muestra la remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro mediante la remediación electrocinética con la interacción del voltaje y tiempo de proceso, donde a la mayor remoción de zinc se dio a un voltaje de 30 V y un tiempo de proceso de 20 días con un porcentaje de 79.06 %.

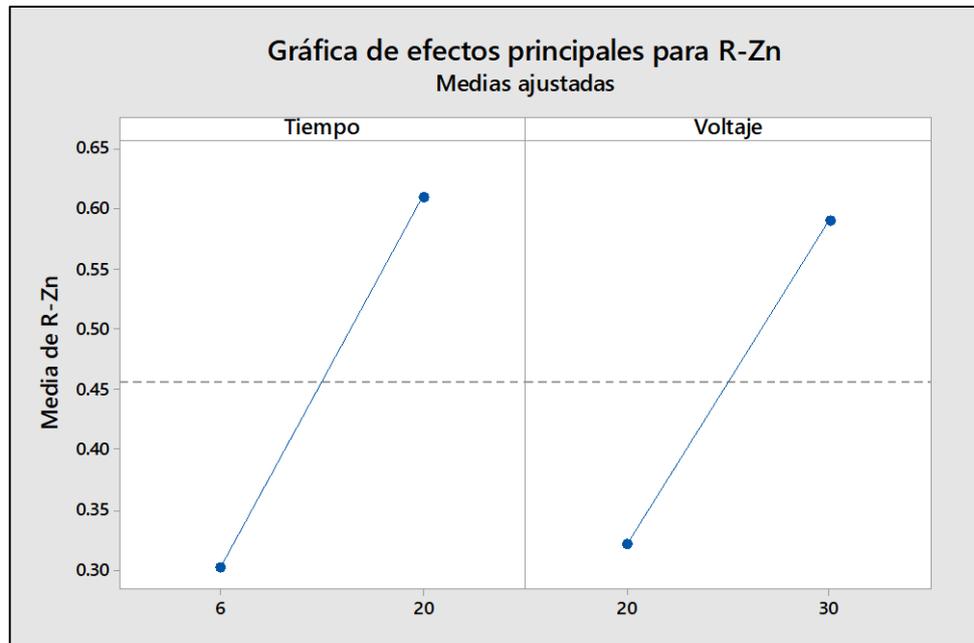


Figura 18. Gráfica de efectos principales para la remoción del Zinc

En la figura 18, se muestra la gráfica de efectos principales para la remoción del zinc, donde a un tiempo de 20 días y un voltaje de 30 V, se tiene los mayores porcentajes de remoción del zinc.

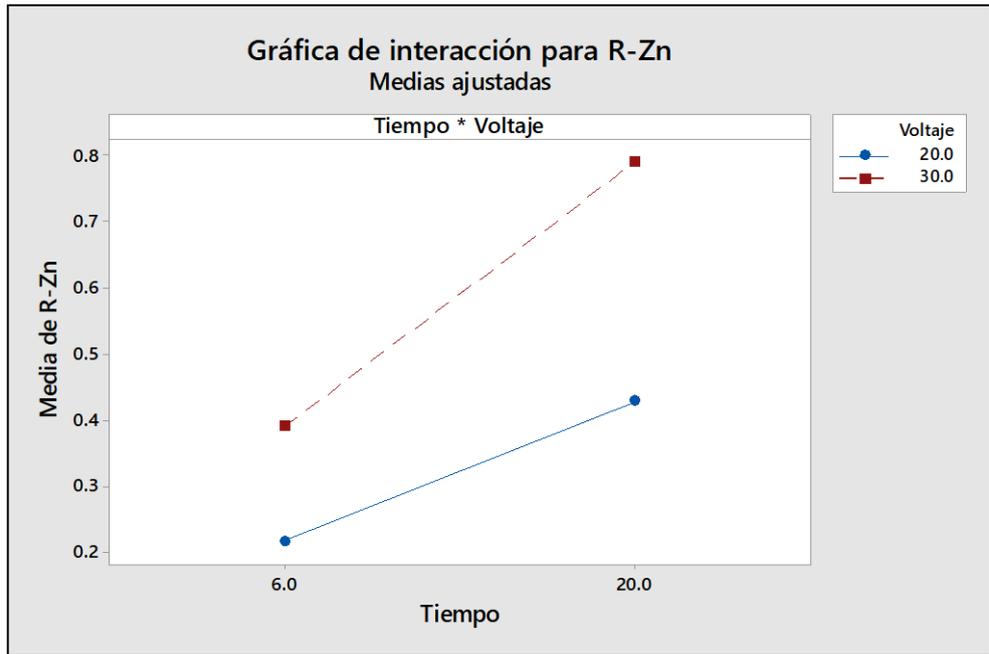


Figura 19. Gráfica de interacción para la remoción del Zinc

En la figura 19, se muestra la gráfica de interacción para la remoción del zinc, donde a un voltaje de 30 V (línea roja) y tiempo de 20 días se tiene la mayor remoción del zinc y a un voltaje de 20 V (línea azul) y tiempo de 6 días se tiene la menor remoción de zinc.

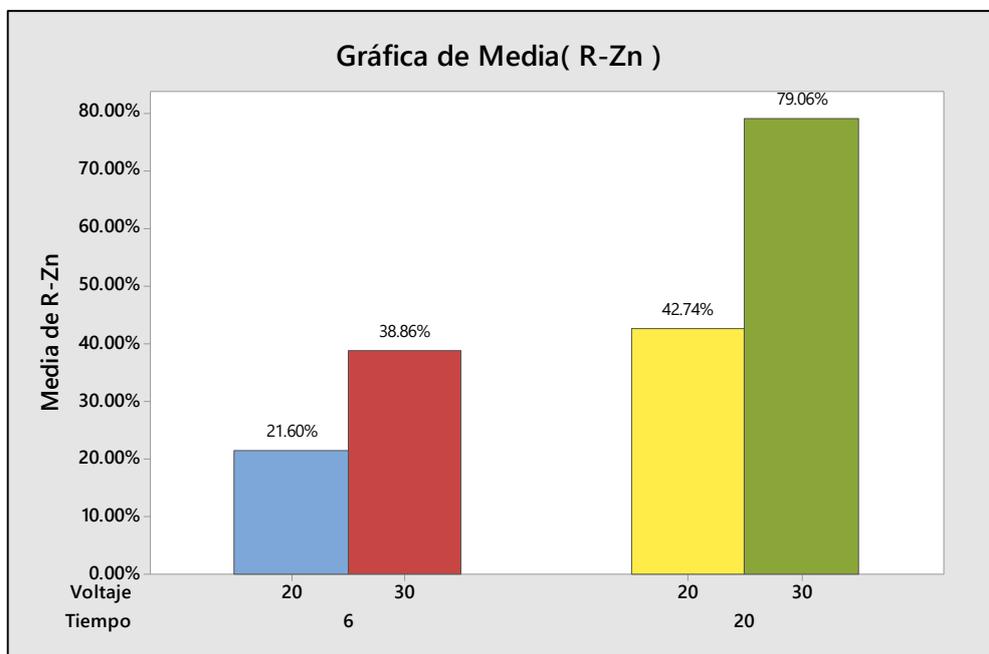


Figura 20. Gráfica de media para la remoción del Zinc

En la figura 20, se muestra la gráfica de media para la remoción del Zinc, donde a 6 días y 20 V se tiene la menor remoción del Zinc con un valor

de 21.60 %, a 20 días y 30 V se tiene la mayor remoción del Zinc con un valor de 79.06 %.

