

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**ESCUELA DE POSGRADO**



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS  
AGRARIAS**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**TESIS:**

**CONCENTRACIÓN DE HIERRO Y pH, SEGÚN LA DENSIDAD DE  
CORRIENTE Y TIEMPO EN EL TRATAMIENTO POR ELECTRÓLISIS DE  
UN DRENAJE ÁCIDO DE MINA, HUALGAYOC, CAJAMARCA, 2022**

Para optar el Grado Académico de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

Presentada por:

**SARAHÍ ALCIRA CAMPOS FERNÁNDEZ**

Asesor:

**Mg. GARY CHRISTIAM FARFÁN CHILICAUS**

Cajamarca, Perú

2024

**CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD**

1. Investigador:  
Sarahí Alcira Campos Fernández  
DNI: 47195484  
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias. Programa de Maestría en Ciencias. Mención: Gestión Ambiental.
2. Asesor: Mg. Gary Christiam Farfán Chilicaus
3. Grado académico o título profesional  
 Bachiller                       Título profesional                       Segunda especialidad  
 Maestro                       Doctor
4. Tipo de Investigación:  
 Tesis                       Trabajo de investigación                       Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:  
**Concentración de hierro y Ph, según la densidad de corriente y tiempo en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina, Hualgayoc, Cajamarca, 2022**
6. Fecha de evaluación: **03/12/2024**
7. Software antiplagio:             TURNITIN                       URKUND (OURIGINAL) (\*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: **24%**
9. Código Documento: **3117:412245219**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:  
 **APROBADO**             PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **03/12/2024**

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>	
 Mg. GARY CHRISTIAM FARFÁN CHILICAUS DNI: 41603429 (Asesor)	 Dr. Juan Edmundo Chávez Rabanal DNI: 26610779 (Director de Unidad)

\* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT © 2024 by  
**SARAHÍ ALCIRA CAMPOS FERNÁNDEZ**  
Todos los derechos reservados



**Universidad Nacional de Cajamarca**  
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDU/CD

**Escuela de Posgrado**  
CAJAMARCA - PERU



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

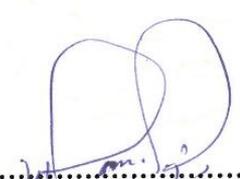
**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

Siendo las <sup>16:00</sup> horas, del día 13 de noviembre del dos mil veinticuatro, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por la **Dr. WILFREDO POMA ROJAS** **Dr. AUGUSTO HUGO MOSQUEIRA ESTRAYER**, **Dr. JIMY FRANK OBLITAS CRUZ** y en calidad de Asesor el **Mg. GARY CHISTIAM FARFÁN CHILICAUS**, actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestría de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada **CONCENTRACIÓN DE HIERRO Y PH, SEGÚN LA DENSIDAD DE CORRIENTE Y TIEMPO EN EL TRATAMIENTO POR ELECTRÓLISIS DE UN DRENAJE ÁCIDO DE MINA, HUALGAYOC, CAJAMARCA, 2022**, presentada por la **Bachiller en Ingeniería Civil Ambiental, SARAHÍ ALCIRA CAMPOS FERNÁNDEZ**.

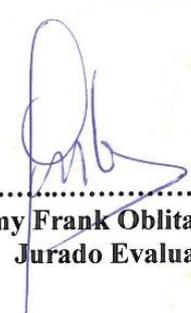
Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó <sup>Aprobar</sup> con la calificación de <sup>dieciséis (16)</sup> la mencionada Tesis; en tal virtud, la **Bachiller en Ingeniería Civil Ambiental, SARAHÍ ALCIRA CAMPOS FERNÁNDEZ**, está apta para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias con Mención en **GESTIÓN AMBIENTAL**.

Siendo las <sup>17:10</sup> horas del mismo día, se dio por concluido el acto.

  
.....  
**Mg. Gary Christiam Farfán Chilicaus**  
Asesor

  
.....  
**Dr. Wilfredo Poma Rojas**  
Jurado Evaluador

  
.....  
**Dr. Augusto Hugo Mosqueira Estrayer**  
Jurado Evaluador

  
.....  
**Dr. Jimy Frank Oblitas Cruz**  
Jurado Evaluador

A:

Dios, por fortalecer mi espíritu y mantener a mi familia unida

Mis padres y hermano quienes con su ejemplo y amor incondicional a pesar de estar lejos me  
incentivan para poder terminar mi tesis

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Mg. Gary C. Farfán Chilicaus por su dedicación y paciencia. Gracias por su guía y todos sus consejos.

A la plana docente de la Escuela de Posgrado de la Sección en Gestión Ambiental y Recursos Naturales con Mención en Gestión Ambiental, a todos Ustedes les quiero agradecer por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí. Gracias a ustedes por sus conocimientos brindados los cuales ahora no son solo conceptos, sino que se ven reflejados en una investigación de alto impacto social; así como por sus continuos consejos que fueron el pilar para continuar en el sendero de la investigación y no desfallecer en el intento.

## INDICE

DICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
INDICE.....	vii
INDICE DE TABLAS .....	xi
INDICE DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIACIONES.....	xv
RESUMEN .....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO I .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO II.....	11
MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Bases teóricas .....	11
2.1.1. Drenaje ácido de mina (DAM) .....	11
2.1.2. Generación de las aguas ácidas de mina .....	12
2.1.3. Etapas de formación de las aguas ácidas .....	13
2.1.4. Composición de las aguas ácidas.....	15
2.1.5. Electrólisis.....	16
2.1.6. Metales pesados .....	18
2.1.7. Contaminación por metales pesados.....	18

2.2.	Antecedentes de la investigación .....	19
2.3.	Definición de términos básicos .....	23
CAPÍTULO III.....		25
MATERIALES Y MÉTODOS .....		25
3.1.	Localización del estudio.....	25
3.2.	Unidad de análisis, población y muestra (diseño estadístico).....	25
3.2.1.	Unidad de análisis .....	25
3.2.2.	Población.....	25
3.2.3.	Muestra .....	25
3.3.	Instrumentos y equipos.....	28
3.3.1.	Balanza analítica Sartorius.....	28
3.3.2.	Medidor de pH WTW .....	28
3.3.3.	Multitéster digital.....	28
3.3.4.	Conductímetro digital .....	28
3.3.5.	Termómetro digital .....	29
3.3.6.	Navegador GPS (sistema de posicionamiento global) de mano .....	29
3.3.7.	Vernier digital .....	29
3.3.8.	Fuente de poder regulable.....	29
3.3.9.	Agitador magnético.....	29
3.4.	Materiales y reactivos.....	29
3.5.	Procedimiento y análisis de datos (Análisis de varianza) .....	30

3.5.1.	Preparación de los electrodos.....	30
3.5.2.	Construcción del equipo .....	31
3.5.3.	Preparación y caracterización de la solución .....	32
3.5.4.	Circuito experimental para electrólisis .....	33
3.5.5.	Aleatorización y toma de muestras .....	34
3.5.6.	Caracterización final de la solución en estudio.....	34
3.5.7.	Análisis de los resultados obtenidos .....	34
CAPÍTULO IV.....		38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		38
4.1.	Remoción de hierro .....	38
4.2.	Incremento de pH en la solución drenaje ácido de mina (DAM).....	43
4.3.	Análisis de varianza .....	46
CAPÍTULO V.....		51
CONCLUSIONES .....		51
CAPÍTULO VI.....		53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		53
CAPÍTULO VII .....		58
APÉNDICE.....		58
7.1.	Remoción de hierro .....	58
7.2.	Incremento de pH en la solución drenaje ácido de mina (DAM).....	60
7.3.	Análisis de varianza .....	61

7.3.1. Análisis de varianza mediante cálculos matemáticos .....	61
7.3.2. Análisis de varianza mediante el software Excel.....	63
7.4. Análisis de efecto .....	67
7.4.1. Para el hierro .....	67
7.4.2. Para el pH.....	69
7.4.3. Interpretación de resultados .....	71
CAPÍTULO VIII.....	72
ANEXO 1 - REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	72
ANEXO 2 – CERTIFICADOS DE LABORATORIO .....	80
ANEXO 3 – VALIDACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS .....	103

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Arreglo de los tratamientos en estudio.....	27
<b>Tabla 2</b> Tabla matriz para las concentraciones de Fe después del tratamiento.....	27
<b>Tabla 3</b> Tabla matriz para los pH obtenidos después del tratamiento .....	28
<b>Tabla 4</b> Condiciones de operación para la celda de electrólisis.....	32
<b>Tabla 5</b> Parámetros iniciales de la muestra en estudio.....	33
<b>Tabla 6</b> Matriz de operacionalización de variables.....	36
<b>Tabla 7</b> Matriz de consistencia.....	37
<b>Tabla 8</b> Reporte de las concentraciones promedio de Fe, en ppm, después del tratamiento ..	38
<b>Tabla 9</b> Reporte de la reducción promedio de Fe, en %, después del tratamiento .....	38
<b>Tabla 10</b> Reporte de las pH promedios de la solución drenaje ácido de mina (DAM), después del tratamiento .....	44
<b>Tabla 11</b> Desviación estándar para los resultados encontrados de la concentración de hierro afectados por la densidad de corriente y el tiempo de residencia .....	47
<b>Tabla 12</b> Desviación estándar para los resultados encontrados del pH afectados por la densidad de corriente y el tiempo de residencia .....	48
<b>Tabla 13</b> Análisis de varianza para los resultados encontrados de la concentración de hierro afectados por la densidad de corriente y el tiempo de residencia .....	49
<b>Tabla 14</b> Análisis de varianza para los resultados encontrados del pH afectados por la densidad de corriente y el tiempo de residencia .....	49
<b>Tabla 15</b> Reporte por triplicado de las concentraciones promedio de Fe, en ppm, después del tratamiento .....	58
<b>Tabla 16</b> Reporte por triplicado de pH promedio, después del tratamiento .....	61

<b>Tabla 17</b> Tabla resumen del análisis de varianza para los resultados encontrados del pH afectados por la densidad de corriente y el pH .....	63
<b>Tabla 18</b> Datos para la distribución $F_{0.05, v_1, v_2}$ .....	66
<b>Tabla 19</b> Análisis de Varianza para Fe (ppm).....	67
<b>Tabla 20</b> Análisis de Varianza para el pH (ppm).....	69

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Etapas en la formación de aguas ácidas .....	14
<b>Figura 2</b> Esquema de una célula electrolítica .....	17
<b>Figura 3</b> Ubicación de la zona de estudio .....	26
<b>Figura 4</b> Características de los electrodos de acero .....	31
<b>Figura 5</b> Esquema de la instalación de la celda de electrólisis .....	32
<b>Figura 6</b> Instalación del circuito experimental .....	34
<b>Figura 7</b> Procedimiento experimental.....	35
<b>Figura 8</b> Reporte de las concentraciones de Fe, en ppm = mg/l, después del tratamiento .....	39
<b>Figura 9</b> Reporte de las reducciones de Fe, en %, después del tratamiento .....	39
<b>Figura 10</b> Gráfico de superficie de las concentraciones de Fe, en ppm = mg/l, después del tratamiento .....	40
<b>Figura 11</b> Celda electrolítica.....	42
<b>Figura 12</b> Reporte de resultados de pH promedio después del tratamiento.....	44
<b>Figura 13</b> Gráfico de superficie de los valores de pH, después del tratamiento.....	45
<b>Figura 14</b> Pasos para activar el análisis de datos en el Excel .....	64
<b>Figura 15</b> Pasos para activar el análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo .....	65
<b>Figura 16</b> Pasos para realizar el análisis de varianza.....	65
<b>Figura 17</b> Relación del efecto estandarizado de las variables para el hierro .....	67
<b>Figura 18</b> Relación del efecto estandarizado de las variables para el pH.....	69
<b>Figura 19</b> Inspección de la zona para extracción de muestras .....	72
<b>Figura 20</b> Extracción de muestras de drenaje ácido de mina (DAM).....	72

<b>Figura 21</b> Colocación de muestras drenaje ácido de mina (DAM) en recipientes esterilizados .....	73
<b>Figura 22</b> Muestras DAM en recipientes esterilizados puestas en laboratorio.....	73
<b>Figura 23</b> Instrumental de laboratorio usado para la corrida experimental: probeta, matraz, pipeta, bomba de succión, varillas de agitación, vaso de precipitación, fiola y probeta .....	74
<b>Figura 24</b> Materiales usados para la corrida experimental: recipientes estériles, vernier, lijas .....	74
<b>Figura 25</b> Electrodo de acero inoxidable.....	75
<b>Figura 26</b> Equipo usado en la corrida experimental: multitéster .....	75
<b>Figura 27</b> Equipo usado en la corrida experimental: agitador termomagnético .....	76
<b>Figura 28</b> Equipo usado en la corrida experimental: pH-metro.....	76
<b>Figura 29</b> Equipo usado en la corrida experimental: fuente de poder .....	77
<b>Figura 30</b> Toma de medidas del electrodo de acero inoxidable .....	77
<b>Figura 31</b> Lijado y lavado de acero inoxidable.....	78
<b>Figura 32</b> Instalación del circuito experimental .....	78
<b>Figura 33</b> Visualización del ánodo y cátodo después de la corrida experimental .....	79
<b>Figura 34</b> Visualización cátodo después de la corrida experimental.....	79

## LISTA DE ABREVIACIONES

Al:	Aluminio
ANOVA: (en inglés)	Análisis de Varianza
Arsénico:	As
Azufre:	S
CaCO <sub>3</sub> :	Carbonato de Calcio
Cd:	Cadmio
cm <sup>2</sup> :	Centímetros al cuadrado
Co:	Cobalto
CuFeS <sub>2</sub> :	Calcopirita
CuS:	Covelita
Cr:	Cromo
DAM:	Drenajes Acido de Mina
Ed.:	Editorial
Edic.:	Edición
Et al:	(abreviatura latina) y otros o y los demás
Fe:	Hierro
Fe <sup>2+</sup> :	Catión divalente de hierro
GPS: (en inglés)	Sistema de Posicionamiento Global
H <sub>2</sub> O:	Agua
ISO: (en inglés)	Organización Internacional de Estandarización
mA:	Miliamperios
Mn:	Manganeso
MINAM:	Ministerio del Ambiente

MINEM:	Ministerio de Energía y Minas
NaOH:	Hidróxido de sodio
Nº:	Número
Ni:	Níquel
O <sub>2</sub> :	Oxígeno
Oro:	Au
Plata:	Ag
pH:	Potencial de Hidrógeno
Pb:	Plomo
ppm:	Partes por millón
Sb:	Antimonio
so <sub>4</sub> <sup>2-</sup> :	Ión sulfato
Vol.:	Volumen
ZnS:	Esfalerita

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue determinar la concentración de hierro y pH, influenciado por la densidad de corriente y el tiempo de residencia en el tratamiento por electrólisis de un Drenaje Ácido de Mina (DAM), en Hualgayoc, Cajamarca. El alcance de la investigación fue experimental, para la cual se empleó 200 ml de solución Drenaje Ácido de Mina (DAM) con datos iniciales promedio de pH igual a 2.62 y concentración de hierro (Fe) de 52.58 ppm. Se emplearon densidades de corriente del orden de 15, 20, 25 y 30 mA/cm<sup>2</sup>; así como a diferentes tiempos de residencia a 35, 40, 45 y 50 minutos. Después de realizados los ensayos se encontró que: con 15 mA/ cm<sup>2</sup> y 35 minutos de tratamiento un pH de 6.09 y una concentración de Fe de 4.32 ppm. El parámetro óptimo fue a 50 minutos de tratamiento y 30 mA/cm<sup>2</sup>, llegándose a obtener un pH de 7.63 y una reducción de hierro de 97.45 %. Según el análisis de varianza se aceptó la hipótesis alterna debido a que el  $F_{\text{tratamiento}}$  en todos los casos fue mayor que el  $F_{\alpha, V_1, V_2}$ ; y, con ello se afirma que la densidad de corriente y el tiempo de residencia influyen significativamente sobre la concentración de hierro y el pH.

**Palabras claves:** Electrólisis, Drenaje Ácido de Mina, remoción de hierro, pH

## ABSTRACT

The objective of the present investigation was to determine the iron concentration and pH, influenced by current density and residence time in the treatment by electrolysis of an acid mine drainage Acid Mine Drainage (AMD), in Hualgayoc, Cajamarca. The scope of the investigation was experimental, for which 200 ml of DAM solution was used with average initial data of pH equal to 2.62 and iron (Fe) concentration of 52.58 ppm. Current densities of 15, 20, 25 and 30 mA/cm<sup>2</sup> were used, as well as different residence times of 35, 40, 45 and 50 minutes. After the tests were carried out, a pH of 6.09 and an Fe concentration of 4.32 ppm were found at 15 mA/cm<sup>2</sup> and 35 minutes of treatment. The optimum parameter was 50 minutes of treatment and 30 mA/cm<sup>2</sup>, obtaining a pH of 7.63 and an iron reduction of 97.45 %. According to the analysis of variance, the alternative hypothesis was accepted because the  $F_{\text{treatment}}$  in all cases was greater than  $F_{\alpha, v_1, v_2}$ ; and, with this it is affirmed that the current density and the residence time significantly influence the iron concentration and pH.

**Keywords:** Electrolysis, Acid Mine Drainage, iron removal, pH

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM), originado en minas abandonadas y estanques del sector minero presenta un desafío significativo, debido principalmente a su naturaleza ácida, bajos niveles de pH y concentraciones elevadas de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) y metales pesados. Estas características tienen el potencial de inducir efectos toxicológicos adversos. El drenaje ácido de mina se forma por el proceso de oxidación de minerales que contienen azufre en presencia de agua. La aceleración de este proceso se puede mejorar significativamente mediante la participación de la actividad bacteriana, ejemplificada por las acciones de *Thiobacillus ferrooxidans* y *Thiobacillus thiooxidans*. Las barreras representan un riesgo significativo tanto para la salud humana como para el medio ambiente debido a sus altos niveles de contaminantes metálicos pesados, incluidos el hierro (Fe), el plomo (Pb), el níquel (Ni) y el cromo (Cr). Sin embargo, la descarga de este drenaje también presenta una vía potencial para la extracción de metales disueltos (Radziszewski & Dieter, 2023).

El drenaje ácido de mina es visto por algunos como un problema ambiental significativo a escala mundial, mientras que otros lo consideran el segundo desafío más prominente después del cambio climático. Según Tuffnell (2017), el tratamiento electroquímico ha surgido como una opción prometedora para mitigar los impactos adversos asociados con la presencia de barrancos. La utilización de métodos electroquímicos ha sido ampliamente empleada en la eliminación de diversos desechos industriales y suelos contaminados, lo que indica su potencial eficacia (Olías & Nieto, 2018).

Actualmente, la confluencia de causas económicas, a saber, los elevados precios de los materiales recuperados, y los factores ambientales, junto con las nuevas decisiones de

ingeniería, está impulsando la proliferación de aplicaciones electroquímicas en el ámbito del tratamiento de los Drenajes Ácidos de Mina (DAM) (Tuffnell, 2017).

La creación del Drenajes Ácido de Mina (DAM) también puede ocurrir como un proceso natural resultante de la oxidación de la pirita en presencia de agua y oxígeno. Este fenómeno se observa a menudo en conexión con las extensas operaciones de extracción de azufre. En la actualidad, las extensas operaciones de extracción de azufre manejan eficazmente la gestión de residuos potencialmente generadores de ácido mediante el empleo de técnicas como la concentración y mitigación de la oxidación de pirita mediante la aplicación de cubiertas de agua o barreras capilares. Las aguas residuales que se filtran de estas regiones de contención tienen que ser sometidas a diversas técnicas de tratamiento. Según la investigación realizada por Simate y Ndlovu (2021), los relaves mineros son los residuos sólidos que quedan después de la extracción y recuperación de minerales comercialmente valiosos, como el cobre (Cu), el plomo (Pb), el zinc (Zn), la plata (Ag) y el oro (Au), a través de procesos metalúrgicos. Araya et al. (2021) informaron de que, a escala mundial, la industria minera produce alrededor de 10 mil millones de toneladas de relaves anualmente, y se prevé que esta cantidad se duplique para el año 2035.

El principal problema relacionado con las operaciones mineras es la producción de Drenaje Ácidos de Mina (DREM) resultante del proceso de oxidación de minerales que contienen azufre (S) incluidos en esos residuos. La oxidación del azufre (S) se facilita principalmente en el lugar de depósito a través de la actividad microbiana, específicamente por la presencia de *Thiobacillus ferrooxidans*, así como la disponibilidad de humedad y oxígeno (Nwaila et al., 2021).

El río Tinto, situado en la provincia de Huelva en la costa española, tiene un color rojo el cual circula en una distancia de alrededor de 100 kilómetros, que se extiende desde su fuente en la sierra hasta su desembocadura en el estuario en la ría de Huelva, situada al sur de

la provincia. El agua del río Tinto presenta un nivel de pH notablemente bajo, lo que indica una acidez significativa. Además, contiene muchos elementos nocivos, incluyendo plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As), con cantidades sustanciales de hierro que contribuyen en su contaminación. Este río tiene una escasez de peces, moluscos, plantas y otros organismos. La presencia de ambientes ácidos facilita la proliferación de microorganismos extremófilos. La presencia de estos atributos permite la clasificación como un fenómeno comúnmente referido como Drenajes Ácidos de Mina (DAM). Una ilustración adicional en las cercanías es el río Odiel, que, aunque es menos conocido que el río Tinto, contribuye a una mayor cantidad de contaminación al río Huelva. Esta contaminación está vinculada a la presencia de depósitos polimetálicos de azufre (Olías & Nieto, 2018).

