

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA DE MINAS**

“INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE  
ELÉCTRICA Y ÁREA EFECTIVA EN LA  
REMOCIÓN DE ARSÉNICO DE UN RELAVE  
MINERO MEDIANTE LA  
ELECTORREMEDIACIÓN”

Tesis para optar el título profesional de:

**Ingeniero de Minas**

**Autor:**

Aldo Edson Caballero Rodríguez

**Asesor:**

M. Sc. Gladys Sandi Licapa Redolfo

<https://orcid.org/0000-0002-9077-5218>

Cajamarca - Perú

## JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Danyer Stewart Girón Palomino	30675947
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Victor Eduardo Alvarez Leon	18034429
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Miguel Ricardo Portilla Castañeda	45209190
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

## **DEDICATORIA**

Mi tesis la dedico con todo el amor y cariño a mi amada madre que con todo el esfuerzo y sacrificio que realizó, supo darme el apoyo para sacarme adelante y jamás dejarme de lado.

A mis hermanas, quienes, con sus palabras de aliento, no me dejaban claudicar en mi meta, ser perseverante y cumplir con mis ideales propuestos.

A mi esposa Yeny Edid Linarez Vigo por su sacrificio y esfuerzo, por darme su apoyo y por creer en mi capacidad, aunque hayamos pasado momentos muy difíciles, siempre ha estado brindándome su comprensión, cariño y amor.

A mis profesores por su gran apoyo y conocimiento ofrecido, por su tiempo compartido y por darme el empuje necesario para desarrollar mi formación profesional.

## AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios, que en cada paso que damos ha sido nuestra mejor compañía, agradecerle por iluminar nuestra mente y colocar en nuestro camino a personas que nos han dado el soporte y la compañía en todo nuestro periodo de estudio.

Agradecer hoy y siempre a nuestros padres por todo ese esfuerzo y sacrificios realizados, que, de no haber sido por ellos, no hubiésemos alcanzado este logro. A nuestros hermanos y hermanas que nos brindaron su apoyo incondicional y nos dieron esa fortaleza necesaria para seguir adelante.

Agradecer a nuestros docentes y compañeros de estudios que, entre enseñanzas y bromas, nos compartieron esos conocimientos que nos ayudaron en todos los ciclos de estudios.

A la Universidad Privada del Norte que me abrió las puertas de sus conocimientos y poder ser mejor persona y buen profesional y poder lograr todas mis metas trazadas.

## TABLA DE CONTENIDO

JURADO EVALUADOR	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
TABLA DE CONTENIDO	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ECUACIONES	8
ÍNDICE DE ANEXOS	9
RESUMEN	10
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	11
<b>1.1. Formulación del problema</b>	<b>23</b>
<b>1.2. Objetivos</b>	<b>23</b>
<i>1.2.1. Objetivo Principal</i>	23
<i>1.2.2. Objetivos Específicos</i>	23
<b>1.3. Hipótesis</b>	<b>24</b>
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	24
CAPÍTULO III: RESULTADOS	46
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS	58
ANEXOS	60

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Granulometría de un Relave Minero</i> .....	15
Tabla 2: <i>Principales ventajas y Limitaciones de la Electrorremediación</i> .....	17
Tabla 3: <i>Comparación de Tecnologías in situ para remediación de suelos contaminados</i>	18
Tabla 4: <i>Tipos de Investigación</i> .....	24
Tabla 5: <i>Barrido de Metales</i> .....	27
Tabla 6: <i>VARIABLES en estudio</i> .....	28
Tabla 7: <i>Modelo Matricial: Factores con Replicaciones</i> .....	29
Tabla 8: <i>Modelo Matricial de Resultados Estadísticos</i> .....	31
Tabla 9: <i>Materiales que se utilizaron para el experimento</i> .....	33
Tabla 10: <i>Materiales utilizados en la investigación</i> .....	34
Tabla 11: <i>Dimensiones de electrodos y área efectiva</i> .....	35
Tabla 12: <i>Análisis Granulométrico</i> .....	36
Tabla 13: <i>Datos utilizados para clasificación del suelo/relave</i> .....	38
Tabla 14: <i>Datos obtenidos para análisis de consistencia</i> .....	41
Tabla 15: <i>Valores Generales para clasificación de suelo/relave</i> .....	44
Tabla 16: <i>Influencia de las variables en la remoción de As</i> .....	46
Tabla 17: <i>Análisis de Varianza ANOVA en la Remoción de Arsénico</i> .....	46
Tabla 18: <i>Análisis de Costos referenciales óptimos para el proceso</i> .....	48
Tabla 19: <i>Variación de Tarifa en Nuevo Gobierno</i> .....	48
Tabla 20: <i>Resumen de resultados mediante programa Excel</i> .....	49
Tabla 21: <i>Resumen de resultados mediante programa Minitab® 19.1.1</i> .....	50
Tabla 22: <i>Análisis de concentraciones en el método ANOVA</i> .....	51
Tabla 23: <i>Porcentajes de Remoción de Arsénico</i> .....	51
Tabla 24: <i>Resultados Generales del método ANOVA</i> .....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Clasificación de las Tecnologías de Remediación</i> .....	16
Figura 2: <i>Dimensiones de electrodos utilizados</i> .....	35
Figura 3: <i>Pesos Retenidos en tamices</i> .....	37
Figura 4: <i>Gráfica granulométrica del material analizado</i> .....	37
Figura 5: <i>Gráfica de Límite Líquido</i> .....	41
Figura 6: <i>Valores para el IG</i> .....	43
Figura 7: <i>Remoción de Arsénico con sus variables</i> .....	47
Figura 8: <i>Análisis Granulométrico para Clasificación del Suelo</i> .....	53
Figura 9: <i>Ubicación de Relave</i> .....	68
Figura 10: <i>Daños ambientales</i> .....	68
Figura 11: <i>Separación de material no usado</i> .....	69
Figura 12: <i>Electrodo de Acero</i> .....	69
Figura 13: <i>Armado de Celda</i> .....	70
Figura 14: <i>Preparación de muestra para análisis</i> .....	70
Figura 15: <i>Celda completa</i> .....	71
Figura 16: <i>Proceso de electrorremediación en proceso</i> .....	71
Figura 17: <i>Relave seccionado de la celda para análisis</i> .....	72
Figura 18: <i>Análisis Granulométrico</i> .....	72

**ÍNDICE DE ECUACIONES**

Ecuación 1: <i>Variación Total (V)</i> .....	30
Ecuación 2: <i>Variación Subtotal (Vs)</i> :.....	30
Ecuación 3: <i>Variación entre renglones (Vr)</i> .....	30
Ecuación 4: <i>Variación entre columnas (Vc)</i> .....	30
Ecuación 5: <i>Variación de Interacción entre renglones y columnas (Vi(r/c))</i> .....	30
Ecuación 6: <i>Variación residual o por error (Ve)</i> .....	30
Ecuación 7: <i>Área efectiva de electrodo utilizado</i> .....	35
Ecuación 8: <i>Coficiente de Uniformidad (Cu) y Coficiente de Curvatura (CC)</i> .....	40
Ecuación 9: <i>Límite Plástico (Lp)</i> .....	42
Ecuación 10: <i>Índice Plástico (IP)</i> .....	42
Ecuación 11: <i>Índice de Grupo (IG)</i> .....	43

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: <i>Cálculo de valores ANOVA</i> .....	60
ANEXO 2: <i>Valores F de la distribución F de Fisher</i> .....	62
ANEXO 3: <i>Reporte de Análisis de Relave Minero</i> .....	63
ANEXO 4: <i>Dimensiones de los electrodos a utilizar</i> .....	64
ANEXO 5: <i>Permiso de Traslado de Relave Minero</i> .....	65
ANEXO 6: <i>Sistema de Clasificación AASHTO</i> .....	66
ANEXO 7: <i>Diseño de Celda</i> .....	67
ANEXO 8: <i>Registro Fotográfico</i> .....	68

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo determinar la influencia de la densidad de corriente eléctrica y área efectiva de electrodos en la remoción de Arsénico de un relave minero mediante la electrorremediación con un propósito aplicativo y de nivel cuantitativo experimental, las variables en estudio se describen en el objetivo planteado (densidad de corriente eléctrica y área efectiva de electrodos), en cuanto a la población, se eligió una minera artesanal de la localidad de Algamarca del cual se tomó una pequeña cantidad de relave (30 kg aprox.) como muestra que sirvió de materia para el proceso ya mencionado y para poder validar o negar nuestra hipótesis se aplicó el instrumento estadístico Análisis de Varianza (ANOVA) de 2 factores con 3 replicaciones cuyos resultados fueron procesados en primera instancia mediante su cálculo directo, luego se hizo uso del programa MiniTab y por último el programa Ms Excel para la corroboración de los datos, así como su comparación, el resultado fue óptimo para la reducción de Arsénico con un porcentaje del 90.80% de reducción de Arsénico (As) en el relave a nivel de laboratorio, concluyendo que el proceso de variación de las variables en estudio tiene un gran influencia en la disminución de Arsénico (As), determinándose valores de reducción de una concentración inicial de  $1197.65 \text{ mg/m}^3$  a  $110.22 \text{ mg/m}^3$ , resultados obtenidos al tomarse como valores un área efectiva de  $159.2 \text{ cm}^2$  y una densidad de corriente de  $30 \text{ mA/cm}^2$  que fueron analizadas en las tablas que se indican en la investigación.

**PALABRAS CLAVES:** Pasivo ambiental, relave minero, remediación ambiental, electrorremediación, análisis de varianza.

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, el medioambiente ha actuado como el único “gestor de residuos” de todas las actividades desarrolladas por el ser humano, pero todo tiene un límite, dicho de otra forma, el medioambiente alcanzó y superó su capacidad de autorregeneración. Es en este punto cuando aparece un concepto que era desconocido hasta el momento, denominado “contaminación ambiental”. Éste fenómeno puede ser definido como la presencia de cualquier agente (físico, químico o biológico) en el ambiente o bien de una combinación de varios agentes en lugares, formas y concentraciones tales que sean o puedan ser nocivos para la salud, la seguridad y el bienestar de la sociedad, o que puedan ser perjudiciales para la vida vegetal o animal, y esto se produce por el uso indebido de los recursos naturales. (López & López, 2013)

Si bien es cierto que el uso de los recursos naturales (maderas, minerales, agua, etc.) ha sido la base fundamental para que la humanidad vaya desarrollándose, cabe resaltar que con el incremento tecnológico de los procesos industriales (1750 d.C.), el uso excesivo de estos recursos se incrementó, y, en consecuencia, se han producido grandes volúmenes de desechos industriales y urbanos. Estos desechos, debido al lento desarrollo y a la ineficiencia de las técnicas de cuidado o manejo, han generado una gran cantidad de sitios contaminados con compuestos orgánicos, materiales peligrosos y metales pesados como es el caso de la minería y que va generando un gran impacto ambiental no solo en el lugar de la labor sino también en los lugares de influencia. (Virikutyle, Sillanpää, & Latostenmaa, 2002)

Los impactos que las industrias extractivas de minerales han hecho al medio ambiente son desastrosos, y la prueba de ello son los 1021 pasivos ambientales en la región de Cajamarca, de los cuales, 961 están ubicados en la provincia de Hualgayoc – distrito de

Bambamarca; por este motivo la población en general vive preocupada por el avance de las industrias extractivas de mineral en nuestra región y ha sido foco de conflictos ambientales con las comunidades pertenecientes a las zonas de influencia. Como solución de esto, se están logrando introducir tecnologías limpias dentro de estos procesos industriales para lograr disminuir las descargas de sustancias contaminantes al medio ambiente; pero aún algunas empresas se mantienen produciendo productos residuales con una baja concentración de sustancias contaminantes al medio.

En un estudio realizado por Parra (2019) en un proceso de recuperación de un relave, realizó cuatro tratamientos electrocinéticos variando la intensidad de corriente y el material de construcción del electrodo, donde a cada tratamiento se le va aumentando la intensidad de corriente, primer tratamiento se le aplicó una intensidad de 1A y en el tercer tratamiento se le aumentó a 2A tercer tratamiento y demostró que esta variación de corriente generó una mayor eficiencia del 65% de remoción en el relave.