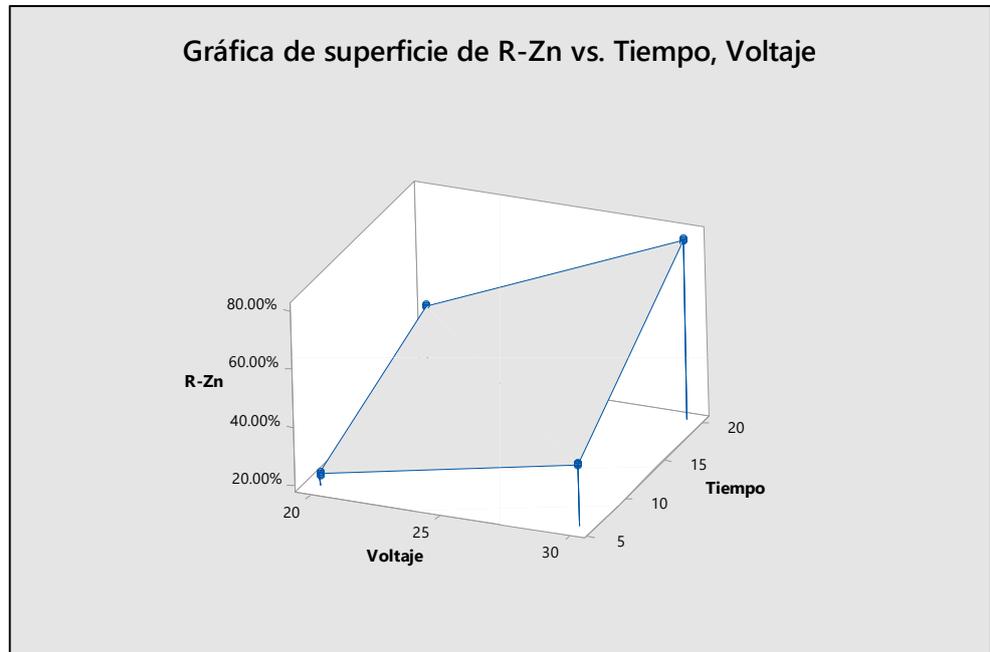


Figura 21. Gráfica de superficie para la remoción del Zinc

En la figura 21, se muestra la gráfica de superficie para la remoción del zinc con la interacción del tiempo y voltaje en la técnica de la remediación electrocinética, donde a mayor tiempo y mayor voltaje se tiene la mayor remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro.

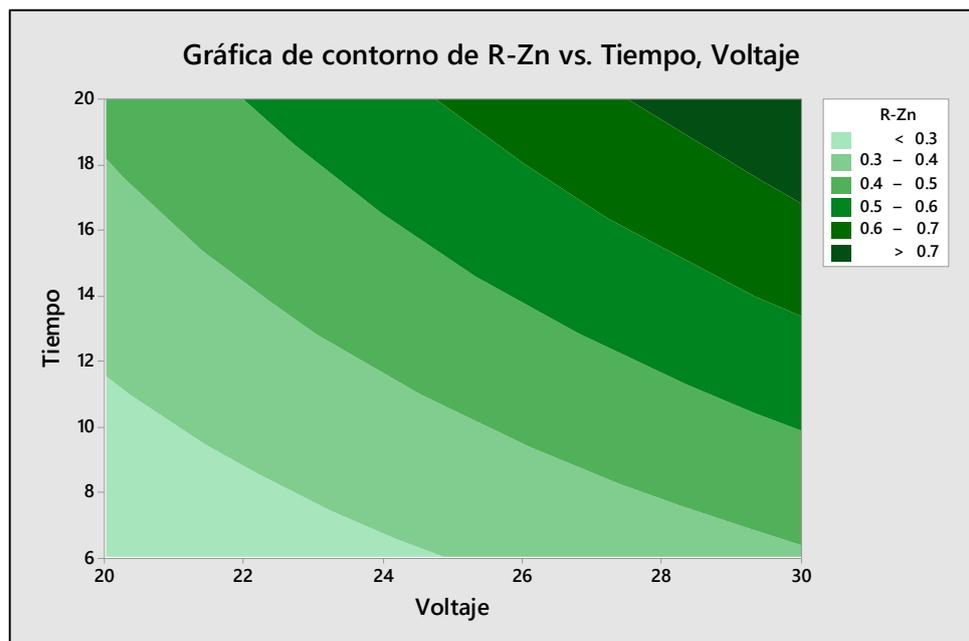


Figura 22. Gráfica de contorno para la remoción del Zinc

En la figura 22, se muestra la gráfica de contorno para la remoción del Zinc con la variación del tiempo de proceso y voltaje, a un tiempo de 6 días y un voltaje de 20 V se tiene valores menores al 30 % de la remoción de zinc y a un tiempo de 20 días y un voltaje de 30 V se tiene valores superiores al 70 % de la remoción de zinc.

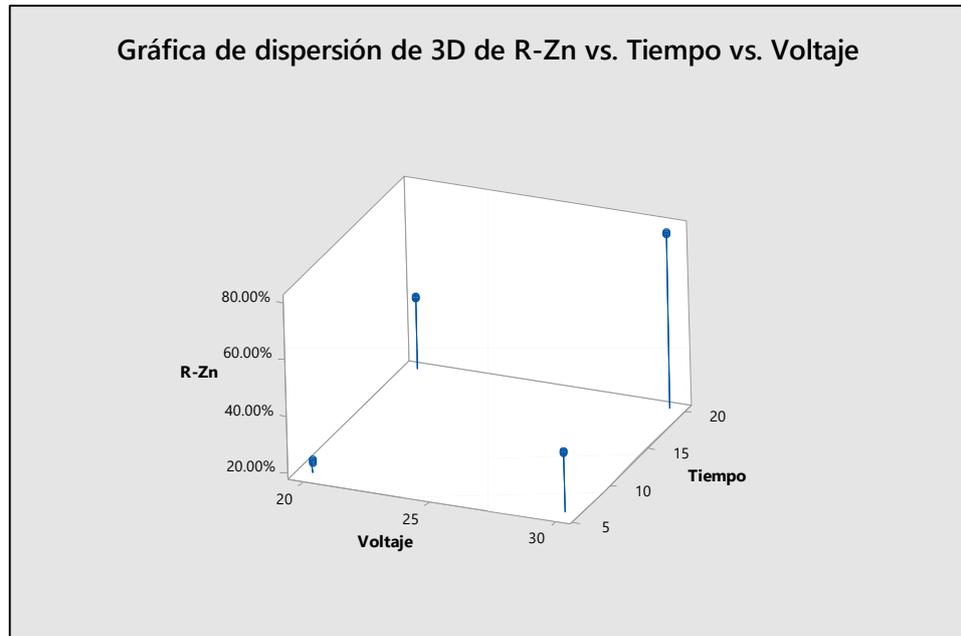


Figura 23. Gráfica de dispersión de 3D para la remoción del Zinc

En la figura 23, se muestra la gráfica de dispersión de 3D para la remoción del Zinc, donde se aprecian cuatro puntos, los cuales son puntos de la interacción de las variables independientes, donde a mayor tiempo y voltaje se obtuvo mayor remoción de zinc.

#### 4.2. Prueba de hipótesis

Para la prueba de hipótesis, se usó el programa estadístico MINITAB V 18, donde se realizó el análisis del diseño factorial de  $2^2$  el cual contó con dos factores (tiempo de proceso y voltaje) y dos niveles (tiempo de 6 días - 20 días y voltaje de 20 V - 30 V), se realizó el análisis de varianza, diagrama de Pareto, prueba de normalidad y comparación de Tukey.