Los relaves mineros en México tienen sus orígenes en la extensa actividad minera que ha tenido lugar durante hace más de 450 años, cubriendo más del 50% de la superficie del país. Estos relaves son el resultado del empleo de procesos de amalgamación y cianuración para la extracción de oro (Au) y plata (Ag). En consecuencia, se ha acumulado un número significativo de millones de toneladas métricas de relaves que se han colocado de una manera inapropiada en sitios al aire libre. En algunos casos, los relaves mineros situados en la región norte de México muestran una presencia sustancial de vegetación en sus superficies, lo que potencialmente sugiere un estado de elevada estabilidad química y mínimos peligros para el medio ambiente. Sin embargo, numerosos estudios han identificado concentraciones elevadas de metales dentro de estos relaves, que, en interacción con el agua de lluvia, dan lugar a la producción de aguas ácidas y los daños medioambientales consecuentes. Según el estudio realizado por Ruíz-Huerta et al. (2018), basándose en datos estadísticos, las operaciones mineras en Cajamarca, Perú, han resultado en un agotamiento significativo del 40% del valle de Yanacocha. Esto ha sido acompañado de una prevalencia preocupante de la malnutrición, que ha alcanzado una tasa del 38%. Además, existe una notable carencia de servicios básicos

como el acceso al agua potable y la electricidad, afectando aproximadamente al 26% de la población. La presencia del Drenajes Ácidos de Mina (DAM) ha provocado el fenómeno de la acidificación del agua, lo que plantea una importante preocupación ecológica.

Según una fuente citada como La Vanguardia (2019), sobre la base de lo anteriormente expuesto, existe la necesidad de llevar a cabo un estudio científicamente respaldado destinado a mitigar o minimizar los efectos adversos causados por los drenajes ácidos de mina en el ecosistema. A la luz de esto, se propone la electrolisis como un método de solución potencial para abordar el problema actual. Esto implica la aplicación de una corriente eléctrica de intensidad específica a través de los electrodos dentro de la zona minera afectada, induciendo reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo. Al utilizar la energía eléctrica como medio de descontaminación del medio ambiente, el objetivo es mitigar los impactos negativos asociados con el Drenajes Ácidos de Mina (DAM).

Investigaciones recientes han encontrado que la industria minera genera aproximadamente 10 mil millones de toneladas de relaves por año, tendiendo a duplicar esta cantidad para el año 2035. Por esta razón, se necesita estudiar el potencial del Drenajes Ácidos de Mina (DAM), así como determinar mecanismos de reducción de elementos potencialmente tóxicos como el hierro.

Con la presente investigación se pretende proporcionar a la comunidad científica y tecnológica datos sobre la densidad de corriente y tiempo de residencia que permita reducir metales pesado como es el hierro e incrementar el pH de las soluciones del Drenajes Ácidos de Mina (DAM) y que permita, mediante la electrolisis, llevarlos hasta parámetros óptimos dentro de los estándares de calidad ambiental y límites máximos permisibles y de esta manera reducir el impacto negativo que genera estas aguas al ecosistema.

La electrolisis es una tecnología limpia emergente la cual aún falta mucho por investigar sobre sus procesos y mecanismos.

Diferentes procesos mineros, causan impactos ambientales tales como, el arrastre de residuos peligrosos, descargas de aguas residuales, entre otros; los cuales fueron depositados sin considerar su impacto al ambiente como la oxidación de los minerales insolubles y formación de drenaje ácido; por tal razón, se debe contribuir con investigaciones que cuenten con tecnologías alternativa que permitan la depuración de aguas ácidas.

De lo anteriormente expuesto surge el siguiente problema general: ¿En qué medida influye la densidad de corriente y tiempo sobre la concentración de hierro y pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca? Como problemas específicos se derivan las siguientes interrogantes: ¿En qué medida influye la densidad de corriente sobre la concentración de hierro y pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca?, ¿En qué medida influye el tiempo sobre la concentración de hierro y pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca? Y ¿En qué medida influye la interacción de la densidad de corriente y tiempo sobre la concentración de hierro y pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca?

Del problema de investigación, se derivan las siguientes hipótesis Nula ( $H_0$ ) y alterna ( $H_1$ ); y, de los objetivos específicos, proceden las hipótesis Nulas ( $H_{0ij}$ ) y alternas ( $H_{1ij}$ ), los cuales son descritos a continuación:

Como hipótesis general se plantea lo siguiente

$H_0$ : La densidad de corriente y tiempo no influyen sobre la concentración de hierro y pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>1</sub>: La densidad de corriente y tiempo influyen sobre la concentración de hierro y pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

Como hipótesis específicas se plantea las siguientes:

H<sub>0a1</sub>: La densidad de corriente no influye sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>1a1</sub>: La densidad de corriente influye sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>0b1</sub>: El tiempo no influye sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>1b1</sub>: El tiempo influye sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>0c1</sub>: La interacción de la densidad de corriente y el tiempo no influye sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>1c1</sub>: La interacción de la densidad de corriente y el tiempo influye sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>0a2</sub>: La densidad de corriente no influye sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>1a2</sub>: La densidad de corriente influye sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>0b2</sub>: El tiempo no influye sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>1b2</sub>: El tiempo influye sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>0c2</sub>: La interacción de la densidad de corriente y el tiempo no influye sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

H<sub>1c2</sub>: La interacción de la densidad de corriente y el tiempo influye sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

Como objetivo general se planteó lo siguiente: Determinar la influencia de la densidad de corriente y tiempo de residencia en la reducción de la concentración de hierro e incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

Así mismo, se consideraron los siguientes objetivos específicos: Establecer la influencia de la densidad de corriente sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca; identificar la influencia del tiempo sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca; determinar la influencia de la interacción de la densidad de corriente y el tiempo sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca; identificar la influencia de la densidad de corriente sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca; establecer la influencia del tiempo influye sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de

Hualgayoc, Cajamarca; determinar la influencia de la interacción de la densidad de corriente y el tiempo sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.

La investigación se desarrolló en la quebrada El Tingo, caserío El Tingo, distrito Hualgayoc, provincia Hualgayoc y departamento Cajamarca. Debido a que, en la zona de Hualgayoc, se evidencia gran cantidad de pasivos ambientales, producto de las actividades mineras formales e informales. En la zona, es muy común que las aguas ácidas, específicamente de la minería informal, sean derivadas a los ríos, los cuales no cuentan con adecuados tratamientos, generando perjuicio a los seres vivos; es por ello, que se busca aplicar tecnologías limpias, proponiendo como alternativa de solución la electrólisis.

La investigación realizada, según el propósito fue aplicada, debido a que se utilizaron los conocimientos en la práctica, para aplicarlos en provecho de la sociedad. Se tuvo como propósito dar solución a una situación o problema concreto e identificable como fue la contaminación por drenaje ácido de mina. Según el diseño de investigación fue experimental, debido a que, en la situación de control, se manipuló de manera intencional las dos variables independientes (densidad de corriente y tiempo de residencia) para analizar las consecuencias sobre la variable dependiente (concentración de hierro y pH).

Según el tipo de investigación experimental fue experimental pura ya que se reunieron dos requisitos: control (se formaron grupos de comparación y en uno de ellos se manipuló la variable independiente) y validez interna (los grupos se formaron aleatoriamente). En el diseño se llegó a evaluar dos variables independientes y dos dependientes.

La concentración de hierro en la solución del drenaje ácido de mina se determinó mediante la técnica de espectrofotometría, un método de análisis químico cuantitativo de laboratorio.

Dentro de los instrumentos empleados se tuvo en cuenta a los siguientes: balanza analítica Sartorius, medidor de pH WTW, multitéster digital, conductímetro digital, termómetro digital, navegador GPS, vernier digital, fuente de poder regulable, agitador magnético.

En la investigación se abordaron 8 capítulos los cuales se describen a continuación:

Capítulo I: Introducción, en el cual, en el primer elemento se planteó el problema, las preguntas que guiaron la investigación y la hipótesis. En el segundo, se explicó cómo y dónde se llevó a efecto la investigación, con qué alcance y limitaciones, y el diseño y las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de la información y para el tratamiento de datos. En el tercero, se adelantó brevemente el contenido de cada uno de los capítulos.

Capítulo II: Marco teórico, en donde el objetivo de este capítulo fue conformar un cuerpo teórico constituido por modelos, teorías y conceptos relacionados con el problema de investigación, de tal manera que fundamenten el análisis y la interpretación de los resultados. Es importante recalcar que el valor del marco teórico radicó en el uso de información científica obtenida a partir de los artículos científicos de las publicaciones afines al tema de investigación, la otra parte del marco teórico, pero no de menor importancia fueron los antecedentes.

Capítulo III: Materiales y métodos. En este capítulo se describió detalladamente el proceso seguido en cada una de las etapas del trabajo realizado. La finalidad fue que otro investigador pueda entender y repetir el estudio de tal manera que acredite los resultados. En este apartado se explicó claramente cómo se obtuvieron los datos, con qué técnicas e instrumentos, y qué métodos estadísticos se usaron para analizarlos. Este capítulo correspondió a la operacionalidad de variables y contrastación de la hipótesis. En el aspecto de materiales se enumeró todos los materiales, equipos modelos, entre otros. En el aspecto de materiales, comprendió una clara descripción de la ubicación de la zona en estudio, así como

una descripción clara y concisa de las características de la zona Posteriormente se describió la metodología utilizada y el diseño estadístico en forma detallada de tal manera que el rigor científico quede asegurado.

Capítulo IV: Resultados y discusión. En esta sección se presentaron los datos representativos. Las mediciones reiteradas se presentaron en tablas o figuras. Los resultados se interpretaron tomando en consideración los objetivos del proyecto, las hipótesis que fueron sometidas a contrastación y el cuerpo de conocimientos relacionados. En esta sección se hizo un análisis lo más crítico y objetivo posible de los resultados obtenidos a la luz de la hipótesis; se explicó por qué los resultados son de esa manera y no de otra. Se evitó las afirmaciones con tono definitivo con lo que se obtuvo garantías y certidumbres que la ciencia, por su carácter falible, no puede ofrecer.

Capítulo V: Conclusiones, Las conclusiones fueron las respuestas, claramente expresada, a las preguntas que se formularon en la introducción en función de la capacidad de la teoría propuesta para responder a ellas bajo la forma de hipótesis confirmadas o refutadas por el trabajo realizado. Las conclusiones deben ser inferencias derivadas de la evidencia científica que se presentó en los resultados y discusión, los cuales a su vez estuvieron referidos a la contrastación de la(s) hipótesis.

Capítulo VI: Referencias bibliográficas. Para la cita de la bibliografía consultada se usaron las normas establecidas en APA establecidas en el protocolo general de investigación de la UNC.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Bases teóricas

##### 2.1.1. *Drenaje ácido de mina (DAM)*

Durante el proceso de extracción de ciertos depósitos como carbón, sulfitos metálicos, hierro, uranio y otros, cantidades significativas de minerales sulfurosos se exponen a la meteorización, lo que conduce a la posible ocurrencia de drenaje ácido. Para que este fenómeno ocurra, es necesario tener circunstancias aeróbicas, que implican la existencia de cantidades suficientes de agua y oxígeno, junto con la actividad catalizadora simultánea de bacterias (Zamora & Meza, 2022)..

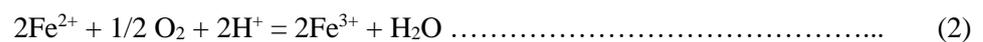
Según (Kalonji-Kabambi, Demers, & Bussière, (2020), la aceleración de los acontecimientos geoquímicos que conducen a la creación de aguas ácidas se debe principalmente a la oxidación de la pirita, especialmente en las regiones mineras. La presencia de oxígeno en el aire facilita la interacción entre los sulfuros y los materiales residuales, como las escombreras y pilas de residuos, debido a la accesibilidad y porosidad que existen en estos lugares. El fenómeno antes mencionado se atribuye a alteraciones en la composición química, así como a un aumento en la superficie de las partículas. Además, se sostiene que una multitud de mecanismos físicos, químicos y biológicos ejercen una influencia significativa en la generación, el transporte y el alivio de la contaminación de las aguas ácidas. Entre estos factores, se considera que la cantidad, concentración, dimensiones de partículas y patrones de dispersión de la pirita ejercen el impacto más sustancial en la formación de efluentes ácidos.

Según Zamora & Meza (2022), la hidrólisis de Fe, Al, y Mn disueltos puede resultar en la generación de iones  $H^+$ , lo que conduce a una alta concentración de Iones  $H^+$  y una

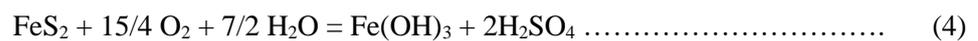
caída posterior en el pH. Un drenaje ácido se define como una condición en la que la concentración de minerales ácidos supera la de los minerales alcalinos. Además, puede incluir niveles elevados de sulfato (SO<sub>4</sub>), hierro (Fe), manganeso (Mn), aluminio (Al), y otros iones. Sin embargo, el proceso de disolución mineral de carbonato sirve para contrarrestar la acidez y eliminar los iones metálicos como Fe y Al. Sin embargo, no tiene un efecto notable en la concentración de SO<sub>4</sub>. En contraste, los drenajes minerales que son neutros o alcalinos (con alcalinidad igual o mayor que la acidez) también pueden mostrar niveles elevados de SO<sub>4</sub>, Fe, Mn y otros solutos. Los cationes predominantes que se encuentran en el drenaje ácido consisten en hierro (Fe), manganeso (Mn) y aluminio (Al), mientras que el anión principal presente es el sulfato (SO<sub>4</sub>).

**2.1.2. Generación de las aguas ácidas de mina**

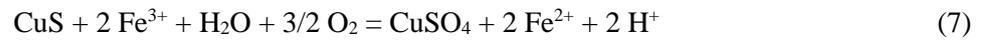
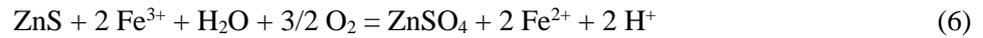
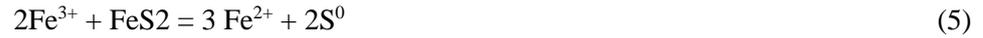
Cuando los sulfuros metálicos entran en contacto con el medio ambiente, se oxidan y producen aguas ácidas de mina. El hierro es esencial en este proceso, tanto en su forma divalente como trivalente. A continuación, se muestran las reacciones de oxidación de la pirita (Gamonal, 2020):



En general, la siguiente ecuación es la expresión para el proceso de oxidación de la pirita (Jimbo, 2019):



Cuando un gramo de pirita se oxida, produce 1,6 g de ácido sulfúrico, aunque otros minerales pueden compensar en cierta medida esta acidez. Según las reacciones, el ion férrico que se produce oxida otros sulfuros metálicos, lo que favorece la disolución de estos metales (Gamonal, 2020):



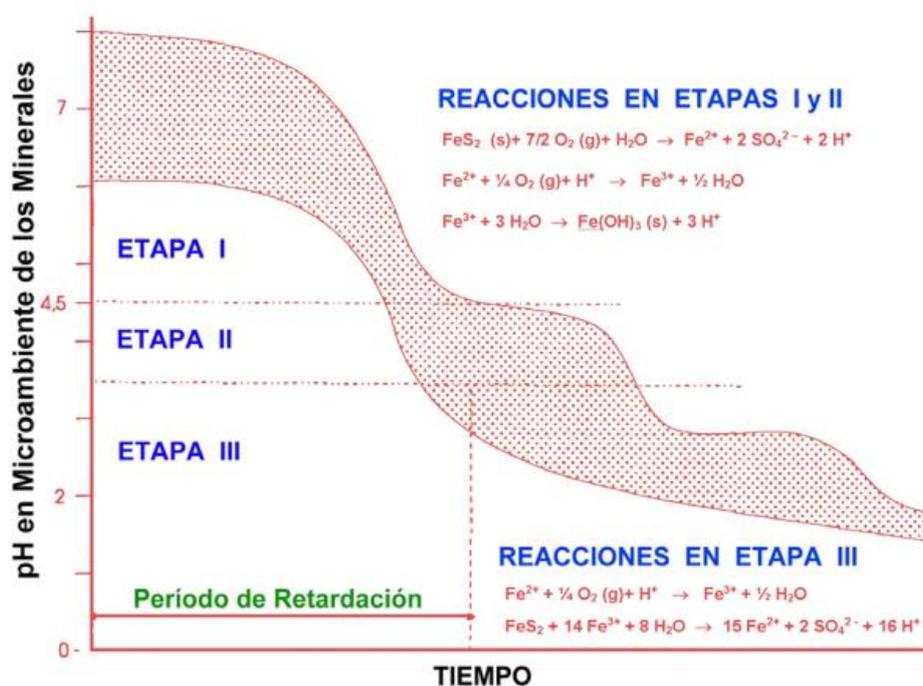
La actividad de las bacterias pertenecientes al género *Thiobacillus* acelera catalíticamente el proceso de oxidación de la pirita y su conversión en ácido sulfúrico,  $10^6$  veces más rápido que la reacción química. Las especies de bacterias *Thiobacillus thiooxidans* y *Thiobacillus ferrooxidans* son las más comunes y han sido descubiertas en los efluentes de las minas. Dado que son bacterias autótrofas y aerobias, el oxígeno es necesario para su crecimiento. Este tipo de bacterias pueden desarrollarse en condiciones extremadamente ácidas; el intervalo de pH ideal para que crezcan se sitúa entre 2 y 3,5. Sin embargo, pueden soportar altos niveles de metales pesados. Sin embargo, pueden soportar altas concentraciones de iones metálicos, lo que hace que los efluentes de la zona pirítica sean un medio perfecto para su crecimiento (Jimbo, 2019).

### **2.1.3. Etapas de formación de las aguas ácidas**

Se pueden utilizar tres fases para describir la producción de agua ácida. La cual se puede visualizar en Figura 1.

**Figura 1**

*Etapas en la formación de aguas ácidas*



Fuente: Jimbo (2019)

En la etapa inicial, el proceso de oxidación de minerales de azufre resulta en la liberación de iones de hierro. Estos iones de hierro luego se someten a la oxidación química en un ambiente neutral, transformándose en hidróxido de Hierro. Posteriormente, el hidróxido de hierro precipita y contribuye a la acidez del medio. En esta fase del proceso, la síntesis de agua ácida a través de la oxidación, principalmente facilitada por el aire y las bacterias (en particular *Thiobacillus ferrooxidans*), emiten humedad a un ritmo similar. Esto ocurre cuando la tasa de oxidación es baja tanto en los mecanismos directos como indirectos de la generación de ácido. En general, el desarrollo gradual de la acidez puede ser parcialmente contrarrestado por la alcalinidad inherente al medio.

Según Jimbo (2019), en la segunda etapa, la disminución de la capacidad de neutralización del medio es superada por la acidez acumulada, resultando en una caída del pH. En consecuencia, la actividad bacteriana se vuelve más común en la oxidación de la

pirita. La reacción química resultante es la formación de sulfato de hierro, que es posteriormente transformado en sulfatos de ferro por oxidación. Al exponerse al agua, el sulfato se somete a una reacción química que resulta en la formación de ácido sulfúrico e hidróxido de hierro. Este último compuesto es insoluble en agua y da un tono amarillo a la solución acuosa. En la actualidad, el mecanismo indirecto demuestra un mayor nivel de eficacia que el directo, a saber, en el contexto de la oxidación del aire.

Según Gamonal, (2020), en la tercera etapa, se ha observado que la actividad bacteriana puede facilitar la lixiviación del sulfuro de hierro en sulfato cuando el pH del entorno, en particular en zonas alrededor de los granos de pirita, cae por debajo de 3. El ion de hierro es afectado por este fenómeno. El estado actual de la producción de ácido experimenta variabilidad como resultado del aumento de la solubilidad del hierro y la disminución de la precipitación del hidróxido de hierro.

En resumen, el *Thiobacillus ferrooxidans* genera ácido complementario a través de la oxidación de iones férricos a iones ferrosos, facilitando posteriormente la oxidación de sulfitos. Es imperativo abordar los siguientes factores, dada la sustancial producción de ácido que se está produciendo actualmente. Según Aduvire (2018), la técnica indirecta, que exhibe comportamiento autocatalítico, demuestra su significado mostrando una reducción de al menos el 75% en la formación de ácido cuando la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* está bloqueada. Además, la prevención de la oxidación ocurre cuando el pH del agua aumenta más allá de 5. Se puede predecir que bajo un nivel de pH inferior a 4,5 ocurrirá la oxidación de todo el sulfuro de hierro. La actividad bacteriana alcanza su máximo crecimiento cuando el pH disminuye a un nivel por debajo de 2,5, en el que se establece un equilibrio.