Otro estudio sobre electrorremediación se realizó para la remoción de As, Pb y Cd de un suelo real que contenía un 93% de arena, y que fue contaminado por la oxidación de residuos mineros y se observó que el procedimiento presentó una disminución de As de cerca del 22% (79 ppm) en comparación con la concentración inicial. (García Hernández, Vargas Ramírez, & Reyes Cruz, 2011)

En otra parte según estudios realizados en la Universidad de Illinois (2008), se reportó que los metales más tratados mediante la tecnología de Electrorremediación son Cd, Pb, Cu, Zn, Co, Cr y As y que la implementación de este tratamiento puede durar entre 1 y 10 días según el experimento según la densidad de corriente, el tipo de suelo y la duración del tratamiento para su posterior remoción. (Al-Hamdan Ashraf & R. Reddy, 2008)

En este mismo estudio, se explicó que en el método de electrorremediación la corriente utilizada es baja ( $\text{mA}/\text{cm}^2$  de sección transversal) por lo que se utiliza un mínimo gradiente de potencial ( $0.9\text{-}1.0\text{V}/\text{cm}$  de separación entre ánodo y cátodo). (Al-Hamdan Ashraf & R. Reddy, 2008)

Otro estudio demostró que esta técnica tiene la capacidad de remover algunos contaminantes orgánicos como tricloroetileno e hidrocarburos, ya sea en estudios de laboratorio, a nivel piloto y de campo; sin embargo, el enfoque de su aplicación fue en suelos contaminados con metales, para la remoción de Cr, Cd, Hg, Pb, Mn, Zn y As y que estos estudios mostraron que el proceso de electrorremediación ha permitido alcanzar eficiencias de remoción cercanas al 100 %, principalmente si la contaminación es causada por un solo metal. Pero al aplicarlas en campo, los resultados de remoción han sido variables ya que en ello dependería del tipo de suelo, tipo de contaminante y la variante tecnológica utilizada. (De la Rosa Pérez, Teutli León, & Ramírez Islas, 2007)

En otro apartado de esta investigación, se hizo mención a uno de tres estudios donde se reportó que en el año 1995, la empresa Geokinetics International Inc. realizó la remediación de un suelo de  $213\text{ m}^2$  y 1 m de profundidad, contaminado con cadmio, cobre, níquel, plomo, Zinc y As y que al tiempo de 18 meses, el proceso fue obteniendo eficiencias diferenciadas para cada elemento con un costo desde 300 hasta 500 dólares por yarda cúbica. (De la Rosa Pérez, Teutli León, & Ramírez Islas, 2007)

Para lograr una efectividad de remoción de As, se debe transmitir una diferencia de potencial, o una densidad de corriente directa y para ello, se necesita electrodos (ánodo y cátodo), estos serán colocados en el suelo, donde se los humecta con soluciones electrolíticas, las cuales ayudarán a mejorar la conductividad generada por el campo eléctrico. Pero esta

conductividad está en función inversa a las dimensiones de los electrolitos y su función es movilizar el contaminante en dirección hacia la zona en donde será recuperado. (De La Rosa Pérez, Teulli, & Ramírez Islas, 2007)

En una investigación realizada por alumnos de la Universidad Privada del Norte (2016), demostraron que la variación de la densidad de corriente eléctrica suministrada influye notablemente sobre la remoción de Pb, pero estos valores están limitados al tipo de metal presente en el relave y su otra variable que fue el ácido acético. (Escobar Misahuamán & Ocas Izquierdo, 2016)

El relave de minería no es en principio residuo tóxico, sino fundamentalmente roca molida y agua, por lo que no es considerado un material tóxico. La toxicidad puede aparecer en estados posteriores, cuando ciertos relaves reaccionan con agua y solubilizan tóxicos que se pueden transportar disueltos en agua. Para aquellos relaves que contienen elementos que pueden ser considerados tóxicos para el ser humano, como arsénico, cianuro, cobre, cinc, cromo, plomo, etcétera, las empresas mineras deben resguardar, de acuerdo con la ley, que dichas reacciones de solubilización de tóxicos no puedan tener lugar, para proteger salud humana y ambiente. (Senargeomin, 2005)

El relave de minería no es Residuo Sólido Peligroso (RSP). El concepto de residuos es material (sólidos) que se generan en procesos industriales o en servicios (como la Salud), mientras que los relaves son residuos de rocas naturales que, si bien han sido separados de la roca mediante un proceso, ninguno de estos sólidos ha sido producido por actividades antropogénicas (humanas). (Senargeomin, 2005)

**Tabla 1:**

*Granulometría de un Relave Minero*

<b>Granulometría</b>	<b>% de Paso</b>	<b>Calidad</b>
Gruesos	0-15% menor de 74 ppm (micrómetro)	Buenos
Medios	15-50% menor de 74 ppm (micrómetro)	Generalmente Buenos
Finos	50-80% menor de 74 ppm (micrómetro)	Cuestionables
Limos	100% menor de 74 y 25% menor de 200 ppm	Almacenados por presas convencionales

*Fuente:* (Llique, 2014)

Según Cruzado & Bravo (2010, p.11), los residuos provenientes de la actividad minera son, materiales peligrosos capaces de romper los equilibrios de los ecosistemas, afectar la salud pública, degradar cuerpos de agua y modificar paisajes naturales. El riesgo del mal manejo de los relaves mineros proviene tanto de la manera en que se lo gestiona, cuanto de alta toxicidad de sus componentes, lo que grava su peligrosidad y su potencial como generador de impactos contaminantes. En forma general, se podría agrupar los impactos atribuibles a mal manejo de los relaves mineros del siguiente modo: (Cruzado & Bravo, 2010)

Por otra parte, en este mismo informe realizado por Cruzado & Bravo (2010, p.14) nos dice que algunas investigaciones realizadas sugieren reusar el relave minero en la fabricación de baldosas y ladrillos, tarrajeo de paredes, fabricación de adoquines; reemplazado al agregado fino por el relave.

Pero para poder utilizar directamente el relave como material, se debe hacer una mejora en sus características químicas como es la llamada remediación de suelos como expresa Volke V., (2005). "Existe una gran variedad de tecnologías de remediación, las cuales se pueden clasificar bajo distintos criterios: objetivo de la remediación, lugar en que

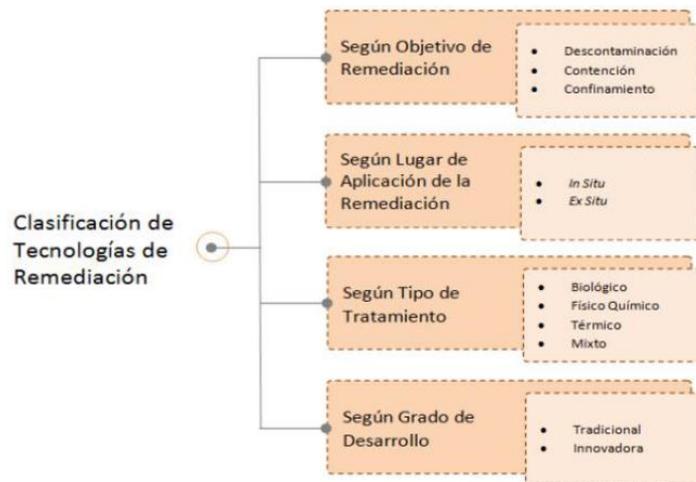
se aplica el proceso de remediación y tipo de tratamiento utilizado. A continuación, se muestra una tabla resumen para la clasificación de las tecnologías de remediación” (Volke, 2005)

Sobre el costo de este proceso, V. Volke (2005), afirmó que en Estados Unidos, al usar esta tecnología para extraer metales del suelo conlleva a un costo de tratamiento, de 50 dólares por metro cúbico con un consumo y costo de energía de 500 kWh/m<sup>3</sup>.

En otro apartado, V. Volke, (2005) también mencionó que estos costos dependen de la extensión y profundidad del lugar contaminado, y varían dependiendo de la extensión del terreno, del material de los electrodos, de la conductividad del suelo, de las metas propuestas para el tratamiento, y del costo de la energía lo que se estimaría a unos gastos energéticos cercanos a 500 KW h/m<sup>3</sup>, dependiendo del espacio entre electrodos [1-1.5 m].

**Figura 1:**

*Clasificación de las Tecnologías de Remediación*



Fuente: Alcalino Concha (2012)

Para este proyecto el proceso de electrorremediación se ubica dentro del lugar de tratamiento (In situ), ya que las técnicas y tecnologías, se aplican directamente sobre el terreno.

“La Electrorremediación es una tecnología para restaurar suelos contaminados que se basa en la generación de un campo eléctrico a partir de imponer corriente directa. Para la aplicación de una diferencia de potencial, o una corriente directa, se requiere el empleo de electrodos (ánodo y cátodo), los cuales son colocados en pozos excavados en el suelo, usualmente estos se humectan con un electrolito para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico. La acción del electrolito permite transportar el contaminante hacia los pozos en donde será extraído. Al contrario del arrastre de fluidos, esta técnica permite establecer una migración dirigida, la cual evita la dispersión del contaminante fuera de la zona de tratamiento” (De La Rosa Pérez, Teulli, & Ramírez Islas, 2007)

Las ventajas y desventajas del proceso de Electrorremediación, se pueden describir en el Tabla 4, donde Volke (2005) hace mención de 4 items muy importantes en cuanto a este proceso:

**Tabla 2:**

*Principales ventajas y Limitaciones de la Electrorremediación*

<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
Es una tecnología disponible comercialmente	No es aplicable en todo tipo de suelos
El contaminante puede separarse con facilidad del suelo, incluso en forma pura	El suelo tratado pierde ligeramente su fertilidad
Es una alternativa eficiente para la remediación <i>in situ</i> de sitios contaminados con metales	Es necesario hidratar el suelo al menos 24 horas antes de iniciar el tratamiento
Se puede aplicar eficientemente en suelos arcillosos (poco permeables)	Valores extremos de pH y reacciones redox pueden disminuir su eficiencia y formar productos indeseables

*Fuente:* Volke (2005)

**Tabla 3:***Comparación de Tecnologías in situ para remediación de suelos contaminados*

<b>Parámetro</b>	<b>Electrorremediación</b>	<b>Arrastre de Fluidos</b>	<b>Extracción forzada con vapores</b>	<b>Oxidación Química</b>	<b>LandFormig</b>
Remoción de compuestos orgánico	Ha demostrado ser eficiente para diversos compuestos orgánicos	Puede remover una cantidad limitada de compuestos orgánicos	Remueve sólo los que tengan una presión de vapor baja	No es muy efectiva para combustibles	Es muy eficiente para la mayoría de los contaminantes orgánicos
Remoción de compuestos inorgánico	Es muy eficiente para contaminantes inorgánicos	Es eficiente, aunque puede dispersar el contaminante	No es efectiva para contaminantes inorgánicos	No suele ser efectiva para transformar el contaminante en otra forma de menor toxicidad	No es efectiva para contaminantes inorgánicos
Factibilidad de aplicación en suelos	Puede aplicarse a una gran variedad de suelos	Sólo se puede aplicar a suelos de alta permeabilidad	Sólo se puede aplicar a suelos de alta permeabilidad	Puede aplicarse a una gran variedad de suelos	Puede aplicarse a una gran variedad de suelos
Estado del suelo después de tratamiento	Dependiendo del tipo de suelo puede requerirse la regeneración (fertilización y adición de materia orgánica)	Dependiendo del tipo de suelo puede requerirse la regeneración (fertilización y adición de materia orgánica)	El suelo no requiere de acciones de regeneración	El suelo requiere de una profunda etapa de regeneración	El suelo no requiere de acciones de regeneración

*Fuente: Pérez (2007)*

“Electrorremediación es una técnica del tipo de descontaminación, generalmente aplicada In Situ y de tratamiento fisicoquímico. La remediación electrocinética es un método para descontaminar suelos que contienen metales pesados y compuestos polares orgánicos mediante el paso de una corriente directa a través del suelo...su único objetivo es extraer metales pesados del suelo mediante el paso de una corriente directa a través del suelo. (Alcalino Concha, 2012)

Los principios que regulan el funcionamiento de la Electrorremediación, se basa “en la aplicación de una corriente directa de baja intensidad a través del suelo contaminado, con el uso de electrodos divididos en extremos anódicos y catódicos. El campo eléctrico moviliza las especies cargadas hacia los electrodos, de manera que los iones metálicos, el amonio y los compuestos orgánicos cargados positivamente se moverán hacia el cátodo, mientras que los aniones (cloro, cianuro, fluoruro, nitratos y compuestos orgánicos cargados negativamente) se moverán hacia el ánodo. La corriente eléctrica genera la formación de un frente ácido en el ánodo y uno básico en el cátodo a partir de la disociación de algunas moléculas de agua; esta generación de condiciones ácidas puede ayudar a la desorción, disolución y transporte de algunos contaminantes metálicos hacia sistemas de recolección ubicados en el cátodo” (Volke, 2005)

“La electrorremediación, involucra la aplicación de un campo eléctrico en una matriz porosa que generalmente se encuentra saturada con agua o algún electrolito de interés, como es el caso de los ácidos orgánicos que presentan ciertas ventajas para este tipo de procesos. Como consecuencia de la aplicación del campo eléctrico, se generan principalmente tres fenómenos electrocinéticas, estos son: Electroósmosis, que representa el movimiento del líquido con respecto a las superficies sólidas inducido por el campo eléctrico. Esto se produce debido a que en las superficies no equilibradas de las partículas del suelo predominan las cargas negativas, y atraen al

líquido hacia el cátodo, que se comporta como un gran catión. Electromigración, es el mecanismo primario de la remediación, también llamado migración iónica, es el movimiento de especies iónicas disueltas, que están presentes en el fluido del poro, debido a la influencia de un campo eléctrico. Electroforesis, corresponde al desplazamiento de partículas coloidales cargadas en suspensión en un líquido, tiene una importancia muy inferior a la de los dos anteriores en este proceso. Los pasos de transformación del contaminante dependen de las especies químicas y de las condiciones del medio ambiente. No obstante, la mayoría de los contaminantes puede transformarse a algunas de sus especies solubles. En el proceso de electrorremediación el ambiente ácido en el ánodo favorece la desorción y disolución de metal, algunos iones pueden existir como cationes o como complejos aniónicos, sin embargo, el ambiente generado al cátodo puede impedir la solubilización de los contaminantes que contengan iones metálicos" (García Hernández, Vargas Ramírez, & Reyes Cruz, 2011)

“... Electrorremediación parece una técnica sencilla, pero existen factores fisicoquímicos que influyen en el transporte de contaminantes como son el pH, la conductividad eléctrica, contenido de agua, Naturaleza y química del suelo, naturaleza del contaminante, naturaleza y arreglo de los electrodos”. (Escobar Misahuamán & Ocas Izquierdo, 2016)

El estudio de los costos de la Electrorremediación “dependen de factores como la cantidad de suelo a remediar, la conductividad del suelo, el tipo de contaminante, el tipo y construcción de los electrodos, la distancia entre electrodos y el diseño utilizado; sin embargo, el factor que tiene un mayor impacto es el consumo de energía eléctrica. En Estados Unidos se estima que de manera general la tecnología de Electrorremediación para extraer metales del suelo tiene un costo de tratamiento, de 50 dólares por metro cúbico con un consumo y costo de energía de 500 kWh/m<sup>3</sup>,

de forma general la Electrorremediación ha demostrado su aplicación exitosa en campo, aunque de manera restringida debido a que cada caso representa un reto tecnológico único, el cual deberá de ser evaluado para seleccionar las tecnologías más adecuadas para su remediación". (De La Rosa Pérez, Teulli, & Ramírez Islas, 2007)

“En nuestro país, se han realizado diversos estudios sobre control en contaminación tanto de aire como de agua; sin embargo, existen pocos estudios sobre remediación de suelos; consideremos que muchos de los contaminantes llegan al suelo como destino final. Las actividades mineras son las primeras responsables de la contaminación de suelos por metales pesados, estas especies dentro del organismo causan problemas de toxicidad (efectos potencialmente carcinógenos y teratogénicos), cuando sobrepasan las concentraciones naturales, al reaccionar con los átomos de azufre en proteínas, con los que se produce una desactivación enzimática; también, por reemplazo de otros cationes esenciales en la estructura de las biomoléculas; además de ser bioacumulables. La electrorremediación, es una técnica electroquímica versátil y ha demostrado ser eficaz para la remoción de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos en diversos tipos de suelos”. (Piuzzi, 2015)

En estadística, se llama experimento factorial completo a aquel experimento cuyo diseño abarca y/o contiene de dos o más factores, que es el método que se utilizará en el presente trabajo, cada uno de estos factores tiene distintos valores o niveles, cuyos valores pueden cubrir todas las posibles combinaciones de estos niveles en todos los factores. Este análisis permite hacer el estudio que afecta cada factor sobre la variable respuesta, en este caso serán los datos tomados en laboratorio, y su efecto de sus interacciones entre estos factores sobre la variable dependiente. Todas las posibles combinaciones que se realizarán, se pueden obtener repitiendo el experimento,

cuyo proceso se llama replicación, para obtener más información sobre estos factores, así como su interacción y su efecto sobre la variable respuesta.