**Tabla 9. Análisis de varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	0.524660	0.104932	7577.97	0.000
Lineal	2	0.497405	0.248703	17960.79	0.000
Tiempo	1	0.282102	0.282102	20372.83	0.000
Voltaje	1	0.215303	0.215303	15548.74	0.000
Interacciones de 2 términos	1	0.027245	0.027245	1967.61	0.000
Tiempo*Voltaje	1	0.027245	0.027245	1967.61	0.000
Error	6	0.000083	0.000014		
Total	11	0.524743			

En la tabla 9, se muestra el análisis de varianza para el diseño factorial de  $2^2$ , donde se observa que, para la variable tiempo, voltaje y la interacción de las dos variables se tiene un valor de p de 0.000, el cual es un valor menor al de significancia de 0.05, lo que determina que existe influencia significativa para las variables independientes en relación a la dependiente.

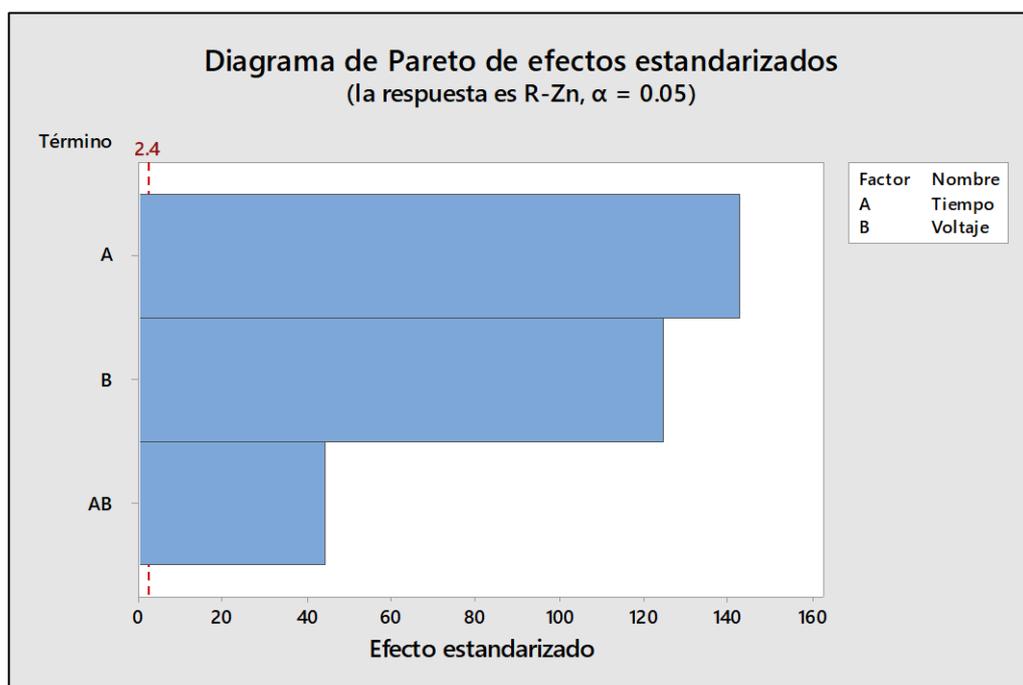


Figura 24. Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados

En la figura 24, se muestra el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados en la remoción del zinc, con una confiabilidad del 95 % y un nivel de significancia del 5 % (0.05). En el diagrama de Pareto se observa que el factor tiempo muestra mayor efecto con respecto al voltaje.

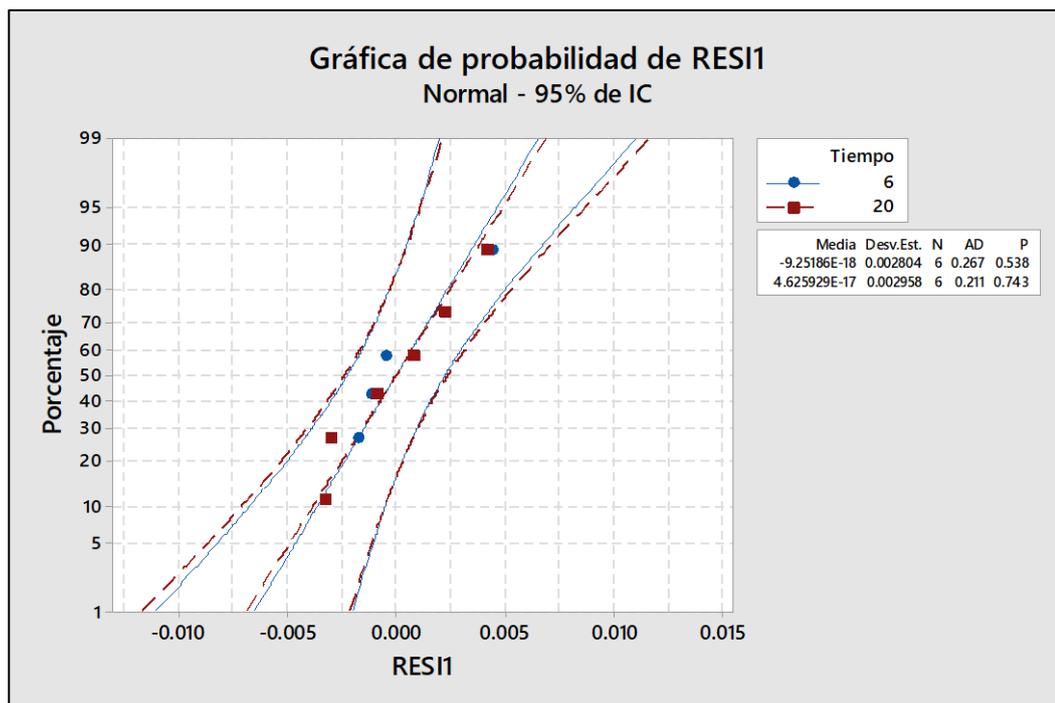


Figura 25. *Gráfica de probabilidad*

En la figura 25, se muestra la gráfica de probabilidad para los datos recabados de la remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro, donde se observa un valor p de 0.538 para el caso de un tiempo de 6 y un valor p de 0.743 para un tiempo de 20, dichos valores son mayores al valor de significancia de 0.05; por ende, afirmamos que nuestros datos provienen de una población normal, sin presentar datos atípicos y nos indica que la variable (tiempo) influye en la respuesta (remoción de zinc) de forma sistemática.

### **Contrastación de la hipótesis**

Para contrastar las hipótesis, tanto general como las específicas, se utilizó el análisis de varianza del diseño factorial  $2^2$ , donde se observa que para la variable tiempo, voltaje y la interacción de las dos variables se tiene un valor de p de 0.000, el cual es un valor menor al de significancia de 0.05, lo que significa que existe influencia significativa para las variables independientes en relación a la dependiente. Además, afirmamos que si aplicamos la remediación electrocinética entonces no podremos remover el zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021.

### Para el voltaje

**Tabla 10.** *Comparación de Tukey para el voltaje*

Voltaje (V)	N	Media(%)	Agrupación
30	6	58.96	A
20	6	32.17	B

Ho = A mayor voltaje, menor será la remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021 mediante la remediación electrocinética.

Ha = A mayor voltaje mayor será la remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021 mediante la remediación electrocinética.

Basándonos en la tabla del análisis de varianza, donde se observa que para la variable del voltaje se tiene un valor p de 0.000, el cual es menor al valor de significancia de 0.05; por ende, afirmamos que, a mayor voltaje mayor será la remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021 mediante la remediación electrocinética, esto también se contrasta con el análisis de comparación por Tukey.

### Para el tiempo de proceso

**Tabla 11.** *Comparación de Tukey para el tiempo de proceso*

Tiempo	N	Media(%)	Agrupación
20	6	60.90	A
6	6	30.23	B

Ho = A mayor tiempo de proceso; menor será la remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021 mediante la remediación electrocinética.

Ha = A mayor tiempo de proceso, mayor será la remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021 mediante la remediación electrocinética.

