

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA  
ESCUELA DE POSGRADO  
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA**



**TESIS:**

**Desarrollo de un proceso sostenible de lixiviación verde en  
el tratamiento de relaves de la minería aurífera artesanal:  
Caso Minera Aurífera Playa Marta - Madre de Dios**

Para optar el grado académico de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTADO POR:

**Bach. Jairo CASTILLON MENDIVIL**

ASESOR:

**Dr. Adolfo LA ROSA-TORO GOMEZ**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2024**

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme seguir avanzando en los proyectos trazados, a mis padres Jorge Castillon Bello y Ana Nelva Mendivil Sulca, por ser mi apoyo constante en mi vida; dedico la presente tesis a ellos, por orientarme y guiarme por el buen camino.

A mis hermanos mayores Elizabeth y George, por ser mis guías.

A mi hermano menor Jorge, por ser mi amigo y compañero.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi gratitud y agradecimiento a mi Alma Mater, la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga; por recibirme en sus aulas y ser el centro de mi formación profesional, a la Universidad Nacional de Ingeniería; por permitirme ser tesista en sus laboratorios de investigación y al PROCENCIA por brindar apoyo al conocimiento científico y por financiar la presente investigación; por medio del proyecto “Desarrollo Tecnológico: Sistema de tecnología limpia y de alta eficiencia, para la extracción de oro y remediación de pasivos ambientales de arena aluvial sin uso de mercurio”, por medio del contrato PROCENCIA N° PE501079406-2022.

Mi profundo reconocimiento a mi asesor Dr. Adolfo La Rosa-Toro Gomez, por acogerme como tesista en la Universidad Nacional de Ingeniería, por haber brindado generosamente su tiempo y conocimientos, y por ser guía para la culminación de la presente tesis, así también; mi agradecimiento a mis amigos del Grupo de Investigación de Electroquímica Aplicada de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, y en especial al Dr. José Luiz Da Silva, Dr. Wilner Valenzuela Barrientos, Mtr. Víctor Raúl Jauja Ccana y a mi amigo Bach. Fabricio Samuel Carrillo Lozano; miembros del GIEA, por brindar sus conocimientos para el desarrollo de la presente tesis.

## ÍNDICE GENERAL

|                                                                              | <i>Pág.</i> |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| DEDICATORIA.....                                                             | ii          |
| AGRADECIMIENTO.....                                                          | iii         |
| RESUMEN .....                                                                | xi          |
| ABSTRACT .....                                                               | xii         |
| INTRODUCCIÓN .....                                                           | xiii        |
| CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN.....                       | 1           |
| 1.1.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                                      | 1           |
| 1.1.1.    Definición operativa.....                                          | 2           |
| 1.1.1.1.    Problema general .....                                           | 2           |
| 1.1.1.2.    Problemas específicos .....                                      | 3           |
| 1.1.2.    Delimitación del problema.....                                     | 3           |
| 1.2.    OBJETIVOS .....                                                      | 3           |
| 1.2.1.    Objetivo general .....                                             | 3           |
| 1.2.2.    Objetivos específicos .....                                        | 4           |
| 1.3.    JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS .....                             | 4           |
| CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO .....                                              | 6           |
| 2.1.    ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....                               | 6           |
| 2.1.1.    Antecedentes internacionales .....                                 | 6           |
| 2.1.2.    Antecedentes nacionales .....                                      | 7           |
| 2.2.    MARCO CONCEPTUAL .....                                               | 9           |
| 2.2.1.    Minería aurífera artesanal en la región Madre de Dios.....         | 9           |
| 2.2.2.    Minera Artesanal Playa Marta.....                                  | 9           |
| 2.2.3.    Métodos de recuperación de mercurio.....                           | 10          |
| 2.2.3.1.    Tratamiento biológico .....                                      | 10          |
| 2.2.3.2.    Tratamiento por adsorción .....                                  | 11          |
| 2.2.3.3.    Desorción térmica .....                                          | 11          |
| 2.2.3.4.    Remediación fisicoquímica.....                                   | 12          |
| 2.2.3.5.    Remediación electrocinética .....                                | 13          |
| 2.2.4.    Química del mercurio .....                                         | 13          |
| 2.2.5.    Proceso de electrolixiación de mercurio con cloruro de sodio ..... | 14          |
| 2.2.6.    Diagrama de distribución de especies del cloro .....               | 18          |
| CAPÍTULO III METODOLOGÍA .....                                               | 20          |
| 3.1.    TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN .....                               | 20          |
| 3.1.1.    Procedimiento .....                                                | 20          |
| 3.2.    POBLACIÓN, MUESTRA Y UNIDAD DE ANÁLISIS .....                        | 22          |
| 3.2.1.    Población.....                                                     | 22          |
| 3.2.2.    Muestra.....                                                       | 22          |