El SS - AISI 304 (Stainless Steel) es el grado de acero inoxidable más utilizado, contiene entre un 18-20% de cromo, así como un alto contenido de níquel, normalmente entre un 8 y un 10.5% en peso, estos elementos de aleación dan al acero excelente resistencia a la corrosión, sin embargo, en ambientes de cloruro, el acero 304 es susceptible a la corrosión por picaduras y grietas, en términos de propiedades mecánicas, tiene una alta resistencia máxima a la tracción de 73200psi y una resistencia máxima a la fluencia de 31200psi, se usa comúnmente para electrodomésticos, en tuberías comerciales de procesamiento de alimentos, intercambiadores de calor y en entornos que correrían el acero al carbono estándar.

Teniendo como perspectiva la cantidad de mineras artesanales ubicadas en la localidad y los desechos sólidos provenientes de los trabajos realizados por estas empresas (algunos de ellos a open pit y otros por métodos subterráneos), se va observando la toxicidad de los relaves ya que las personas están expuestas a una contaminación directa e inminente de tiempo, por lo que se propone utilizar el proceso de Electrorremediación para el estudio de la remoción de metales.

El motivo que impulsa la realización de este proyecto es que se considera de suma importancia a tener como referencia sobre la remoción de metales de un suelo contaminado y que a futuro podría favorecer en la economía de la empresa minera.

El presente proyecto, va enfocado en analizar el proceso de electrorremediación, con el fin de obtener datos reales que serían las bases de apoyo de las entidades mineras para su elaboración y referencias posteriores en donde se tenga una mejor visualización y a futuro terminar con los conflictos medioambientales.

## 1.1. Formulación del problema

A pesar de la variedad de técnicas descritas anteriormente sobre el proceso de electrorremediación como tecnología limpia para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados, en nuestro país no se dispone de información sobre su implementación y su uso en relaves mineros y mucho menos existen evaluaciones sobre la remoción de los metales (As), en función a la densidad de corriente eléctrica y área efectiva de electrodos, por lo que propuso la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la influencia de la densidad de corriente eléctrica y el área efectiva de los electrodos en la remoción de arsénico de un relave minero mediante la electrorremediación?

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo Principal

Determinar la influencia de la densidad de corriente eléctrica y área efectiva de electrodos en la remoción de Arsénico de un relave minero mediante la electrorremediación

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar la densidad de corriente apropiado en la remoción de Arsénico mediante la electrorremediación en relave minero.
- Determinar el área efectiva de electrodos para la remoción de arsénico en el proceso de electrorremediación en relave minero.
- Determinar la remoción de arsénico de relaves mineros mediante la electrorremediación.
- Identificar los costos aproximados que podría generar la realización del proceso de electrorremediación.
- Utilizar el método AASHTO para la clasificación de tipos de suelo para el relave minero y analizar la eficacia del proceso de electrorremediación para relaves mineros.

### 1.3. Hipótesis

A medida que se va incrementando la densidad de corriente eléctrica y la variación del área efectiva de los electrodos, aumentará significativamente la remoción de arsénico, lo que conllevaría a una disminución de la concentración de este metal en el relave minero.

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

El tipo de investigación según su nivel, se puede apreciar en la Tabla 6, donde se describe el criterio de la investigación, su tipo y la razón que determinó este procedimiento.

**Tabla 4:**

*Tipos de Investigación*

<b>Criterio</b>	<b>Tipo de investigación</b>	<b>Razón</b>
Según el propósito	Aplicada	Su objetivo es determinar un problema específico.
Según la profundidad	Explicativa	Explica el comportamiento de las variables.
Según su naturaleza de datos	Cuantitativa	Estudia y analiza la realidad el problema basándose en expresar los resultados en cifras.
Según la manipulación de variable	Experimental	Se posee un control de las variables.

*Fuente:* Guía de investigación científica UPN 2018.

Acorde con su propósito la presente investigación es de carácter aplicada, debido a que el objetivo principal de la presente investigación procura enmarcar un problema específico. (Hernández et al., 2014, p. 40)

Por su profundidad la presente investigación presenta un carácter explicativo, debido que analiza y explica cada una de las variables en estudio. (Hernández et al., 2014, p. 34).

Por su naturaleza la presente investigación es considerada de carácter cuantitativa, debido que los datos observados y recolectados fueron debidamente procesados bajo el enfoque estadístico. (Hernández et all., 2014. p.89).

Debido a que si hubo una manipulación de variables el presente estudio es del tipo experimental ya que el investigador manipula las variables del experimento. (Hernández et all., 2014. p.25).

La presente investigación corresponde a un diseño de corte transversal, lo que indica que la toma de datos se dio en único momento del estudio. (Hernández et all., 2014. p.98).

Para esta investigación, la población estuvo constituido por los relaves mineros provenientes de las mineras artesanales de la localidad de Algamarca, en cuanto a la muestra, se tomó como referencia de estudio la cantidad de 30 kilogramos de relave, tomando para ello, las medidas de permiso respectivo para su acceso y su transporte, permiso que se le ubicará en los anexos correspondientes, esta cantidad fue el inicio para un barrido de minerales, para luego proceder a tomar 28 muestras más (de 1kg aproximadamente cada una), por lo que el total de la muestra utilizada sería de 30kg.

El material de estudio estuvo constituido por un relave minero ubicado en la localidad de Algamarca, en el distrito Cachachi, provincia de Cajabamba, región Cajamarca con una latitud sur de  $-7^{\circ}36'30.5''$  y latitud oeste de  $-78^{\circ}14'45.3''$ , a una latitud de 3033 m.s.n.m. y en las coordenadas referenciales 9158648N, 803591E. La localidad cuenta con un aprox. De 121 viviendas.

Las muestras obtenidas de campo, se tomaron por medición aleatoria, ya que no se estimaba la cantidad total de material de la población, se tomó una pequeña muestra de 1.20 kg para un barrido de minerales y determinar las cantidades en estudio.

Para el análisis granulométrico se optó por utilizar el método AASHTO, donde se procede a determinar los diferentes resultados para poder determinar la clasificación granulométrica del relave (Límite líquido, Límite plástico, Coeficiente de uniformidad  $C_u$ ; y el coeficiente de curvatura  $C_c$ ).

Seguidamente, se enviará a analizar el porcentaje de Arsénico a un laboratorio certificado (en este caso el Laboratorio de la UNT). Para el análisis de los resultados se utilizará el análisis de varianza ANOVA con 2 variables independientes y con 3 replicaciones; ya que, este método se usa para determinar las interacciones entre 2 a mas variables.

El procedimiento a seguir para la investigación para la recolección de datos, se realizaron de la siguiente manera: Se inició con la búsqueda de información que abarcara el tema sobre electrorremediación de suelos contaminados por metales en minería y las tecnologías que podrían aplicar para disminución o remoción de los mismos, se optó por el tema de disminución de arsénico de relave, ya que es un tema muy importante a tratar en la zona de Algamarca y base de bastos conflictos sociales, se tomó información de tesis ya elaboradas concernientes al tema de remediación de suelos contaminados, doctorados de diferentes universidades, informes, publicaciones, revistas entre otros, como se lista en la bibliografía.

Se hizo el viaje a la zona con la finalidad de poder obtener una pequeña muestra representativa para análisis, por lo que se tuvo que solicitar por escrito al dueño y al encargado de la mina artesanal para que ceda el permiso correspondiente al ingreso.

La muestra representativa se tomó de las coordenadas UTM (9158648N, 803591E), siendo de unos 30 kilogramos aproximadamente, cantidad requerida para laboratorio, llevándose una parte de la muestra para hacer un barrido de minerales y saber con exactitud que minerales están

en mayor proporción (en nuestro caso fue Arsénico) y de esta forma atacarlo por el procedimiento ya explicado y para poder disminuirlo o removerlo como se puede mostrar en la Tabla 7:

**Tabla 5:**

*Barrido de Metales*

<b>Método</b>	<b>ME ICP-OES</b>									
<b>Elemento</b>	<b>Au</b>	<b>Ag</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>
<b>Unidades</b>	<b>g/TM</b>	<b>g/TM</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>ppm</b>	<b>ppm</b>
<b>M-1</b>	6.49	691.86	0.05	7.42	0.13	0.04	0.25	1.58	212.5	0.00

*Nota:* Se envió a laboratorio de la UNT una cantidad de 1.2kg aproximadamente para determinar la cantidad de metales que tiene esa muestra, muestran que el relave de la minera Los Alisos, contienen un alto contenido en oro (Au), plata (Ag), hierro (Fe), Zinc (Zn), Arsénico (As).

Se llevó la muestra a laboratorio para hacer el estudio de suelos y poder caracterizarlo de acuerdo a la norma AASHTO.

Se empezó a elaborar la celda base de electrorremediación que se utilizará para realizar la toma de muestras que posteriormente irán a un laboratorio especializado, dicha celda fue hecha de vidrio con las dimensiones que se detallarán posteriormente, así también como el uso del Ácido Acético como electrolito o catalizador para la remoción de Arsénico.

Con los datos obtenidos del laboratorio, se empezó a realizar los cálculos de disminución en porcentaje de la cantidad de Arsénico en la muestra tratada y para validar o negar la hipótesis se ha utilizado el método de Análisis de Varianza (ANOVA) de dos factores con replicaciones.

Para el análisis e interpretación de datos, se realizó un diseño experimental de dos factores (BIFACTORIAL) con tres replicaciones, donde las variables se muestran en la Tabla 6 y la matriz de diseño en la Tabla 7:

**Tabla 6:**

*Variables en estudio*

<b>VARIABLES</b>	<b>Niveles</b>
<b>Independiente</b>	
Factor 1 (Densidad de corriente eléctrica)	X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub>
Factor 2 (Área de electrodos)	Y <sub>1</sub> , Y <sub>2</sub> , Y <sub>3</sub>
<b>Dependiente</b>	% de reducción

*Nota: para la cantidad de pruebas se hace la operación siguiente*

$$N^{\circ} \text{ total de pruebas} = (N^{\circ} \text{ de matriz}) * (N^{\circ} \text{ de réplicas}) + \text{Prueba Patrón}$$

$$N^{\circ} \text{ total de pruebas} = [(3 * 3) * (3)] + 1$$

$$N^{\circ} \text{ total de pruebas} = 28 \text{ pruebas}$$

Se ha utilizado experimentos y los principios encontrados en el método científico, dichos experimentos han sido llevado a cabo dentro de un laboratorio y se utilizará el método bifactorial (dos factores) con tres niveles o grupos por variable independiente y con un tamaño muestral de tres réplicas o repeticiones por cada nivel o grupo.

La distribución de los tres niveles o grupos a utilizar viene siendo la Densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>) de 10 mA/cm<sup>2</sup>, 20 mA/cm<sup>2</sup> y 30 mA/cm<sup>2</sup> que estarían interactuando con el Área Efectiva (cm<sup>2</sup>) de los electrodos, en este caso sería 307.2 cm<sup>2</sup>, 233.2 cm<sup>2</sup> y 159.2 cm<sup>2</sup> y que se estarían realizando tres pruebas por cada interacción que se propondría trabajar.

Haciendo un barrido de metales, se optó por la disminución y/o remoción de Arsénico, cuyos datos se obtienen de la recolección correspondiente a cada una de las interacciones entre la densidad de corriente y el área efectiva de los electrodos, dándonos como resultado el siguiente Modelo matricial que se estaría aplicando a los diferentes niveles o grupos.