Basándonos en la tabla del análisis de varianza, donde se observa que para la variable del tiempo de proceso se tiene un valor p de 0.000, el cual es menor al valor de significancia de 0.05, por ende, se afirma que, a mayor tiempo de proceso, mayor será la remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro en el año 2021 mediante la remediación electrocinética, esto también se contrasta con el análisis de comparación por Tukey.

### 4.3. Discusión de resultados

#### 4.3.1. Características de los suelos

Se recolectó muestras de suelos contaminados por zinc del valle del Mantaro, donde se realizó un análisis de suelo y se obtuvo valores de pH de 7.96 considerado medianamente alcalino, conductividad de 44.40 mS/m estimado como normal ya que no existe restricciones para ningún cultivo; materia orgánica de 4.22 % que representa un valor alto en el suelo, nitrógeno de 0.21 %, con una cantidad baja de fósforo de 3.04 ppm, un valor de potasio alto 343.93 ppm y un valor inicial de Zn de 15.74 mg/kg. También se realizó un análisis de textura de suelo, donde presenta un 53.2 % de arena, 31.8 % de limo, 15 % de arcilla y una clase textural de franco arenosa. De manera similar, Amipara et al., (2021) (4) en su caracterización de suelo obtuvo como resultado un color marrón, materia orgánica de 0.3 % considera muy baja comparada con nuestra investigación, gravedad específica de 2.173 y una concentración inicial de zinc de 46 ppm el cual es un valor superior a lo analizado en nuestro estudio. Cameselle et al., (2021) (11) en su caracterización de suelo obtuvo un pH de 4.4, un valor fuertemente ácido; caso opuesto en nuestra investigación, pues se obtuvo un pH medianamente alcalino, conductividad eléctrica de 3.15 mS/m el cual es un valor normal, materia orgánica de 4.5 % que representa un valor alto en el suelo caso similar en nuestra investigación y una concentración muy elevada de zinc de 1001 ppm. Beymari (2020) (8) las propiedades del suelo fue un pH de 8.19 considerado medianamente alcalino, materia orgánica de 3.5 %, un valor medio para el suelo, una textura del suelo era franco arcilloso y una concentración elevada de zinc de 1392 ppm caso similar al de Cameselle et al., (2021) (11). Demir et al., (2015) (1) la distribución del tamaño de las partículas del suelo se determinó como 49 %, 46,7 % y 4,3 % como arena, limo y arcilla, respectivamente. La clasificación de la textura del suelo fue franco arenoso, el pH del suelo fue ligeramente ácido en 6.29. La cantidad de materia orgánica fue muy baja, del 1 % al 2 % en masa en el suelo. La concentración inicial de Zn en la muestra de suelo fue de 19 565 mg kg<sup>-1</sup>.

Como se observó en la investigación de los diferentes autores, la elevada concentración de zinc se debe a que fueron suelos de relaves de la mina que estaban altamente contaminado.

#### 4.3.2. Variación del voltaje en la remoción de zinc

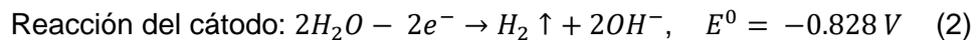
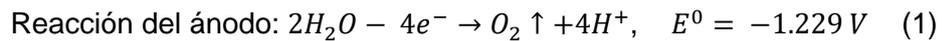
Para observar que ocurre en la variación del voltaje de remoción de zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro, con la variación del voltaje de 20 V a 30 V, donde a 20 V se obtuvo una remoción promedio de 32.16 % y a 30 V se obtuvo una remoción promedio de 58.95 %. De manera similar Amipara et al., (2021) (4) trabajó con intensidad de corriente de 333 mA, 430 mA, 487 mA y 648 mA, donde a una mayor intensidad de corriente de 648 mA obtuvo la mayor remoción de zinc de con un 79.06 %. La misma situación se evidencia en Beyrami (2020) (8) que muestra algunos cambios en las concentraciones residuales de Zn en diferentes tratamientos bajo dos voltajes de  $1.33 \text{ V cm}^{-1}$  y  $2.66 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ . A medida que aumenta el gradiente de voltaje en todos sus tratamientos, aumenta la intensidad de la remoción de metales pesados. El tratamiento electrocinético requiere menos tiempo a alto voltaje, pero el costo de energía es mucho mayor. Con base en que, al aumentar el gradiente de voltaje se removió el porcentaje promedio de Zn de 33.17 % en gradiente de voltaje  $1.33 \text{ (V}\cdot\text{cm}^{-1})$  se alcanzó 40,11%, a un gradiente de tensión de  $2,66 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

Como se observó en nuestros resultados que a mayor voltaje se genera mayor remoción del zinc, según He et al., (2021) (13) esta variación de la remoción del zinc se debe al aumento del voltaje, lo que puede explicarse porque los iones móviles en los suelos se movieron continuamente al área cercana a los electrodos y, en consecuencia, la tasa de conductividad del suelo disminuyó con el tiempo.

De acuerdo a Karim (2014) (27) cuando se impone un campo eléctrico a una masa de suelo húmedo, los iones positivos se mueven hacia el cátodo (el electrodo negativo) y los iones negativos hacia el ánodo (electrodo positivo). Debido a la sustitución isomorfa y la presencia de enlaces rotos en las estructuras del suelo, se requieren cationes móviles en exceso para equilibrar las cargas fijas negativas en las superficies de las partículas del suelo. Por lo tanto, los cationes móviles ejercen más impulso sobre el fluido de los poros que los aniones móviles. Como resultado, existe un movimiento neto de fluido con relación a las partículas del suelo bajo, la influencia del gradiente de potencial eléctrico impuesto denominado electroósmosis (convección de agua inducida por el campo a través de un medio poroso con una carga superficial). A diferencia del flujo de agua a

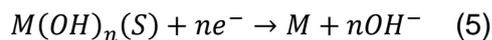
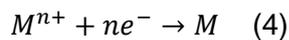
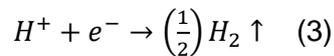
presión, la electroósmosis depende de la corriente eléctrica a través del suelo, la resistencia, al flujo del suelo y el arrastre de fricción ejercido por los iones migratorios en la molécula de agua y este flujo se origina en la doble capa eléctrica de los poros del suelo.

Las reacciones de electrólisis de los electrodos primarios se presentan en las siguientes ecuaciones (27):



Donde  $E^0$  es el potencial electroquímico de reducción estándar, una medida de la tendencia de los reactivos en sus estados estándar.

Karim (2014) (27) afirma que, en los primeros días del proceso, la reacción de electrólisis reduce el pH en el ánodo por debajo de 2 y aumenta el pH en el cátodo por encima de 10, dependiendo de la corriente total aplicada. Las siguientes son las reacciones secundarias que pueden existir dependiendo de la concentración de especies disponibles (27):



Donde M se refiere a metales. El medio ácido (Ec. 1) generado en el ánodo avanza a través del suelo hacia el cátodo por migración iónica y electroósmosis debido al gradiente eléctrico, flujo de fluido de poro debido a cualquier gradiente hidráulico aplicado externamente o generado internamente y difusión debido a la sustancia química. gradientes desarrollados en el sistema. La base desarrollada en el cátodo avanza inicialmente hacia el ánodo por difusión y migración iónica. Sin embargo, el contraflujo debido a la electro-ósmosis retarda la retrodifusión y la migración del frente de la base. El avance de este frente es más lento que el avance del frente ácido debido al flujo electroosmótico que contrarresta y también porque la movilidad iónica del  $H^+$  es aproximadamente 1.76 veces la del  $OH^-$ .