#### **2.1.4. Composición de las aguas ácidas**

La pirita, siendo el mineral predominante encontrado en los depósitos de azufre, se asocia comúnmente con el proceso de oxidación. Sin embargo, vale la pena señalar que la

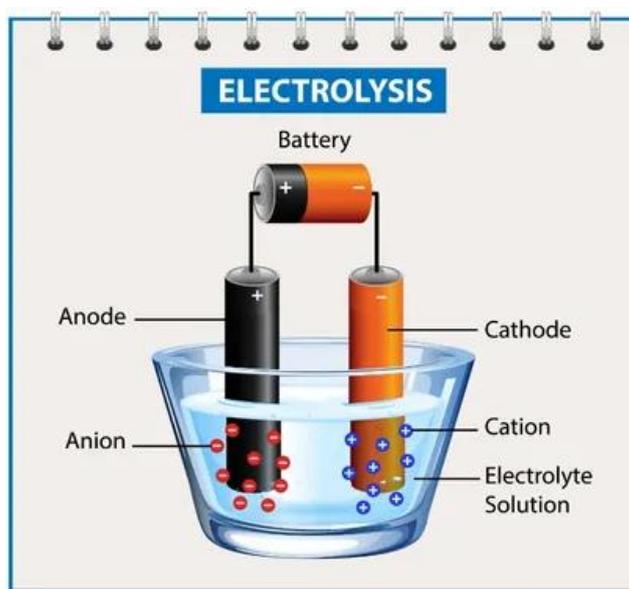
bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* posee la capacidad de oxidar una variedad diversa de sulfuros metálicos, incluyendo calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), covelita ( $\text{CuS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), y otros compuestos similares. Como resultado, esta bacteria contribuye al enriquecimiento de las aguas de extracción de ácidos con diversos metales. Además, vale la pena señalar que los óxidos, carbonatos, silicatos, así como los sulfatos de cobre y zinc se encuentran con frecuencia en regiones caracterizadas por la presencia de pirita. Las sales mencionadas sirven como lixiviantes cuando entran en contacto con el ácido producido en los procesos descritos anteriormente. Están presentes principalmente en forma de cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), malaquita ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ), calamita ( $\text{ZnCO}_3$ ) y compuestos similares. Además, también se observan niveles menores de otros elementos, a saber, arsénico (As), antimonio (Sb), cadmio (Cd), plomo (Pb), aluminio (Al), manganeso (Mn), níquel (Ni), cobalto (Co) y plata (Ag), en la composición, predominantemente en forma de sulfitos, óxidos y sulfatos. La precipitación es uno de los numerosos factores que influyen en la composición química de los DAM (Aduvire, 2018).

#### **2.1.5. *Electrólisis***

La electrolisis se define como el proceso por el cual una sustancia iónica en un estado líquido (ácido) se descompone con la aplicación de una corriente eléctrica continua. El diagrama presentado en la Figura 2 ilustra la estructura fundamental y los componentes de una célula de electrolisis.

## Figura 2

### *Esquema de una célula electrolítica*



Fuente: (Plaza, 2022)

Los electrones se generan en el ánodo, que representa el electrodo cargado positivamente, y luego se consumen en el cátodo, lo que denota el electrodo cargado negativamente. Una celda electrolítica presenta las mismas características que una celda electroquímica o galvanizada, como las observadas en procesos de corrosión, cuando la polaridad de los electrodos es invertida. Por consiguiente, es posible hacer comparaciones entre los mecanismos de reducción observados en la corrosión de objetos metálicos y los fenómenos que ocurren en el cátodo durante la electrolisis. Sin embargo, el proceso de disolución del metal ocurre consistentemente como la reacción primaria durante la corrosión en el ánodo. Esta reacción particular es sólo una entre una serie de reacciones que pueden tener lugar durante el proceso de electrolisis, junto con la liberación de gas, la absorción de gases y la oxidación de los iones metálicos (Plaza, 2022).

### **2.1.6. Metales pesados**

Osman, Yang, & Massey (2019) indican que los elementos metálicos tóxicos con un peso atómico elevado, como el arsénico (As), el cromo (Cr), el cobre (Cu), el plomo (Pb), el mercurio (Hg), la plata (Ag) y el zinc (Zn), se conocen como metales pesados los cuales incluso en dosis bajas, son tóxicos para los seres vivos.

### **2.1.7. Contaminación por metales pesados**

En un estudio realizado por Aduvire (2018), investigó que la contaminación del agua es un problema generalizado que tiene repercusiones significativas en las comunidades a nivel local, regional y mundial. El fenómeno está intrínsecamente relacionado con la contaminación del aire y el uso de los recursos de la tierra por los seres humanos. El deterioro del medio ambiente humano contemporáneo plantea una preocupación significativa que derivada de los factores de la expansión de la población, el desarrollo industrial y la ampliación urbana. A lo largo de la historia, las poblaciones humanas han establecido asentamientos cerca de ríos, lagos y zonas costeras debido a su dependencia inherente del medio acuático. En consecuencia, esta coexistencia ha dado lugar a la aparición de indicaciones tempranas de contaminación y degradación de la calidad del agua. La contaminación del agua se refiere a la entrada de diversas sustancias en los cuerpos de agua, incluyendo, pero no limitando, a productos químicos, microorganismos, contaminantes industriales y otros, así como agua ácida. Estos compuestos contribuyen a la degradación de la calidad del agua, lo que la hace inadecuada para el consumo humano o industrial

Osman, Yang, & Massey (2019) realizaron un estudio en la cual sugiere que la electrocoagulación se está aplicando con éxito en varios lugares en todo el mundo. Esta técnica implica la aplicación de impulsos eléctricos a los efluentes, resultando en tres resultados ventajosos para su purificación: mayor floculación (principalmente para metales pesados), mejor coagulación (especialmente para los metales ligeros), y mayor oxigenación

(para tiramiento orgánico). Esto permite el tratamiento simultáneo de diversos contaminantes dentro de un proceso singular, ampliando así los usos potenciales.

## **2.2. Antecedentes de la investigación**

Valles (2021) llevó a cabo un estudio en la región de Durango, México, con el objetivo de determinar las técnicas de tratamiento químico y electrolítico que pueden eliminar eficazmente el hierro y neutralizar el drenaje ácido de mina (DAM). Bajo las determinadas condiciones de funcionamiento: En una duración de 60 minutos, con una densidad de corriente de  $19 \text{ A/m}^2$ , una concentración inicial de hierro (Fe) de 300 ppm, un pH inicial de 2.5, y en ausencia de agitación a una temperatura inicial de  $25^\circ\text{C}$ , los hallazgos experimentales demostraron que el empleo de tratamiento de electrolisis resultó en una tasa máxima de eliminación del hierro de alrededor del 99,99%. Además, el pH final se midió en 6.5. Esto indica que la eliminación de Fe superó el 80% a partir del minuto 20 del período experimental.

Según Piedra & Zambrano (2021) realizaron una aplicación de la electroquímica con el objetivo de remover contaminantes presentes en aguas residuales generadas de una planta procesadora de material minero, investigación realizada en la Universidad de Guayaquil – Ecuador. Lograron evaluar que las mejores condiciones de trabajo fueron usando electrodos de hierro y aluminio en arreglos de celda de  $3 \times 2$  y  $2 \times 3$ , tensión de 14 – 20 V, intensidad de 2 - 6 A y rangos de tiempos de 1 a 4 min. Por consiguiente, se determinó que la mejor opción era utilizar electrodos de aluminio colocados en una configuración de  $3 \times 2$ , conectados a una tensión de 20.4 V y una intensidad de 6 A en un tiempo de 2 minutos. Por medio de la configuración escogida se logró alcanzar altos porcentajes de remoción en Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Color y Turbiedad, dando como resultado 98.95%, 94.23%, 97.18% y 96,64% respectivamente.

Según Das & Kumar (2021) realizaron un estudio sobre el tratamiento del agua de proceso de la planta de beneficio de mineral de hierro mediante electrocoagulación, investigación publicada en la Revista Árabe de química. Los resultados experimentales mostraron que los electrodos de aluminio en modo monopolar con una densidad de corriente de  $68,50 \text{ A/m}^2$ , una distancia entre electrodos de 1 cm y una conductividad de la solución de  $1033 \text{ }\mu\text{S/cm}$  eran las condiciones de operación ideales para obtener agua tratada con una eficiencia de eliminación. de 99,95%, 99,46%, 99,33%, 97,99%, 73,44% para iones Fe, Cr, Pb, Mn y Cu respectivamente después de 60 min de tratamiento.

Según Zevallos (2018), el objetivo de su investigación fue proporcionar estabilidad en el sistema Drenajes Ácidos de Mina (DAM) dentro de Paraíso Perdido Apata, una corporación ubicada en la provincia de Jauja, región Junín. El pH de la solución que se midió inicialmente arrojó un valor de 4. Luego del tratamiento el pH aumentó a 6,5 debido a la adición de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Este compuesto sirvió como precipitador de iones metálicos que eran solubles en agua, resultando en la formación de hidróxidos. Así mismo, al introducir cal, se elevó el pH de la zona designada de interés, con lo que se redujeron los niveles de concentraciones de metales pesados.

En su estudio, Castañeda & Choton, (2019) realizaron una investigación sobre el impacto de la densidad de corriente y el tiempo de residencia en la reducción de  $\text{Fe}^{2+}$  en la solución ácida durante el proceso de electrocoagulación. La solución fue preparada de manera artificial en el laboratorio de Ingeniería de Materiales de la Universidad Nacional de Trujillo. En la investigación emplearon tres densidades de corriente diferentes ( $20, 40$  y  $80 \text{ mA/cm}^2$ ) y cuatro tiempos de residencia (10, 20, 40 y 60 minutos). De los resultados obtenidos, se evidenció que a una densidad de corriente de  $80 \text{ mA/cm}^2$  y una duración de residencia de 40 minutos, el porcentaje más alto de eliminación de iones  $\text{Fe}^{2+}$  alcanzado fue del 76,20%. Asimismo, se observó un porcentaje de eliminación de 17,97% cuando la densidad de corriente

se fijó en 20 mA/cm<sup>2</sup>. Se ha visto que la densidad actual dentro del rango de pH de 6-7 contribuye al aumento de flóculos, la formación de lodo y la generación de óxidos metálicos. Esta densidad particular de corriente es responsable de un cierto porcentaje de eliminación. Basándose en el análisis estadístico ANOVA realizado con un nivel de confianza del 95%, se ha determinado que la densidad de corriente es la variable que ejerce la influencia más significativa en la reducción de iones Fe (II) a través del proceso de electrocoagulación.

Según Cuba (2020), en la investigación manifestó como objetivo realizar el tratamiento de agua residual por el método de electrocoagulación para la reutilización en riego de vegetales - Ate Vitarte – Lima. Concluye afirmando que la optimización de los factores sobre la alta remoción de los parámetros fisicoquímicos se adquirió a los niveles de intensidad 5 Amperios, tiempo de 15 minutos, distancia de 2 centímetros y a pH 7.5, con una remoción de 99.02% en turbiedad, 90.83% en Demanda Química de Oxígeno y 95.93% en Sólidos Suspendidos Totales,

En su estudio, Gonzales & Malca (2019) investigaron el impacto de la densidad de corriente sobre la eficacia de la eliminación de metales pesados durante el tratamiento de electrocoagulación de Yanacocha S.R.L.- Cajamarca. El pH inicial de la solución varía de 2.00 a 2.12. El experimento implicó la utilización de un reactor que funcionaba a una corriente de 10 amperios. Dos electrodos hechos de acero y aluminio fueron empleados sirviendo como cátodo y ánodo, respectivamente. El reactor funcionó durante una duración promedio de 3 horas, con 36 minutos dedicados a lograr una solución con un pH que oscila entre 5,15 y 6,00. Además, el objetivo del experimento era lograr una reducción de las concentraciones de metales pesados del 70% al 100%.

Según Chilón & Villalta (2022), manifiestan como objetivo aplicar el proceso de electrolisis para la recuperación de plomo en drenajes de la mina Algamarca – Cajamarca. concluyen afirmando que, de acuerdo al análisis de propiedades físico químicas se determinó

que para el caso dicha investigación se utilizó para hacer la remoción del plomo (Pb) un 97.55%, siendo la muestra inicial de 0.386 mg/l de plomo (Pb) y la final de 0.004 mg/l de plomo (Pb). Se determinó que los valores promedios en la remoción de plomo (Pb), fue influenciados por el tiempo de retención a diferencia de la densidad de corriente los cuales son para 1.8v una densidad de corriente de 10.21 mA/cm<sup>2</sup>; para 2.4 v densidad de corriente de 20.07 mA/cm<sup>2</sup> y finalmente para 3.6 v densidad de corriente igual a 40.12 mA/cm<sup>2</sup>. De la misma forma se determinó el porcentaje de remoción en función al tiempo para la remoción del plomo (Pb) por electrolisis, el cual concluye que, se tiene los tiempos en minutos de 15, 30 y 60.

En su estudio, Terán (2019) investigó el impacto de la eliminación de plomo del drenaje de ácido mineral de Cerro Corona Hualgayoc - Cajamarca en relación con la densidad actual y la duración de retención. En el experimento se utilizó un volumen total de 300 mililitros de Drenaje Ácido de Mina (DAM), en el que las muestras fueron sometidas a períodos de retención variables de 15, 30 y 60 minutos, junto con densidades de corriente variable de 10, 20 y 40 mA/cm<sup>2</sup>. Al concluir las pruebas, se logró una reducción significativa de la toxicidad, con una eliminación del 97.55% del plomo presente en el Drenaje de Ácido de la Mina (DAM). Los resultados de la investigación demuestran que hubo una disminución de los niveles de plomo (Pb) en un 48,45% después de una duración de 30 minutos y una densidad de corriente aplicada de 40 mA/cm<sup>2</sup>. Además, se logró una eficiencia de eliminación del 98,96% después de 60 minutos en las mismas condiciones. El análisis ANOVA indica que el proceso de electrolisis para la reducción del plomo (Pb) está influenciado tanto por el tiempo, como por la densidad de corriente.

### 2.3. Definición de términos básicos

**Drenaje de mina:** El fenómeno del drenaje de las minas se refiere a la descarga de agua de las actividades mineras, que a menudo contiene altas concentraciones de minerales disueltos y pueden tener la descarga periódica o estacional de material líquido en los órganos receptores puede proceder de cualquiera de las siguientes fuentes: de actividad minera, la cual abarca diversas acciones y procesos llevados a cabo en tierra con el fin de facilitar las operaciones mineras y los esfuerzos conexos. Esto incluye actividades como exploración minera, explotación, transporte y cierre de minas. Además, abarca el establecimiento y el funcionamiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales que están directamente relacionados con las actividades mineras, que abarcan el tratamiento de agua mineral, agua industrial y desechos domésticos (Aduvire, 2018).

**Aguas Ácidas:** Una de las principales preocupaciones medioambientales que han ganado gran atención en los últimos tiempos es la generación de agua ácida, que se vuelve contaminada con metales pesados y otros contaminantes debido a las operaciones mineras (Jimbo, 2019).

**Electroquímica:** Plaza (2022).define la electroquímica como una rama de la química que investiga la interacción entre la electricidad y las reacciones químicas, así como la conversión de la energía química en energía eléctrica y viceversa.

**Tiempo de tratamiento** Según Aduvire (2018)., la duración del método, comúnmente referido como el tiempo de reacción, es una característica que exhibe una correlación directa con la concentración de iones de hierro disuelto en el agua. Cuanto más tiempo dure el proceso, más hierro se disolverá en el sistema.

**Densidad de corriente:** El concepto de densidad de corriente se refiere a la medida de la corriente eléctrica por unidad de área. La cantidad a la que se hace referencia es la

magnitud de la corriente eléctrica que atraviesa los electrodos sumergidos dentro del electrolito (Plaza, 2022).

**Concentración de hierro:** La concentración de hierro en la muestra se determina mediante la aplicación del valor medido a la curva de calibración, que muestra la relación entre la concentración de hierro y la absorbancia, que previamente se obtiene mediante la realización de la misma medición usando soluciones patrón de hierro con concentraciones conocidas. (Navarrete, 2022).

**pH:** Es una medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua. Se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua. La escala del pH es logarítmica con valores de 0 a 14. Un incremento de una unidad en la escala logarítmica, equivale a una disminución diez veces mayor en la concentración de iones de hidrógeno. Con una disminución del pH, el agua se hace más ácida y con un aumento de pH el agua se hace más básica (Navarrete, 2022).

**Electrodo:** Según Navarrete (2022), un electrodo es una sustancia conductora que facilita la adición o eliminación de electrones de los iones presentes en una solución, permitiendo así la generación de una corriente eléctrica.

**Conductividad:** La adición de sal (NaCl) aumenta la conductividad de la solución. La adición de iones de cloruro puede ayudar a mitigar los efectos adversos causados por otros iones ( $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ), que resultan en la formación de una capa insoluble en los electrodos y, por consiguiente, conducen a una reducción de la eficiencia de corriente (Plaza, 2022).

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### **3.1. Localización del estudio**

La toma de muestras, para la presente investigación se realizó en la quebrada El Tingo del centro poblado EL Tingo, distrito Hualgayoc, provincia Hualgayoc, departamento de Cajamarca, con coordenada UTM WGS84 zona 17S E:759125 N:9255332. En la figura 3 se aprecia la localización del área de estudio.

#### **3.2. Unidad de análisis, población y muestra (diseño estadístico)**

##### **3.2.1. *Unidad de análisis***

La unidad de análisis estuvo constituida por un drenaje ácido de mina (DAM) proveniente de la quebrada El Tingo, centro poblado El Tingo, distrito Hualgayoc, provincia Hualgayoc, departamento de Cajamarca.

##### **3.2.2. *Población***

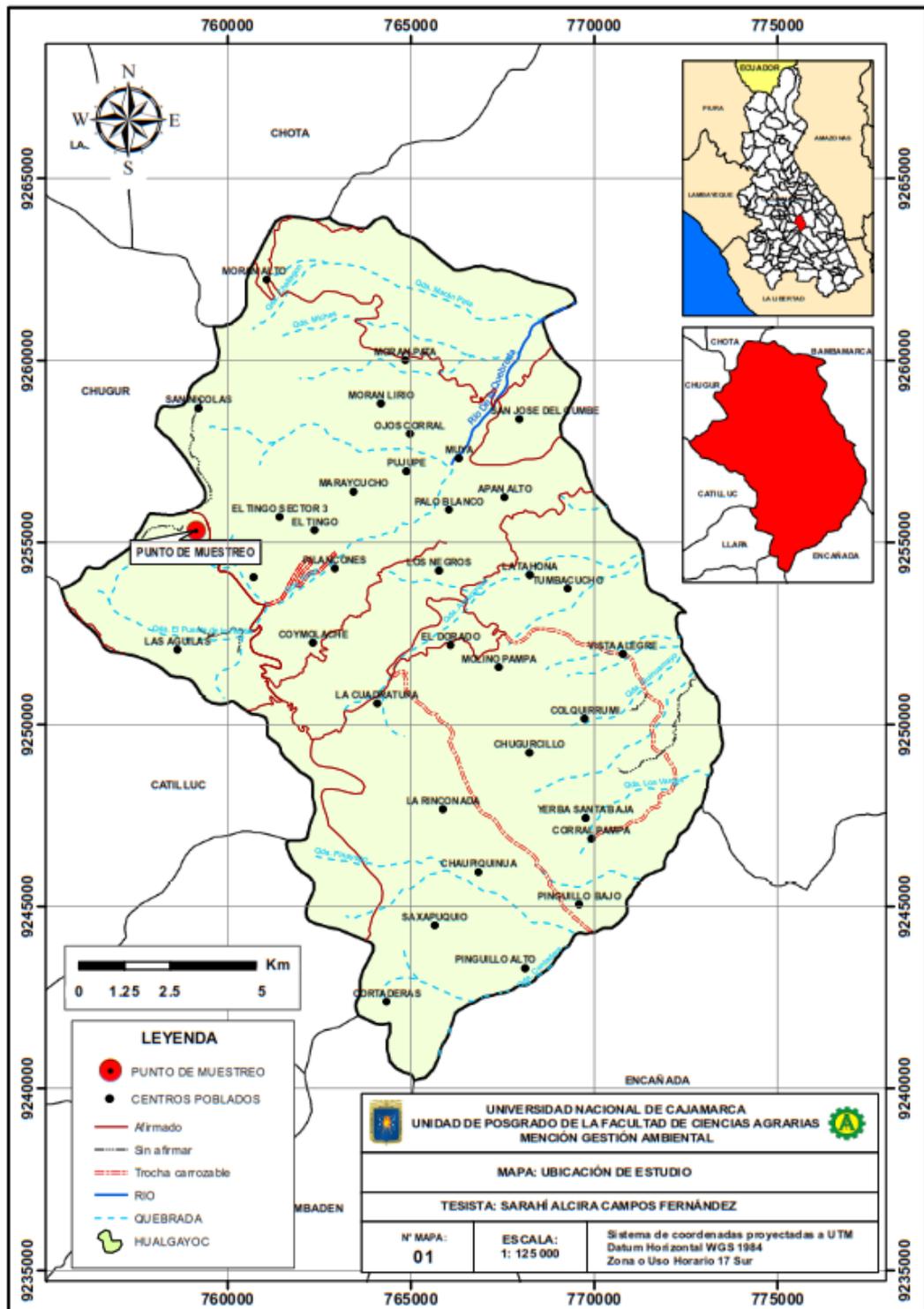
La población estuvo constituida por 30 litros de drenaje ácido de mina (DAM) proveniente de la quebrada El Tingo, centro poblado El Tingo, distrito Hualgayoc, provincia Hualgayoc y departamento Cajamarca.

##### **3.2.3. *Muestra***

Como existieron 4 parámetros de la VI<sub>1</sub> (Densidad de corriente) x 4 parámetros de la VI<sub>2</sub> (Tiempo de residencia) x 3 réplicas, se obtuvieron 48 muestras. Tener en cuenta que se adicionaron 3 muestras patrones o iniciales, es decir, sin ningún tratamiento, dando un total de 51 muestras. Cada muestra estuvo constituida por 200 ml, haciendo un total de 9.8 l de drenaje ácido de mina (DAM) proveniente de la quebrada El Tingo, centro poblado El Tingo, distrito Hualgayoc, provincia Hualgayoc, departamento Cajamarca. En la tabla 1 se puede apreciar la matriz para los resultados de las 48 pruebas para cada una de las variables dependientes.