**Tabla 7:**

*Modelo Matricial: Factores con Replicaciones*

Factor 01 (densidad de corriente)	Factor 02 (Área de electrodos)	Réplicas (% de Reducción)				
		1	2	3		
X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>	M <sub>111</sub>	M <sub>112</sub>	M <sub>113</sub>	S <sub>11</sub>	G <sub>1</sub>
	Y <sub>2</sub>	M <sub>121</sub>	M <sub>122</sub>	M <sub>123</sub>	S <sub>21</sub>	
	Y <sub>3</sub>	M <sub>131</sub>	M <sub>132</sub>	M <sub>133</sub>	S <sub>31</sub>	
X <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	M <sub>211</sub>	M <sub>212</sub>	M <sub>213</sub>	S <sub>12</sub>	G <sub>2</sub>
	Y <sub>2</sub>	M <sub>221</sub>	M <sub>222</sub>	M <sub>223</sub>	S <sub>22</sub>	
	Y <sub>3</sub>	M <sub>231</sub>	M <sub>232</sub>	M <sub>233</sub>	S <sub>32</sub>	
X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	M <sub>311</sub>	M <sub>312</sub>	M <sub>313</sub>	S <sub>13</sub>	G <sub>3</sub>
	Y <sub>2</sub>	M <sub>321</sub>	M <sub>322</sub>	M <sub>323</sub>	S <sub>23</sub>	
	Y <sub>3</sub>	M <sub>331</sub>	M <sub>332</sub>	M <sub>333</sub>	S <sub>33</sub>	
		N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	T	

*Nota:* Se realiza el sistema matricial, dando algunos valores a cada resultado (Mx, Sx; Gx, Nx, T) para poder utilizarlas en las ecuaciones que se muestran más adelante, donde:

FACTOR 1 (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>): Densidad de Corriente (mA/cm<sup>2</sup>)

FACTOR 2 (Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, Y<sub>3</sub>): Área Efectiva de Electrodo (cm<sup>2</sup>)

M<sub>i</sub> :Medición a efectuar

S<sub>i</sub> :Sumatoria por filas.

G<sub>i</sub> :Sumatoria por filas en grupo.

N<sub>i</sub> :Sumatoria por Columnas o replicaciones.

T :Sumatoria total de los grupos.

Para el tratamiento de datos, resultados y procedimiento estadístico, se utilizará el método ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) y se corroborará los datos obtenidos con los cálculos realizados en el programa MS Excel y el programa MINITAB.

Para obtener los cálculos del ANOVA, se procederá a efectuar algunas sumatorias para poder llegar a los datos de la matriz cuyas variables se representan como sigue:

**Ecuación 1:** *Variación Total (V)*

$$V = \left( \sum M_i^2 \right) - \frac{T^2}{\text{número de muestras}}$$

**Ecuación 2:** *Variación Subtotal (Vs):*

$$V_s = \left( \sum \frac{S_i^2}{\text{número de réplicas}} \right) - \frac{T^2}{\text{número de muestras}}$$

**Ecuación 3:** *Variación entre renglones (Vr)*

$$V_r = \left( \sum \frac{G_i^2}{\text{número de datos por grupo}} \right) - \frac{T^2}{\text{número de muestras}}$$

**Ecuación 4:** *Variación entre columnas (Vc)*

$$V_c = \left( \sum \frac{\Sigma S_i^2}{\text{número de datos de muestra por filas}} \right) - \frac{T^2}{\text{número de muestras}}$$

**Ecuación 5:** *Variación de Interacción entre renglones y columnas (Vi(r/c))*

$$V_{i(r/c)} = V_s - (V_r + V_c)$$

**Ecuación 6:** *Variación residual o por error (Ve)*

$$V_e = V - (V_r + V_c + V_i)$$

Una vez hallados estos valores se colocarán en una tabla de resultados estadísticos como se muestra en la Tabla 8:

**Tabla 8:**

*Modelo Matricial de Resultados Estadísticos*

Variación	Grados de Libertad (gl)	Cuadrado Medio	F
V <sub>r</sub>	(a - 1)	$S_r^2 = \frac{Vr}{(a - 1)}$	$\frac{S_r^2}{S_e^2}$
V <sub>c</sub>	(b - 1)	$S_c^2 = \frac{Vc}{(b - 1)}$	$\frac{S_c^2}{S_e^2}$
V <sub>i(r/c)</sub>	(a - 1)(b - 1)	$S_i^2 = \frac{Vi}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{S_i^2}{S_e^2}$
V <sub>s</sub>	(ab) - 1		
V <sub>e</sub>	(ab)(c - 1)	$S_e^2 = \frac{Ve}{(ab)(c - 1)}$	
<b>Total</b>			

Los valores F que se ubican como valores al final de la tabla, se usan para probar la Hipótesis nula (H<sub>0</sub>).

Se busca el valor de F (α, V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>) en la tabla de distribución de Fisher, sabiendo que “α” es el grado de confiabilidad (en nuestro caso es de 0,05), V<sub>1</sub> es el GL entre grupos y V<sub>2</sub> es el GL entre niveles.

Con estos resultados se concluiría que:

Si  $F_o < F(\alpha, V_1, V_2)$ , entonces se acepta la hipótesis nula.

Si  $F_o > F(\alpha, V_1, V_2)$ , entonces se acepta la hipótesis alternativa.

Y las hipótesis que se tomarán en este estudio van de acuerdo a las correlaciones entre filas y columnas y las replicaciones entre ambas por ser un método de 2 factores con replicación

$F_A$  : Densidad de corriente eléctrica

$H_o$  : No existe cambio en el porcentaje de remoción de As al variar la densidad de corriente eléctrica.

$H_1$  : Existe un cambio en el porcentaje de remoción de As al variar la densidad de corriente eléctrica.

$F_B$  : Área efectiva de electrodos

$H_o$  : No existe cambio en el porcentaje de remoción de As al variar las dimensiones del área efectiva de los electrodos.

$H_1$  : Existe un cambio en el porcentaje de remoción de As al variar las Dimensiones del área efectiva de los electrodos.

$F_{AB}$  : El aumento del Área efectiva y la variación de densidad de corriente

$H_o$  : No existe un cambio en el porcentaje de remoción de As al variar la densidad de corriente y las dimensiones de los electrodos.

$H_1$  : Existe un cambio en el porcentaje de remoción de As al variar la densidad de corriente y las dimensiones de los electrodos.

Una vez fijado nuestro proceso de recolección de datos, se dividió este procedimiento en 3 fases: la **Primera Fase: de campo**, acceso al CC.PP. de Algamarca, se puede realizar mediante movilidad particular en un recorrido directo desde Cajamarca hacia dicha localidad presentando en su mayor extensión una carretera asfaltada con una longitud de 133 km. y en un tiempo de llegada de 3 horas 36 minutos aproximadamente, luego de la cual para llegar al centro poblado de Algamarca existe un desvío situado a 3 km de Cajabamba que es una carretera de trocha de 38 km. y un tiempo de llegada de 30 minutos aproximadamente; la segunda ruta es atravesar el recorrido con una movilidad colectiva hacia la provincia de Cajabamba y luego tomar otro colectivo hacia el CC.PP de Algamarca con una longitud aproximada de 177 km. Y un tiempo estimado de 5 horas.

La **Segunda Fase: de Laboratorio** donde se eligieron los parámetros para el estudio del relave minero y los cálculos a nivel de laboratorio que se tomaron para la investigación:

**Tabla 9:**

*Materiales que se utilizaron para el experimento*

Parámetro	Unidad	Método del Ensayo
Análisis Granulométrico	%	ASTM D422 Ed. 2017(Standard Test Method for Particle) <a href="https://www.astm.org/standards/d422">https://www.astm.org/standards/d422</a>
Límite Líquido	%	ASTM D424 Ed. 2017 (Standard Test Plastic Limit and Pasticity Index of Soils)
Límite Plástico	%	ASTM D4318 Ed. 2017 (Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils)
Contenido de Hmedad	%	ASTM D2216 Ed. 2019(Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass
Clasificación de suelo	A-x-y	AASHTO M145 Ed. 2021 (Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes
Análisis Químico	%	Barrido de Metales (As)

Para iniciar la toma de ensayos de electrorremediación se empleó tres celdas construidas en vidrio con unas dimensiones de 0.20 m de largo, anchos variables (10cm, 7.5 cm, 5cm) y 0.10 m de altura cuya capacidad para la muestra es de 1 kg aproximadamente, dentro del interior de la celda se colocaron soportes de vidrio que permitiría tanto la sujeción de los electrodos de acero tipo SS – AISI 304 (en nuestro caso las dimensiones se van a ir variando para efecto del análisis) y sujetando el material poroso (triplay húmedo), que estaría dividiendo las celdas en 3 cámaras, en cuya segunda cámara, se alojaría la muestra (relave) previamente hidratada y en las cámaras restantes, se colocarían la solución electrolítica (ácido oxálico).

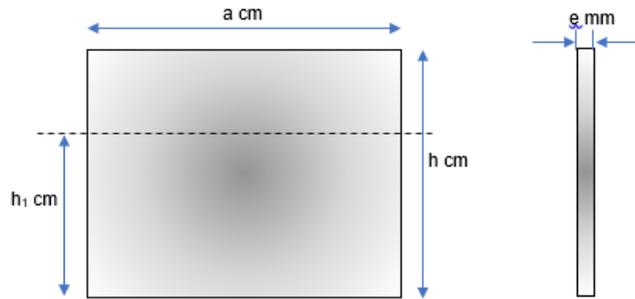
**Tabla 10:**

*Materiales utilizados en la investigación*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>
Muestra	Relave minero de minera artesanal de Algamarca
Masa por ensayo	1.10 kilogramos (total 30 kg aprox.)
Concentración inicial de Arsénico	1210.79 mg/kg
Tipo de Reactor	Reactor tipo Batch
Número de electrodos por ensayo	06
Cátodo de la celda	SS – AISI 304 (acero inoxidable)
Ánodo de la celda	SS – AISI 304 (acero inoxidable)
Tamaño de electrodos	Variable para el estudio
Área sumergida de electrodos	Variable para el estudio
Tiempo de ensayo	24 horas
Parámetros de corriente utilizados	Variable para el estudio
Separación entre electrodos de celda	12 cm
Solución catolito/anolito	Ácido Oxálico 5%
Soportes internos de las celdas	Triplay

**Figura 2:**

*Dimensiones de electrodos utilizados*



*Nota:* En la figura 1, se puede observar las dimensiones utilizadas para la determinación del área efectiva de los electrodos (área sumergida en la muestra).

**Ecuación 7:** Área efectiva de electrodo utilizado

$$\text{Área efectiva} = 2 * ((h_1 * a) + (h_1 * e) + (a * e)) \text{cm}^2$$

*Donde:*

*a* : Ancho de electrodo (cm). (Valores de 10 cm, 7.5 cm y 5 cm)

*h<sub>1</sub>* : Altura de solución electrolítica y relave en celda (cm). (7cm)

*e* : Espesor de electrodo (cm). (0.4 cm)

Como se usan 2 electrodos, entonces el área total es el doble (2xÁrea efectiva)

**Tabla 11:**

<i>Dimensiones de Electroodos y Área Efectiva</i>					
				<b>Área Efectiva (cm<sup>2</sup>)</b>	
<b>Área</b>	<b>a (cm)</b>	<b>h<sub>1</sub> (cm)</b>	<b>e (cm)</b>	<b>Con 1 electrodo</b>	<b>Con 2 electrodos</b>
A <sub>1</sub>	10	7	0.4	153.6	307.2
A <sub>2</sub>	7.5	7	0.4	116.6	233.2
A <sub>3</sub>	5	7	0.4	79.6	159.2

Para el método granulométrico, se procede a pasarlos por diferentes tamices de acuerdo a la norma ASTM D422, se toma los pesos de los pasantes, se realiza la gráfica y a través del método AASHTO, se procede a identificar el tipo de suelo.

**Tabla 12:**

*Análisis granulométrico*

(pulg)	(mm)	Peso malla	Peso malla + muestra	Retenido	(%)	(%) Acumulado	(%) Pasante
2"	50.80	537.90	537.90	0.00	0	0	100
1 1/2 "	38.10	571.50	571.50	0.00	0	0	100
1"	25.40	539.30	539.30	0.00	0	0	100
3/4 "	19.05	540.30	540.30	0.00	0	0	100
1/2 "	12.70	517.80	541.10	23.30	1.88	1.88	98.12
3/8 "	9.53	513.90	532.80	18.90	1.52	3.40	96.60
N° 4	4.75	503.10	636.20	133.10	10.72	14.11	85.89
N° 8	2.36	465.20	714.20	249.00	20.05	34.16	65.84
N° 10	2.00	460.80	519.60	58.80	4.73	38.90	61.10
N° 20	0.85	406.30	693.00	286.70	23.08	61.98	38.02
N° 30	0.60	407.60	523.30	115.70	9.32	71.30	28.70
N° 40	0.43	376.10	455.00	78.90	6.35	77.65	22.35
N° 60	0.25	355.40	506.50	151.10	12.17	89.81	10.19
N° 100	0.15	353.20	431.40	78.20	6.30	96.11	3.89
N° 200	0.08	313.50	348.20	34.70	2.79	98.90	1.10
Ciega	0.00	349.40	363.00	13.60	1.10	100.00	0.00
<b>Total</b>				1242.00	100		

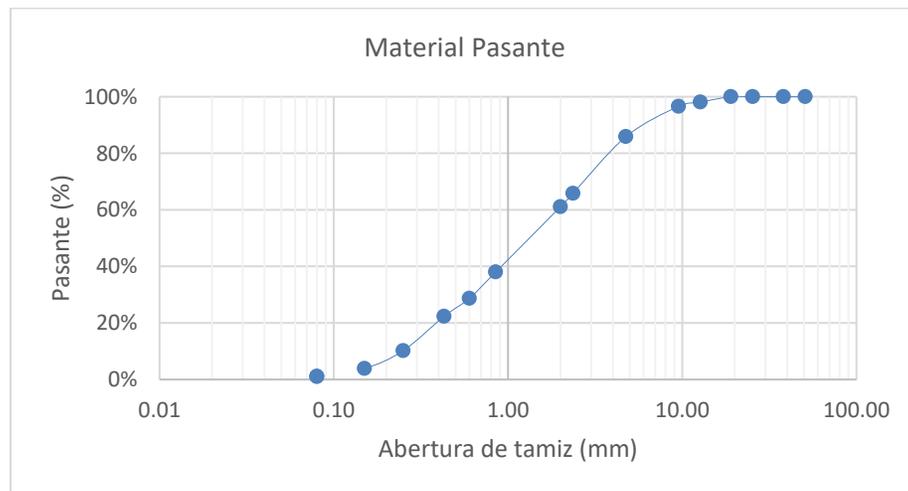
**Figura 3:**

*Pesos Retenidos en tamices*



**Figura 4:**

*Gráfica granulométrica del material analizado*



Para calificar el tipo de suelo se utilizará el método AASHTO que se explicará con el siguiente procedimiento:

Se halla el  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{30}$  y  $P_{60}$  de la tabla de resultados granulométricos para reemplazar en fórmulas ya propuestas ( $P_x$  viene siendo la cantidad del % pasante y  $D_x$  viene siendo

la abertura de la malla en milímetros o el tamaño de las partículas correspondientes al porcentaje de abertura de ese tamiz).