#### **4.3.3. Variación del tiempo de proceso en la remoción de zinc**

Para observar los efectos que presenta la variación del tiempo de proceso, en la remoción de zinc, se trabajó con tiempos de 6 a 20 días, donde a 6 días se obtuvo una remoción promedio de 30.23 % y a 20 días se obtuvo una remoción promedio de 60.89 %. De manera similar Beyrami (2020) (8) trabajó a un tiempo de 5 días donde obtuvo la mayor remoción del zinc del suelo contaminado con un valor de 40,11 %. Amipara et al., (2021) (4) trabajó con un tiempo de proceso de 144 horas donde alcanzó la máxima remoción de zinc de 79.06 %, ya que, con el paso del tiempo, la intensidad de la corriente disminuye, pues, ya que la mayoría de los iones migraron a los electrodos opuestos y los iones  $\text{OH}^-$  en la región del cátodo provocan la precipitación de Zn, lo que dificulta una mayor migración y aumenta la resistencia. Además, la electromigración de iones  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  hacia el cátodo y el ánodo respectivamente, se neutralizan entre sí y forman agua. Esto disminuye la conductancia en el sistema de la remediación electrocinética. Según Cameselle et al., (2021) (11) el aumento del tiempo de tratamiento en la remoción de zinc mediante el proceso de remediación electrocinética genera como resultado la eliminación efectiva de Zn del suelo contaminado envejecido. Además, lograron una remoción de Zn superior al 70 % - 80 %. Esperando lograr la remediación completa de estos metales, aumentando el tiempo de tratamiento. Caso similar en esta investigación que a mayor tiempo se obtuvo mayor remoción de metal zinc.

#### **4.3.4. Remediación electrocinética en la remoción de zinc**

En la aplicación de la remediación electrocinética se trabajó con tiempos de proceso de 6 días – 20 días y voltajes de 20 V – 30 V y como electrolito se usó KCl en un volumen de 175 mL. Dicho electrolito proporcionó conductancia para mejorar el proceso de la electrocinética y también para tener una mayor concentración de potasio en el suelo. La remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro mediante la remediación electrocinética con la interacción del voltaje y tiempo de proceso se dio a un voltaje de 30 V y un tiempo de proceso de 20 días con un porcentaje de 79.06 %. Varios autores trabajaron el mismo proceso de la remediación electrocinética para remover el zinc de los suelos entre ellos son Amipara et al., (2021) (4), Beyrami (2020) (8), He et al.,

(2021) (13), Cameselle et al., (2021) (11) y entre otros más que llegan a la conclusión que, a mayor voltaje y tiempo en el proceso de remediación electrocinética mayor es la remoción del zinc.

De acuerdo a Amipara et al., (2021) (4) el uso del electrolito de KCl proporciona una mayor conductancia para mejorar el proceso de la electrocinética y también para tener una mayor concentración de potasio en el suelo. En esta investigación, al aplicar la remediación electrocinética se obtuvo una remoción del zinc de 15.74 ppm a 3.30 ppm, caso similar el de Amipara et al., (2021) (4) donde el Zn inicial en el suelo varía de 424.7 mg a 88.94 mg. La formación de iones  $H^+$  en el ánodo y su migración hacia el cátodo disminuye el pH del suelo en el reactor y disuelve los iones Zn del suelo. La presencia de una mayor concentración de iones  $OH^-$  cerca del cátodo detuvo la disolución de Zn del suelo contaminado y creó una pared impermeable para que pase el Zn. El zinc disuelto del suelo se transfirió al ánodo y al cátodo por electroósmosis y electromigración. El efecto combinado de estos dos fenómenos conduce a la eliminación del zinc del suelo enriquecido. Los iones  $OH^-$  en el frente del cátodo y los iones  $H^+$  en el frente del ánodo son parámetros esenciales para la electromigración y la eliminación del metal Zn.

De acuerdo a Liu et al, (2018) (23) la extracción electrocinética consiste en eliminar los metales pesados de los suelos contaminados mediante adsorción eléctrica. Cuando se aplica electricidad de corriente continua (CC) de baja densidad a través de electrodos insertados en el suelo, los cationes en la fase de solución del suelo contaminado migran al cátodo mientras que los aniones migran al ánodo con la fuerza de atracción del campo eléctrico establecido.

## CONCLUSIONES

Se determinó la concentración inicial que presentan los suelos contaminados del valle del Mantaro, donde se realizó un análisis de suelo y se obtuvo valores de pH de 7.96 considerado medianamente alcalino; conductividad de 44.40 mS/m determinando como normal, ya que no existe restricciones para ningún cultivo; materia orgánica de 4.22 % que representa un valor alto en el suelo, nitrógeno de 0.21 %, con una cantidad baja de fósforo de 3.04 ppm; un valor de potasio alto de 343.93 ppm y un valor inicial de Zn de 15.74 mg/kg. También se realizó un análisis de textura de suelo, presentó un 53.2 % de arena, 31.8 % de limo, 15 % de arcilla y una clase textural de franco arenosa.

Se determinó la variación del voltaje en la remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro mediante la remediación electrocinética, donde, a un voltaje de 20 V se obtuvo una remoción de zinc del 21.16 %, la menor remoción de zinc obtenida y a un voltaje de 30 V se obtuvo una remoción de zinc del 79.35 %, el mayor valor de remoción de zinc. Con un promedio de remoción de zinc del 45.56 %.

Se determinó el tiempo de proceso en la remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro mediante la remediación electrocinética, donde, a un tiempo de 6 días se obtuvo una remoción de zinc del 21.16 %, la menor remoción de zinc obtenida y a un tiempo de 20 días se obtuvo una remoción de zinc del 79.35 %, el mayor valor de remoción de zinc. Con un promedio de remoción de zinc del 45.56 %.

Se determinó el porcentaje de remoción del zinc de los suelos contaminados del valle del Mantaro mediante la remediación electrocinética, donde a un tiempo de 20 días y un voltaje de 30 V, se obtienen los mayores porcentajes de remoción del zinc con un 79.06 % el cual representa el 12.44 ppm, y quedó en el suelo analizado una concentración final de 3.3 ppm.

## RECOMENDACIONES

Presentar los resultados obtenidos a las autoridades pertinentes para poder desarrollar el proyecto a gran escala y mitigar la contaminación por zinc en los suelos contaminados del valle del Mantaro.

Utilizar diferentes aditivos como el EDTA, ácido cítrico, etc. como electrolitos.

Realizar mayores estudios sobre cómo la intensidad de corriente varía en el proceso de la remediación electrocinética.

Evaluar cómo el pH de la solución y el pH del suelo se ven afectados en el proceso de la remediación electrocinética.

Realizar la remediación de suelos contaminados con metales como el Cr y Pb para identificar las condiciones experimentales apropiadas que conduzcan a una movilización y remoción significativas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) DEMIR, Aydeniz, Sibel PAMUKCU a Reena Amatya SHRESTHA. Simultaneous removal of Pb, Cd, and Zn from heavily contaminated mine tailing soil using enhanced electrochemical process. *Environmental Engineering Science* [online]. 2015, **32**(5), 416–424. ISSN 15579018. Dostupné z: doi:10.1089/ees.2014.0384
- (2) FERRUCCI, Aurelio, Marco VOCCIANTE, Roberto BAGATIN a Sergio FERRO. Electrokinetic remediation of soils contaminated by potentially toxic metals: Dedicated analytical tools for assessing the contamination baseline in a complex scenario. *Journal of Environmental Management* [online]. 2017, **203**, 1163–1168. ISSN 10958630. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2017.02.037
- (3) LACALLE, Rafael, José BECERRIL a Carlos GARBISU. 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* [online]. 2020, **04**(02), 112–133. Dostupné z: doi:10.26502/jesph.96120089
- (4) AMIPARA, Brijesh, Arti D. GALGALE a Nirav G. SHAH. Enhanced Electrokinetic Remediation of Zinc Contaminated Soil by Changeover of Composite Electrolyte. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution* [online]. 2021, **18**(2), 59–65. ISSN 18758568. Dostupné z: doi:10.3233/AJW210019
- (5) MUNIVE, Rubén. *Recuperación de suelos degradados por contaminación con metales pesados en el valle del Mantaro mediante compost de stevia y fitorremediación*. B.m., 2018. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- (6) SELVI, Adikesavan, Aruliah RAJASEKAR, Jayaraman THEERTHAGIRI, Azhagesan ANANTHASELVAM, Kuppusamy SATHISHKUMAR, Jagannathan MADHAVAN a Pattanathu K.S.M. RAHMAN. Integrated remediation processes toward heavy metal removal/recovery from various environments-A review. *Frontiers in Environmental Science* [online]. 2019, **7**(May). ISSN 2296665X. Dostupné z: doi:10.3389/fenvs.2019.00066
- (7) ARCE, Siles a Marilú CALDERÓN. Suelos contaminados con plomo en la Ciudad de La Oroya- Junín y su impacto en las aguas del Río Mantaro. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. 2018, **20**(40), 48–55. ISSN 1682-3087.