|           |                                                                                     |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.3.    | Muestreo.....                                                                       | 22 |
| 3.2.4.    | Unidad de análisis .....                                                            | 22 |
| 3.3.      | TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....                                | 22 |
| 3.3.1.    | Técnicas de recolección de datos .....                                              | 22 |
| 3.3.2.    | Instrumentos de recolección de datos .....                                          | 23 |
| 3.3.3.    | Acopio y procesamiento de datos .....                                               | 23 |
| 3.4.      | HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....                                    | 23 |
| 3.4.1.    | Hipótesis general.....                                                              | 23 |
| 3.4.3.    | Hipótesis específicas.....                                                          | 23 |
| 3.4.4.    | Variable dependiente .....                                                          | 24 |
| 3.4.5.    | Variable independiente.....                                                         | 24 |
| 3.4.6.    | Indicadores .....                                                                   | 24 |
| 3.4.7.    | Materiales utilizados en la investigación .....                                     | 26 |
| 3.4.8.    | Equipos utilizados en la investigación.....                                         | 26 |
| 3.5.      | PROCEDIMIENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS .....                                   | 27 |
| 3.5.1.    | Ubicación y descripción del lugar de estudio .....                                  | 27 |
| 3.5.2.    | Obtención del relave minero .....                                                   | 28 |
| 3.5.3.    | Obtención de muestra representativa .....                                           | 28 |
| 3.6.      | CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE MINERO .....                                             | 29 |
| 3.6.1.    | Análisis del contenido de humedad .....                                             | 29 |
| 3.6.2.    | Determinación pH del relave minero.....                                             | 30 |
| 3.6.3.    | Determinación de la densidad del relave minero .....                                | 31 |
| 3.6.4.    | Identificación de mercurio y oro por inspección .....                               | 32 |
| 3.6.5.    | Cuantificación de mercurio y oro en el relave minero .....                          | 32 |
| 3.6.6.    | Caracterización de componentes mineralógicos del relave minero.....                 | 33 |
| 3.7.      | FORMULACIÓN DE LIXIVIANTE .....                                                     | 33 |
| 3.8.      | LIXIVIACIÓN DE MERCURIO EN PURO .....                                               | 35 |
| 3.9.      | LIXIVIACIÓN DEL RELAVE MINERO .....                                                 | 36 |
| 3.10.     | ANÁLISIS DE LIXIVIACIÓN DEL RELAVE MINERO .....                                     | 38 |
| 3.10.1.   | Análisis de lixiviación de mercurio y oro formulación C .....                       | 38 |
| 3.10.1.1. | Determinación de la cantidad de mercurio y oro en el relave minero.....             | 39 |
| 3.10.1.2. | Determinación de la cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final .....          | 39 |
| 3.10.1.3. | Determinación de la eficiencia en remoción de mercurio y oro .....                  | 40 |
| 3.10.2.   | Análisis de lixiviación de mercurio y oro formulación D .....                       | 40 |
| 3.10.2.1. | Determinación de la concentración de mercurio y oro en el lixiviado .....           | 41 |
| 3.10.2.2. | Determinación de la cantidad de mercurio y oro en el lixiviado.....                 | 41 |
| 3.10.2.3. | Determinación de la cantidad de mercurio y oro en el residuo de la lixiviación .... | 42 |
| 3.10.2.4. | Balance de materia del mercurio y oro .....                                         | 42 |
| 3.10.2.5. | Determinación de la eficiencia en remoción de mercurio y oro .....                  | 42 |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                                     | 43 |
| 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE MINERO .....                                | 43 |
| 4.1.1. Contenido de humedad del relave minero .....                         | 43 |
| 4.1.2. Análisis de pH del relave minero.....                                | 44 |
| 4.1.3. Densidad del relave minero .....                                     | 44 |
| 4.1.4. Identificación de mercurio y oro por inspección .....                | 45 |
| 4.1.5. Cuantificación de mercurio y oro en el relave minero .....           | 46 |
| 4.1.6. Caracterización componentes mineralógicos del relave minero.....     | 47 |
| 4.2. ANÁLISIS LIXIVIADO DE MERCURIO EN PURO .....                           | 48 |
| 4.3. LIXIVIACIÓN DEL RELAVE MINERO .....                                    | 48 |
| 4.4. ANALISIS DE MERCURIO Y ORO EN LA LIXIVIACIÓN DEL RELAVE MINERO         | 54 |
| 4.4.1. Análisis de lixiviación de mercurio y oro formulación C .....        | 54 |
| 4.4.1.1. Cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final .....             | 55 |
| 4.4.1.2. Eficiencia en lixiviación de mercurio y oro .....                  | 56 |
| 4.4.2. Análisis de lixiviación de mercurio y oro formulación D .....        | 56 |
| 4.4.2.1. Concentración de mercurio y oro en el lixiviado final.....         | 56 |
| 4.4.2.2. Cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final .....             | 58 |
| 4.4.2.3. Cantidad de mercurio y oro en el residuo de la lixiviación .....   | 58 |
| 4.4.2.4. Balance de materia del mercurio y oro .....                        | 59 |
| 4.4.2.5. Eficiencia en remoción de mercurio y oro .....                     | 59 |
| 4.4.2.6. Lixiviación de mercurio y oro con respecto al tiempo .....         | 60 |
| 4.5. RECUPERACIÓN DE MERCURIO.....                                          | 63 |
| 4.5.1. Precipitación del lixiviado .....                                    | 63 |
| 4.5.2. Obtención de curva de calibración electroquímica para mercurio ..... | 64 |
| 4.5.3. Electrodeposición de mercurio .....                                  | 68 |
| CONCLUSIONES.....                                                           | 72 |
| RECOMENDACIONES .....                                                       | 73 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                             | 74 |
| ANEXOS.....                                                                 | 80 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Temperaturas de desorción de algunas especies de mercurio .....                         | 12 |
| Tabla 2 Ensayos para la formulación de lixivante verde .....                                    | 21 |
| Tabla 3 Operacionalización de variables .....                                                   | 25 |
| Tabla 4 Formulación inicial del lixivante.....                                                  | 33 |
| Tabla 5 Formulación lixivante A.....                                                            | 34 |
| Tabla 6 Formulación lixivante B.....                                                            | 34 |
| Tabla 7 Formulación lixivante C.....                                                            | 35 |
| Tabla 8 Formulación lixivante D.....                                                            | 35 |
| Tabla 9 Formulación inicial del lixivante - mercurio en puro.....                               | 36 |
| Tabla 10 Lixiviación 60 minutos - Formulación lixivante C .....                                 | 39 |
| Tabla 11 Lixiviación 180 minutos – Formulación lixivante D .....                                | 40 |
| Tabla 12 Resultados de porcentaje de humedad del relave minero .....                            | 43 |
| Tabla 13 Determinación de pH del relave minero.....                                             | 44 |
| Tabla 14 Resultados de la densidad del relave minero .....                                      | 44 |
| Tabla 15 Análisis de mercurio y oro del relave minero .....                                     | 46 |
| Tabla 16 Porcentaje mineralógico del relave minero .....                                        | 47 |
| Tabla 17 Análisis lixiviación de mercurio puro .....                                            | 48 |
| Tabla 18 Comportamiento de parámetros – formulación lixivante A .....                           | 48 |
| Tabla 19 Comportamiento de parámetros – formulación lixivante B .....                           | 49 |
| Tabla 20 Comportamiento de parámetros – formulación lixivante C .....                           | 50 |
| Tabla 21 Comportamiento de parámetros – formulación lixivante D .....                           | 51 |
| Tabla 22 Comportamiento de parámetros 60 minutos- Formulación lixivante C ....                  | 54 |
| Tabla 23 Cantidad de mercurio y oro en el relave minero.....                                    | 55 |
| Tabla 24 Análisis de concentración de mercurio y oro en el lixiviado final .....                | 55 |
| Tabla 25 Cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final.....                                  | 56 |
| Tabla 26 Eficiencia de lixiviación de mercurio y oro – formulación C.....                       | 56 |
| Tabla 27 Comportamiento de parámetros de lixiviación 180 minutos - Formulación lixivante D..... | 56 |
| Tabla 28 Análisis de mercurio y oro en la muestra de lixiviado final – 180 min.....             | 57 |
| Tabla 29 Análisis de concentración de mercurio y oro en el lixiviado .....                      | 58 |
| Tabla 30 Cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final.....                                  | 58 |
| Tabla 31 Análisis de concentración de mercurio y oro en el residuo .....                        | 58 |
| Tabla 32 Eficiencia de lixiviación de mercurio y oro – formulación D.....                       | 59 |
| Tabla 33 Concentración de muestras lixiviado 15, 30, 45 y 60 minutos.....                       | 60 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 34 Porcentaje de lixiviación de mercurio en 15, 30, 45 y 60 minutos ..... | 60 |
| Tabla 35 Concentración de muestras lixiviado 60 y 120 minutos.....              | 61 |
| Tabla 36 Porcentaje de lixiviación de oro en 60, 120 y 180 minutos.....         | 62 |
| Tabla 37 Resumen de datos de lixiviación .....                                  | 63 |
| Tabla 38 Datos de curva de calibración electroquímica de mercurio .....         | 67 |
| Tabla 39 Cálculo de concentración de mercurio con respecto al tiempo .....      | 70 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Ubicación satelital de la concesión minera Playa Marta .....            | 10 |
| Figura 2 Esquema del proceso de electro recuperación .....                       | 13 |
| Figura 3 Esquema de proceso de electro lixiviación .....                         | 15 |
| Figura 4 Diagrama de Pourbaix de mercurio elemental .....                        | 16 |
| Figura 5 Diagrama de Pourbaix de un sistema mercurio – cloruro .....             | 17 |
| Figura 6 Diagrama de Pourbaix en un sistema oro - cloro .....                    | 17 |
| Figura 7 Diagrama de distribución del cloro.....                                 | 19 |
| Figura 8 Región de Madre de Dios - Provincia de Tambopata - Distrito Inambari... | 27 |
| Figura 9 Obtención del relave minero– Minera Playa Marta .....                   | 28 |
| Figura 10 Obtención de muestra representativa del relave minero.....             | 29 |
| Figura 11 Determinación de pH del relave minero.....                             | 30 |
| Figura 12 Determinación de densidad del relave minero.....                       | 32 |
| Figura 13 Diagrama de flujo del tratamiento de mercurio del relave minero .....  | 37 |
| Figura 14 Proceso de lixiviación del relave minero.....                          | 38 |
| Figura 15 Identificación de mercurio por inspección.....                         | 45 |
| Figura 16 Identificación de oro por inspección.....                              | 46 |
| Figura 17 Difractograma de la muestra de relave minero .....                     | 47 |
| Figura 18 Comportamiento del pH con respecto al tiempo - lixiviante A .....      | 49 |
| Figura 19 Comportamiento del ORP con respecto al tiempo - lixiviante A .....     | 49 |
| Figura 20 Comportamiento del pH con respecto al tiempo - lixiviante B .....      | 50 |
| Figura 21 Comportamiento del ORP con respecto al tiempo - lixiviante B .....     | 50 |
| Figura 22 Comportamiento del pH con respecto al tiempo - lixiviante C .....      | 51 |
| Figura 23 Comportamiento del ORP con respecto al tiempo - lixiviante C .....     | 51 |
| Figura 24 Comportamiento del pH con respecto al tiempo - lixiviante D .....      | 52 |
| Figura 25 Comportamiento del ORP con respecto al tiempo - lixiviante D .....     | 52 |
| Figura 26 Comportamiento del pH – Formulación de lixiviantes .....               | 53 |
| Figura 27 Comportamiento del ORP – Formulación de lixiviantes .....              | 53 |
| Figura 28 Comportamiento del pH con respecto al tiempo – Formulación C .....     | 54 |
| Figura 29 Comportamiento del ORP con respecto al tiempo – Formulación C .....    | 55 |
| Figura 30 Comportamiento del pH con respecto al tiempo – Formulación D .....     | 57 |
| Figura 31 Comportamiento del ORP con respecto al tiempo – Formulación D .....    | 57 |
| Figura 32 Lixiviación de mercurio con respecto al tiempo .....                   | 61 |
| Figura 33 Lixiviación de oro con respecto al tiempo .....                        | 62 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 34 Precipitación del lixiviado .....                                    | 63 |
| Figura 35 Sistema electroquímico .....                                         | 64 |
| Figura 36 Diagrama de ciclovoltamperometria del lixiviado filtrado.....        | 65 |
| Figura 37 Celda electroquímica.....                                            | 65 |
| Figura 38 Curva de calibración de mercurio .....                               | 66 |
| Figura 39 Curva de calibración.....                                            | 67 |
| Figura 40 Sistema de electrodeposición de mercurio .....                       | 68 |
| Figura 41 Cátodo recubierto con mercurio después de la electrodeposición ..... | 69 |