**Figura 3**

*Ubicación de la zona de estudio*



**Tabla 1***Arreglo de los tratamientos en estudio*

		Tiempo de residencia (minutos)							
		35		40		45		50	
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>	
		R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom
		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>	
	20	R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>	
		R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom
		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>	
	25	R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>	
		R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom
		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>	
	30	R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>		R <sub>1</sub>	
		R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom	R <sub>2</sub>	Prom
		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>		R <sub>3</sub>	

Los grupos se formaron aleatoriamente, como se puede ver en la Tabla 2 y Tabla 3.

**Tabla 2***Tabla matriz para las concentraciones de Fe después del tratamiento*

		Tiempo de residencia (minutos)							
		35		40		45		50	
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	M-5		M-3		M-9		M-4	
		M-21	Prom	M-19	Prom	M-25	Prom	M-20	Prom
		M-37		M-35		M-41		M-36	
	20	M-2		M-7		M-1		M-8	
		M-18	Prom	M-23	Prom	M-17	Prom	M-24	Prom
		M-34		M-39		M-33		M-40	
	25	M-6		M-10		M-11		M-12	
		M-22	Prom	M-26	Prom	M-27	Prom	M-28	Prom
		M-38		M-42		M-43		M-44	
	30	M-13		M-14		M-15		M-16	
		M-29	Prom	M-30	Prom	M-31	Prom	M-32	Prom
		M-45		M-46		M-47		M-48	

**Tabla 3***Tabla matriz para los pH obtenidos después del tratamiento*

		Tiempo de residencia (minutos)							
		35		40		45		55	
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	M-13		M-5		M-2		M-4	
		M-29	Prom	M-21	Prom	M-18	Prom	M-20	Prom
		M-45		M-37		M-34		M-36	
	20	M-16		M-6		M-1		M-7	
		M-32	Prom	M-22	Prom	M-17	Prom	M-23	Prom
		M-48		M-38		M-33		M-39	
	25	M-3		M-9		M-8		M-15	
		M-19	Prom	M-25	Prom	M-24	Prom	M-31	Prom
		M-35		M-41		M-40		M-47	
	30	M-12		M-11		M-14		M-10	
		M-28	Prom	M-27	Prom	M-30	Prom	M-26	Prom
		M-44		M-43		M-46		M-42	

### 3.3. Instrumentos y equipos

#### 3.3.1. *Balanza analítica Sartorius*

- Modelo: BP301S.
- Voltaje: 12-30 V.
- Precisión: 0,0001 g.

#### 3.3.2. *Medidor de pH WTW*

- Modelo: pH330.

#### 3.3.3. *Multitéster digital*

- Modelo: PR-61D.
- Marca: Digitronik

#### 3.3.4. *Conductímetro digital*

- Modelo: KGD002
- Marca: Nahita

- Conductividad: 0.00 uS/cm - 199.9 mS/cm  $\pm$  1.5 %

- TDS: 0.00 mg/l - 19.99 g/L  $\pm$  1.5 %

- Salinidad: 0.00-8.00%  $\pm$  0.3 %

### **3.3.5. *Termómetro digital***

- Modelo: KJP005

- Rango: -40/50 °C

### **3.3.6. *Navegador GPS (sistema de posicionamiento global) de mano***

- Modelo: GPSmap78s

- Marca: Garmin

### **3.3.7. *Vernier digital***

- Modelo: MCO 43 9102

- Marca: Mitutoyo

- Intervalo: 0-12"/300mm

### **3.3.8. *Fuente de poder regulable***

- Modelo: TE-5305B

- Marca: Pro'sKit

- Elemento "Short sheet"

- Salida variable 0-30V y 0-5A

- Ajuste fino y grueso para voltaje y corriente

- Control automático de temperatura

### **3.3.9. *Agitador magnético***

- Modelo: C-MAG HS 7

- Marca: Korning

## **3.4. *Materiales y reactivos***

- Fiola de 500 y 1000 ml

- Matraz Erlenmeyer de 100 y 250 ml
- Vasos de precipitación de 50,100, 500 y 1000 ml
- Pipetas de 5ml y10 ml
- Buretas de 50 ml
- Papel filtro whatman N°40
- Luna de reloj
- Goteros
- Material de vidrio y de plástico
- Muestra: solución DAM.

### **3.5. Procedimiento y análisis de datos (Análisis de varianza)**

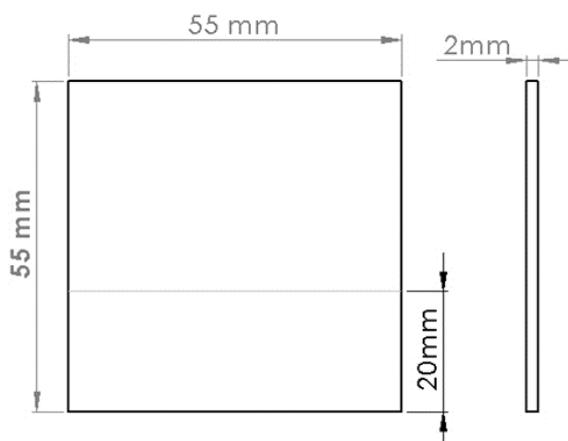
#### **3.5.1. Preparación de los electrodos**

Los electrodos utilizados (ánodo y cátodo) fueron placas de acero AISI 304, de dimensiones 5,5 x 5,5 x 0,2 centímetros. Para su adecuación, se lijaron cuidadosamente, luego se limpiaron con jabón, se enjuagaron con agua potable, se desengrasaron con diluyente y se secaron con un paño para eliminar cualquier impureza (aceites, grasa o polvo) de su superficie.

En la Figura 5 se muestra las características del electrodo empleado en la corrida experimental, en la cual se evidencia que solo 20 mm fue sumergido dentro del reactor (vaso de precipitación), con la cual permitió obtener el área efectiva.

## Figura 4

### *Características de los electrodos de acero*



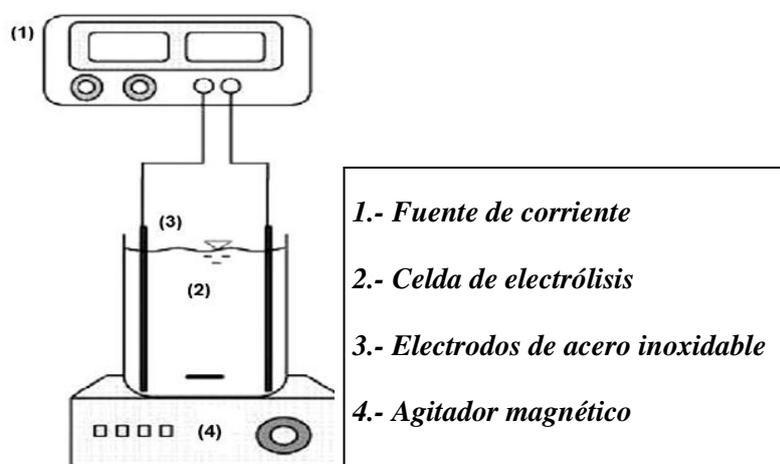
El área efectiva utilizada fue de 23.9 cm<sup>2</sup> por electrodo, la cual se obtuvo realizando la siguiente operación matemática: (2.0 cm x 5.5 cm x 2 caras) + (5.5 cm x 0.2 cm) + (2 cm x 0.2 cm x 2 caras).

### **3.5.2. Construcción del equipo**

La celda para realizar la electrólisis estuvo constituida por un vaso de precipitación de 500 ml, El esquema del sistema de electrólisis utilizado en la investigación se muestra en la Figura 5.

**Figura 5**

*Esquema de la instalación de la celda de electrólisis*



La Tabla 4 muestra en forma resumida las condiciones usadas para el proceso de electrólisis realizado en la presente investigación.

**Tabla 4**

*Condiciones de operación para la celda de electrólisis.*

Nombre	Descripción
Volumen por ensayo	0.20 l
Tipo de reactor	Batch
Número de electrodos por ensayo	02
Cátodo de celda	Acero Inoxidable AISI 304
Ánodo de celda	Acero Inoxidable AISI 304
Tamaño de electrodos	5.5 x 5.5 x 0.2 cm.
Tiempo de ensayo	Variable
Parámetros de corriente (voltaje, amperaje)	Variable
Separación entre electrodos	2 cm

### **3.5.3. Preparación y caracterización de la solución**

Para la preparación de la muestra inicial, se colocó en un vaso de precipitación y se dejó sedimentar el material particulado durante 24 horas, luego de ese tiempo se procedió a realizar un filtrado empleando papel de filtro. A la solución obtenida se realizó el análisis químico de concentración inicial de hierro y pH.

La muestra inicial fue caracterizada obteniéndose valores que se encuentran plasmadas en la tabla 5

**Tabla 5**

*Parámetros iniciales de la muestra en estudio.*

Nombre	[Fe], ppm	pH
Solución DAM	52.48	2.62

#### **3.5.4. Circuito experimental para electrólisis**

Para la corrida experimental se procedió a colocar 200 ml de solución DAM dentro del vaso de precipitación, luego se conectaron los electrodos al polo positivo y negativo con ayuda de los conectores que provinieron de la fuente de poder.

Se instaló el pH-metro. Posteriormente se conectó el multítester al polo positivo que sale de la fuente de poder y cerrando el circuito con el conector en el electrodo.

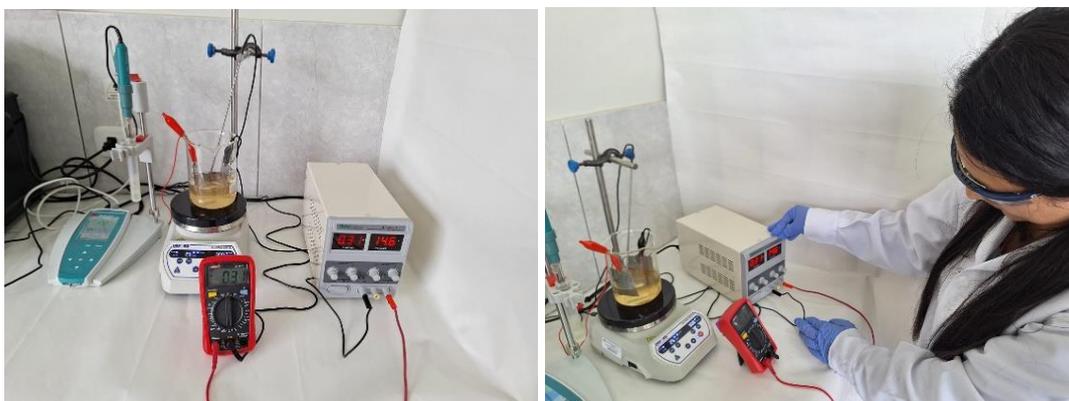
Posteriormente se sumergieron los electrodos, corroborando que solo 20 mm sean los que entren en contacto con la solución.

Luego se encendió la fuente de poder y se reguló a los parámetros de amperaje (A) adecuado, los cuales fueron corroborados con el multítester. Con estos parámetros regulados, se permitió llevar a la densidad de corriente ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) solicitada para la corrida experimental de la presente investigación.

La instalación del circuito experimental se puede visualizar en la Figura 6 mostrada a continuación.

## Figura 6

### *Instalación del circuito experimental*



### **3.5.5. Aleatorización y toma de muestras**

Después del tratamiento, se dejó reposar durante dos horas y se extrajo un volumen de 0,20 l, luego se codificó y se seleccionó al azar para posteriormente mandar a analizar las diferentes concentraciones de hierro y pH.

### **3.5.6. Caracterización final de la solución en estudio**

Para verificar la reducción de la concentración de hierro mediante el método de electrólisis en las condiciones anteriormente mencionadas y medir el aumento del pH, las muestras ensayadas se sometieron a un análisis químico los cuales permitieron evaluar las variaciones cuantitativas.

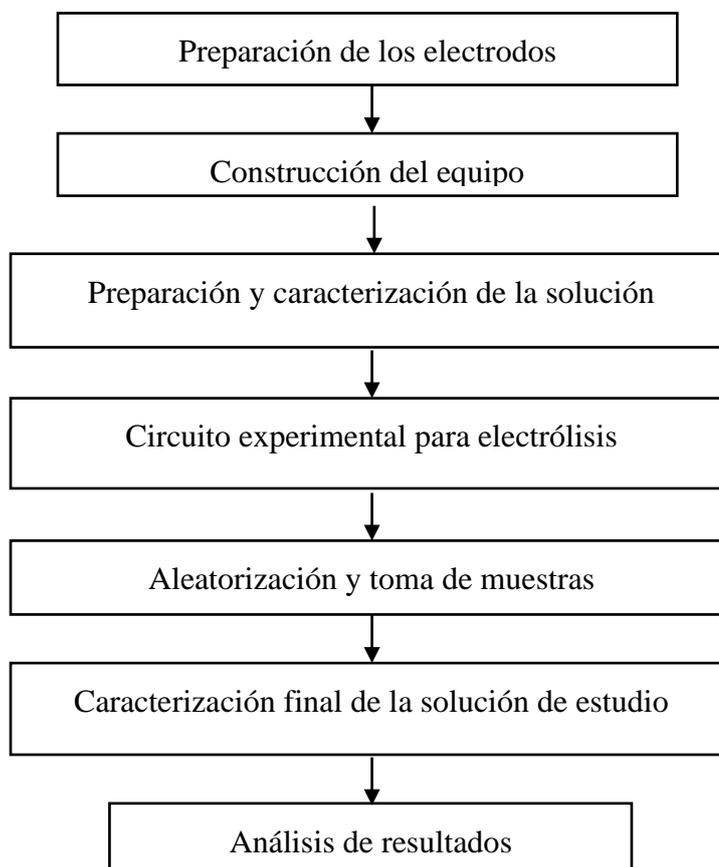
### **3.5.7. Análisis de los resultados obtenidos**

Para representar las tendencias de las variables investigadas, todos los datos recopilados se colocaron en tablas y los resultados se sometieron a cálculos y procedimientos matemáticos y estadísticos. Los resultados obtenidos demostraron una reducción considerable de hierro y un incremento del pH, verificándose la influencia entre las variables mediante el análisis de varianza.

A continuación, en la Figura 7 se visualiza el procedimiento experimental empleado en la presente investigación:

**Figura 7**

*Procedimiento experimental*



La recolección y análisis de los resultados de la eliminación de hierro con distintas relaciones de densidad de corriente y tiempos de residencia fueron procesados mediante cálculos estadísticos de análisis de varianza.

El software a emplear fue el Excel.

Adicionalmente, a continuación, en la Tabla 5 se presentará la matriz de operacionalización de variables y en la Tabla 6 la matriz de consistencia.

**Tabla 6***Matriz de operacionalización de variables.*

<b>Variables</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Técnicas e instrumentos</b>	<b>Unidad de observación</b>
VI <sub>1</sub> : Densidad de corriente	15, 20, 25, 30	Es la intensidad de corriente que pasa por unidad de sección transversal o área	mA/cm <sup>2</sup>	Potenciómetro	<i>Intensidad</i> <i>área</i>
VI <sub>2</sub> : Tiempo	35, 40, 45, 50	Es un periodo predeterminado en la que se hace algo o sucede un acontecimiento.	minutos	Cronómetro	Avance del tiempo
VD <sub>1</sub> : Concentración de hierro	Reducción de concentración de hierro	proporción entre la materia de disolución (soluto) y la sustancia de disolución (disolvente).	%	Espectrofotómetro	Concentración de hierro
VD <sub>2</sub> : pH	Aumento del pH	Medida del nivel de acidez o alcalinidad de un material o solución.	Unidades de incremento	pH-metro	Potencial de hidrógeno

**Tabla 7**

*Matriz de consistencia.*

<b>Título del proyecto:</b> Concentración de hierro y pH, según la densidad de corriente y tiempo en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina, Hualgayoc, Cajamarca, 2022							
<b>Problema</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Variabes</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Indicador</b>	<b>Metodología</b>	<b>Población y muestra</b>
¿En qué medida influye la densidad de corriente y tiempo sobre la concentración de hierro y pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca 2022?	Determinar la influencia de la densidad de corriente y tiempo de residencia en la reducción de la concentración de hierro e incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.	La densidad de corriente y tiempo influyen sobre la concentración de hierro y pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca.	Densidad de corriente	$\frac{mA}{cm^2}$	$\frac{Intensidad}{\acute{a}rea}$	Tipo experimental	Solución de Drenaje Ácido de Mina (DAM)
			Tiempo	minutos	Avance del tiempo		
			Concentración de hierro	ppm = mg/l	% de reducción		
			pH	Rango de 0 a 14: 0 a 6.9: Ácido 7: Neutro 7.1 a 14: Básico	Unidades de incremento		

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Remoción de hierro

A continuación, en la Tabla 8 y Figura 8 se aprecia los resultados de la concentración de hierro y en la Tabla 9 y Figura 9, el porcentaje de reducción de hierro después de realizar la corrida experimental, teniendo en cuenta que la concentración inicial de hierro tuvo en promedio 52.48 ppm.

**Tabla 8**

*Reporte de las concentraciones promedio de Fe, en ppm, después del tratamiento*

		Tiempo de residencia (minutos)			
		35	40	45	50
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	4.320	4.300	4.030	3.970
	20	4.290	3.820	3.700	3.360
	25	3.860	3.330	2.520	1.950
	30	3.020	2.470	1.540	1.340

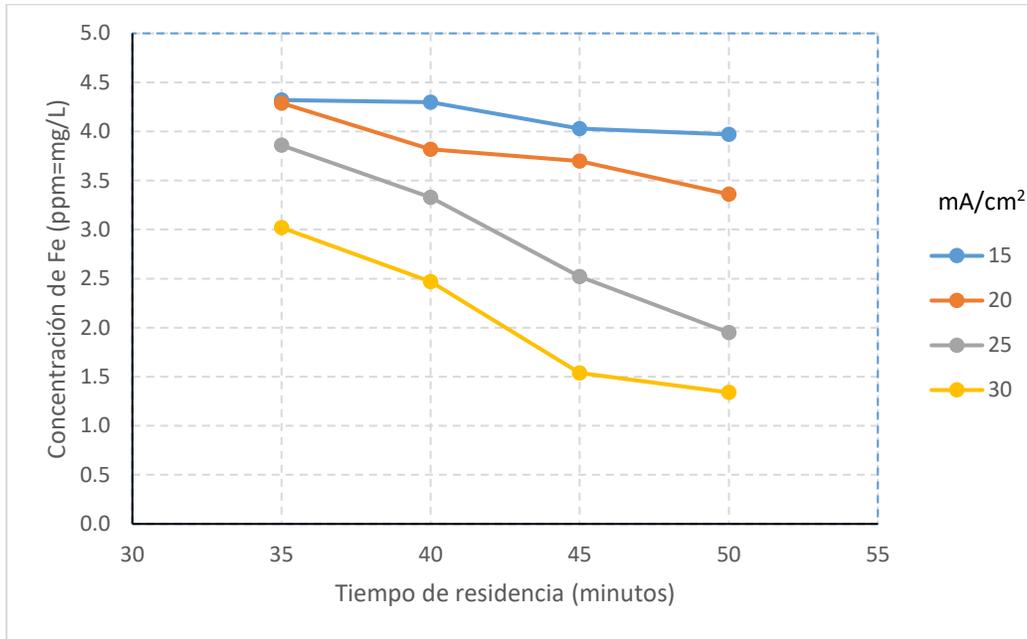
**Tabla 9**

*Reporte de la reducción promedio de Fe, en %, después del tratamiento*

		Tiempo de residencia (minutos)			
		35	40	45	50
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	91.768	91.806	92.321	92.435
	20	91.825	92.721	92.950	93.598
	25	92.645	93.655	95.198	96.284
	30	94.245	95.293	97.066	97.447