**Tabla 13:**

*Datos utilizados para calificación de suelo*

(mm)	(%) Pasante
50.80	100
38.10	100
25.40	100
19.05	100
12.70	98.12
9.53	96.60
4.75	85.89
2.36	65.84
2.00	61.10
0.85	38.02
0.60	28.70
0.43	22.35
$D_1 \leftarrow$ <b>0.25</b>	<b>10.19</b> $\rightarrow P_1$
$D_{10} \leftarrow$ <b>0.15</b>	<b>3.89</b> $\rightarrow P_{10}$
$D_2 \leftarrow$ 0.08	1.10 $\rightarrow P_2$
0.00	0.00

Para  $P_{10}$  se halla el  $D_{10}$  donde los valores  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $D_1$  y  $D_2$  son los valores superior e inferior respectivamente de la tabla granulométrica anterior, para los valores  $D_{30}$  y  $D_{60}$  se procede de la misma manera que se hizo con el  $D_{10}$ , luego esos datos se reemplazan en la siguiente ecuación para hallar los valores que no se tienen como datos.

$$D_x = \left( \frac{\text{Log } X - \text{Log } P_1}{\text{Log } P_2 - \text{Log } P_1} \right) (D_2 - D_1) + D_1$$

Hallamos  $D_{10}$ :

De la tabla se extraen los datos y se reemplaza en la ecuación ( $P_1 = 10.19$ ;  $P_2 = 3.89$ ;

$D_1=0.25$ ;  $D_2 = 0.15$ )

$$D_{10} = \left( \frac{\text{Log } 10 - \text{Log } 10.19}{\text{Log } 3.89 - \text{Log } 10.19} \right) (0.15 - 0.25) + 0.25$$

$$D_{10} = (0.0195)(-0.1) + 0.25$$

$$\mathbf{D_{10} = 0.248}$$

Hallamos  $D_{30}$ :

De la tabla se extraen los datos y se reemplaza en la ecuación ( $P_1 = 38.02$ ;  $P_2 = 28.70$ ;  $D_1 =$

$0.85$ ;  $D_2 = 0.60$ )

$$D_{30} = \left( \frac{\text{Log } 30 - \text{Log } 38.02}{\text{Log } 28.70 - \text{Log } 38.02} \right) (0.60 - 0.85) + 0.85$$

$$D_{30} = (0.8425)(-0.25) + 0.85$$

$$\mathbf{D_{30} = 0.639}$$

Hallamos  $D_{60}$ :

De la tabla se extraen los datos y se reemplaza en la ecuación ( $P_1 = 61.10$ ;  $P_2 = 38.02$ ;  $D_1 = 2$ ;

$D_2 = 0.85$ )

$$D_{60} = \left( \frac{\text{Log } 60 - \text{Log } 61.10}{\text{Log } 38.02 - \text{Log } 61.10} \right) (0.85 - 2) + 2$$

$$\mathbf{D_{60} = 1.573}$$

Con los datos obtenidos, se halla el Coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y el coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) propuestos por Allen Hazen como una medida simple de la uniformidad en suelos granulares:

**Ecuación 8:** *Coeficiente de Uniformidad ( $C_u$ ) y Coeficiente de Curvatura ( $C_c$ )*

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{y} \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60})(D_{10})}$$

Con la condición que:

Para Gravas: Si  $C_u > 4$  y  $1 < C_c < 3$ , el suelo es bien gradado

Para Arenas: Si  $C_u > 6$  y  $1 < C_c < 3$ , el suelo es bien gradado

$$C_u = \frac{1.573}{0.248} \quad ; \quad C_c = \frac{(0.639)^2}{(1.573)(0.248)}$$

$$C_u = 6.3427 \quad ; \quad C_c = 1.0467$$

De acuerdo al  $C_u$  y  $C_c$ , se obtiene que el relave es arenoso y **BIEN GRADADA**.

Para un segundo ensayo se prosiguió a analizar el límite plástico ( $L_p$ ) y límite líquido ( $LL$ ), que son los límites de consistencia de un suelo, para dicho ensayo se utilizó un instrumento llamado "Copa de Casagrande", donde cuyos datos se obtuvieron cerrando una ranura practicada en una muestra de suelo humedecido previamente y golpeándola un aproximado de 25 veces ( lo más cercano a esa cantidad por regla), el contenido de humedad o agua, se registra como Límite Líquido ( $LL$ ), el límite plástico ( $L_p$ ) o contenido de agua, se determina presionando y enrollando la muestra trabajada en el Límite Líquido ( $LL$ ) hasta obtener un diámetro de 3 mm en el cual el pequeño enrollado se desmorona, y no se puede continuar con ese tipo de trabajo, de tal modo que los enrollados formados, se pesan en una tara y luego se procede a calentar en un horno para hallar de esta forma el contenido de agua que vendría a ser el Límite plástico ( $L_p$ ).

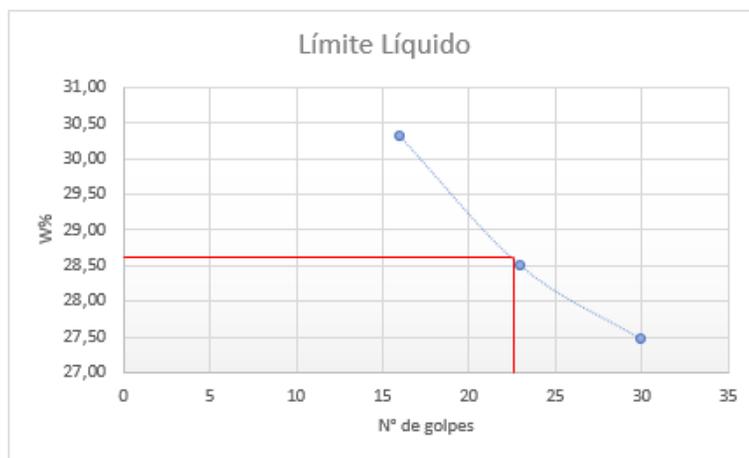
**Tabla 14:**

*Datos obtenidos para análisis de consistencia*

	Límite Líquido			Líquido Plástico	
	1	2	3	1	2
<b>W tara (Wt)</b>	16.5	15.55	15.75	15.15	14.65
<b>W (mh + t)</b>	43.8	52.35	51.35	20.36	19.49
<b>W (ms + t)</b>	37.45	44.19	43.68	19.81	18.97
<b>Ws</b>	20.95	28.64	27.93	4.66	4.32
<b>Wh</b>	27.30	36.80	35.60	5.21	4.84
<b>Ww</b>	6.35	8.16	7.67	0.55	0.52
<b>N° de golpes</b>	16	23	30	--	--
<b>W% (contenido de humedad)</b>	30.31	28.49	27.46	11.80	12.04

**Figura 5:**

*Gráfica de Límite Líquido*



Hallamos el Límite Plástico:

**Ecuación 9:** *Límite Plástico (Lp)*

$$Lp = \frac{\sum w\%_i}{\text{número de pruebas}}$$

$$Lp = \frac{11.80 + 12.04}{2}$$

$$Lp = 11.92\%$$

Hallamos el Límite Líquido (LL): Acomodamos en una tabla para sacar los valores para su interpolación logarítmica.

	W%	Nº de golpes	
D <sub>1</sub>	27.46	30	P <sub>1</sub>
D <sub>25</sub>	28.49	23	P <sub>25</sub>
D <sub>2</sub>	30.31	16	P <sub>2</sub>

$$D_{25} = \left( \frac{\text{Log } 25 - \text{Log } 30}{\text{Log } 23 - \text{Log } 30} \right) (28.49 - 27.46) + 27.46$$

$$W\%_{(25)} = (0.686)(1.03) + 27.46$$

$$W\%_{(25)} = 28.17\% = \text{Límite Líquido}$$

Hallamos Índice Plástico (IP)

**Ecuación 10:** *Índice Plástico (IP)*

$$IP = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico}$$

$$IP = 28.17 - 11.92$$

$$IP = 16.25$$

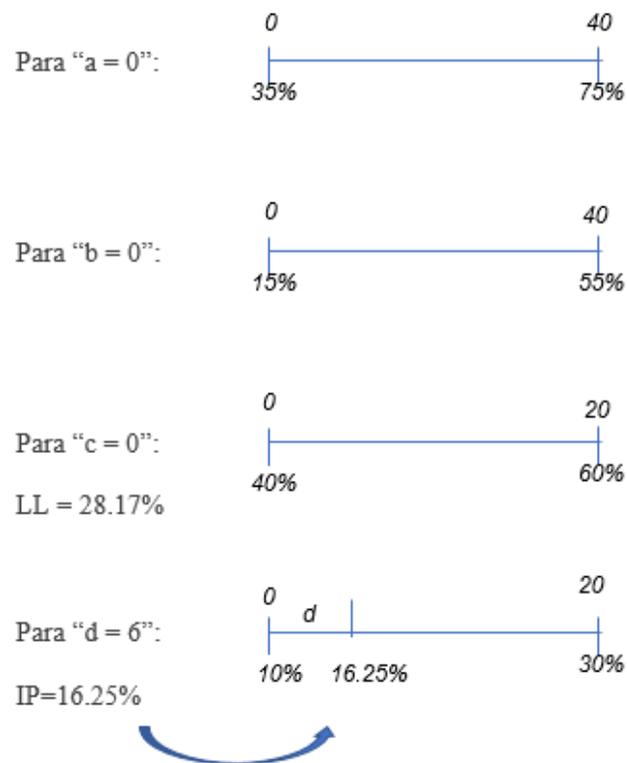
Hallamos el Índice de Grupo (IG): considerando que los valores son tomados de acuerdo al % pasante de la malla N°200 (en nuestro caso es 1.1%)

**Ecuación 11:** *Índice de Grupo (IG)*

$$IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$$

**Figura 6:**

*Valores para el IG*



Reemplazando los valores obtenidos de los cálculos anteriores en la fórmula, se tendría

$$IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$$

$$IG = 0.2(0) + 0.005(0)(0) + 0.01(0)(6)$$

$$IG = 0$$

Sacando todos los valores hallados, se procedería a calificar el tipo de suelo mediante el formato AASHTO:

**Tabla 15:**

*Valores generales obtenidos para clasificación de suelos*

	<b>Valores</b>
<b>D10</b>	0.248
<b>D30</b>	0.639
<b>D60</b>	1.573
<b>Cu</b>	6.3427
<b>Cc</b>	1.0467
<b>Lp</b>	11.92%
<b>LL</b>	28.17%
<b>IP</b>	16.25%
<b>IG</b>	0
<b>N°200 %Pasante</b>	1.1%
<b>N°4</b>	Pasa=85.89%
	<u>%R.A.=14.11%</u>

De acuerdo a los datos obtenidos de la Tabla N° 16, y de acuerdo a la tabla del ANEXO 6, se define que la muestra es una Arena Limosa o arcillosa tipo A-2-6 bien gradada, ya que su Cu está entre el rango pedido y su Cc está también dentro del rango permisible.

Y la última y *Tercera Fase: de Gabinete* donde se la comparación y evaluación de los resultados de acuerdo a normativas y datos estadísticos, para posteriormente realizar los gráficos de resultados y de esta manera brindar una información técnica del procedimiento utilizado.

En cuanto al aspecto ético, resumir que la información que se presenta en este proyecto, contiene datos veraces, se ha respetado la propiedad intelectual que se ha tomado como base y de tesis ya elaboradas que se ven enfocadas en las referencias bibliográficas, así como los derechos de autor y la ética.

La información fue manejada con carácter confidencial y basada en los principales principios éticos que el proyecto lo requiere, en los cuales se fundamentan la confianza y la buena fe de la UNT y la UPN que participan en la investigación.

- ***Principio de autonomía.*** La UNT fue informada sobre el proyecto, enviándose una solicitud para el uso de su laboratorio indicando que son invitados a participar la cual fue suficientemente completa y accesible para su decisión, de si participar o denegarse a ello.
- ***Principio de justicia.*** El estudio está elaborado para brindar conocimientos que aporten información de manera distributiva a los que muestren interés en el estudio.
- ***Principio de beneficencia.*** Mediante este proyecto, se busca un beneficio para las personas y empresa quienes se verían informadas en la disminución de contaminación y aceptando las labores mineras si se ve el trabajo conjunto.
- ***Principio de no maleficencia.*** La información que se está presentando, será utilizada con fines académicos, denegando cualquier fin que sobrevenga en un daño al elaborador de este proyecto; por otro lado, se busca maximizar todos los beneficios posibles de manera proporcional.