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar un proceso sostenible de lixiviación verde para el tratamiento de relaves de la minería aurífera artesanal con caso de estudio en la minera aurífera Playa Marta en Madre de Dios, la investigación fue de tipo experimental con un enfoque cuantitativo. Para la caracterización del relave minero se analizó la concentración de mercurio y oro al inicio y final de la lixiviación por espectrofotometría de absorción atómica de flama. Para la formulación de lixivante se tuvieron como variables de respuesta el pH en un rango de 4 a 4,5; el potencial de oxidación y reducción (ORP) superiores a 1 000 mV y el tiempo de lixiviación entre 60 a 180 minutos. Como resultados, el relave minero tuvo una concentración de 866,925 mg/kg de mercurio y 95,738 mg/kg de oro, la formulación del lixivante con relación a relave minero en peso seco fue de 1,267 mL/g, para los componentes individuales: cloruro de sodio (sal común) en una relación de 0,059 mL/g , hipoclorito de sodio en 0,360; agua para dilución 0,40; ácido fosfórico 0,01; y para la etapa de neutralización, ácido fosfórico en 0,023 e hidróxido de sodio 1 M en 0,335; el tiempo de lixiviación fue de 60 minutos para el mercurio y 180 minutos para el oro, la eficiencia de lixiviación fue del 99,56 % para el mercurio y 97,80 % para el oro, el residuo final de la lixiviación (arena) tuvo una concentración final menor a 1,458 mg/kg de mercurio y concentración menor a 0,688 mg/kg de oro. Se concluye que la formulación del lixivante permite una alta lixiviación de mercurio y oro; el cual puede ser utilizado para el tratamiento de los relaves de las mineras auríferas artesanales aluviales en la Región Madre de Dios.

**Palabra clave:** minería, relave, mercurio, oro, lixiviación.

## ABSTRACT

The objective of this research was to develop a sustainable green leaching process for the treatment of relationships in artisanal gold mining with a case study in the Playa Marta gold mining company in Madre de Dios. The research was experimental with a quantitative approach. To characterize the mining tailings, the concentration of mercury and gold at the beginning and end of leaching was analyzed by flame atomic absorption spectrophotometry. For the lixiviant formulation, the response variables were pH in a range of 4 to 4.5; the oxidation and reduction potential (ORP) exceed 1,000 mV and the leaching time between 60 to 180 minutes. As results, the mining tailings had a concentration of 866.925 mg/kg of mercury and 95.738 mg/kg of gold, the formulation of the lixiviant in relation to mining tailings in dry weight was 1.267 mL/g, for the individual components: chloride sodium (common salt) in a ratio of 0.059 mL/g, sodium hypochlorite in 0.360; water for dilution 0.40; phosphoric acid 0.01; and for the neutralization step, phosphoric acid at 0.023 and 1 M sodium hydroxide at 0.335; The leaching time was 60 minutes for mercury and 180 minutes for gold, the leaching efficiency was 99.56% for mercury and 97.80% for gold, the final leaching residue (sand) had a final concentration less than 1.458 mg/kg of mercury and a concentration less than 0.688 mg/kg of gold. It is concluded that the formulation of the lixiviant allows high leaching of mercury and gold; which can be used for the treatment of tailings from alluvial artisanal gold mining in the Madre de Dios Region.