- (8) BEYRAMI, Hossein. Effect of different treatments on electrokinetic remediation of Zn, Pb and Cd from a contaminated calcareous soil. *Chinese Journal of Chemical Engineering* [online]. 2020. ISSN 10049541. Dostupné z: doi:10.1016/j.cjche.2020.09.011
- (9) REZAEI, Milad, Pourya KARGAR GHOMESHE a Arash MOHAMMAD HOSSEINI. Electrokinetic Remediation of Zinc and Copper Contaminated Soil: A Simulation-based Study. *Civil Engineering Journal* [online]. 2017, **3**(9), 690–700. ISSN 2476-3055. Dostupné z: doi:10.21859/cej-03096
- (10) CAMESELLE, Claudio, Susana GOUVEIA, Djamel AKRETCHE a Boualem BELHADJ. Electrokinetic remediation for the removal of organic contaminants in soils. *Current Opinion in Electrochemistry* [online]. 2018, **11**, 41–47. ISSN 24519111. Dostupné z: doi:10.1016/j.coelec.2018.07.005
- (11) CAMESELLE, Claudio, Susana GOUVEIA a Adrian CABO. Enhanced electrokinetic remediation for the removal of heavy metals from contaminated soils. *Applied Sciences (Switzerland)* [online]. 2021, **11**(4), 1–12. ISSN 20763417. Dostupné z: doi:10.3390/app11041799
- (12) FIGUEROA, Arylein, Claudio CAMESELLE, Susana GOUVEIA a Henrik K. HANSEN. Electrokinetic treatment of an agricultural soil contaminated with heavy metals. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* [online]. 2016, **51**(9), 691–700. ISSN 15324117. Dostupné z: doi:10.1080/10934529.2016.1170425
- (13) HE, Chiquan, Anni HU, Feifei WANG, Pu ZHANG, Zhenzhen ZHAO, Yanping ZHAO a Xiaoyan LIU. 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* [online]. 2021, **407**(August), 126923. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2020.126923
- (14) MARRUGO, Jose a Erick LOPEZ. Electrokinetic remediation of mercury-contaminated soil , from the mine El Alacran-San Jorge river basin , Cordoba-Colombia. *Redalyc* [online]. 2013, 136–146. ISSN 0120-6230. Dostupné z: <http://www.redalyc.org/pdf/430/43029811013.pdf>
- (15) RYU, Byung Gon, Geun Yong PARK, Ji Won YANG a Kitae BAEK. Electrolyte conditioning for electrokinetic remediation of As, Cu, and Pb-contaminated soil.

- Separation and Purification Technology* [online]. 2011, **79**(2), 170–176. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2011.02.025
- (16) FARFÁN, Gary. *Influencia de la densidad de corriente en la concentración de ácido oxálico sobre la remoción de plomo por electroremediación de relave de la empresa minera Paredones*. B.m., 2019. Universidad Nacional de Huancavelica.
- (17) DORAN, John a Michael ZEISS. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Encyclopedia of Earth Sciences Series* [online]. 2000, **Part 4**, 543–547. ISSN 1871756X. Dostupné z: doi:10.1007/978-90-481-3585-1\_107
- (18) ALVARENGA, P., C. FERREIRA, C. MOURINHA, P. PALMA a A. DE VARENNES. Chemical and ecotoxicological effects of the use of drinking-water treatment residuals for the remediation of soils degraded by mining activities. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [online]. 2018, **161**(May), 281–289. ISSN 10902414. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecoenv.2018.05.094
- (19) VAMERALI, Teofilo, Marianna BANDIERA a Giuliano MOSCA. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environmental Chemistry Letters* [online]. 2010, **8**(1), 1–17. ISSN 16103653. Dostupné z: doi:10.1007/s10311-009-0268-0
- (20) VANGRONSVELD, Jaco a Scott D CUNNINGHAM. *Metal-Contaminated Soils : In Situ Inactivation and Phytoremediation*. 2012.
- (21) RAHMAN, Pattanathu K.S.M. a Suvechhya BASTOLA. Biological reduction of iron to the elemental state from ochre deposits of Skelton Beck in Northeast England. *Frontiers in Environmental Science* [online]. 2014, **2**(JUN), 1–8. ISSN 2296665X. Dostupné z: doi:10.3389/fenvs.2014.00022
- (22) MANZETTI, Sergio, E. Roos VAN DER SPOEL a David VAN DER SPOEL. Chemical properties, environmental fate, and degradation of seven classes of pollutants. *Chemical Research in Toxicology* [online]. 2014, **27**(5), 713–737. ISSN 15205010. Dostupné z: doi:10.1021/tx500014w
- (23) LIU, Lianwen, Wei LI, Weiping SONG a Mingxin GUO. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment* [online]. 2018, **633**, 206–219. ISSN 18791026. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.161

- (24) KIM, Rog Young, Jeong Ki YOON, Tae Seung KIM, Jae E. YANG, Gary OWENS a Kwon Rae KIM. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation—a critical review. *Environmental Geochemistry and Health* [online]. 2015, **37**(6), 1041–1061. ISSN 15732983. Dostupné z: doi:10.1007/s10653-015-9695-y
- (25) PIETRZYKOWSKI, Marcin, Jarosław SOCHA a Natalie S. VAN DOORN. Linking heavy metal bioavailability (Cd, Cu, Zn and Pb) in Scots pine needles to soil properties in reclaimed mine areas. *Science of the Total Environment* [online]. 2014, **470–471**, 501–510. ISSN 18791026. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2013.10.008
- (26) WUANA, Raymond A. a Felix E. OKIEIMEN. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology* [online]. 2011, **2011**, 1–20. ISSN 2090-4614. Dostupné z: doi:10.5402/2011/402647
- (27) KARIM, Mohammed A. Electrokinetics and soil decontamination: concepts and overview (Review). *Journal of Electrochemical Science and Engineering* [online]. 2014, **4**(4), 297–313. ISSN 1847-9286. Dostupné z: doi:10.5599/jese.2014.0054
- (28) ACAR, Yalcin B, Robert J GALE, A GREGG, Jihad HAMED a Roberto L WONG. Journal of Environmental Science and Health . Part A : Environmental Science and Engineering and Toxicology : Toxic / Hazardous Substances and Environmental Engineering Electrochemical processing of soils : Theory of pH gradient development by diffusion ,. *Journal of Environmental Science and Health, Part A* (6). 1990, (June 2012), 687–714.
- (29) PROBSTEIN, Ronald F. a R. Edwin HICKS. Removal of contaminants from soils by electric fields. *Science* [online]. 1993, **260**(5107), 498–503. ISSN 00368075. Dostupné z: doi:10.1126/science.260.5107.498
- (30) PAMUKCU, Sibel. *Electric and Magnetic Fields Bioeffects* [online]. 2014. ISBN 9781441969965. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4419-6996-5
- (31) SAICHEK, Richard E. a Krishna R. REDDY. Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* [online]. 2005, **35**(2), 115–192. ISSN 10643389. Dostupné z: doi:10.1080/10643380590900237