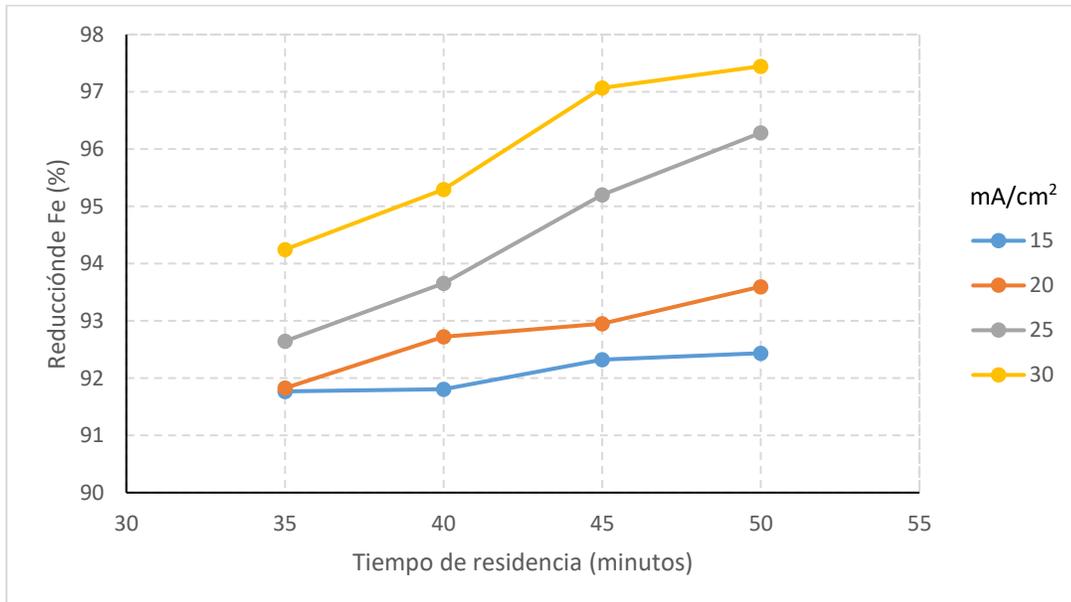
**Figura 8**

*Reporte de las concentraciones de Fe, en ppm = mg/l, después del tratamiento*



**Figura 9**

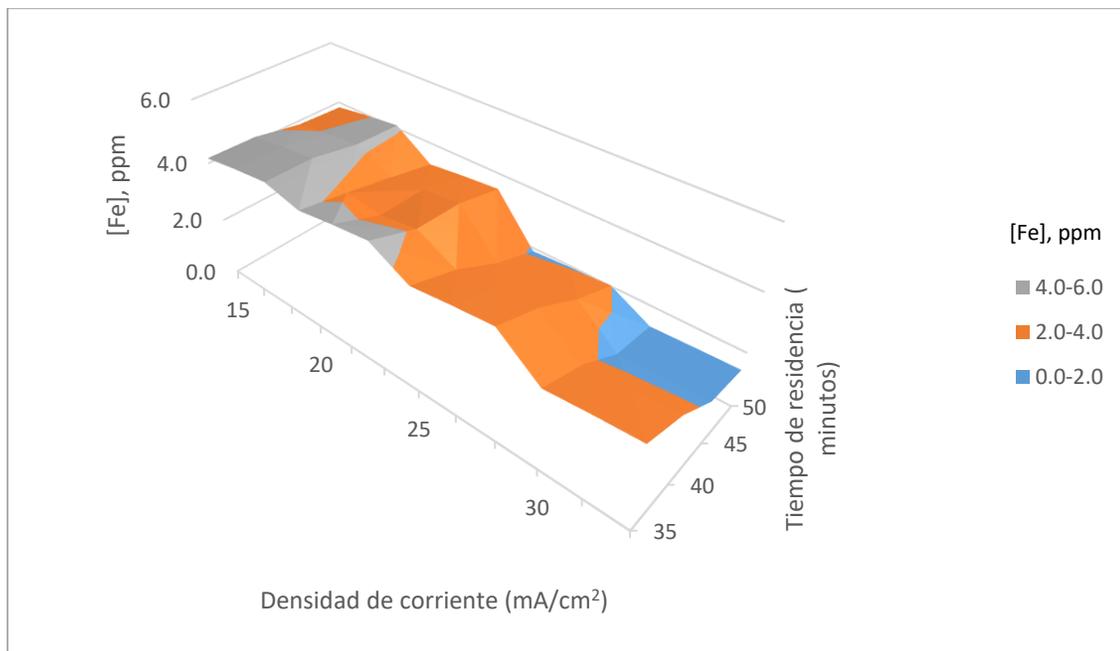
*Reporte de las reducciones de Fe, en %, después del tratamiento*



Según los resultados obtenidos se puede evidenciar que a medida que aumenta el tiempo de residencia y la densidad de corriente, se ve incrementado la reducción de Fe en la solución Drenaje Ácido de Mina (DAM), es así, que, en los primeros 35 minutos y a una densidad de 15 mA/cm<sup>2</sup> se logró reducir la concentración de hierro desde 52.48 ppm hasta 4.320 ppm, el cual representó un porcentaje de reducción en el orden de 91.768 %.

### Figura 10

*Gráfico de superficie de las concentraciones de Fe, en ppm = mg/l, después del tratamiento*



En la Figura 10, se evidencia que el parámetro óptimo se consiguió con 50 minutos de tratamiento y 30 mA/cm<sup>2</sup>, encontrándose reducir la concentración de hierro hasta 1.340 ppm, el cual representó un 97.447 % de reducción de Fe, lo cual se dio, debido a que en la solución Drenaje Ácido de Mina (DAM) estuvieron presentes iones metálicos disueltos de hierro y por electrólisis dentro de la celda constituida por dos electrodos uno positivo (ánodo) y otro negativo

(cátodo), ambos de acero, con lo que permitió que en el ánodo ocurra la oxidación y en el cátodo la reducción (Castañeda & Choton, 2019).

Cuando se le aplicó corriente externa, se observó el desprendimiento de oxígeno ( $O_2$ ) en el ánodo e hidrógeno ( $H_2$ ) en el cátodo, pero ello sólo se dio cuando la diferencia de potencial entre los electrodos se ha elevado a un mínimo teórico (Cuba, 2020).

Fueron dos los mecanismos generados tanto en el ánodo como en el cátodo:

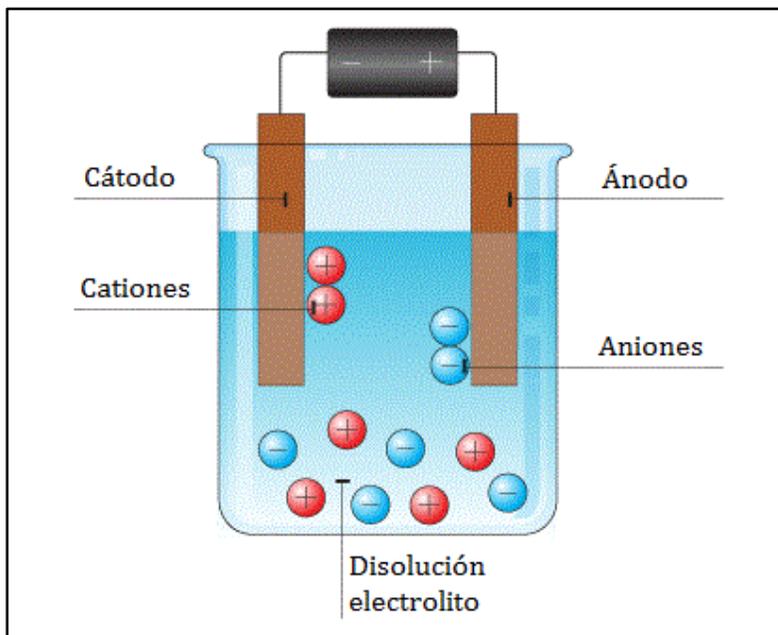
(1°) Oxidación en el ánodo.- en el ánodo, los iones de agua ( $H_2O$ ) se descomponen mediante la reacción de oxidación generando oxígeno ( $O_2$ ) y protones ( $H^+$ ). Esta reacción ayudó a mantener el equilibrio iónico en la solución (Navarrete, 2022).

(2°) Reducción en el cátodo.- En el cátodo, los iones metálicos disueltos, como el hierro ( $Fe^{3+}$ ), se redujeron a su forma metálica, en este caso, hierro elemental ( $Fe$ ). Esto ocurrió mediante la transferencia de electrones desde el cátodo al ion metálico, lo que resulta en su deposición o precipitación en la superficie del cátodo. Una vez que el hierro se ha depositado en el cátodo, se puede recuperar mediante diferentes métodos, como el raspado o lavado del cátodo. El hierro recuperado se puede utilizar posteriormente en diferentes aplicaciones (Valles, 2021).

La solución Drenaje Ácido de Mina (DAM), en condiciones atmosféricas, 1 atm y 25 °C, no se descompone de manera espontánea para formar  $H_2(g)$  y  $O_2(g)$ . Sin embargo, esta reacción se puede inducir en una celda electrolítica como se muestra en la Figura 9. Cuando los electrodos se sumergen en la solución Drenaje Ácido de Mina (DAM), y se conectan a la fuente de poder (batería) tiene suficiente cantidad de iones para conducir la electricidad. De inmediato empiezan a aparecer burbujas de gas de hidrógeno y oxígeno en los dos electrodos, sin que haya consumo neto de la solución ácida (Araya, Ramírez, Kraslawski, & Cisternas, 2021).

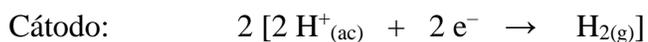
**Figura 11**

*Celda electrolítica*

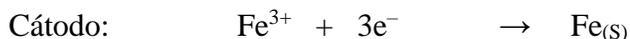


Fuente: Química (2023)

Según la Figura 9, se puede afirmar la formación de las siguientes reacciones:



En el cátodo también se genera el siguiente mecanismo:



Los resultados obtenidos son respaldados por diversos investigadores como Valles (2021), el cual manifiesta en su investigación que para eliminar eficazmente el hierro y neutralizar el Drenaje Ácido de Mina (DAM), empleó 60 minutos de tratamiento y una densidad de corriente de  $19 \text{ A/m}^2$ , logrando reducir un 99.99% de Fe, el cual tuvo una concentración inicial de 300 ppm, afirmando una eliminación de Fe desde el minuto 20 con un porcentaje de

reducción del orden de 80%. Así mismo, Gonzales & Malca (2019) investigaron el impacto de la densidad de corriente sobre la eficacia de la eliminación de metales pesados durante el tratamiento de electrocoagulación, los cuales encontraron que con el empleo de 10 amperios a 3 horas y 36 minutos lograron una reducción de las concentraciones de metales pesados del 70% al 100%. En su estudio, Castañeda & Choton, (2019) realizaron una investigación sobre el impacto de la densidad de corriente y el tiempo de residencia en la reducción de  $Fe^{2+}$  en la solución ácida, evidenciaron que a una densidad de corriente de  $80 \text{ mA/cm}^2$  y una duración de residencia de 40 minutos, fueron los parámetros para el porcentaje más alto de eliminación de iones  $Fe^{2+}$  alcanzado fue del 76,20%. Asimismo, se observó un porcentaje de eliminación de 17,97% cuando la densidad de corriente se fijó en  $20 \text{ mA/cm}^2$ . Finalmente, Terán (2019) investigó el impacto de la eliminación de plomo del drenaje de ácido mineral de Cerro Corona Hualgayoc - Cajamarca en relación con la densidad de corriente y tiempo; la investigación demostró que hubo una disminución de los niveles de plomo en un 48,45% después de una duración de 30 minutos y una densidad de corriente aplicada de  $40 \text{ mA/cm}^2$ ; además, se logró una eficiencia de eliminación del 98,96% después de 60 minutos en las mismas condiciones.

#### **4.2. Incremento de pH en la solución drenaje ácido de mina (DAM)**

Al hablar sobre el incremento de pH y neutralización de la solución DAM (pH entre 6.5 - 8.5), se puede evidenciar que en la Tabla 10 y Figura 12 se presentan los resultados obtenidos después de realizar el tratamiento, teniendo en cuenta que el pH inicial promedio fue de 2.62, evidenciándose un incremento sustancial del mismo.

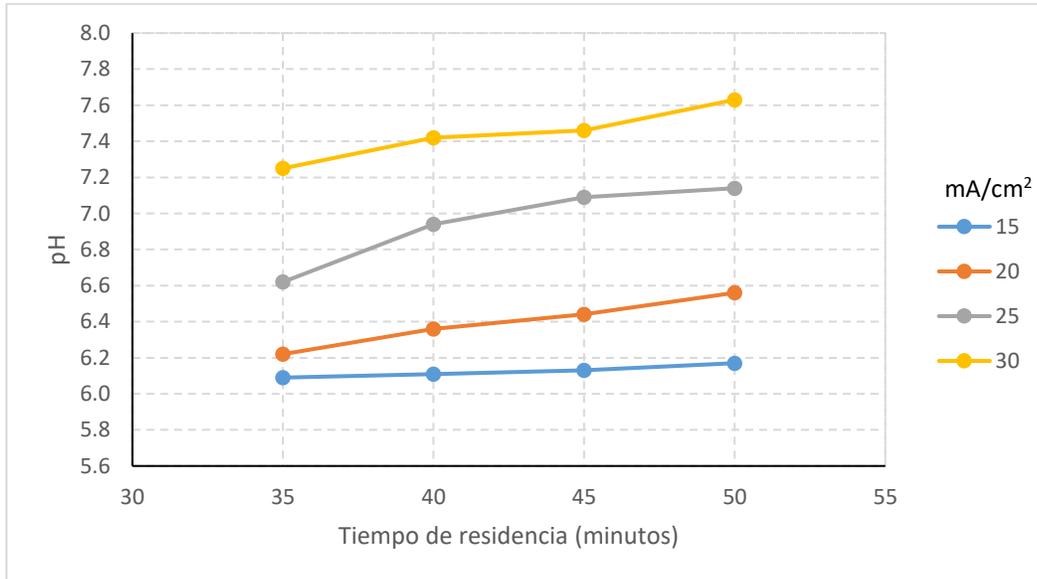
**Tabla 10**

*Reporte de las pH promedios de la solución drenaje ácido de mina (DAM), después del tratamiento*

		Tiempo de residencia (minutos)			
		35	40	45	50
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	6.090	6.110	6.130	6.170
	20	6.220	6.360	6.440	6.560
	25	6.620	6.940	7.090	7.140
	30	7.250	7.420	7.460	7.630

**Figura 12**

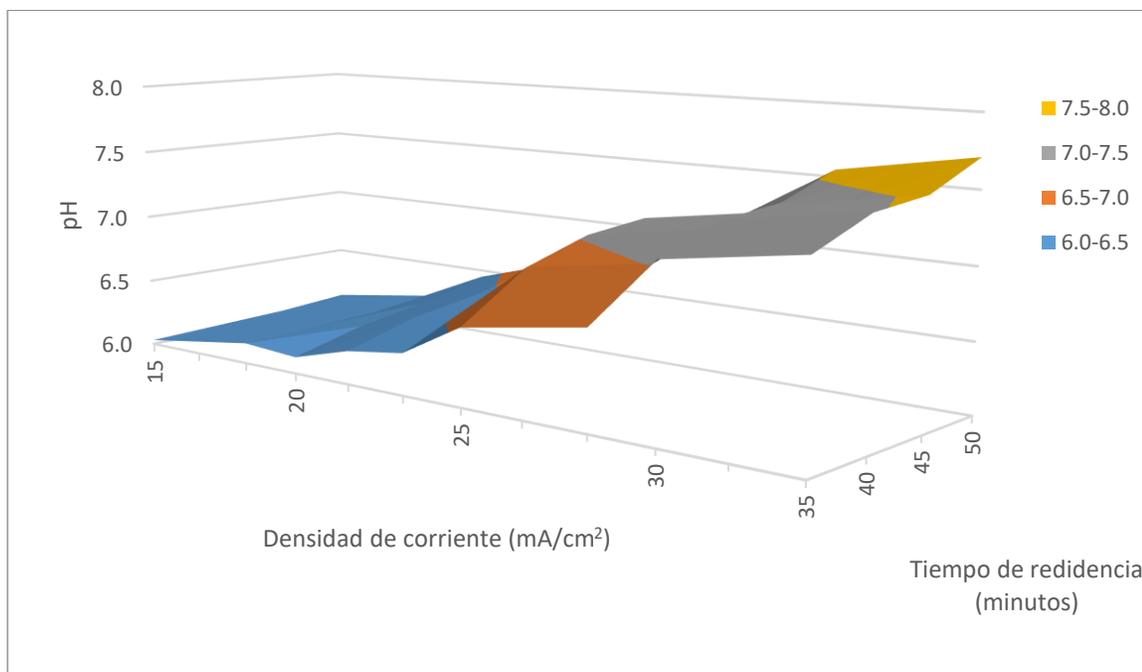
*Reporte de resultados de pH promedio después del tratamiento*



Según los resultados obtenidos se puede evidenciar que a medida que aumenta el tiempo de residencia y la densidad de corriente, se incrementa el pH en la solución DAM, es así, que en los primeros 35 minutos y a una densidad de 15 mA/cm<sup>2</sup> se logró elevar desde 2.62 hasta 6.090.

**Figura 13**

*Gráfico de superficie de los valores de pH, después del tratamiento*



Según la Figura 13, se evidencia que el parámetro óptimo de pH, el cual se debe encontrar entre 6.5 y 7.5 se consiguió entre los 25 – 30 mA/cm<sup>2</sup> y a cualquier tiempo de tratamiento (35 – 50 minutos); esto se dio, debido a la reacción de reducción que ocurre durante el proceso de electrólisis. En este proceso, los iones metálicos, como el hierro (Fe<sup>3+</sup>), son reducidos a su forma metálica en el cátodo. Esto implica la transferencia de electrones hacia el cátodo desde los iones metálicos disueltos (Castañeda & Choton, 2019).

Durante la reducción del hierro en el cátodo, se consumen protones (H<sup>+</sup>) presentes en la solución. Estos protones se combinan con los electrones para formar moléculas de hidrógeno (H<sub>2</sub>) gaseoso. A medida que se consumen los protones, la concentración de iones H<sup>+</sup> en la solución disminuye, lo que hace que el pH aumente. Además, la oxidación que ocurre en el ánodo durante el proceso de electrólisis genera oxígeno (O<sub>2</sub>) y protones (H<sup>+</sup>). Sin embargo, estos protones generados en el ánodo no son suficientes para contrarrestar la disminución de protones

causada por la reducción del hierro en el cátodo. Como resultado, el pH de la solución tiende a aumentar. El incremento del pH en una solución DAM es beneficioso ya que ayuda a neutralizar la acidez de la solución y a estabilizarla, lo que reduce su toxicidad y facilita su tratamiento posterior. Sin embargo, es importante monitorear y controlar el pH para asegurarse de que se encuentre dentro de los límites adecuados para el proceso de tratamiento y evitar problemas ambientales adicionales (Kalonji-Kabambi, Demers, & Bussière, 2020).

Los resultados obtenidos son respaldados por Valles (2021), el cual manifiesta en su investigación que para eliminar eficazmente el hierro y neutralizar el Drenaje Ácido de Mina (DAM), empleó 60 minutos de tratamiento y una densidad de corriente de  $19 \text{ A/m}^2$ , logrando incrementar el pH hasta un valor de 6.5, el cual tuvo pH inicial de 2.5. tratamiento sin agitación y con una temperatura de trabajo de  $25^\circ\text{C}$ . Así mismo, Gonzales & Malca (2019) investigaron el impacto de la densidad de corriente sobre la eficacia de la eliminación de metales pesados durante el tratamiento de electrocoagulación, los cuales encontraron que el pH de la solución inicial varió desde 2.00 a 2.12, y con el empleo de 10 amperios a 3 horas y 36 minutos lograron incrementar el pH en un rango entre 5.15 y 6.00.

### **4.3. Análisis de varianza**

Para el análisis de varianza se tuvo que realizar un análisis de dispersión de datos, como fue la desviación estándar, para los datos la concentración de hierro después del tratamiento afectados por la densidad de corriente y el tiempo de residencia, dando los siguientes resultados, los cuales se plasman a continuación en la tabla 11:

**Tabla 11**

*Desviación estándar para los resultados encontrados de la concentración de hierro afectados por la densidad de corriente y el tiempo de residencia*

		Tiempo de residencia (minutos)					
		35	40	45	50	Total	
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	Cuenta	3	3	3	3	12
		Suma	12.9500	12.8900	12.0800	11.9000	49.8200
		Promedio	4.3167	4.2967	4.0267	3.9667	4.1517
		Varianza	0.0230	0.0226	0.0197	0.0194	0.0422
		Desviación estándar	0.1517	0.1504	0.1405	0.1393	0.2053
	20	Cuenta	3	3	3	3	12
		Suma	12.8600	11.4600	11.0900	10.0800	45.4900
		Promedio	4.2867	3.8200	3.6967	3.3600	3.7908
		Varianza	0.0226	0.0076	0.0170	0.0133	0.1313
		Desviación estándar	0.1504	0.0872	0.1305	0.1153	0.3624
	25	Cuenta	3	3	3	3	12
		Suma	11.5800	9.9900	7.5700	5.8600	35.0000
		Promedio	3.8600	3.3300	2.5233	1.9533	2.9167
		Varianza	0.0183	0.0133	0.0081	0.0049	0.5927
		Desviación estándar	0.1353	0.1153	0.0902	0.0702	0.7699
30	Cuenta	3	3	3	3	12	
	Suma	9.0600	7.4100	4.6100	4.0100	25.0900	
	Promedio	3.0200	2.4700	1.5367	1.3367	2.0908	
	Varianza	0.0111	0.0073	0.0030	0.0020	0.5178	
	Desviación estándar	0.1054	0.0854	0.0551	0.0451	0.7196	

Para el análisis de varianza, también se tuvo que realizar un análisis de dispersión de datos, como fue la desviación estándar, para los datos encontrados de pH después del tratamiento afectados por la densidad de corriente y el tiempo de residencia, dando los siguientes resultados, los cuales se plasman a continuación en la tabla 12:

**Tabla 12**

*Desviación estándar para los resultados encontrados del pH afectados por la densidad de corriente y el tiempo de residencia*

		Tiempo de residencia (minutos)					
		35	40	45	50	Total	
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	Cuenta	3	3	3	3	12
		Suma	18.2700	18.3300	18.3900	18.5100	73.5000
		Promedio	6.0900	6.1100	6.1300	6.1700	6.1250
		Varianza	0.0039	0.0036	0.0034	0.0031	0.0036
		Desviación estándar	0.0624	0.0600	0.0583	0.0557	0.0598
	20	Cuenta	3	3	3	3	12
		Suma	18.6600	19.0700	19.3100	19.6800	76.7200
		Promedio	6.2200	6.3567	6.4367	6.5600	6.3933
		Varianza	0.0084	0.0094	0.0094	0.0103	0.0235
		Desviación estándar	0.0917	0.0971	0.0971	0.1015	0.1532
	25	Cuenta	3	3	3	3	12
		Suma	19.8600	20.8200	21.2700	21.4200	83.3700
		Promedio	6.6200	6.9400	7.0900	7.1400	6.9475
		Varianza	0.0049	0.0048	0.0046	0.0045	0.0485
		Desviación estándar	0.0700	0.0693	0.0678	0.0671	0.2202
	30	Cuenta	3	3	3	3	12
		Suma	21.7500	22.2600	22.3800	22.8900	89.2800
		Promedio	7.2500	7.4200	7.4600	7.6300	7.4400
		Varianza	0.0049	0.0055	0.0061	0.0064	0.0237
		Desviación estándar	0.0700	0.0742	0.0781	0.0800	0.1541

Posteriormente, con los datos encontrados, se procedió a realizar el análisis de varianza, encontrándose que el  $F_{\text{tratamiento}}$  es mayor que el  $F_{\alpha, v_1, v_2}$ , para cada uno de los tratamientos, así como de sus interacciones, aceptándose de esta manera la hipótesis alterna en donde se menciona que cada una de las variables independientes y de sus interacciones influyen significativamente sobre la variable dependiente, la cual se evidencia en la Tabla 13 y Tabla 14.