**Keyword:** mining, tailings, mercury, gold, leaching.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la minería artesanal de extracción de oro que se desarrolla en el Perú utiliza el mercurio para recuperar oro. El mercurio tiene la propiedad de formar amalgamas con varios metales incluyendo el oro. Por otro lado; las arenas negras que son retenidas en las alfombras por gravimetría en la industria artesanal minera conteniendo oro, son recuperados para luego añadirles el mercurio, en una relación aproximada de 1 275 gramos de mercurio por cada tonelada de arena negra, de esta cantidad de mercurio el 6,51 % se queda retenido dentro de las arenas negras, convirtiéndose en relaves de la minería aurífera artesanal. Una vez realizado el amalgamamiento, se recupera una pasta de amalgama de mercurio y oro, este es retirado y posteriormente por el proceso de calentamiento se recupera el oro y se volatiliza el mercurio. El mercurio que es retenido por las arenas negras, queda impregnado de este y son almacenadas en pozos de amalgamamiento, con valores superiores a 800 ppm, que superan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo comercial/ industrial/ extractivo (valor máximo permisible de 24 ppm). La recuperación de oro por mercurio, tiene una eficiencia comprendida de 70 a 80 %; debido que el oro fino presente en las arenas negras no queda amalgamado; por ello, los relaves mineros se caracterizan por presentar una concentración superior de 80 mg/kg de oro, siendo una pérdida importante en la minería artesanal.

El mercurio presente en los relaves mineros artesanales representa una alta fuente de contaminación e introducción del mercurio a la naturaleza y contaminación en la cadena trófica; por lo que es de suma importancia desarrollar investigaciones que permitan el tratamiento de estos relaves mineros.

La presente investigación se desarrolló dentro del marco del proyecto "Desarrollo Tecnológico: Sistema de tecnología limpia y de alta eficiencia, para la extracción de oro y remediación de pasivos ambientales de arena negra aluvial sin uso de mercurio", financiado por PROCENCIA N° PE501079406-2022. Desarrollados en el laboratorio de Electroquímica Aplicada de la Universidad Nacional de Ingeniería, en el laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y en el Centro de Investigación Tecnológica Minera (CITE) – Puerto Maldonado – Madre de Dios.

## **CAPÍTULO I**

### **ASPECTOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La minería como actividad ha jugado un papel preponderante desde los orígenes de la humanidad, a partir del momento que el hombre comenzó a desarrollarla para elaborar herramientas que mejoraron su calidad de vida; permitiendo su subsistencia, y posterior a la revolución industrial hasta nuestros días el uso de los metales fue expandido a casi todas las actividades de la vida diaria (OSINERGMIN, 2017). Esta actividad a nivel mundial ha desarrollado grandes procesos de acuerdo a las dimensiones y capacidades de producción, siendo la división general el desarrollo de la gran minería, mediana minería y la pequeña minería o también denominado minería artesanal (INS, 2012).

La minería aurífera artesanal usa el mercurio para recuperar el oro de las rocas o arenas de los ríos, debido que el mercurio tiene la propiedad de formar aleaciones con casi todos los metales; llamadas amalgamas, entre ellos el oro y la plata (MINAM, 2015). El mercurio es considerado como un metal tóxico, que al ser vertido al medio ambiente se convierte en un contaminante nocivo por su alta persistencia, transformación y su capacidad de formar compuestos orgánicos. Es un metal con propiedades bioacumulables dentro de los seres vivos, aumentando la concentración dentro de los organismos a medida que se encuentren en exposición y acumulándose dentro de la cadena trófica (MINAM, 2017).

La región Madre de Dios es identificada por su gran diversidad biológica, por su abundancia en recursos vivos, por ello; es catalogado como la capital de la biodiversidad del Perú, cuenta con cinco áreas protegidas, gran diversidad de flora y

fauna, tiene una población de 200 000 habitantes que incluyen 32 comunidades nativas los cuales pertenecen a cinco etnias diferentes (MDI, 2017).

La minería aurífera aluvial en el Perú, es una actividad que se ejerce en diferentes regiones del país, siendo una de las zonas potenciales de esta actividad la región de Madre de Dios (DGCA, 2016). La minería artesanal en la Región Madre de Dios, utiliza mercurio para recuperar el oro de las arenas negras, este mercurio agregado tan solo el 10 % se combina con el oro formando la amalgama, el resto es sobrante y es reciclado o vertido al medio ambiente (UNEP, 2008). Esta actividad minera, tuvo en la región un aumento desde la década de 1990, generando deforestación de miles de hectáreas, convirtiéndose en una de las principales actividades por donde ingresa el mercurio a los ríos de la cuenca del Inambari, acompañado con los problemas ambientales que trae en la salud humana y ecológica (Barthem, R. et al., 2016), así también; la destrucción indiscriminada del suelo, la deforestación de los bosques, aumento de enfermedades, violencia social, trata de personas e inseguridad alimenticia (Osores et al., 2012). Según Vega C. et al., en el 2018 afirman que en la región Madre de Dios, entre el 77 % al 91 % de peces carnívoros que se encuentran en la influencia de la minería aurífera artesanal, presentan concentración de mercurio por encima de 0,5 mg/Kg, que advierten que su consumo puede generar riesgo a la salud, por otro lado; según CPILAP (2023), determina que la concentración en el cabello de personas de las comunidades indígenas ribereñas donde se desarrolla la minería artesanal, presentan una concentración media de mercurio de 4,04 ppm; valor 4 veces superior a los estándares de calidad según el Organismo Mundial de la Salud.

La presente investigación, pretende desarrollar un proceso sostenible de lixiviación verde en el tratamiento de relaves de la minería aurífera artesanal, utilizando agentes lixiviantes ecoamigables al medio ambiente y los relaves de la Minera Aurífera “Playa Martha” – Madre de Dios, a fin de obtener una metodología para reducir la contaminación por mercurio en la región Madre de Dios.

### **Definición operativa**

#### **1.1.1.1. Problema general**

¿Es posible desarrollar un proceso sostenible de lixiviación verde para el tratamiento de relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta?