- (32) REDDY, Krishna a Claudio CAMESELLE. *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*. 2009. ISBN 978-0-470-38343-8.
- (33) ILYAS, Sadia, Rajiv SRIVASTAVA, Hyunjung KIM a Humma CHEEMA. Enhanced Electrokinetic Techniques in Soil Remediation for Removal of Heavy Metals. *Electrokinetic Remediation for Environmental Security and Sustainability* [online]. 2021, (Dc), 287–302. Dostupné z: doi:10.1002/9781119670186.ch13
- (34) REDDY, Krishna R., Charlie Y. XU a Supraja CHINTHAMREDDY. Assessment of electrokinetic removal of heavy metals from soils by sequential extraction analysis. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2001, **84**(2–3), 279–296. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/S0304-3894(01)00237-0
- (35) RAHMAN, Zunaithur, JAGADHEESWARI, Arun MOHAN, THARINI, SELVENDRAN a Shanmuga PRIYA. Electrokinetic remediation: An innovation for heavy metal contamination in the soil environment. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, **37**(Part 2), 2730–2734. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.08.541
- (36) HUANG, Deqian, Quan XU, Jiongjia CHENG, Xiaocheng LU a Hong ZHANG. Electrokinetic remediation and its combined technologies for removal of organic pollutants from contaminated soils. *International Journal of Electrochemical Science*. 2012, **7**(5), 4528–4544. ISSN 14523981.
- (37) SAH, J. a J. CHEN. Study of the electrokinetic process on Cd and Pb spiked soils. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 1998, **58**(1–3), 301–315. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/S0304-3894(97)00140-4
- (38) LI, An, Kent CHEUNG a Krishna REDDY. Cosolvent-Enhanced Electrokinetic Remediation of Soils Contaminated with Phenanthrene. *Journal of Environmental Engineering* [online]. 2000, **126**(6), 527–533. ISSN 0733-9372. Dostupné z: doi:10.1061/(asce)0733-9372(2000)126:6(527)
- (39) SAICHEK, R. a K. REDDY. Effects of system variables on surfactant enhanced electrokinetic removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from clayey soils. *Environmental Technology (United Kingdom)* [online]. 2003, **24**(4), 503–515. ISSN 1479487X. Dostupné z: doi:10.1080/09593330309385585

- (40) RAYMOND, Li a Li LORETTA. Enhancement of Electrokinetic Extraction from Lead-Spiked Soils. 2000, **126**(September), 849–857.
- (41) ZHONGMING, Li, Ji Wei YU a Ivars NERETNIEKS. Removal of Pb(II), Cd(II) and Cr(III) from sand by electromigration. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 1997, **55**(1–3), 295–304. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/S0304-3894(97)00021-6
- (42) WICK, Lukas, Lei SHI a Hauke HARMS. Electro-bioremediation of hydrophobic organic soil-contaminants: A review of fundamental interactions. *Electrochimica Acta* [online]. 2007, **52**(10 SPEC. ISS.), 3441–3448. ISSN 00134686. Dostupné z: doi:10.1016/j.electacta.2006.03.117
- (43) NIQUI, José a José ORTEGA. Integrating Biodegradation and Electroosmosis for the Enhanced Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Creosote-Polluted Soils. *Journal of Environmental Quality* [online]. 2007, **36**(5), 1444–1451. ISSN 0047-2425. Dostupné z: doi:10.2134/jeq2006.0516
- (44) MENA, Esperanza, Clara RUIZ, José VILLASEÑOR, Manuel RODRIGO a Pablo CAÑIZARES. Biological permeable reactive barriers coupled with electrokinetic soil flushing for the treatment of diesel-polluted clay soil. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2015, **283**, 131–139. ISSN 18733336. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2014.08.069
- (45) MENA, E., J. VILLASEÑOR, M. RODRIGO a P. CAÑIZARES. Feasibility of electrokinetic oxygen supply for soil bioremediation purposes. *Chemosphere* [online]. 2014, **117**(1), 382–387. ISSN 18791298. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2014.07.075
- (46) HO, Sa, Christopher ATHMER, Wayne SHERIDAN a Andrew SHAPIRO. Scale-up aspects of the Lasagna process for in situ soil decontamination. 1997, **55**, 39–60.
- (47) HO, Sa, Christopher ATHMER, Wayne SHERIDAN, Mason HUGHES, Robert ORTH, David MCKENZIE, Philip BRODSKY, Andrew SHAPIRO, Timothy SIVAVEC, Joseph SALVO, Dale SCHULTZ, Richard LANDIS, Ron GRIFFITH a Steve SHOEMAKER. The lasagna technology for in situ soil remediation. 2. Large field test. *Environmental Science and Technology* [online]. 1999, **33**(7), 1092–1099. ISSN 0013936X. Dostupné z: doi:10.1021/es980414g

- (48) VIRKUTYTE, Jurate, Mika SILLANPÄÄ a Petri LATOSTENMAA. Electrokinetic soil remediation - Critical overview. *Science of the Total Environment* [online]. 2002, **289**(1–3), 97–121. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/S0048-9697(01)01027-0
- (49) LI, Gang, Shuhai GUO, Shucai LI, Lingyan ZHANG a Shanshan WANG. Comparison of approaching and fixed anodes for avoiding the „focusing“ effect during electrokinetic remediation of chromium-contaminated soil. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2012, **203**, 231–238. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2012.07.008
- (50) BRADY, Nyle a Ray WEIL. *The Nature And Properties Of Soils*, 14th Edition. 2017.
- (51) HERNÁNDEZ, Roberto, Carlos FERNÁNDEZ a Pilar BAPTISTA. *Metodología de la investigación*. 2014. ISBN 9781456223960.
- (52) CEGARRA, José. *Metodologia de la investigación científica y tecnológica* [online]. 2004. ISBN 84-7978-624-8. Dostupné z: <https://www.freelibros.me/metodologia-de-la-investigacion/metodologia-de-la-investigacion-cientifica-y-tecnologica-jose-cegarra-sanchez>
- (53) KUMAR, Ranjit. *Research Methodology*. 2011. ISBN 9781849203005.
- (54) HOSFORD, Rubén a Héctor BAYARRE. *Metodología de la Investigación Científica. Métodos y Técnicas Aplicadas a la Investigación en Atención Primaria de Salud* [online]. 2012, 53. Dostupné z: <http://files.sld.cu/iss/2009/02/curso-metodologia.pdf>

# **ANEXOS**

## Anexo 1

### Toma de muestra



## Armado del equipo y materiales



## Desarrollo experimental



Suelo listo para los reactores



Agregado del suelo al reactor



Agregado del electrolito al reactor

### Toma de muestra de los resultados



Puesto del electrodo al reactor



Conexión a la fuente de alimentación



Modulo final del proceso de remediación

## Anexo 2

## Reportes



### INFORME DE ENSAYO N° 2-0117/21

Pág. 1/1

**Solicitante** : Yaneth Lily de la Cruz Caballon  
**Domicilio legal** : Av. Circunvalación S/N – La Punta  
**Proyecto** : Remediación electrocinética en la remoción del Zinc de los suelos contaminados del valle del mantaro - 2021  
**Muestra(s) Declarada(s)** : \_\_\_\_\_  
**Lugar de Muestreo** : \_\_\_\_\_  
**Cantidad de muestras para el Ensayo** : 05 muestras x 100 g  
**Forma de Presentación** : 05 Bolsas herméticas  
**Fecha de Recepción** : 15/12/21  
**Fecha de Inicio del Ensayo** : 15/12/21  
**Fecha de Término del Ensayo** : 29/12/21  
**Fecha de Emisión de Informe** : 30/12/21  
**N° de Cotización de Servicio** : \_\_\_\_\_

Ensayo	Codigo del cliente	Resultados (mg/L)	Limite de detección
Zn	L0	15.74	0.02

Ensayo	Codigo del cliente	Resultados (mg/L)	Limite de detección
Zn	L11R1	12.26	0.02
	L21R1	9.62	
	L12R1	9.05	
	L22R1	3.30	

- Lugar y condiciones ambientales del muestreo. Indicado por el cliente
- El cliente renuncia al derecho de la dirimencia

**Método de Análisis:**  
Zn: Espectofotometría UV-Vis

Huancayo, 30 de Diciembre de 2021

**Ing. Henry R. Ochoa León**  
CIP N° 124232  
JEFE DE LABORATORIO

\*El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe.