**Tabla 13**

*Análisis de varianza para los resultados encontrados de la concentración de hierro afectados por la densidad de corriente y el tiempo de residencia*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	$F_{\text{tratamiento}}$	$F_{\alpha, v1, v2}$
Densidad de corriente	30.71588333	3	10.23862778	767.5373002	2.901119584
Tiempo de residencia	10.61833333	3	3.539444444	265.333958	2.901119584
Interacción	3.078816667	9	0.342090741	25.64478456	2.188765768
Dentro del grupo	0.426866667	32	0.013339583		
Total	44.8399	47			

**Tabla 14**

*Análisis de varianza para los resultados encontrados del pH afectados por la densidad de corriente y el tiempo de residencia*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	$F_{\text{tratamiento}}$	$F_{\alpha, v1, v2}$
Densidad de corriente	12.36870625	3	4.122902083	711.8679856	2.901119584
Tiempo de residencia	0.697939583	3	0.232646528	40.16918465	2.901119584
Interacción	0.20871875	9	0.023190972	4.004196643	2.188765768
Dentro del grupo	0.185333333	32	0.005791667		
Total	13.46069792	47			

Según los resultados encontrados, la densidad de corriente es la que tiene mayor influencia sobre la concentración de hierro, debido a que, es el que tiene mayor valor de  $F_{\text{tratamiento}}$ , seguido por el tiempo de residencia y finalmente por la interacción de ambos; es decir, la densidad de corriente, el tiempo de residencia y la interacción de la densidad de corriente con el tiempo de residencia afectan significativamente sobre la concentración de hierro, dicha afirmación queda respaldada estadísticamente mediante el análisis de varianza.

Así mismo, la densidad de corriente también es la que tiene mayor influencia sobre el pH, debido a que, es el que tiene mayor valor de  $F_{\text{tratamiento}}$ , seguido por el tiempo de residencia y finalmente por la interacción de ambos; es decir, la densidad de corriente, el tiempo de residencia y la interacción de la densidad de corriente con el tiempo de residencia afectan significativamente sobre el pH de la solución DAM, dicha afirmación queda respaldada estadísticamente mediante el análisis de varianza.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES

Se concluye afirmando que la densidad de corriente y tiempo de residencia influyen en la reducción de la concentración de hierro e incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca, el cual se evidenció mediante el análisis de varianza y los resultados obtenidos.

La densidad de corriente influye significativamente sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca. La cual se evidenció mediante el ANOVA, encontrándose que el  $F_{\text{tratamiento}} = 767.54 > F_{\alpha, v_1, v_2} = 2.90$

El tiempo influye significativamente sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca. La cual se evidenció mediante el ANOVA, encontrándose que el  $F_{\text{tratamiento}} = 265.33 > F_{\alpha, v_1, v_2} = 2.90$

La interacción de la densidad de corriente y el tiempo influyen significativamente sobre la reducción de la concentración de hierro en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca. La cual se evidenció mediante el ANOVA, encontrándose que el  $F_{\text{tratamiento}} = 25.64 > F_{\alpha, v_1, v_2} = 2.19$

La densidad de corriente influye significativamente sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca. La cual se evidenció mediante el ANOVA, encontrándose que el  $F_{\text{tratamiento}} = 711.87 > F_{\alpha, v_1, v_2} = 2.90$

El tiempo influyen significativamente sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca. La cual se evidenció mediante el ANOVA, encontrándose que el  $F_{\text{tratamiento}} = 40.17 > F_{\alpha, v_1, v_2} = 2.90$

La interacción de la densidad de corriente y el tiempo influyen significativamente sobre el incremento del pH en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina de la zona de Hualgayoc, Cajamarca. La cual se evidenció mediante el ANOVA, encontrándose que el  $F_{\text{tratamiento}} = 4.00 > F_{\alpha, v_1, v_2} = 2.19$

## CAPÍTULO VI

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduvire, O. (2018). Dimensionado de sistemas de tratamiento de aguas acidas de mina. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 1-11.  
[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2519-53522018000200001#:~:text=En%20general%2C%20las%20aguas%20%20C3%A1cidas,%20%20K%2C%20Mg%20y%20otros.](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522018000200001#:~:text=En%20general%2C%20las%20aguas%20%20C3%A1cidas,%20%20K%2C%20Mg%20y%20otros.)
- Araya, N., Ramírez, Y., Kraslawski, A., & Cisternas, L. (2021). Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis. *Environmental Management*, 284, 112060. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112060>
- Castañeda, D., & Choton, E. (2019). *estudio de la densidad de corriente y tiempo de residencia en el proceso de electrocoagulación y su influencia en la reducción Fe(II) de solución de drenaje acido de mina*. Universidad Nacional de Trujillo.  
<https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2699413>
- Chilon, O., & Villalta, A. (2022). Aplicación del método de electrólisis para la recuperación de plomo en drenajes de la mina Algamarca - Cajamarca 2022. *Universidad Privada del Norte*.  
[https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN\\_648b6ea20a840571402f4b6387edb031/Description#tabnav](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN_648b6ea20a840571402f4b6387edb031/Description#tabnav)
- Cuba, M. (2020). Tratamiento de agua residual procedente de lavadoras por el método de electrocoagulación para la reutilización en riego de vegetales - Ate Vitarte. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*.

[https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/11734/Cuba\\_tm.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/11734/Cuba_tm.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Das, D., & Kumar, B. (2021). Treatment of iron ore beneficiation plant process water by electrocoagulation. *Arabian Journal of Chemistry*, Volume 14, Issue 1.

<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.11.008>.

EPA. (14 de marzo de 2023). *Impacto de los contaminantes biológicos en la calidad del aire interior*. <https://espanol.epa.gov/cai/impacto-de-los-contaminantes-biologicos-en-la-calidad-del-aire-interior>

Gamonal, P. (2020). *Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos*.

Retrieved 15 de agosto de 2023, from

<http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/MedioAmbiente/DAMhumedales.pdf>

Gonzales, E., & Malca, M. (2019). *Influencia del amperaje y tiempo de residencia sobre el porcentaje de remoción de metales pesados en el tratamiento de aguas ácidas de Minera Yanacocha S.R.L. por electrocoagulación, 2018*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/21258>

Jimbo, A. (2019). Dinámica de la generación de Drebaje Ácido en los materiales de concentración del Proyecto Loma Larga. *Universidad de Azuay*.

<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8832/1/14488.pdf>

Kalonji-Kabambi, A., Demers, I., & Bussière, B. (2020). Reactive transport modeling of the geochemical behavior of highly reactive tailings in different environmental conditions. *Applied Geochemistry*, 122 (104761). <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104761>

La Vanguardia. (30 de setiembre de 2019). *Batalla entre la minería y la ecología*.

<https://www.lavanguardia.com/participacion/lectores-corresponsales/20190930/47670210436/batalla-mineria-ecologia-mundo-cambio-climatico.html>

Navarrete, D. (2022). *Introducción a la electroquímica*. Retrieved 20 de agosto de 2023, from

[https://fq.iespm.es/documentos/diego\\_navarrete/2\\_quimica/8.pdf](https://fq.iespm.es/documentos/diego_navarrete/2_quimica/8.pdf)

Nwaila, G., Ghorbani, Y., Zhang, S., Frimmel, H., Leon, T., Derek, R., & Phumzile, N. (2021).

Valorisation of mine waste - Part I: Characteristics of, and sampling methodology for, consolidated mineralised tailings by using Witwatersrand gold mines (South Africa) as an example. *Journal of Environmental Management*, 295, 113013.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113013>

Olías, M., & Nieto, J. (2018, Julio 20). *Ríos rojos: el problema ambiental de las aguas ácidas de*

*mina*. <https://theconversation.com/rios-rojos-el-problema-ambiental-de-las-aguas-acidas-de-mina-163947>

Osman, M., Yang, F., & Massey, I. (2019). Exposure routes and health effects of heavy metals

on children. *Biometals*, 32(4), 563-573. <https://doi.org/10.1007/s10534-019-00193-5>

Piedra, N., & Zambrano, Y. (2021). *Aplicación electroquímica en la remoción de contaminantes*

*presentes en aguas residuales generadas de una planta procesadora de material minero*.

Huayaquil: Universidad de Huayaquil.

<https://repositorio.ug.edu.ec/server/api/core/bitstreams/bc3a47e3-9f5d-43ed-b6f2-59d0aecdcaec/content>

Plaza, D. (2022). *Qué es la electrólisis y para qué se utiliza*. Retrieved 14 de setiembre de 2023,

from <https://www.motor.es/que-es/electrolisis>

Química. (15 de agosto de 2023). *Electrólisis del agua*.

<http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/432-electrolisis-del-agua.html>

Radziszewski, P., & Dieter, B. (2023). Exploring the economic potential of an electrochemical alternative to managing acid mine tailings. *Minerals Engineering*, 191, 107968.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107968>

Ruíz-Huerta, E., Garza, A., Gómez-Bernal, J., Castillo, F., & Avalos-Borja, M. (2018). Arsenic contamination in irrigation water, agricultural soil and maize crop from an abandoned smelter site in Matehuala, Mexico. *Journal of Hazardous Materials*, 339, 330-339.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.06.041>

Simate, G., & Ndlovu, S. (2021). *Acid mine drainage formation, dissemination and control, Acid Mine Drainage, from waste to resources*. London: CRC Press.

Terán, J. (2019). *Tratamiento de Drenaje ácido de mina (DAM) por electrólisis para la remoción de plomo, Hualgayoc, Cajamarca, 2019*. Cajamarca: Universidad Privada del norte.

<https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/23867/Ter%c3%a1n%20Chilon%20Jos%c3%a9%20Abel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Tuffnell, S. (5 de setiembre de 2017). *Acid drainage: the global environmental crisis you've never heard of*. <https://theconversation.com/acid-drainage-the-global-environmental-crisis-youve-never-heard-of-83515>

Valles, D. (2021). *Eliminación de hierro y neutralización de drenajes ácidos por los métodos de tratamiento químico y por electrólisis*. Durango, México: Tecnológico Nacional de México - Maestro en Ciencias Ambientales.

[https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/4054/1/Tesis\\_VallesPerlataDaniaAraceli.pdf](https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/4054/1/Tesis_VallesPerlataDaniaAraceli.pdf)

Zamora, G., & Meza, R. (2022). Formación, prevención e innovación en el tratamiento de drenajes ácidos en operaciones mineras. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 7(1), 3-20. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2519-53522022000100001#:~:text=2022&text=El%20drenaje%20%C3%A1cido%20en%20operaciones,y%20al%20ox%C3%ADgeno%20del%20aire](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522022000100001#:~:text=2022&text=El%20drenaje%20%C3%A1cido%20en%20operaciones,y%20al%20ox%C3%ADgeno%20del%20aire).

Zevallo, J. (2018). *Estabilización del drenaje ácido de mina (DAM) de la empresa Paraíso Perdido Apata*. (T. p. Sostenible, Ed.) Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.  
<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4587/Zevallos%20S..pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## CAPÍTULO VII

### APÉNDICE

#### 7.1. Remoción de hierro

A continuación, en la Tabla 15, se aprecia los resultados de la concentración de hierro por triplicado, teniendo en cuenta que la concentración inicial de hierro tuvo en promedio 52.48 ppm, los mismos que son respaldados con los certificados correspondientes plasmados en los anexos.

**Tabla 15**

*Reporte por triplicado de las concentraciones promedio de Fe, en ppm, después del tratamiento*

		Tiempo de residencia (minutos)			
		35	40	45	50
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	4.160	4.140	3.880	3.820
		4.330	4.310	4.040	3.980
		4.460	4.440	4.160	4.100
	20	4.130	3.860	3.560	3.240
		4.300	3.720	3.710	3.370
		4.430	3.880	3.820	3.470
	25	3.720	3.210	2.430	1.880
		3.870	3.340	2.530	1.960
		3.990	3.440	2.610	2.020
	30	2.910	2.380	1.480	1.290
		3.030	2.480	1.540	1.340
		3.120	2.550	1.590	1.380

Estos datos fueron los que se emplearon para realizar el análisis de varianza del diseño bifactorial de trabajo empleando el Software Excel.

Con los resultados de la Tabla 15, se procedió a sacar el promedio y plasmarlos en la Tabla 8, la misma que se vuelve a replicar a continuación para los fines de entendimiento:

**Tabla 8**

*Reporte de las concentraciones promedio de Fe, en ppm, después del tratamiento*

		Tiempo de residencia (minutos)			
		35	40	45	50
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	4.320	4.300	4.030	3.970
	20	4.290	3.820	3.700	3.360
	25	3.860	3.330	2.520	1.950
	30	3.020	2.470	1.540	1.340

Con los resultados de la Tabla 8 se procedió a aplicar la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Reducción} = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Para efectos prácticos se procede aplicar la fórmula para el primer dato, en donde los siguientes se aplicó el mismo procedimiento, teniendo en cuenta que la concentración inicial de hierro promedio fue de 52.48 ppm:

$$\% \text{ Reducción}_1 = \frac{52.48 - 4.320}{52.48} \times 100$$

$$\% \text{ Reducción}_1 = 91.768 \%$$

Todos los resultados obtenidos fueron plasmados en la Tabla 9, la misma que se vuelve a considerar a continuación:

**Tabla 9***Reporte de la reducción promedio de Fe, en %, después del tratamiento*

		Tiempo de residencia (minutos)			
		35	35	35	35
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	91.768	91.806	92.321	92.435
	20	91.825	92.721	92.950	93.598
	25	92.645	93.655	95.198	96.284
	30	94.245	95.293	97.066	97.447

**7.2. Incremento de pH en la solución drenaje ácido de mina (DAM)**

A continuación, en la Tabla 10, se vuelve a considerar el reporte de pH promedio de la solución Drenaje Ácido de Mina (DAM), después del tratamiento, los cuales se obtuvieron a partir de los datos obtenidos por triplicados que se encuentran en la tabla 16 y cuyos resultados se sustentan con el reporte emitido por el laboratorio

**Tabla 10***Reporte de pH promedio de la solución Drenaje Ácido de Mina (DAM), después del tratamiento*

		Tiempo de residencia (minutos)			
		35	40	45	50
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	6.090	6.110	6.130	6.170
	20	6.220	6.360	6.440	6.560
	25	6.620	6.940	7.090	7.140
	30	7.250	7.420	7.460	7.630

**Tabla 16***Reporte por triplicado de pH promedio, después del tratamiento*

		Tiempo de residencia (minutos)			
		35	40	45	50
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	15	6.030	6.050	6.070	6.110
		6.090	6.110	6.130	6.170
		6.150	6.170	6.190	6.230
	20	6.120	6.250	6.330	6.450
		6.240	6.380	6.460	6.580
		6.300	6.440	6.520	6.650
	25	6.550	6.870	7.020	7.070
		6.620	6.940	7.090	7.140
		6.690	7.010	7.160	7.210
	30	7.180	7.350	7.390	7.550
		7.250	7.420	7.460	7.630
		7.320	7.490	7.530	7.710

**7.3. Análisis de varianza**

Con los datos obtenidos por triplicado se procedió a realizar el análisis de varianza, por cálculos matemáticos y empleando en Software Excel:

**7.3.1. Análisis de varianza mediante cálculos matemáticos****Suma total de cuadrados**

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c Y_{ijk}^2 - \frac{Y^2}{abn}$$

**Suma de cuadrados para el efecto A (tiempo de tratamiento)**

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_i^2}{bn} - \frac{Y^2}{abn}$$

**Suma de cuadrados para el efecto B (densidad de corriente)**

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_j^2}{an} - \frac{Y^2}{abn}$$

**Suma de cuadrados para la interacción entre el efecto A x B (tiempo de tratamiento y densidad de corriente)**

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij}^2}{n} - \frac{Y^2}{abn} - SS_A - SS_B$$

**Suma de cuadrados del error E**

$$SS_E = SS_T - SS_{subtotales}$$

$$SS_{subtotales} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij}^2}{n} - \frac{Y^2}{abn}$$

**Puntos porcentuales de la distribución F**

$$F \alpha, v_1, v_2$$

**Donde**

a: Niveles de la variable independiente 1

b: Niveles de la variable independiente 2

n: Número de repeticiones

$v_1 =$  Grados de libertad correspondientes  $= a-1 = b-1 = 4-1 = 3$

$$v_2 = ab(n-1) = 4 \times 4 (3-1) = 32$$

$$\alpha = 0.05$$

Los valores  $F_{\alpha, v_1, v_2}$  fueron obtenidos de la Tabla 15

**Tabla 17**

*Tabla resumen del análisis de varianza para los resultados encontrados del pH afectados por la densidad de corriente y el pH*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	$F_{\text{tratamiento}}$	$F_{\alpha, v_1, v_2}$
Densidad de corriente	$SS_A$	a-1	$SS_A/a-1$	$MSS_A/MSS_E$	Tabla 15
Tiempo de residencia	$SS_B$	b-1	$SS_B/b-1$	$MSS_B/MSS_E$	Tabla 15
Interacción	$SS_{AB}$	(a-1)(b-1)	$SS_{AB}/(a-1)(b-1)$	$MSS_{AB}/MSS_E$	Tabla 15
Dentro del grupo	$SS_E$	ab(n-1)	$SS_E/ab(n-1)$		
Total	$SS_T$	abn-1			

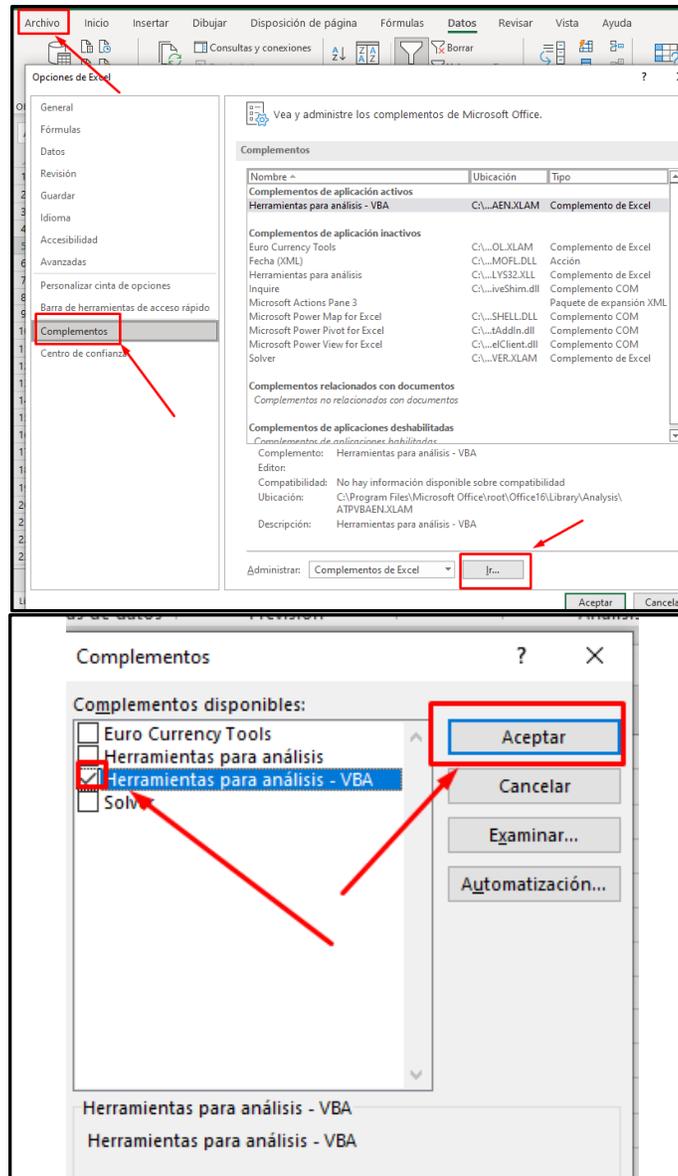
Las respuestas de la tabla 17 fueron plasmadas, anteriormente, en la Tabla 13

### 7.3.2. Análisis de varianza mediante el software Excel

Se procedió a realizar la activación de Análisis de datos dentro del software siguiendo los siguientes pasos. - Click siguiendo la siguiente ruta: Archivo – Opciones – Complementos – Ir; luego activar el casillero Herramienta para análisis VBA, según se evidencia en la Figura 14:

**Figura 14**

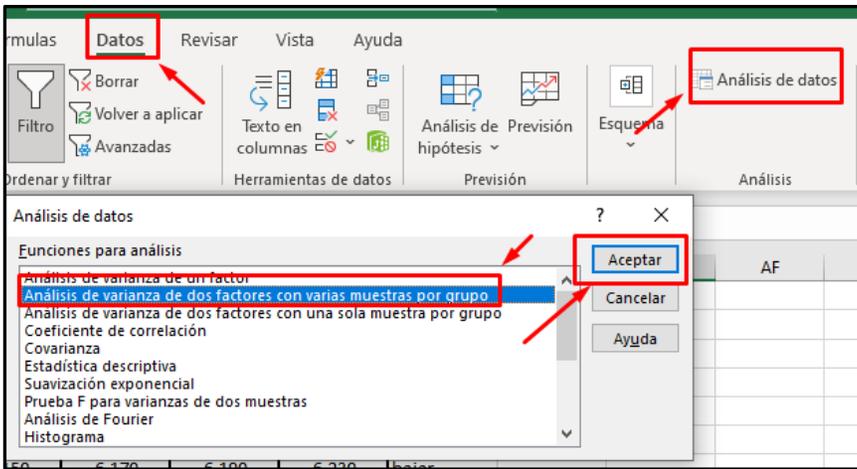
*Pasos para activar el análisis de datos en el Excel*



Luego se procedió a ir a Datos – Análisis de datos – Análisis de Varianza de dos factores con varias muestras por grupo – Aceptar, la cual se visualiza en la Figura 15.