#### **1.1.1.2. Problemas específicos**

- ¿Cuál es la composición mineralógica y concentraciones de mercurio y oro que caracteriza inicialmente al relave de la minera aurífera artesanal Playa Marta?
- ¿Cuáles serán los componentes adecuados para la formulación del lixiviante verde para el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta?
- ¿Cuáles son los parámetros de lixiviación favorables de tiempo y Potencial de Oxidación y Reducción (ORP) para el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta?

#### **1.1.2. Delimitación del problema**

La investigación se realizó en el Laboratorio de Electroquímica Aplicada del Centro de Investigación de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y en el laboratorio de Fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH). Las muestras se tomarán de los residuos de arenas negras (relave minero) de la minera aurífera artesanal “Playa Marta”, del distrito de Inambari de la provincia de Mazuko de la región Madre de Dios; la formulación y trabajo de laboratorio se realizó en los laboratorios de la UNI y la UNSCH, y los trabajos de campo se realizaron en el distrito de Inambari donde se realiza la actividad minera artesanal.

El tiempo en la cual se desarrolló la investigación fue desde el mes de enero del año 2023 hasta abril del año 2024.

### **1.2. OBJETIVOS**

#### **1.2.1. Objetivo general**

Desarrollar un proceso sostenible de lixiviación verde para el tratamiento de relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar inicialmente el relave de la minera aurífera artesanal Playa Marta mediante la composición mineralógica y concentración de mercurio y oro.
- Determinar los componentes adecuados para la formulación del lixiviante verde para el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta.
- Determinar los parámetros de lixiviación favorables de tiempo y Potencial de Oxidación y Reducción (ORP) para el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS**

La minería aurífera ha representado la principal economía en el Departamento de Madre de Dios desde el año 1973, dicha actividad se desarrolla a lo largo de las diversas cuencas hidrográficas de la Región (Rubio, 2010). Esta actividad es sumamente perniciosa para la salud humana en la Región de Madre de Dios y en todo el Perú, el cual afecta a las poblaciones cercanas donde se desarrolla la actividad minera informal e ilegal, así como; a las poblaciones que se encuentran alejadas a ellas (Plenge & Jaimes, 2012). En la recuperación de oro, los mineros utilizan mercurio por el método de amalgamación, generando al final del proceso relaves mineros que presentan una concentración superior a 275 ppm de mercurio (Huamán, F. et al., 2020). Por otro lado; los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos de la Normativa Peruana, describen que para un suelo comercial/ industrial/ extractivo, la concentración máxima de mercurio es de 24 ppm (MINAM, 2017), las concentraciones de metales superiores al ECA para suelo es considerado como peligro de contaminación, catalogando los relaves como residuos tóxicos peligrosos. Al final del proceso de recuperación de oro con mercurio, los relaves son vertido e introducido a las fuentes de agua, produciendo contaminación de los ríos, el cual es un problema de salud pública para la región, debido que el mercurio se introduce dentro de la cadena trófica alimenticia, y al final llega a los seres humanos. El contacto con mercurio puede ocasionar intoxicación crónica, hasta generación de patologías neurológicas congénitas en embriones y fetos (Plenge et al., 2010). Otras enfermedades producto de la exposición de mercurio, fueron identificados como

padecimientos en el deterioro cognitivo, autismo, hipercolesterolemia, infertilidad y defectos en el tubo neural (López T. & Chamizo G., 2023).

Frente a lo señalado se justifica el presente trabajo de investigación, el cual plantea una metodología rápida, económica y amigable con el medio ambiente, para remover el mercurio presente en los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta en Madre de Dios, para reducir la concentración de mercurio antes de ser introducidos al ecosistema y reducir su peligrosidad como pasivo ambiental.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **2.1.1. Antecedentes internacionales**

Rey (2019), desarrolló una revisión bibliográfica de las tecnologías de remediación, para mitigar los efectos de plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg) de origen antropogénico presentes en el suelo con el fin de mejorar las tecnológicas utilizadas, en especial en la fitorremediación mejorada, la electorremediación mejorada con agentes quelantes y el lavado de suelos. Además, señalan algunos factores que afectan la eficiencia de extracción de los metales por estos agentes quelantes como el pH y la materia orgánica.

Thoming, L. et al., 1999. En la investigación desarrollaron un proceso de electrolixiviación para remediar suelos con contenido de mercurio, utilizaron muestras de minería aurífera brasileña que contenían mercurio en una concentración de 6 mg/kg y muestra de industria alemana contaminada con mercurio con una concentración de 220 mg/kg, evaluaron el proceso de electrolixiviación en pruebas a escala de laboratorio, utilizaron como agente lixivante el ácido hipocloroso, produciéndose por oxidación mediante reacción electrolítica del cloruro de sodio. Los experimentos lo realizaron con electrolisis de 500 mL de volumen de la mezcla, utilizando 2 electrodos de grafito. El lixiviado con iones mercurio en complejo por la acción de iones cloruro, fue tratado por electrodeposición para la recuperación del mercurio en la forma elemental. Midieron como principales parámetros el pH y la densidad de corriente limite, determinaron que el rendimiento del ácido hipocloroso depende directamente del pH y ORP, demostraron que el pH óptimo a trabajar es de

pH igual a 6, la densidad de corriente límite de 0,90 V, la concentración de cloruro de sodio de 1 mol/L y el tiempo de electrolixiviación de 3 horas. Concluyen con una concentración final inferior a 1 mg/kg de mercurio y una recuperación de 99 % para los residuos de minería aurífera brasileña, y una concentración final de 28 mg/kg de mercurio y una recuperación final del 87 % para la muestra de industria alemana. Concluyeron que el proceso de electrolixiviación es una de las mejores soluciones para el tratamiento de pasivos ambientales de la minería aurífera brasileña con bajo nivel concentración de mercurio.

Santos, L. & Correa, L., 1995. En su investigación presentan resultados a escala de laboratorio de muestras de minería de oro que utilizaron mercurio. El residuo utilizado fue de la región Pocone en Brasil, donde se practica la minería aurífera y la recuperación de oro con mercurio, el residuo presenta una concentración inicial de mercurio de 45,7 ppm y una concentración de oro de 1 ppm. Realizaron la recuperación de mercurio por el proceso de electrolixiviación en medio de cloruro de sodio para formar ácido hipocloroso, utilizaron 0,86 mol/dm<sup>3</sup> de concentración de cloruro de sodio, como electrodos utilizaron lámina de platino y carbón, un tiempo de electrolixiviación de 180 minutos, un pH entre los valores de 6 a 6,5 y densidad de corriente límite de 0,90 V. Los ensayos lo realizaron en 1 L de solución de cloruro de sodio y 0,20 kg de residuo de minería de oro conteniendo mercurio. Concluyeron que la concentración final en el residuo de electrolixiviación fue de 0,1 ppm de mercurio y representó una recuperación superior al 99 %, así también; las pequeñas trazas de oro fueron recuperados formando amalgama con el mercurio electrodepositado, siendo analizadas en las virutas extraídas del cátodo.