\*Prohíbida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTALES GRUPO JHACC

\*Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

LAA-GJ

Rev. 01

Jr. Santa Rosa N° 1361 - El Tambo, Huancayo - Perú Celular: 971 718825 - 954 416149 - 956 988682

Correo: proyectos@grupojhacc.com / administracion@grupojhacc.com

www.grupojhacc.com

## INFORME DE ENSAYO N° 2-0002/22

Pág. 1/1

**Solicitante** : Yaneth Lily de la Cruz Caballon  
**Domicilio legal** : Av. Circunvalación S/N – La Punta  
**Proyecto** : Remediación electrocinética en la remoción del Zinc de los suelos contaminados del valle del mantaro - 2021  
**Muestra(s) Declarada(s)** : \_\_\_\_\_  
**Lugar de Muestreo** : \_\_\_\_\_  
**Cantidad de muestras para el Ensayo** : 04 muestras x 100 g  
**Forma de Presentación** : 04 Bolsas herméticas  
**Fecha de Recepción** : 04/01/22  
**Fecha de Inicio del Ensayo** : 04/01/22  
**Fecha de Término del Ensayo** : 18/01/22  
**Fecha de Emisión de Informe** : 19/01/22  
**N° de Cotización de Servicio** : \_\_\_\_\_

Ensayo	Codigo del cliente	Resultados (mg/L)	Limite de detección
Zn	L11R2	12.35	0.02
	L21R2	9.58	
	L12R2	8.97	
	L22R2	3.34	

- Lugar y condiciones ambientales del muestreo: Indicado por el cliente
- El cliente renuncia al derecho de la dirimencia

**Método de Análisis:**  
 Zn: Espectrofotometría UV- Vis

Huancayo, 19 de Enero de 2022

  
**GRUPO JHACC S.A.C**  
**Ing. Henry R. Ochoa León**  
 CIP N° 124232  
 JEFE DE LABORATORIO

\*El informe de ensayo sólo es valido para las muestras referidas en el presente informe.  
 \*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTALES GRUPO JHACC  
 \*Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

LAA-GJ

Rev: 01

## INFORME DE ENSAYO N° 2-0011/22

Pág. 1/1

**Solicitante** : Yaneth Lily de la Cruz Caballon  
**Domicilio legal** : Av. Circunvalación S/N – La Punta  
**Proyecto** : Remediación electrocinética en la remoción del Zinc de los suelos contaminados del valle del manto - 2021  
**Muestra(s) Declarada(s)** :  
**Lugar de Muestreo** :  
**Cantidad de muestras para el Ensayo** : 04 muestras x 100 g  
**Forma de Presentación** : 04 Bolsas herméticas  
**Fecha de Recepción** : 24/01/22  
**Fecha de Inicio del Ensayo** : 24/01/22  
**Fecha de Término del Ensayo** : 07/02/22  
**Fecha de Emisión de Informe** : 08/02/22  
**N° de Cotización de Servicio** :

Ensayo	Código del cliente	Resultados (mg/L)	Límite de detección
Zn	L11R3	12.41	0.02
	L21R3	9.67	
	L12R3	9.02	
	L22R3	3.25	

- Lugar y condiciones ambientales del muestreo: Indicado por el cliente
- El cliente renuncia al derecho de la dirimencia

**Método de Análisis:**  
 Zn: Espectrofotometría UV-Vis

Huancayo, 08 de Febrero de 2022

  
**GRUPO JHACC S.A.C.**  
**Ing. Henry R. Ochoa León**  
 CIP N° 124232  
 JEFE DE LABORATORIO

\*El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe

\*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTALES GRUPO JHACC

\*Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

LAA-GJ

Rev: 01

## Caracterización del suelo



### INFORME DE ENSAYO N° 01032-22/SU/SANTA ANA

#### I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: De la Cruz Caballon Yaneth Lily
Propietario / Productor	: De la Cruz Caballon Yaneth Lily
Dirección del cliente	: Concepcion
Solicitado por	: De la Cruz Caballon Yaneth Lily
Muestreado por	: Cliente
Número de muestra(s)	: 01 muestra
Producto declarado	: Suelo agricola
Presentación de las muestras(s)	: Bolsas de plastico
Referencia del muestreo	: Reservado por el cliente
Procedencia de muestra(s)	: Concepcion-Junin
Fecha(s) de muestreo	: 2021-12-30
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2022-01-13
Lugar de ensayo	: LABSAF Santa Ana
Fecha(s) de análisis	: 2022-01-14
Cotización del servicio	: 032-22-SA
Fecha de emisión	: 2022-02-09

#### II. RESULTADO DE ANALISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio	SU032-SA-22	-	-	-	-	-
Matriz Analizada	Suelo agricola	-	-	-	-	-
Fecha de Muestreo	2021-12-30	-	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h)	09:00	-	-	-	-	-
Condición de la muestra	Conservada	-	-	-	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente	Lote 01	-	-	-	-	-
<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>LC</b>	<b>Resultados</b>			
pH	unid. pH	--	7.96	-	-	-
Conductividad	mS/m	--	44.40	-	-	-
Materia Orgánica	%	--	4.22	-	-	-
Nitrógeno	%	--	0.21	-	-	-
Fósforo	ppm	--	3.04	-	-	-
Potasio	ppm	--	343.93	-	-	-
<b>Análisis de Textura</b>						
Arena	%	--	53.2	-	-	-
Limo	%	--	31.8	-	-	-
Arcilla	%	--	15.0	-	-	-
Clase Textural	---	--	Franco arenosa	-	-	-

**INFORME DE ENSAYO**  
 N° 01032-22/SU/SANTA ANA

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO	
ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
pH	EPA 9045D, Rev. 4, 2004. Soil and waste pH.
Conductividad	ISO 11265, First Edition. 1994. Soil Quality. Determination of the Specific Electrical Conductivity.
Textura	Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.9 AS-09.2000. Determinación de la textura del suelo por procedimiento de Bouyoucos.
Materia Orgánica	Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.7 AS-07. 2000. Contenido de Materia Orgánica por el método de Walkley y Black.
Nitrogeno	Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.7 AS-07. 2000. Contenido de Materia Orgánica por el método de Walkley y Black.
Fósforo	NOM-021-SEMARNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.10, AS-10. 2000. Fosforo Extraible, en suelos de neutros a alcalinos (Procedimiento de Olsen y colaboradores).
Potasio	NOM-021-SEMARNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.11, AS-11. 2000. Fosforo Extraible, en suelos de ácidos a neutros (Procedimiento de Bray y Kurtz 1).
	NOM-021-SEMARNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.12, AS-12. 2000. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables del suelo, con acetato de amonio.

**IV. CONSIDERACIONES**

- Estado en las que ingreso la Muestras: Buenas Condiciones de almacenamiento
- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
- El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.

Firma  
 Ciro Riveros Chahuayo  
 Responsable del laboratorio

FIN DE INFORME DE ENSAYO