### CAPÍTULO III: RESULTADOS

Analizando la Tabla 16, se pudo determinar la influencia de la densidad de corriente eléctrica y área efectiva de electrodos para la remoción de Arsénico (valor máximo de 90.80%)

**Tabla 16:**

*Influencia de las variables en la remoción de As*

Factor 01 (mA/cm <sup>2</sup> )	Factor 02 (cm <sup>2</sup> )	Réplicas(% de Reducción)			
		1	2	3	
10	307.2	16.74	10.77	9.02	36.53
	233.2	25.89	27.21	28.47	81.58
	159.2	44.70	45.88	46.50	137.08
20	307.2	46.33	47.03	48.47	141.82
	233.2	59.67	60.34	58.89	163.58
	159.2	73.92	74.47	72.22	220.61
30	307.2	66.09	68.12	66.80	201.02
	233.2	73.09	74.96	71.67	211.83
	159.2	90.46	90.80	89.95	271.20
<b>Total</b>		496.89	499.57	492.01	<b>1488.47</b>

*Nota:* Datos extraídos de las replicaciones del proceso de electrólisis a las 27 muestras.

**Tabla 17:**

*Análisis de Varianza ANOVA en la Remoción de Arsénico*

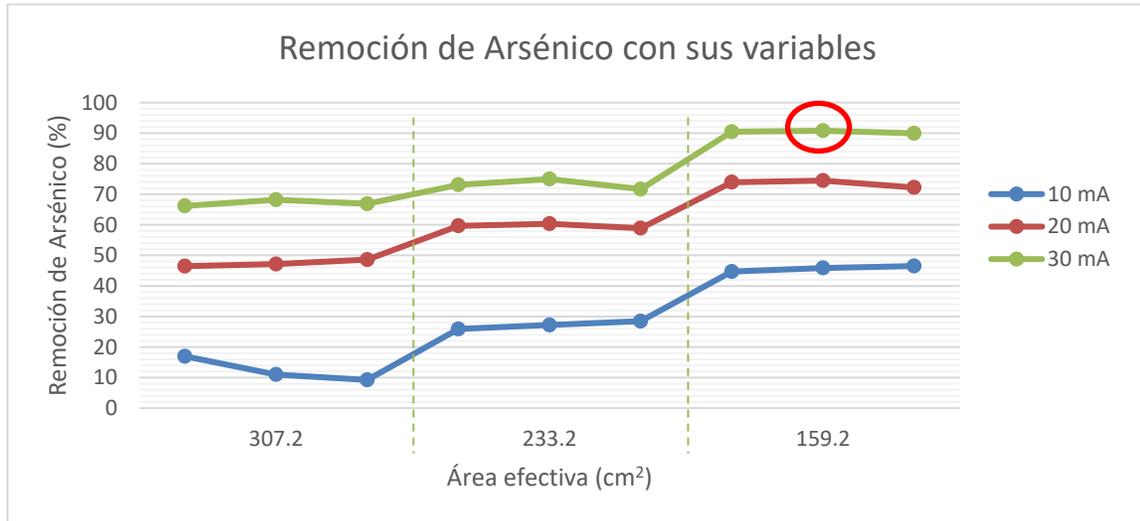
Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad (GL)	Cuadrado Medio	F
V <sub>r</sub>	10937.64	2	5468.82	1899.90
V <sub>c</sub>	3501.031	2	1750.52	607.82
V <sub>i(r/c)</sub>	106.1198	4	26.53	9.2118
V <sub>s</sub>	14544.79			
V <sub>e</sub>	51.79734	18	2.88	
<b>Total</b>	<b>14596.5873</b>	<b>26</b>		

*Nota:* Los datos calculados anteriormente, se colocaron en la Tabla 17, para corroborar los resultados

En la Tabla 16, se puede apreciar claramente que le valor máximo de remoción de arsénico es de un valor de 90.80% y estos valores se pueden corroborar en la Figura 7, donde se precisa la densidad de corriente requerida y las dimensiones del electrodo.

**Figura 7:**

*Remoción de Arsénico con sus variables*



*NOTA:* En la Figura 7, se puede observar que el pico más alto se ubica en el punto del lado derecho donde se está aplicando una densidad de 30 mA sobre 159.2 cm² de área efectiva

Realizando un análisis estadísticos de costos, se puede dar un alcance aproximado de costo del proceso de electrorremediación o también llamada remediación electrocinética. Los costos del procedimiento varían dependiendo de la extensión del terrenoy profundidad del sitio contaminado, del material requerido para los electrodos, de la conductividad del suelo, del fin propuesto para el tratamiento, del tiempo requerido, ya que puede llevar desde unas cuantas semanas hasta un aproximado de entre 6 u 8 meses a tratar y de la parte más importante como es el costo de la energía eléctrica.

**Tabla 18:**

*Análisis de Costos referenciales óptimos para el proceso*

Voltaje aplicado (v)	Amperaje (mA)	Amperaje (A)	Watt (W)	kW	Volúmen (m <sup>3</sup> )	kW/m <sup>3</sup>	Costo (s/ kW)	C.T. (S/m <sup>3</sup> )
14.43	1536	1.536	22.1645	0.0222	0.0008	26.3863	0.43	11.35
24.11	3072	3.072	74.0660	0.0741	0.0006	117.5650	1.88	221.02
29.57	4608	4.608	136.2586	0.1363	0.0004	324.4251	1.88	609.92

**Tabla 19:**

*Variación de Tarifa en Nuevo Gobierno*

Consumo Mensual		Nuevo Gobierno		COVID-19
Tipo de Tarifa	kWh/mes	Aumento (S/)	Variación	
<30kWh	25	0.43	3.5%	11.4%
31 a 100kWh	90	1.88	3.4%	11.4%
>100kWh	150	3.57	3.5%	11.9%

Fuente: Enerkory

NOTA: Basado en tarifas publicadas vigentes a partir del 04 Jul21

**Tabla 20:**

*Resumen de resultados mediante programa Excel*

RESUMEN	307.2 cm2	233.2 cm2	159.2 cm2	Total
<i>10 mA</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	36,5343078	81,5782315	137,07761	255,19015
Promedio	12,1781026	27,1927438	45,6925368	28,3544611
Varianza	16,358045	1,65893995	0,84181146	216,077085
<i>20 mA</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	141,824604	178,90458	220,605352	541,334536
Promedio	47,274868	59,6348601	73,5351174	60,1482818
Varianza	1,19519732	0,52178341	1,36932832	130,219984
<i>30 mA</i>				
Cuenta	3	3	3	9
Suma	201,015022	219,727505	271,201937	691,944465
Promedio	67,0050074	73,2425017	90,4006457	76,8827183
Varianza	1,05319959	2,71812459	0,182239	111,071407
<i>Total</i>				
Cuenta	9	9	9	
Suma	379,373934	480,210317	628,8849	
Promedio	42,1526594	53,3567019	69,8761	
Varianza	583,032966	421,004589	382,907138	

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	10937,6405	2	5468,82023	1900,45993	1,1481E-21	3,55455715
Columnas	3501,03072	2	1750,51536	608,31846	2,9758E-17	3,55455715
Interacción Dentro del grupo	106,11975	4	26,5299375	9,21937111	0,00030972	2,92774417
Total	51,7973374	18	2,87762985			
Total	14596,5883	26				

**Tabla 21:**

*Resumen de resultados mediante programa Minitab® 19.1.1*

### Método

Codificación de factores (-1; 0; +1)

### Información del factor

Factor	Tipo	Niveles	Valores
Densidad	Fijo	3	10; 20; 30
Área	Fijo	3	159,2; 233,2; 307,2

### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Densidad	2	10938,0	5469,02	1897,19	0,000
Área	2	3501,7	1750,83	607,36	0,000
Densidad*Área	4	106,1	26,53	9,20	0,000
Error	18	51,9	2,88		
Total	26	14597,7			

### Medias

Término	Media ajustada	Error estándar de la media
Densidad		
10	28,353	0,566
20	60,149	0,566
30	76,882	0,566
Área		
159,2	69,878	0,566
233,2	53,354	0,566
307,2	42,152	0,566
Densidad*Área		
10 159,2	45,693	0,980
10 233,2	27,190	0,980
10 307,2	12,177	0,980
20 159,2	73,537	0,980
20 233,2	59,633	0,980
20 307,2	47,277	0,980
30 159,2	90,403	0,980
30 233,2	73,240	0,980
30 307,2	67,003	0,980

*Nota:* Se hizo el cálculo directo a través del Programa MINITAB para corroborar datos

**Tabla 22:**

*Análisis de concentraciones en el método ANOVA*

		Dimensiones de electrodo (cm <sup>2</sup> )								
		307.2			233.2			159.2		
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	10	1025.37	1098.85	1120.36	953.47	936.48	920.33	662.34	648.20	640.70
	20	660.98	652.37	634.58	518.88	510.30	528.87	312.37	305.81	332.69
	30	417.55	392.64	408.81	346.22	322.15	364.44	114.30	110.22	120.38
Total (mg/Kg)		1231.5			1286.63			1197.65		

*Nota:* Cantidades obtenidas luego de la electrorremediación en mg/Kg

**Tabla 23:**

*Porcentajes de Remoción de Arsénico*

		Dimensiones de electrodo (cm <sup>2</sup> )								
		307.2			233.2			159.2		
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	10	16.74%	10.77%	9.02%	25.89%	27.21%	28.47%	44.70%	45.88%	46.50%
	20	46.33%	47.03%	48.47%	59.67%	60.34%	58.89%	73.92%	74.47%	72.22%
	30	66.09%	68.12%	66.80%	73.09%	74.96%	77.67%	90.46%	90.80%	89.95%

NOTA: Cantidades obtenidas luego de la electrorremediación en porcentajes

**Tabla 24:**

*Resultados Generales del método ANOVA*

Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad (GL)	Cuadrado Medio	F	F <sub>crítico</sub>
Vr	10937.64	2	5468.82	1899.90	3.55455715
Vc	3501.031	2	1750.52	607.82	3.55455715
Vi(r/c)	106.1198	4	26.53	9.2118	2.92774417
Vs	14544.89				
Ve	51.79734	18	2.88		
<b>Total</b>	<b>14596.5873</b>	<b>26</b>			

Para los datos que se obtuvieron gracias al método de varianza (ANOVA con replicación) y con un nivel de confianza de 95%, se obtuvo lo siguiente:

F<sub>A</sub> : Densidad de corriente eléctrica se tiene que  $F_0 > F_{\text{tabular}} = 1899.90 > 3.55$

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, la variación (aumento) de la densidad de corriente eléctrica influye de manera significativa para la remoción de As del relave minero.

F<sub>B</sub> : Área efectiva de electrodos se tiene que  $F_0 > F_{\text{tabular}} = 607.82 > 3.55$

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, la variación (diminución) de las dimensiones del área efectiva de los electros, influye de manera significativa para la remoción de As del relave minero.

F<sub>AB</sub> : El aumento de la densidad de corriente y la variación del área efectiva de

electrodos, se tiene que  $F_0 > F_{\text{tabular}} = 9.2118 > 2.93$

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, la interacción del incremento de la densidad de corriente eléctrica y la disminución del área efectiva de electros, influye de manera positiva en la remoción de As del relave minero.

Se concluye que como el  $F_0 > F_{\text{crítico}}$ , en  $F_A$ ,  $F_B$  y  $F_{AB}$ , la variación de corriente y la variación de dimensiones del electro si afecta en el porcentaje de remoción de As, pero al realizar la interacción entre ambas variables, llegará un punto en el cual la remoción ya no es eficiente como se muestra en la Tabla 23, y a nivel de laboratorio, se estaría tomando los picos de remoción altos como límite de la capacidad de carga de los electrodos.

**Figura 8:**

*Análisis Granulométrico para Clasificación del Suelo*



*NOTA: En la Figura 8, se puede observar que el pico más alto se ubica en el punto de 32.40% y se le ubica en tipo de Arena media, ya que a sus costados se distribuye entre arena fina y arena gruesa y se corrobora en el ANEXO 6, donde se verifica que la muestra es Arena Limosa o arcillosa tipo A-2-6 (0) bien gradada.*

El límite líquido de un suelo es el contenido de humedad que se expresa en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado plástico y el estado líquido. El valor calculado se obtuvo el valor de 28.75%, el cual indica que el material tiene una gran cantidad de absorción, motivo por el cual, en épocas de lluvia, dicho material escurre hacia las zonas bajas por efecto de la gravedad y provocan gran cantidad de contaminación.

## CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la Tabla 23 se observa que la densidad de corriente óptimo es de  $30\text{mA}/\text{cm}^2$  conjuntamente con un área efectiva de  $159.2\text{ cm}^2$ , sin embargo estos valores son a nivel de laboratorio, que los electrodos están limitados a su capacidad de resistencia a la carga eléctrica y que mientras vas aumentando la carga eléctrica y aumentando el área efectiva de los electrodos, el porcentaje de remoción no es tan eficiente, dicho de otra manera se podría decir que, al aumentar la corriente eléctrica y tomar área efectiva las dimensiones que podría soportar un electrodo con su resistencia máxima, se podría obtener grandes resultados de remoción de material ya sea orgánico e inorgánico.

En la Tabla 23, se determina que la remoción de As obtenido fue del 90.80% pasando de una concentración inicial de  $1197.65\text{ mg}/\text{Kg}$  de contenido de As a una concentración final de  $110.22\text{ mg}/\text{Kg}$ , lo que demuestra el propósito del proceso realizado, pero como el proceso solo está a nivel de laboratorio, este porcentaje puede aumentar si es aplicado a un proceso industrial, lo que daría un gran beneficio para realizar un cierre de mina exitoso, otra forma de aumentar el porcentaje de remoción estaría enfocado al control de pH para mantener los contaminantes en solución y de la misma manera también usar diferentes tipos de electrodos.

La granulometría del relave de la mina artesanal es de un 30% y comparando con la Tabla 1 que nos propone Y.Llique (2014), se encuentra dentro de una granulometría media y generalmente buena, por otra parte, utilizando el método AASHTO en la ANEXO 6, se trata de una Arena Limosa o arcillosa tipo A-2-6 bien gradada.