### **2.1.2. Antecedentes nacionales**

Apaza & Galdos 2021. En su investigación evaluaron el tratamiento de relaves de la minería artesanal con el método de electrolixiviación con cloruro de sodio para la mitigación de mercurio, el tipo de investigación fue experimental puro, la muestra de estudio fueron los relaves mineros provenientes de la minería artesanal que utilizan la amalgamación para recuperar el oro. El relave minero fue recuperado del centro poblado de Mollehuaca del distrito de Huanuhuanu de la provincia de Caravelí del departamento de Arequipa. El análisis de los contaminantes lo realizaron por el método de metales totales ICP-masa. La parte experimental lo desarrollaron en 3 ensayos con 1 000 g de relave minero, 5 L de volumen de electrolito, electrodos el

grafito, intensidad de corriente de 2 A, tiempo de operación de 5 horas y una concentración de solución de NaCl en 3,5 molar. Obtuvieron como resultado una concentración de mercurio en el relave minero de 1 226,00 ppm y al final del proceso obtuvieron una remoción de mercurio del 56,53 %.

Quiroz, A. et al., 2021. El objetivo de su trabajo fue recuperar el oro aluvial de las arenas negras por la oxidación del oro por acción del hipoclorito generado por electrolisis del NaCl y agregando directamente lejía como fuente de hipoclorito de sodio. La muestra de arena aluvial fue tomada de la concesión minera "La Familia" perteneciente al Bajo Puquiri del Departamento de Madre de Dios. Las muestras fueron puestas en operación de una mesa gravimétrica, donde se separó el oro grueso del fino. Realizaron el estudio de electrolixiviación tanto para oro patrón y oro aluvial, utilizaron celdas de tres electrodos, como electrodo de trabajo oro patrón, como electrodo auxiliar electrodo de grafito, como electrodo de referencia de Ag/AgCl y como fuente de energía un potencióstato - galvanostato. Utilizaron como electrolito NaCl en una concentración de 10 g/L, emplearon la técnica voltamperometría cíclica en un rango de potencial de 0 a 1,5 V vs Ag/AgCl y una velocidad de barrido de 100 mV/s y un pH igual a 2. Para el proceso de recuperación del oro lixiviado, utilizaron el método de precipitación con solución de sulfato ferroso a pH igual 2 y como regulador de acidez el ácido fosfórico. Determinaron que al agregar lejía (hipoclorito de sodio) directamente al sistema de electrolixiviación, aumenta el poder oxidante; el cual tiene la capacidad de lixiviar químicamente al oro. Determinaron que el oro grueso retirado de la mesa gravimétrica tuvo una concentración porcentual de 80,76 %; y el oro fino no retenido tuvo un análisis cuantitativo de 0,196 g/kg de arenilla aluvial tratada. En el proceso de recuperación obtuvieron un 99,93 % para oro patrón y un 99,89 % para el oro aluvial.

Huamán, F. et al., 2020. Su investigación tuvo como objetivo la caracterización preliminar de arenas negras recolectadas de diferentes concesiones mineras auríferas que utilizan el mercurio para recuperar el oro en la región Madre de Dios. Realizaron el análisis de 4 muestras cerca de las cuencas hidrográficas de Inambari, Colorado, Bajo Madre de Dios y Alto Madre de Dios, obtuvieron la muestra representativa por medio de la técnica de cuarteo y realizaron la medición de pH, humedad, determinación de mercurio por medio de ICP-AES y un análisis de caracterización de fases por DRX del residuo minero. Determinaron que el pH de las arenas negras medidas a 25 °C fue ligeramente acida con un pH promedio de 6,8 y

la humedad de las muestras fue de 3 % para las muestras de Colorado y Bajo Madre de Dios, y para Inambari y Alto Madre de Dios tuvieron una humedad de 10 %. La mayor concentración de mercurio fue de 275 mg/kg perteneciente a Alto Madre de Dios y la concentración más baja fue de Inambari con 13,1 mg/kg. El análisis por difracción de rayos X demostraron una alta intensidad para las especies de cuarzo en un 54,4 % y goetita en un 35 %, y en menor presencia la caolinita con 3,1 % y otras especies con menor porcentaje.

## **2.2. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.2.1. Minería aurífera artesanal en la región Madre de Dios**

La minería aurífera aluvial en el Perú, es una actividad que se ejerce en diferentes regiones del país, de las cuales una de las zonas potenciales de esta actividad es la región de Madre de Dios (DGCA, 2016). El oro del departamento de Madre de Dios se encuentra en polvo y en pepitas en los ríos, playas y viejos cauces de ríos; ubicadas en las vertientes del sureste del departamento; esto producto que los ríos nacen en las alturas andinas (OGEI, 2019), las principales cuencas y subcuencas son los ríos Madre de Dios, Inambari, Colorado, Tambopata y Malinowski (IIAP, 2011). Estas minerías artesanales usan mercurio en el proceso de extracción de oro, que al final del proceso se obtiene un residuo llamado arenas negras (Huamán et al., 2020), que mediante ensayos de toxicidad “Toxicity Characteristic Leaching Procedure” las arenas negras de Madre de Dios son residuos peligrosos por contener mercurio que supera los valores de 0,2 mg/L (Huamán et al., 2017). Esta minería artesanal de oro genera a parte de la destrucción indiscriminada del suelo amazónico, deforestación de los bosques, aumento de enfermedades, violencia social, trata de personas e inseguridad alimenticia (Osores et al., 2012), así también; tiene un impacto negativo en la degradación de la salud, de la fauna y los seres humanos (Ramírez et al., 2019).