**Figura 15**

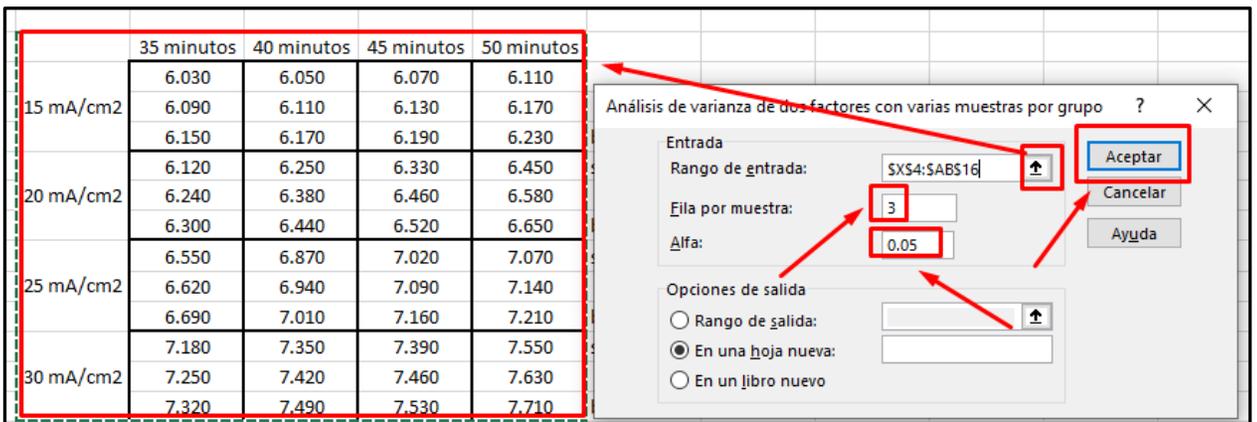
*Pasos para activar el análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo*



Luego se seleccionaron los datos a analizar, se colocó el número de réplicas en el casillero denominado Fila por muestra, en Alfa se colocó 0.05, el cual representaba el 5 % de error aceptado como valedero y finalmente click en Aceptar, tal cual se evidencia en la Figura 16

**Figura 16**

*Pasos para realizar el análisis de varianza*



Finalmente se visualizará la tabla de análisis de varianza de los datos analizados

**Tabla 18**

*Datos para la distribución  $F_{0.05, v_1, v_2}$*

$V_2$	$V_1$ Grados de libertad del numerador ( $V_1$ )																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	inf.		
2	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3		
3	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50		
4	10.73	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53		
5	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63		
6	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36		
7	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67		
8	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23		
9	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93		
10	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71		
11	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54		
12	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.52	2.49	2.45	2.40		
13	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30		
14	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21		
15	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13		
16	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07		
17	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01		
18	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96		
19	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92		
20	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88		
21	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84		
22	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81		
23	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78		
24	F <sub>0.05, v<sub>1</sub>, v<sub>2</sub></sub> => Interpolando: F <sub>0.05, 3, 32</sub> = 2.90								2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71		
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.33	2.27	2.23	2.15	2.08	2.00	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69		
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	F <sub>0.05, v<sub>1</sub>, v<sub>2</sub></sub> => Interpolando: F <sub>0.05, 9, 32</sub> = 2.19								1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65		
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64		
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62		
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51		
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39		
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.55	1.43	1.35	1.25		
Inf.	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.85	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00		

## 7.4. Análisis de efecto

### 7.4.1. Para el hierro

A continuación, se presentan el análisis de efecto para el hierro

**Tabla 19**

*Análisis de Varianza para Fe (ppm)*

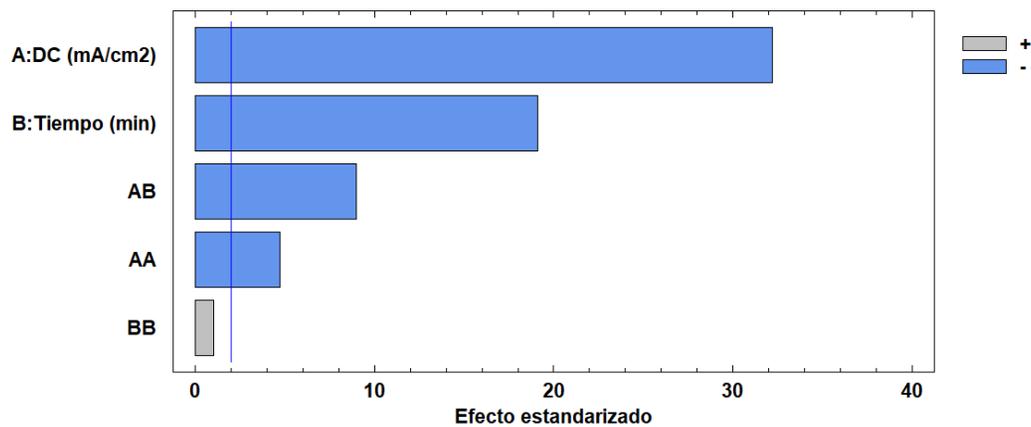
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:DC (mA/cm2)	29.8779	1	29.8779	1036.64	0.0000
B:Tiempo (min)	10.5002	1	10.5002	364.31	0.0000
AA	0.648675	1	0.648675	22.51	0.0000
AB	2.32672	1	2.32672	80.73	0.0000
BB	0.03	1	0.03	1.04	0.3137
bloques	0.303537	2	0.151769	5.27	0.0093
Error total	1.15287	40	0.0288218		
Total (corr.)	44.8399	47			

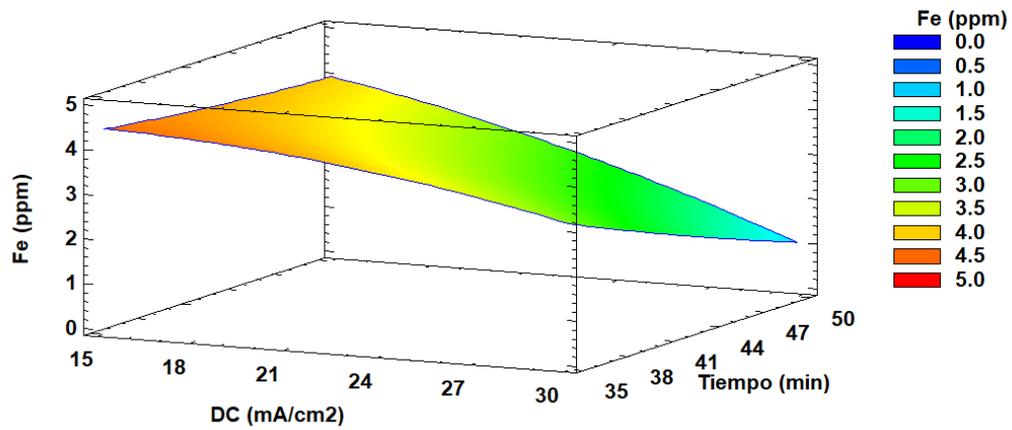
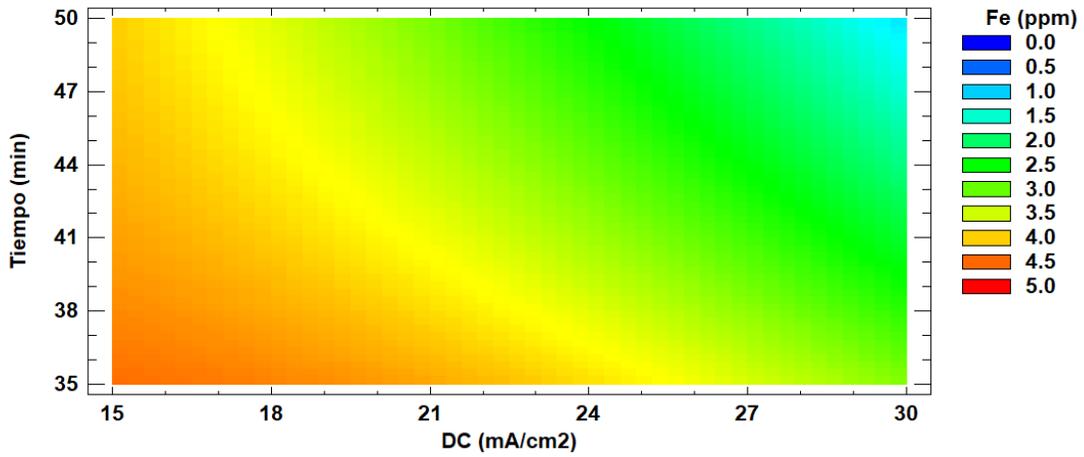
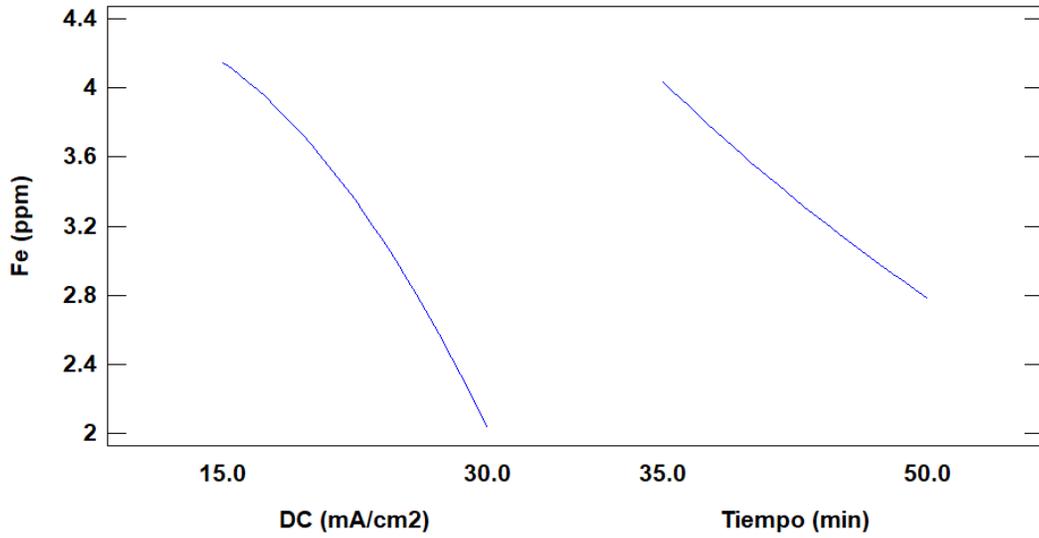
R-cuadrada = 97.4289 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 96.979 por ciento

**Figura 17**

*Relación del efecto estandarizado de las variables para el hierro*





$$Fe \text{ (ppm)} = 2.79798 + 0.367543 * DC \text{ (mA/cm2)} - 0.0101467 * Tiempo \text{ (min)} - 0.00465 * DC \text{ (mA/cm2)}^2 - 0.00704533 * DC \text{ (mA/cm2)} * Tiempo \text{ (min)} + 0.001 * Tiempo \text{ (min)}^2$$

### 7.4.2. Para el pH

A continuación, se presentan el análisis de efecto para el pH

**Tabla 20**

*Análisis de Varianza para el pH (ppm)*

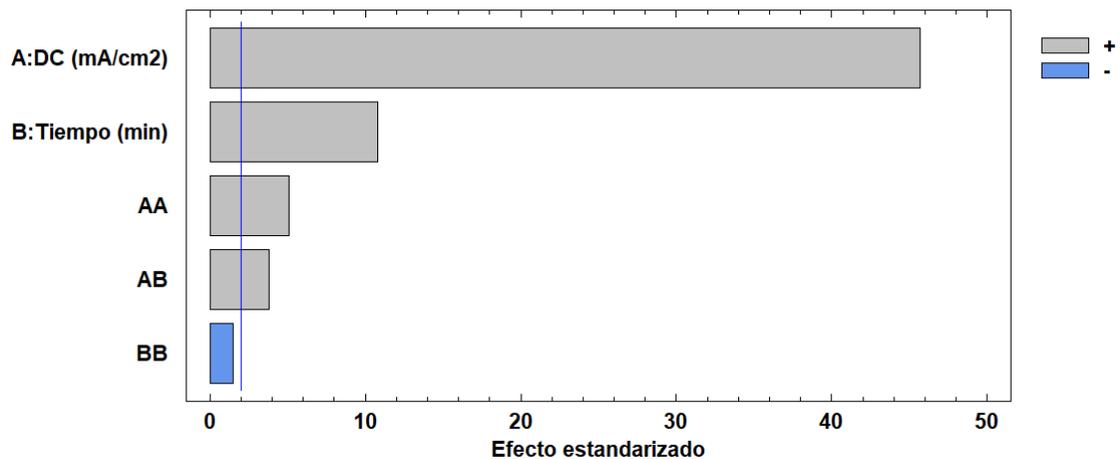
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:DC (mA/cm2)	12.1455	1	12.1455	2087.70	0.0000
B:Tiempo (min)	0.677344	1	0.677344	116.43	0.0000
AA	0.150752	1	0.150752	25.91	0.0000
AB	0.0851767	1	0.0851767	14.64	0.0004
BB	0.0130021	1	0.0130021	2.23	0.1428
bloques	0.156217	2	0.0781083	13.43	0.0000
Error total	0.232706	40	0.00581765		
Total (corr.)	13.4607	47			

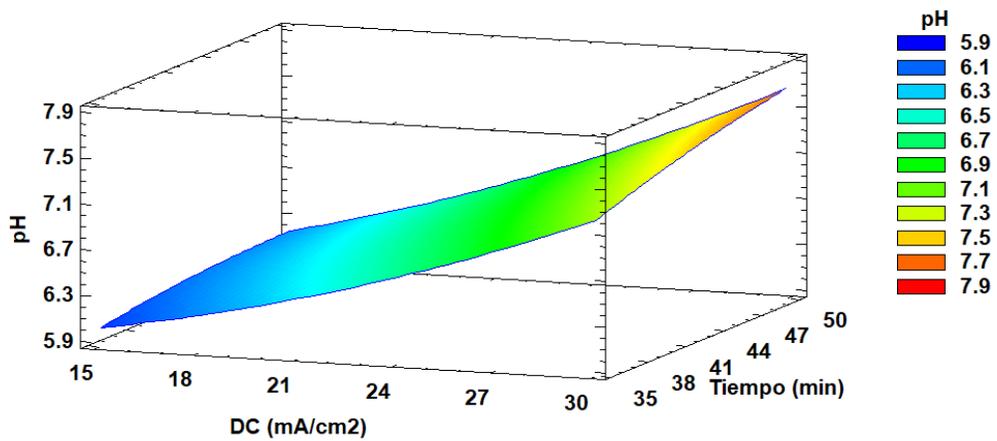
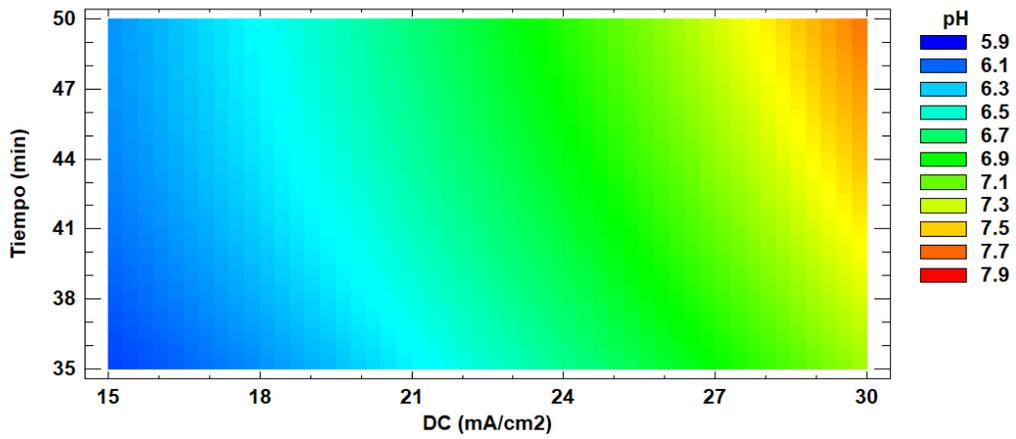
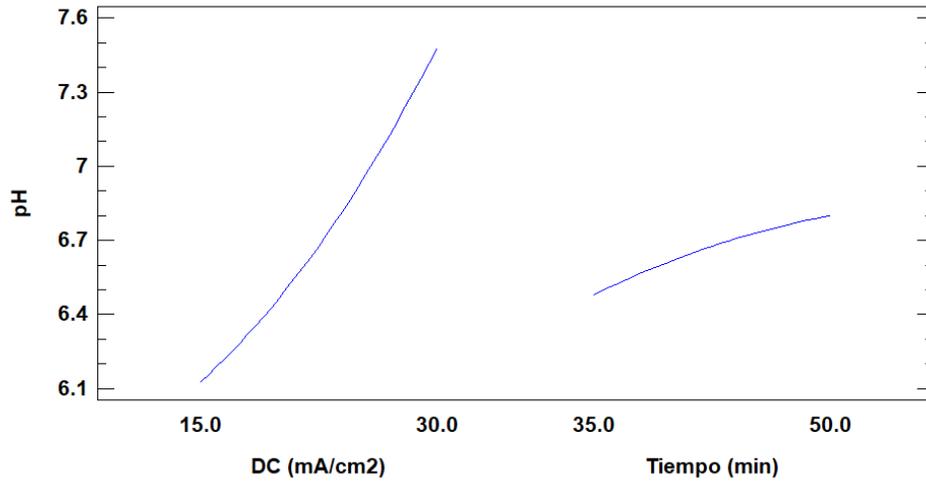
R-cuadrada = 98.2712 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 97.9687 por ciento

**Figura 18**

*Relación del efecto estandarizado de las variables para el pH*





$$\text{pH} = 4.98398 - 0.0681817 \cdot \text{DC (mA/cm2)} + 0.0468783 \cdot \text{Tiempo (min)} + 0.00224167 \cdot \text{DC (mA/cm2)}^2 + 0.001348 \cdot \text{DC (mA/cm2)} \cdot \text{Tiempo (min)} - 0.000658333 \cdot \text{Tiempo (min)}^2$$

### **7.4.3. Interpretación de resultados**

Debido a que la Razón-F es una medida de la relación entre la variabilidad explicada por el modelo (varianza entre los grupos) y la variabilidad no explicada (error). Un valor muy alto de la Razón-F sugiere que la variabilidad explicada por el modelo es mucho mayor que la variabilidad no explicada. Esto indica que las diferencias entre los grupos (o efectos de las variables independientes) son significativamente grandes, lo que sugiere un fuerte efecto.

Por otro lado, el valor-p mide la probabilidad de obtener resultados tan extremos como los observados, bajo la hipótesis nula (que generalmente establece que no hay efecto o diferencia significativa). Un valor-p de 0, en la mayoría de los casos o muy cercano a ello, indica que hay una evidencia extremadamente fuerte en contra de la hipótesis nula. Esto significa que el modelo es altamente significativo y que el efecto de las variables independientes sobre la variable dependiente es muy poco probable que haya ocurrido por azar.

Existe un efecto significativo: Con una Razón-F tan alta y un valor-p de 0, en la mayoría de los casos o muy cercano a ello, se puede concluir afirmando que hay un efecto muy significativo de las variables independientes sobre la variable dependiente. Las diferencias entre los grupos (o los efectos de las variables explicativas) no son producto del azar.

Alto poder del modelo: La Razón-F elevada sugiere que el modelo tiene un alto poder explicativo, es decir, las variables independientes explican una gran parte de la variabilidad en la variable dependiente.

En resumen, la combinación de una Razón-F muy alta y un valor-p igual a 0 en la mayoría de los casos o muy cercano a ello, sugiere que el modelo es altamente significativo y que los efectos observados no son debido al azar.