El procedo de electrorremediación tiene un gran potencial para descontaminar cualquier variedad de suelos ya sea que contenga compuestos orgánicos e inorgánicos. Aunque en muchos

estudios de laboratorio como de campo se han obtenido resultados bastante favorables, cabe resaltar que aún es necesario avanzar en el análisis de este proceso para poder desarrollar a futuro mejores técnicas híbridas que aprovechen las capacidades de la electrorremediación y obtener altas eficiencias de remoción en campo.

Una vez efectuado el proceso de electrorremediación, el suelo pierde ligeramente su fertilidad, debido a que se extraen los iones como  $\text{NO}_3^{-1}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{PO}_4^{-2}$ ,  $\text{NH}_4^{+1}$  por lo que dicho suelo debe pasar por procesos de tratamiento de fertilización para poder ser utilizado como suelo para cultivo; por otra parte, se debe evaluar la integridad estructural del suelo, ya que algunas arcillas cambian su carga debido a la variación de pH, producto de la hidrólisis del agua.

Sobre el costo que se está tomando para la electrorremediación, cabe resaltar que es un gasto mínimo en comparación a los problemas medioambientales que se generan por la contaminación de relaves mineros, ya que éste es el factor fundamental de grandes pérdidas económicas e incluso de vidas, dando una pequeña inversión mas de lo estipulado en sus estudios de cierre de minas, se puede utilizar el método de electrorremediación para ir generando ingresos y permisos pacíficos de comunidades que van siendo afectadas y poder laborar eficientemente y sin problema alguno.

Las implicancias tomadas en cuenta para la presente investigación, pueden agruparse de la siguiente manera:

- a. Informativas, dado que no existe muchas investigaciones sobre el tema, esta investigación nos permite conocer de manera real los efectos, en términos económicos a nivel de laboratorio y que se puede utilizar de información base para futuras investigaciones.

- b. Académicas, ya que permite realizar la recolección y procesamiento de información sobre la electrorremediación de relaves mineros; estableciendo una referencia a tener en cuenta para futuras investigaciones.
- c. Implicancias prácticas para las diferentes entidades, los resultados de la investigación permiten tener un porcentaje estimado en cuanto a referencias de costos sobre la implementación del proceso para pequeñas mineras.

Junto con las implicancias halladas en la investigación, también se presentaron algunas limitaciones que no se pudieron evitar como el acceso a la información ya que no se cuenta con muchos estudios relacionados con la electrorremediación aplicada a relaves mineros, acceso a la localidad ya que los eventos climatológicos interrumpen el muestreo, se limita la información, ya que por ser mineras artesanales se rehusaban a compartir resultados e información contenida y al no tener acceso a un laboratorio especializado, el tiempo para los resultados se vieron alargados.

En los análisis de a tabla de resultados que se mostraron con anterioridad, se lograron obtener los resultados para los objetivos trazados:

- Se determinó que al aplicar un aumento de corriente eléctrica sobre un área efectiva, e ir variando las dimensiones de estos electrodos, influenciaría en gran medida para determinar la cantidad de corriente óptima y el área efectiva de electrodos óptimos a utilizar en el proceso de electrorremediación a nivel de laboratorio.
- Se determinó una densidad de corriente óptima de  $30 \text{ mA/cm}^2$  para una disminución del 90.80% de concentración de As contenido en el relave minero.
- Se determinó que las dimensiones del electrodo, al aplicarse una densidad de  $30 \text{ mA/cm}^2$ , es de  $159.2 \text{ cm}^2$  para poder remover la mayor cantidad de As.

- Se determinó la remoción de As de una concentración inicial de 1197.64 mg/Kg a una concentración final de 110.22 mg/Kg, demostrándose de esta manera, que el efecto de variación de la densidad de corriente eléctrica administrada y la variación de área efectiva del electrodo, es positivo en cuanto a la disminución de porcentaje de As.
- El costo aproximado para este proceso fue de 221.02 \$/m<sup>3</sup>, ya que es el costo más favorable por tratarse de una mediana minería y como presentan los autores De La Rosa , Teulli y Ramírez Islas, 2007, los costos estarían estimados en un valor de 50 \$/m<sup>3</sup>, lo que se ajustaría con los datos estadísticos tomados, por lo que los valores óptimos a utilizar a nivel de laboratorio fueron de un área efectiva de 233.2cm<sup>2</sup> y 30 mA/cm<sup>2</sup> .
- Se usó el Métodos ASSHTO para la clasificación de suelos como un apoyo a futuras investigaciones para la construcción, ya que este método relaciona la granulometría, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad y que es un método utilizado para Obra Viales.
- Se analizó el procedimiento de electrorremediación y es favorable ya que removió en gran parte la toxicidad del realve minero, este procedimiento tuvo grandes resultados, por lo que es una una alternativa óptima para realizar un cierre de minas exitoso y recuperar parte de estos suelos para ser utilizados en otras áreas ya sean para cultivo ( con un tratamiento del suelo) o para construcción poder disminuir los índices de conflictos sociales que se están tornando más agrestes en nuestra región.

## REFERENCIAS

- Alcalino Concha, G. (2012). *"Análisis y comparación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales"*. Santiago de Chile.
- Al-Hamdan Ashraf, Z., & R. Reddy, K. (Marzo de 2008). *Transient behavior of heavy metals in soils during electrokinetic remediation*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653507014440?via%3Dihub>
- Castillo, L., Satalaya, C., Peredes, Ú., Encalada, M., Zamora, J., & Cuadros, M. (2021). "Pasivos Ambientales Mineros en el Perú: Resultados de la auditoría de desempeño sobre gobernanza para el manejo integral de los PAM". Documento de Política en Control Gubernamental (Working Paper Series).
- Cruzado, E., & Bravo, F. (2010). *"Impacto de los Relaves Minero en el Perú"*. Lima: Departamento de Investigación y Documentación Parlamentaria.
- De La Rosa Pérez, D. A., Teulli, M. M., & Ramírez Islas, M. E. (2007). "Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo".
- De la Rosa Pérez, D. A., Teutli León, M. M., & Ramírez Islas, M. E. (Agosto de 2007). "Electrorremediación de Suelos Contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo". Puebla, México.
- Escobar Misahuamán, A. J., & Ocas Izquierdo, S. M. (2016). *"Electrorremediación en función de la densidad de corriente y la concentración de ácido acético, como alternativa para la disminución de plomo en relaves mineros-mina Paredones, Cajamarca, 2016"*. Cajamarca, Perú.
- García Hernández, L., Vargas Ramírez, M., & Reyes Cruz, V. (2011). *"Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de residuos mineros, utilizando agua y ácido acético como electrolitos"*. México.
- García Hernández, L., Vargas Ramírez, M., & Reyes Cruz, V. (26 de Febrero de 2011). "Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de residuos mineros, utilizando agua y ácido acético como electrolitos". Hidalgo, México: CP 42128.
- Grufides. (2015). *Informe PAM*. Cajamarca: (RM102-2015-MEM/DM).
- Juarez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). En *Mecánica de Suelos - Fundamentos de la Mecánica de Suelos* (pág. 644). México: LIMUSA.
- Juarez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). En *Mecánica de Suelos-Fundamentos de la Mecánica de Suelos* (pág. 644). México: LIMUSA.

- Llique, Y. (2014). *"Comparación de la resistencia a compresión de concreto común y otros concretos usando relaves mineros en proporción del 25% y 50% de la dosificación del agregado fino"*. Cajamarca, Perú.
- López, R., & López, V. (2013). *"Remediación electrocinética de suelos de baja permeabilidad contaminados con compuestos orgánicos hidrófobos"*. Ciudad Real.
- Morales, J. C. (1972). *CONSIDERACIONES TECNICO-ECONOMICAS EN LA EXPLOTACION DE LAS MINAS DE ALGAMARCA*. Lima, Perú: UNI.
- Parra, G. A. (2019). *"Evaluación de la Influencia de distintos niveles de corriente eléctrica en la técnica de electrorremediación para relaves mineros contaminados por Pb y Hg provenientes de Ponce Enríquez, Azuay"*. Riobamba-Ecuador.
- Pérez, D. (Agosto de 2007). *Google*. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v23n3/v23n3a3.pdf>
- Piuzzi, F. (2015). *"Encuentro Científico Internacional 2015 de verano"*. Lima, Perú.
- Quijada, M. S. (2015). *"Los Pasivos Ambientales: Diagnóstico y Propuestas"*. Pasco, Cajamarca y Puno.
- Sánchez, S. (14 de FEBRERO de 2017). *"La minería convierte a Cajamarca en el primer lugar con más pasivos ambientales en el Perú"*. (GRUFIDES, Entrevistador)
- Senargeomin. (2005). *SENARGEOMIN*. Obtenido de <http://relaves.comunicaciones@sernageomin.cl#home>
- Virkutyle, J., Sillanpää, M., & Latostenmaa, P. (2002). *"Electrokinetic soil remediation – Critical overview (Remediación electrocinética del suelo: descripción crítica.)"*. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 289, 97-121.
- Volke, V. (Mayo de 2005). *Google*. Obtenido de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/B1E761B1E2F24A5C05257D490070F94F/\\$FILE/SuelosContaminadosPorMetalesYMetaloides.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/B1E761B1E2F24A5C05257D490070F94F/$FILE/SuelosContaminadosPorMetalesYMetaloides.pdf)

## ANEXOS

### ANEXO 1: Cálculo de valores ANOVA

Para obtener los resultados ANOVA, se procederá a efectuar algunos cálculos utilizando los datos de la matriz de análisis de la Tabla 13 cuyas variables se representan como sigue:

- Hallando la Variación Total (V):

$$V = \left( \sum M_i^2 \right) - \frac{T^2}{\text{número de muestras}}$$

$$V = (16.74^2 + 10.77^2 + \dots + 89.95^2) - \frac{1488.47^2}{27}$$

$$V = 14596.59$$

- Hallando la Variación Subtotal (Vs):

$$V_s = \left( \sum \frac{S_i^2}{\text{número de réplicas}} \right) - \frac{T^2}{\text{número de muestras}}$$

$$V_s = \left( \frac{36.53^2}{3} + \frac{81.58^2}{3} + \dots + \frac{271.20^2}{3} \right) - \frac{1488.47^2}{27}$$

$$V_s = 14248.18$$

- Hallando la Variación entre renglones (Vr):

$$V_r = \left( \sum \frac{G_i^2}{\text{número de datos por grupo}} \right) - \frac{T^2}{\text{número de muestras}}$$

$$V_r = \left( \frac{(36.53 + 81.58 + 137.08)^2}{9} + \dots + \frac{(201.02 + 211.83 + 271.20)^2}{9} \right) - \frac{1488.47^2}{27}$$

$$V_r = 10937.64$$

- Hallando la Variación entre columnas ( $V_c$ ):

$$V_c = \left( \sum \frac{\sum S_i^2}{\text{número de datos de muestra por filas}} \right) - \frac{T^2}{\text{número de muestras}}$$

$$V_c = \left( \frac{(36.53 + 141.82 + 201.02)^2}{9} + \dots + \frac{(137.08 + 220.61 + 271.2)^2}{9} \right) - \frac{1488.47^2}{27}$$

$$V_c = 3501.031$$

- Hallando la Variación de Interacción entre renglones y columnas ( $V_{i(r/c)}$ ):

$$V_{i(r/c)} = V_s - (V_r + V_c)$$

$$V_{i(r/c)} = 14544.79 - (10937.64 + 3501.031)$$

$$V_{i(r/c)} = 106.1198$$

- Hallando la Variación residual o por error ( $V_e$ ):