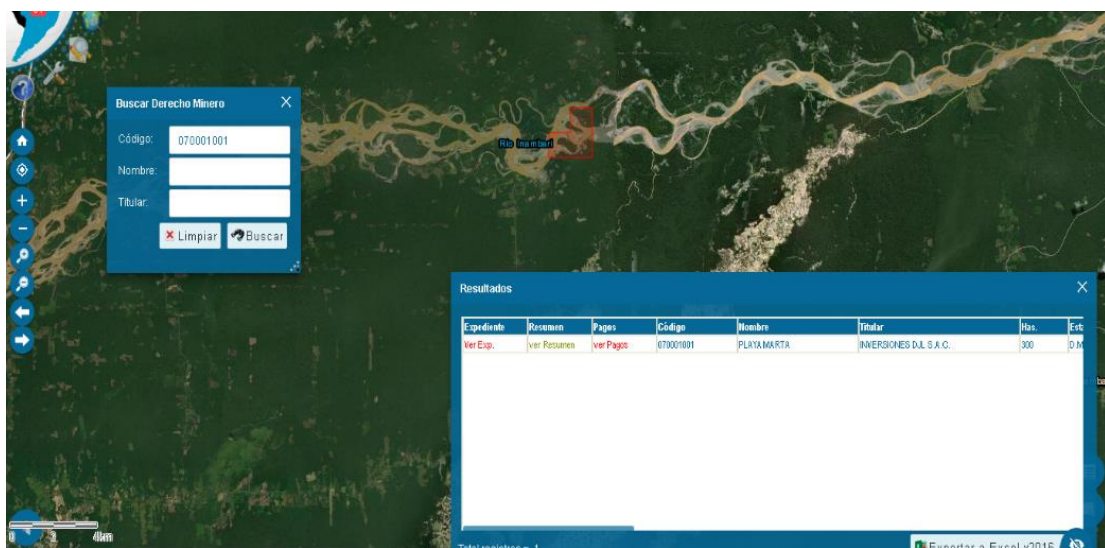
### **2.2.2. Minera Artesanal Playa Marta**

La concesión minera Playa Martha con código 070001001, presenta una extensión de 300 hectáreas, localizado en el distrito de Inambari, provincia de Tambopata, departamento de Madre Dios. Esta concesión minera se encuentra registrada y formalizada ante la Dirección Regional de Energía, Minas e Hidrocarburos (DREMEH). La actividad principal es la extracción de oro por explotación a tajo

abierto y posterior concentración por tolvas gravimétricas, producto de esto se obtiene las arenas negras; material retenido en las tolvas. Las arenas negras son llevadas al área de amalgamación, donde se agrega mercurio líquido para formar la amalgama con el oro, y posterior incineración del mercurio para recuperar el oro. El residuo de arenas negras; los cuales contienen mercurio, son almacenados en las pozas de amalgamación, donde se almacena hasta el llenado y posterior secado. En la figura 1 se observa la fotografía satelital de la empresa Playa Marta.

## Figura 1

*Ubicación satelital de la concesión minera Playa Marta*



*Nota:* La figura fue obtenida de la base de datos del Ministerio de Energía y Minas del Perú. Fuente: Sistema de información Geológico y Catastral Minero (GEOCATMIN).

### 2.2.3. Métodos de recuperación de mercurio

#### 2.2.3.1. Tratamiento biológico

Algunos microorganismos y plantas cuentan con mecanismos bioquímicos que pueden contrarrestar la toxicidad de los metales pesados (Beltrán & Gómez, 2016); el tratamiento de biorremediación utiliza los procesos metabólicos de ciertos organismos (plantas, hongos y bacterias) para degradar, transformar o remover los contaminantes y convertirlos en productos metabólicos inocuos (Volke & Velasco, 2002). Las especies que se utilizan son seleccionadas por diversas características, como su potencial de evapotranspiración, tipo de enzimas que producen, velocidad de crecimiento, tamaño de raíces y la capacidad de bioacumulación de

contaminantes (García & Rodríguez, 2010). Este método presenta ventajas debido que se puede realizar *in situ* y *ex situ*, es una tecnología sustentable, es de bajo costo, no requiere consumo de energía, evita la excavación, actúa positivamente sobre el suelo mejorando sus propiedades físicas y químicas, pero; como principales desventajas de este método, es un proceso relativamente lento y requiere áreas relativamente grandes (Delgadillo et al., 2011).

Los problemas de contaminación que existen en la actualidad requieren tecnologías costo-efectivas, amigables con el medio ambiente y que se puedan aplicar a gran escala, tal es el caso de la biorremediación (Delgadillo et al., 2011).

### **2.2.3.2. Tratamiento por adsorción**

La adsorción es un tratamiento utilizado para la remoción de metales pesados en aguas de consumo y residuales. La adsorción es un fenómeno superficial que implica la acumulación o concentración de una sustancia, siendo la sustancia que se adsorbe el adsorbato y la fase donde ocurre la adsorción el adsorbente (Cooney, 1998). Las altas concentraciones de mercurio en las aguas residuales y su gran impacto en el medio ambiente, ha generado aumentar los esfuerzos en investigar métodos efectivos y con bajo costo para su eliminación, uno de estos tratamientos es la adsorción (Tejada et al., 2015).

### **2.2.3.3. Desorción térmica**

La desorción es un proceso de separación física donde se añade calor para lograr volatilizar los contaminantes contenidos en el material sólido (Navarro & Villadevall, 2005), consiste en calentar de 90 °C a 540 °C el suelo contaminado, con el fin de vaporizar los contaminantes y separarlos del suelo, es un proceso de separación física no destructivo (Volke & Velasco, 2002). Este método no se utiliza con frecuencia por los altos costos de energía que requiere, es por eso que investigaciones como el uso de fuente primaria de energía; como la luz solar, son investigaciones que se tienen en consideración (Navarro & Cañadas, 2007). En el caso de suelos contaminados por mercurio, la temperatura de desorción está condicionado a los compuestos a tratar, pero tiene un rango que no supera los 600 °C (Navarro & Villadevall, 2005). La eliminación superior al 50 % se alcanzan a temperatura comprendidas entre los 400 y 500 °C, en cambio la eliminación de mercurio es escaso si se trabaja con una temperatura de 300 °C (Navarro & Cañadas,

2007). En la tabla 1 se presentan las especies de mercurio y sus respectivas temperaturas necesarias para su liberación.

**Tabla 1**

*Temperaturas de desorción de algunas especies de mercurio*

| <b>Especie de mercurio</b>      | <b>Temperatura de liberación de mercurio (°C)</b> |
|---------------------------------|---------------------------------------------------|
| Hg <sup>0</sup>                 | < 80, < 150                                       |
| Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> | 170                                               |
| HgCl <sub>2</sub>               | < 250, 220                                        |
| HgO                             | 270 - 535, 160 – 495                              |
| HgS                             | 300, 280 - 400, 210 - 340, 400                    |
| Hg en pirita                    | 450                                               |
| Hg en esfarelita                | 600                                               |
| Hg - Subsustancias húmicas      | 200 – 300                                         |

*Nota:* Se muestra las diferentes temperaturas requeridas para realizar el proceso de desorción para las especies de mercurio. Fuente: *El mercurio como contaminante global – Desarrollo de metodologías para su determinación de suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente* (pág. 47), Gaona Martinez, Xavier, (2004).

La temperatura de desorción depende de una serie de variables, como el material sólido, el tamaño de partículas o presencia de irregularidades en la red cristalina (Gaona, 2004). El proceso de desorción térmica de mercurio en muestras de suelos y residuos mineros tiene un porcentaje de eliminación de 86 %, considerándose un proceso exitoso (Navarro & Villadevall, 2005).