## CAPÍTULO VIII

### ANEXO 1 - REGISTRO FOTOGRÁFICO

**Figura 19**

*Inspección de la zona para extracción de muestras*



**Figura 20**

*Extracción de muestras de drenaje ácido de mina (DAM)*



**Figura 21**

*Colocación de muestras drenaje ácido de mina (DAM) en recipientes esterilizados*



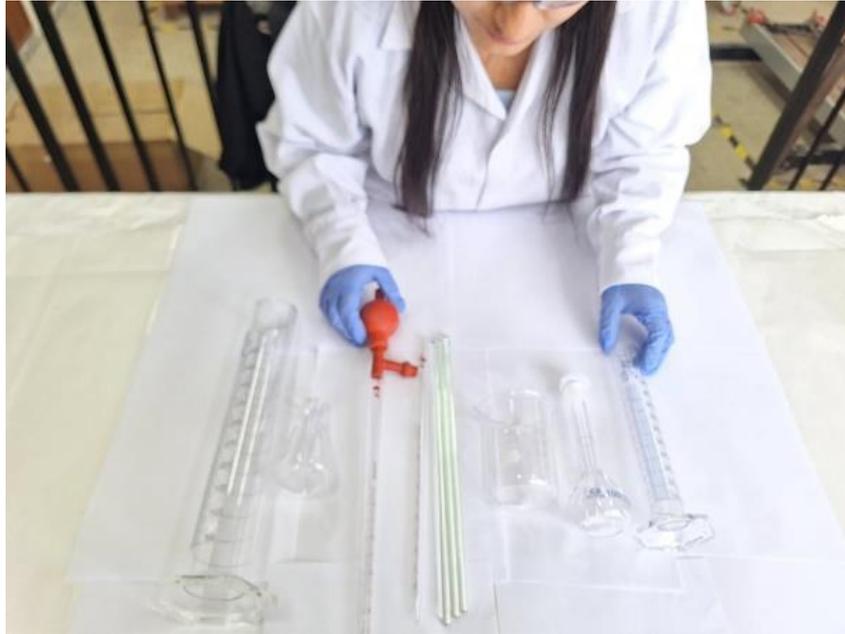
**Figura 22**

*Muestras DAM en recipientes esterilizados puestas en laboratorio*



**Figura 23**

*Instrumental de laboratorio usado para la corrida experimental: probeta, matraz, pipeta, bomba de succión, varillas de agitación, vaso de precipitación, fiola y probeta*



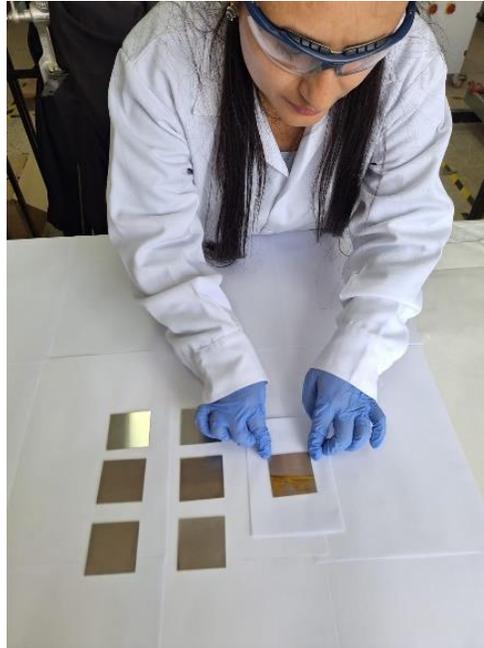
**Figura 24**

*Materiales usados para la corrida experimental: recipientes estériles, vernier, lijas*



**Figura 25**

*Electrodos de acero inoxidable*



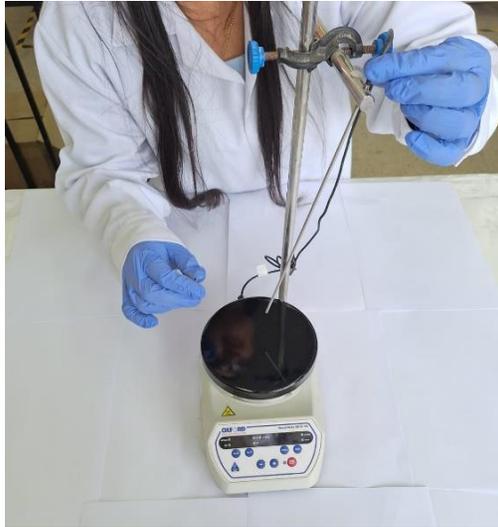
**Figura 26**

*Equipo usado en la corrida experimental: multitéster*



**Figura 27**

*Equipo usado en la corrida experimental: agitador termomagnético*



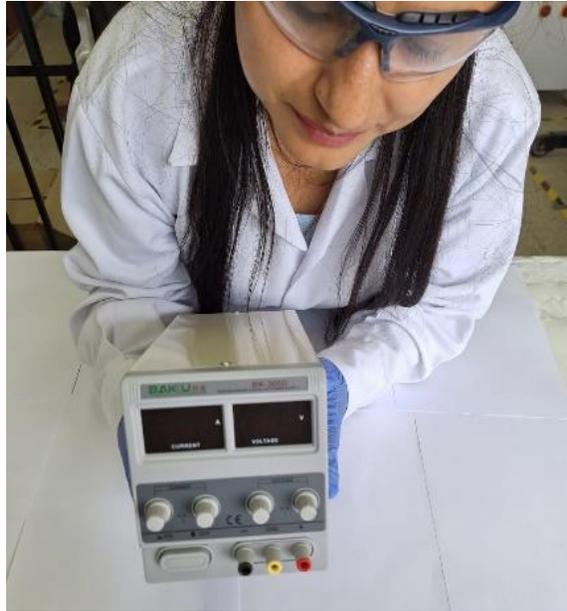
**Figura 28**

*Equipo usado en la corrida experimental: pH-metro*



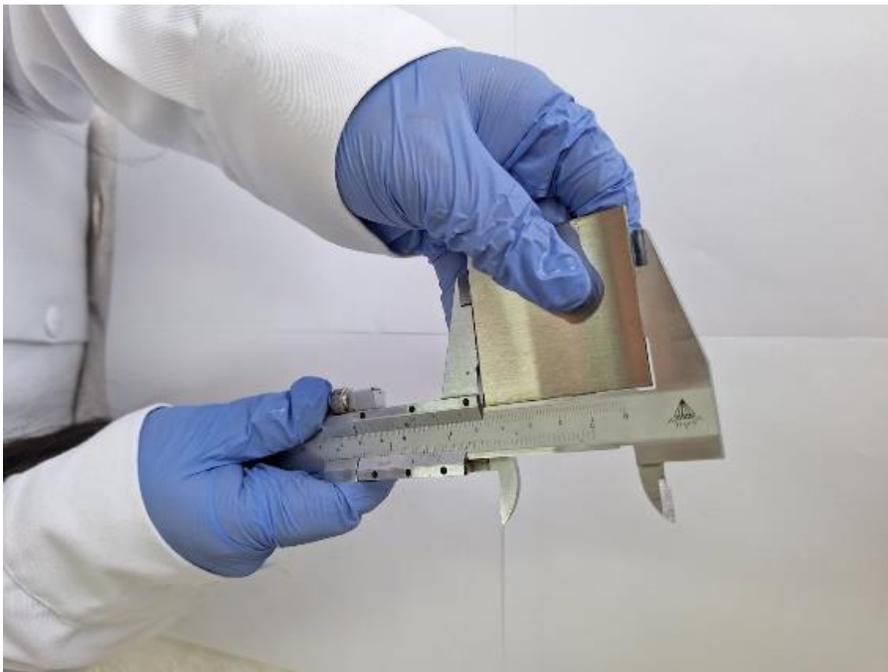
**Figura 29**

*Equipo usado en la corrida experimental: fuente de poder*



**Figura 30**

*Toma de medidas del electrodo de acero inoxidable*



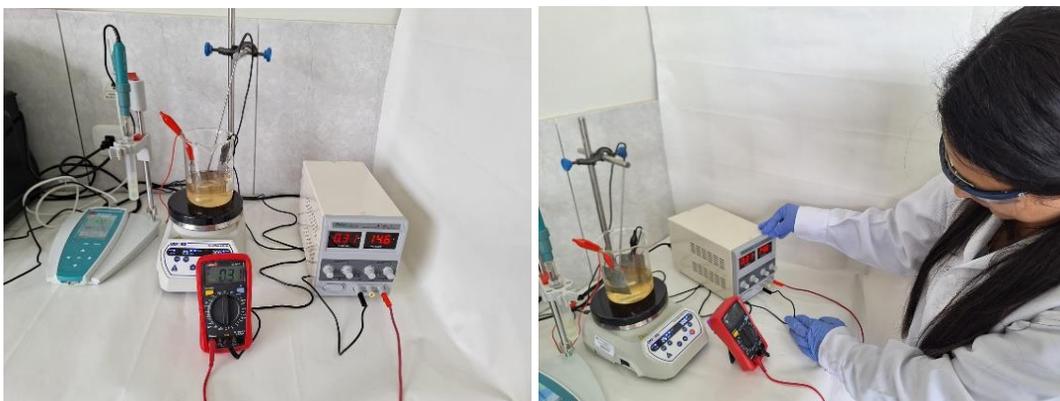
**Figura 31**

*Lijado y lavado de acero inoxidable*



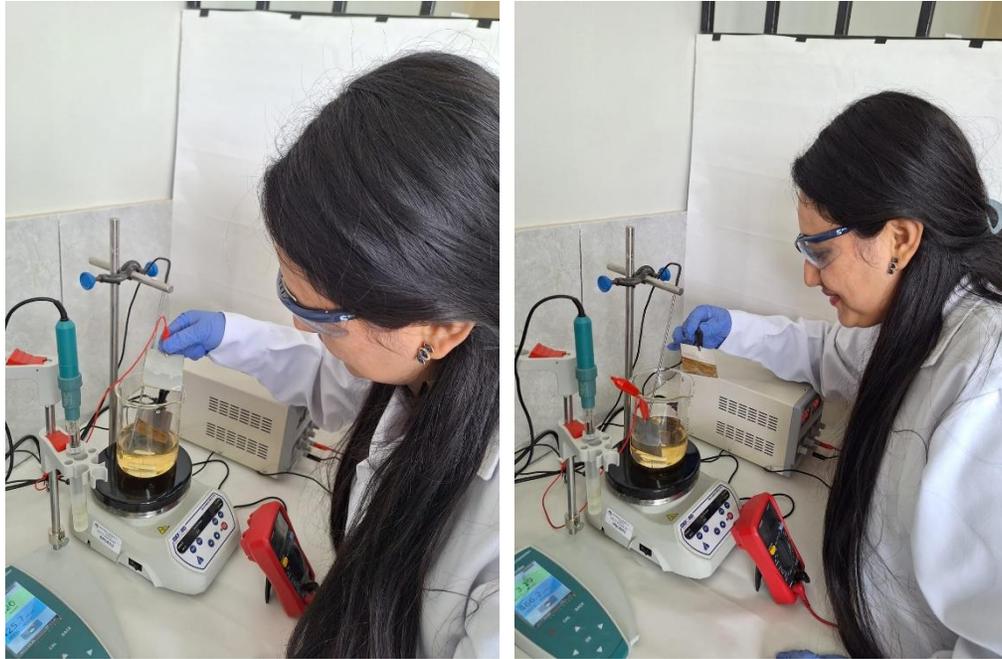
**Figura 32**

*Instalación del circuito experimental*



**Figura 33**

*Visualización del ánodo y cátodo después de la corrida experimental*



**Figura 34**

*Visualización cátodo después de la corrida experimental*



## ANEXO 2 – CERTIFICADOS DE LABORATORIO

Certificados emitidos por el laboratorio LAB PERÚ MINERALS S.R.L. Es una empresa ubicada en la ciudad de Trujillo, dedicada a brindar Servicios de Ensayos Químicos y Pruebas Metalúrgicas en minerales Metálicos y no Metálicos, con la disposición siempre de atender con el mejor servicio, brindando a sus clientes todo el conocimiento técnico que requieran, lo cual, sitúan al equipo de expertos estar siempre a la vanguardia de la industria y contiene certificaciones internacionales como el ISO:9001, generando confiabilidad a los resultados emitidos por dicho laboratorio:





## INFORME DE ENSAYO N° 156665

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 25/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 25/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 26/10/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-IN	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-2821-001		52.380

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 26 de octubre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 157370

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 28/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 28/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 30/10/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M- 0	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3183-003		52.580

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 30 de octubre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 157368

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 28/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 28/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 30/10/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-17	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3183-001		3.710

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 30 de octubre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158111

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-18	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-001		4,300

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158112

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-19	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-002		4.310

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158113

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-20	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-003		3.980

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158114

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-21	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-004		4.330

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158115

Cliete : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-22	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-005		3.870

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158116

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-23	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-006		3.720

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158117

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones liquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-24	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-007		3.370

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158118

Cliete : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-25	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-008		4,040

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158119

Cliete : CAMPOS FERNANDEZ SARAHÍ ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-26	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-009		3.340

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 157369

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 28/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 28/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 30/10/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M - 27	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3183-002		2,530

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 30 de octubre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158120

Cliete : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones liquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-28	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-010		1.960

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158121

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-29	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-011		3.030

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158122

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-30	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-012		2.480

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158123

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
 Referencia del Cliente :  
 Cantidad de Muestras : 1  
 Fecha de Recepción : 31/10/2023  
 Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
 Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
 Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones líquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-31	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-013		1,540

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
 Gerente Técnico  
 CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158124

Cliete : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 31/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-002 / Ver. 00	Determinación de Ag y Au por Absorción Atómica en Soluciones liquidas

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método Elemento	MLP-002
						Observación	Fierro Fe ppm
1	M-32	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de Plástico	OCT23-3572-014		1.340

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas".

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de noviembre del 2023



AUTORIZADO POR:

Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 156934

Cliete : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 25/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 25/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 26/10/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-018 / Ver. 00	Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24 th Ed. 2023 pH Value. Electrometric Method

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método	MLP - 018
						Elemento	PH
1	M-IN	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-2821-001	Observación	2.03
2	M-IN2	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-2821-002		2.86
3	M-IN3	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-2821-003		2.79
4	M-IN4	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-2821-004		2.74
5	M-IN5	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-2821-005		2.69

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas"

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 26 de Octubre del 2023

AUTORIZADO POR:  
Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 157373

Cliete : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 1  
Fecha de Recepción : 28/10/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 28/10/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 30/10/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-018 / Ver. 00	Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24 th Ed. 2023 pH Value. Electrometric Method

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método	MLP - 018
						Elemento	PH
1	M-17	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-3193-003		6.46

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas"

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 30 de Octubre del 2023

LAB PERÚ  
MINERALS SRL

AUTORIZADO POR:  
Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158484

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
Referencia del Cliente :  
Cantidad de Muestras : 7  
Fecha de Recepción : 02/11/2023  
Fecha de Inicio de Ensayo : 03/11/2023  
Fecha de Término de Ensayo : 03/11/2023  
Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-018 / Ver. 00	Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24 th Ed. 2023 pH Value. Electrometric Method

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método	MLP - 018
						Elemento	PH
1	M-23	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	NOV23-0215-001	Observación	6.58
2	M-29	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	NOV23-0215-002		6.09
3	M-32	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	NOV23-0215-003		6.24
4	M-18	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	NOV23-0215-004		6.13
5	M-20	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	NOV23-0215-005		6.17
6	M-21	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	NOV23-0215-006		6.11
7	M-22	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	NOV23-0215-007		6.38

"Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas"

Cantidad mínima de ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 03 de Noviembre del 2023

AUTORIZADO POR:  
Ing. Abner Paz Herrera  
Gerente Técnico  
CIP : 224522

FLP-099, Ver.01



## INFORME DE ENSAYO N° 158125

Cliente : CAMPOS FERNANDEZ SARAHI ALCIRA  
 Referencia del Cliente :  
 Cantidad de Muestras : 14  
 Fecha de Recepción : 31/10/2023  
 Fecha de Inicio de Ensayo : 31/10/2023  
 Fecha de Término de Ensayo : 01/11/2023  
 Lugar de ejecución del ensayo : Lab Perú Minerals S.R.L., Mz. N19, Lote 1C, Parque Industrial, La Esperanza, La Libertad, Perú

Código de Método	Descripción
MLP-018 / Ver. 00	Potencial de Hidrógeno (pH) a 25°C. SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24 th Ed. 2023 pH Value. Electrometric Method

N°	Cód. Cliente	Tipo Ensayo	Tipo Muestra	Presentación Muestra	Cód. Laboratorio	Método	MLP - 018
						Elemento	PH
2	M-19	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-3573-002	Observación	6.62
7	M-24	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-3573-007		7.09
8	M-25	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-3573-008		6.94
9	M-26	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-3573-009		7.63
10	M-28	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-3573-010		7.25
12	M-30	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-3573-012		7.46
13	M-31	Lote (Duplicado)	Solución	Frasco de plástico	OCT23-3573-013		7.14

\*Las muestras podrán ser retiradas por los interesados transcurrido el tiempo de almacenamiento que es de 14 días calendario a partir de la fecha de recepción para Contramuestras, rechazos o gruesos, caso contrario se procederá a desecharlas\*

Cantidad mínima de Ingreso para solicitud de contramuestra: Muestras por análisis newmont 1500 g | Otros análisis 800 g | Soluciones 300 ml

Emitido en Trujillo - Perú, 01 de Noviembre del 2023

AUTORIZADO POR:  
 Ing. Abner Paz Herrera  
 Gerente Técnico  
 CIP : 224522

FLP-099, Ver.01

### ANEXO 3 – VALIDACIÓN POR JUICIO DE EXPERTOS

Para la validación de la corrida experimental y de los resultados obtenidos, se procedió a realizar la replicabilidad de los mismos en el laboratorio del Departamento Académico de Ingeniería de Materiales de la Universidad Nacional de Trujillo, bajo la supervisión del Dr. Ing. César Pol Arévalo Aranda, cuya trayectoria profesional es:

- Doctor en Ciencias e Ingeniería.
- Magister en Gestión de Riesgos Ambientales y Seguridad en las Empresas.
- 1° Profesión: Ingeniero Metalurgista.
- 2° Profesión: Ingeniero Civil.
- Tesis Doctoral en Activaciones Alcalinas
- Especialista en electrólisis con Tesis de Maestría en Electrocoagulación de soluciones contaminadas.
- Catedrático en Universidades Públicas y Privadas.
- Catedrático de Pregrado y Posgrado.
- Catedrático de diversos cursos de Química, así como de Tesis y Proyecto de Tesis
- CIP: 139835

Y los análisis de laboratorio fueron realizados por el Dr. Ing. Alexander Y. Vega Anticona, también Ingeniero de reconocida trayectoria profesional en la prestigiosa Universidad Nacional de Trujillo, cuyos certificados se evidencian a continuación.



Dr. Ing. César Pol Arévalo Aranda  
DNI: 40889077



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

## Facultad de Ingeniería

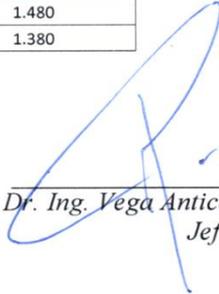
Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

### REPORTE DE ANÁLISIS

Solicitante	: Sarahí Alcira Campos Fernández
Investigación	: Concentración de hierro y pH, según la densidad de corriente y tiempo en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina, Hualgayoc, Cajamarca, 2022
Muestra	: Solución
Fecha de ingreso	: 06 de noviembre de 2023
Condición	: Muestra puesta en laboratorio

N°	Código	Fe [ppm]
01	M-1	3.820
02	M-2	4.430
03	M-3	4.440
04	M-4	4.100
05	M-5	4.160
06	M-6	3.990
07	M-7	3.860
08	M-8	3.240
09	M-9	3.880
10	M-10	3.440
11	M-11	2.430
12	M-12	2.020
13	M-13	2.910
14	M-14	2.380
15	M-15	1.590
16	M-16	1.290
17	M-33	3.560
18	M-34	4.130
19	M-35	4.140
20	M-36	3.820
21	M-37	4.460
22	M-38	3.720
23	M-39	3.880
24	M-40	3.470
25	M-41	4.160
26	M-42	3.210
27	M-43	2.610
28	M-44	1.880
29	M-45	3.120
30	M-46	2.550
31	M-47	1.480
32	M-48	1.380

Trujillo 08 de noviembre de 2023

  
Dr. Ing. Vega Anticona Alexander Y.  
Jefe de Laboratorio



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

## Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

### REPORTE DE ANÁLISIS

Solicitante	: Sarahí Alcira Campos Fernández
Investigación	: Concentración de hierro y pH, según la densidad de corriente y tiempo en el tratamiento por electrólisis de un drenaje ácido de mina, Hualgayoc, Cajamarca, 2022
Muestra	: Solución
Fecha de ingreso	: 06 de noviembre de 2023
Condición	: Muestra puesta en laboratorio

N°	Código	pH
01	M-1	6.52
02	M-2	6.07
03	M-3	6.69
04	M-4	6.23
05	M-5	6.17
06	M-6	6.25
07	M-7	6.45
08	M-8	7.02
09	M-9	7.01
10	M-10	7.55
11	M-11	7.35
12	M-12	7.18
13	M-13	6.03
14	M-14	7.53
15	M-15	7.21
16	M-16	6.30
17	M-33	6.33
18	M-34	6.19
19	M-35	6.55
20	M-36	6.11
21	M-37	6.05
22	M-38	6.44
23	M-39	6.65
24	M-40	7.16
25	M-41	6.87
26	M-42	7.71
27	M-43	7.49
28	M-44	7.32
29	M-45	6.15
30	M-46	7.39
31	M-47	7.07
32	M-48	6.12

Trujillo 08 de noviembre de 2023

*Dr. Ing. Vega Anticona Alexander Y.*  
Jefe de Laboratorio