$$V_e = V - (V_r + V_c + V_i)$$

$$V_e = 14596.59 - (10937.64 + 3501.031 + 106.1198)$$

$$V_e = 51.7973$$

**Tabla 5. VALORES F DE LA DISTRIBUCIÓN F DE FISHER**

1 -  $\alpha = 0.95$

$v_1$  = grados de libertad del numerador

1 -  $\alpha = P ( F \leq f_{\alpha, v_1, v_2} )$

$v_2$  = grados de libertad del denominador

$v_2 \backslash v_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	161.446	199.499	215.707	224.583	230.160	233.988	236.767	238.884	240.543	241.882	242.981	243.905	244.690	245.363	245.949	246.466	246.917	247.324	247.688	248.016
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.329	19.353	19.371	19.385	19.396	19.405	19.412	19.419	19.424	19.429	19.433	19.437	19.440	19.443	19.446
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.785	8.763	8.745	8.729	8.715	8.703	8.692	8.683	8.675	8.667	8.660
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964	5.936	5.912	5.891	5.873	5.858	5.844	5.832	5.821	5.811	5.803
5	6.808	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735	4.704	4.678	4.655	4.636	4.619	4.604	4.590	4.579	4.568	4.558
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060	4.027	4.000	3.976	3.956	3.938	3.922	3.908	3.896	3.884	3.874
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637	3.603	3.575	3.550	3.529	3.511	3.494	3.480	3.467	3.455	3.445
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.688	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347	3.313	3.284	3.259	3.237	3.218	3.202	3.187	3.173	3.161	3.150
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137	3.102	3.073	3.048	3.025	3.006	2.989	2.974	2.960	2.948	2.936
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978	2.943	2.913	2.887	2.865	2.845	2.828	2.812	2.798	2.785	2.774
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854	2.818	2.788	2.761	2.739	2.719	2.701	2.685	2.671	2.658	2.646
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753	2.717	2.687	2.660	2.637	2.617	2.599	2.583	2.568	2.555	2.544
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671	2.635	2.604	2.577	2.554	2.533	2.515	2.499	2.484	2.471	2.459
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602	2.565	2.534	2.507	2.484	2.463	2.445	2.428	2.413	2.400	2.388
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544	2.507	2.475	2.448	2.424	2.403	2.385	2.368	2.353	2.340	2.328
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494	2.456	2.425	2.397	2.373	2.352	2.333	2.317	2.302	2.288	2.276
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450	2.413	2.381	2.353	2.329	2.308	2.289	2.272	2.257	2.243	2.230
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.575	2.510	2.456	2.412	2.374	2.342	2.314	2.290	2.269	2.250	2.233	2.217	2.203	2.191
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.542	2.477	2.423	2.378	2.340	2.308	2.280	2.256	2.234	2.215	2.198	2.182	2.168	2.155
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348	2.310	2.278	2.250	2.225	2.203	2.184	2.167	2.151	2.137	2.124
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321	2.283	2.250	2.222	2.197	2.176	2.156	2.139	2.123	2.109	2.096
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297	2.259	2.226	2.198	2.173	2.151	2.131	2.114	2.098	2.084	2.071
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275	2.236	2.204	2.175	2.150	2.128	2.109	2.091	2.075	2.061	2.048
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255	2.216	2.183	2.155	2.130	2.108	2.088	2.070	2.054	2.040	2.027
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236	2.198	2.165	2.136	2.111	2.089	2.069	2.051	2.035	2.021	2.007
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220	2.181	2.148	2.119	2.094	2.072	2.052	2.034	2.018	2.003	1.990
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204	2.166	2.132	2.103	2.078	2.056	2.036	2.018	2.002	1.987	1.974
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190	2.151	2.118	2.089	2.064	2.041	2.021	2.003	1.987	1.972	1.959
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177	2.138	2.104	2.075	2.050	2.027	2.007	1.989	1.973	1.958	1.945
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165	2.126	2.092	2.063	2.037	2.015	1.995	1.976	1.960	1.945	1.932
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077	2.038	2.003	1.974	1.948	1.924	1.904	1.885	1.868	1.853	1.839
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026	1.986	1.952	1.921	1.895	1.871	1.850	1.831	1.814	1.798	1.784
60	4.001	3.150	2.758	2.525	2.368	2.254	2.167	2.097	2.040	1.993	1.952	1.917	1.887	1.860	1.836	1.815	1.796	1.778	1.763	1.748
70	3.978	3.128	2.736	2.503	2.346	2.231	2.143	2.074	2.017	1.969	1.928	1.893	1.863	1.836	1.812	1.790	1.771	1.753	1.737	1.722
80	3.960	3.111	2.719	2.486	2.329	2.214	2.126	2.056	1.999	1.951	1.910	1.875	1.845	1.817	1.793	1.772	1.752	1.734	1.718	1.703
90	3.947	3.098	2.706	2.473	2.316	2.201	2.113	2.043	1.986	1.938	1.897	1.861	1.830	1.803	1.779	1.757	1.737	1.720	1.703	1.688
100	3.936	3.087	2.696	2.463	2.305	2.191	2.103	2.032	1.975	1.927	1.886	1.850	1.819	1.792	1.768	1.746	1.726	1.708	1.691	1.676
200	3.888	3.041	2.650	2.417	2.259	2.144	2.056	1.985	1.927	1.878	1.837	1.801	1.769	1.742	1.717	1.694	1.674	1.656	1.639	1.623
500	3.860	3.014	2.623	2.390	2.232	2.117	2.028	1.957	1.899	1.850	1.808	1.772	1.740	1.712	1.686	1.664	1.643	1.625	1.607	1.592
1000	3.851	3.005	2.614	2.381	2.223	2.108	2.019	1.948	1.889	1.840	1.798	1.762	1.730	1.702	1.676	1.654	1.633	1.614	1.597	1.581

Elaborada por Irene Patricia Valdez y Alfaro.

**ANEXO 3: Reporte de Análisis de Relave Minero**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO**

Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

Trujillo, 09 de Noviembre del 2020

**REPORTE DE ANÁLISIS DE RELAVE MINERO DE LA ZONA DE ALGAMARCA**

**Solicitantes:** Caballero Rodriguez, Aldo Edson.

**DNI:** 44151197

**Investigación:** "Efecto de la densidad de corriente eléctrica y área de los electrodos sobre la remoción de cianuro libre en el proceso de electrorremediación de los relaves mineros de zona de Algamarca, Cajamarca - 2020."

**Muestras:** Puestos en laboratorio (30 muestras de relave minero)

Valores de

Densidad de Corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	Arsénico (mg/Kg)		
	A1	A2	A3
0	1231.5		
	1286.63		
	1197.65		
10	1025.37	953.47	662.34
	1098.85	936.48	648.2
	1120.36	920.33	640.7
20	660.98	518.88	312.37
	652.37	510.3	305.81
	634.58	528.87	332.69
30	417.55	346.22	114.3
	392.64	322.15	110.22
	408.81	3.64.44	120.38

**LEYENDA**

**A1:** Área efectiva de electrodo mayor

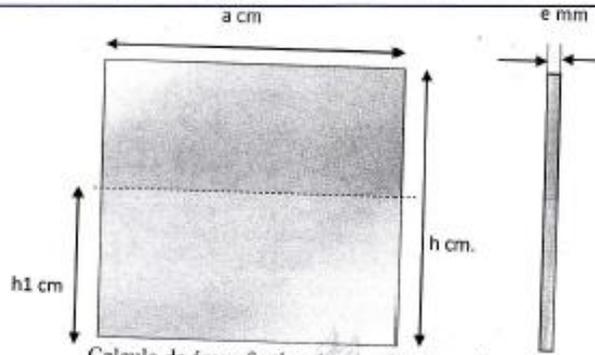
**A2:** Área efectiva de electrodo media

**A3:** Área efectiva de electrodo media

**ANEXO 4: Dimensiones de los electrodos a utilizar**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento Académico de Ingeniería de Materiales



Calculo de área efectiva de un solo electrodo

$$\text{Área efectiva} = 2 \cdot ((h_1 + a) + (h_1 + e) + a + e) \text{ cm}^2$$

Donde:

- *a*: ancho de electrodo (mm). Valores de 10, 7.5 y 5 cm
- *h<sub>1</sub>*: altura del agua y relave en celda (mm). 7 cm
- *e*: espesor de electrodo (mm). 0.4 cm

∴ se usan 2 electrodos entonces el area total es el doble **2 x Área efectiva**

Áreas (cm <sup>2</sup> )	Área 1 electrodo (cm <sup>2</sup> )	Área 2 electrodos (cm <sup>2</sup> )
A1	153.6	307.2
A2	116.6	233.2
A3	79.6	159.2

LABORATORIO: Materiales Compuestos



*ANEXO 5: Permiso de Traslado de Relave Minero*



ANEXO 6: Sistema de Clasificación AASHTO

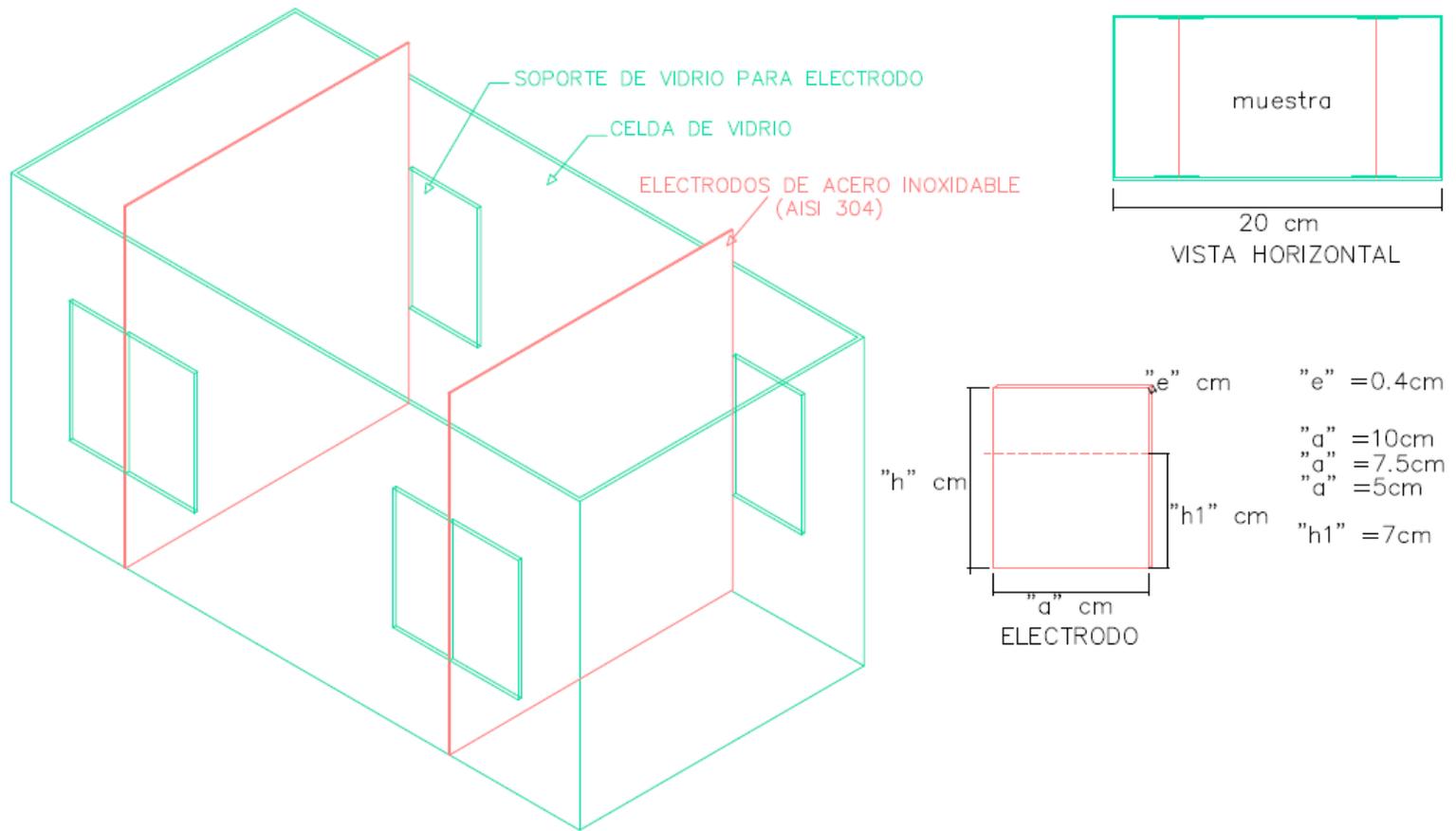
Clasificación General		Materiales granulares 35% o menos pasan la malla N° 200						Materiales limosos y arcillosos más del 35% pasa la malla N° 200					
		A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
Grupos		A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
	Análisis por mallas % que pasa la malla N°	10	50 max.										
40		30 max.	50 max.	51 max.									
200		15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.	
Característica de la fracción que pasa la malla 40	LL				40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.	41 min.
	LP	6 max.	6 max.	NP	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.	11 min.
Índice de grupo (IG)		0	0	0	0	0	4 max.	4 max.	8 max.	12 max.	16 max.	20 max.	20 max.
Tipo usual de materiales constituyentes		Fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Arena limosa o arcillosa, arena			Suelos limosos		Suelos arcillosos			
Comportamiento general como subbase		EXCELENTE A BUENO						ACEPTABLE A MALO					

NOTA: El índice de plasticidad de los suelos A-7-5 es igual o menor que su límite líquido 30, el de los A-7-6 mayor que su límite líquido se halla indicada la relación entre LL e IP de los materiales finos. Dichos de otro modo, el grupo A-7 es subdividido en A-7-5 ó A-7-6, dependiendo del Límite Plástico (Lp)

- Si el  $L_p \geq 30$ , la clasificación es A-7-6
- Si el  $L_p < 30$ , la clasificación es A-7-5

Fuente: (Juarez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

**ANEXO 7: Diseño de Celda**





**Figura 9:** *Ubicación de Relave*



**Figura 10:** *Daños ambientales*



**Figura 11:** Separación de material no usado



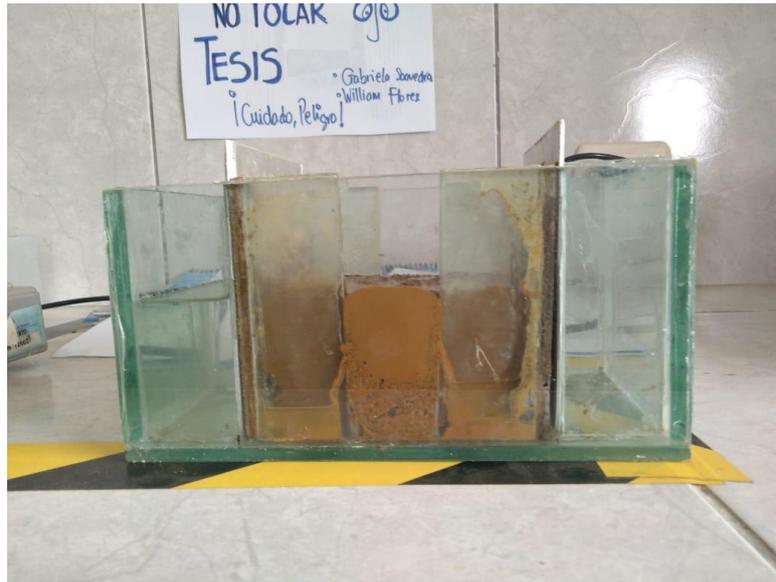
**Figura 12:** Electrodo de Acero



**Figura 13:** Armado de Celda



**Figura 14:** Preparación de muestra para análisis



**Figura 15:** Celda completa



**Figura 16:** Proceso de electrorremediación en proceso



**Figura 17:** *Relave seccionado de la celda para análisis*



**Figura 18:** *Análisis Granulométrico*