#### **2.2.3.4. Remedición fisicoquímica**

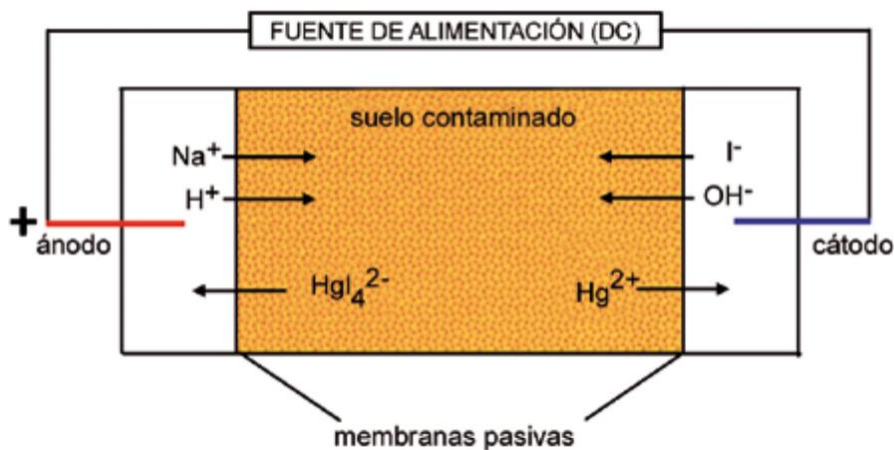
Los tratamientos fisicoquímicos utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación. Entre los tratamientos fisicoquímicos para tratamiento *in situ*, tenemos la remediación electrocinética, el lavado de suelos, la extracción por solventes, la extracción de vapores y la solidificación/estabilización (Volke & Velasco, 2002).

### 2.2.3.5. Remediación electrocinética

Se basa en la aplicación de corriente de baja intensidad entre electrodos insertados en el suelo contaminado y saturado con agua que actúa como medio conductor (García & Rodríguez, 2010), aprovecha las propiedades conductivas del suelo, el cual extrae y separa contaminantes orgánicos e inorgánicos del suelo, lodos o sedimentos (Volke & Velasco, 2002). En función a su carga eléctrica, los contaminantes son transportados a través de la fase fluida hacia el ánodo o cátodo (García & Rodríguez, 2010). En la figura 2 se representa el esquema del proceso remediación electrocinética.

**Figura 2**

*Esquema del proceso de electro recuperación*



*Nota:* Se muestra la migración de los iones producto de un flujo de carga eléctrica. Fuente: Tomado de *El mercurio. Situación actual, problemas y soluciones*. (pág.9) García & Rodríguez (2010).

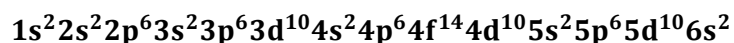
La eficiencia del método disminuye dependiendo del contenido de humedad menor del 10 %, así también; la presencia de metales o materiales aislados provocan variaciones en la conductividad eléctrica del suelo (Volke & Velasco, 2002).

### 2.2.4. Química del mercurio

El mercurio es un metal líquido a temperatura ambiente; de color blanco plateado y denso, con punto de fusión de 234,321 K ó - 38,829 °C. Es un metal del sub grupo II B de la tabla periódica y está relacionado con el zinc y el cadmio, tiene como número atómico 80, una masa atómica de 200,59 y una densidad de 13,595 g/cm<sup>3</sup> (Kozin &

Hansen, 2013). Presenta los estados de valencia de + 1 y + 2. Forma dos series de sales; los compuestos mercuriosos y mercúricos que provienen del óxido mercurioso ( $\text{Hg}_2\text{O}$ ); que involucra al grupo divalente mercurioso  $\text{Hg}_2^{++}$ , y al óxido mercúrico ( $\text{HgO}$ ); que contiene el ion divalente  $\text{Hg}^{++}$  (Vogel, 1974).

Su configuración electrónica es:

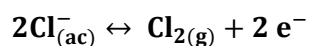


El mercurio tiene la propiedad de formar aleaciones con casi todos los metales; llamadas amalgamas, entre ellos el oro y la plata (Kozin & Hansen, 2013). La minería aurífera usa el mercurio para recuperar el oro y formar la amalgama, para luego calentarlo y evaporar el mercurio. Es probable que la principal razón para el uso de mercurio en la minería artesanal es que los efectos de envenenamiento no son evidentes hasta algún tiempo, así también; este método peligroso es relativamente barato a comparación con el producto oro (UNEP, 2008).

#### **2.2.5. Proceso de electrolixiviación de mercurio con cloruro de sodio**

El agente lixiviante, ácido hipocloroso puede ser producido por oxidación electrolítica a partir de solución de cloruro de sodio, para después el lixiviado se trate electrolíticamente para depositar el mercurio elemental y regenerar el agente lixiviante. El rendimiento de este proceso depende de la eficacia del cloro para generar el agente lixiviante, la generación de iones hipoclorito son el resultado de la oxidación de los iones de cloruro a cloro elemental, que en contacto con la solución acuosa produce ácido hipocloroso y/o iones de hipoclorito (Thoming et al., 1999).

La reacción que ocurre en el ánodo es:



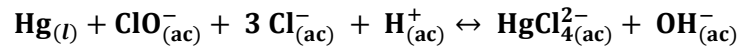
La reacción en el cátodo es:



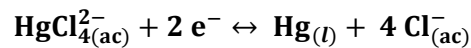
Dónde: en una celda donde los productos del ánodo y cátodo no se encuentran separados, existe un proceso de reacción.



Según Santos & Correa (1995), la reacción de una solución acuosa de cloruro de sodio aplicando corriente eléctrica, genera el agente oxidante ( $\text{ClO}^-_{(ac)}$ ); el cual puede producir la disolución del mercurio. La oxidación del mercurio se produce de acuerdo a la siguiente reacción.



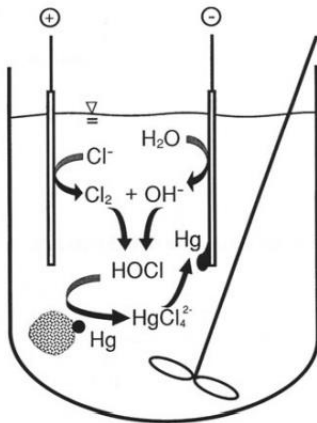
Según Thoming et al., (1999), en una solución acuosa de especies de mercurio, el mercurio puede ser extraído de la solución por medio de la reducción catódica, siempre que contenga más cloruro que mercurio. El mercurio puede ser depositado electrolíticamente en la superficie del cátodo según la siguiente reacción.



En la figura 3 se representa el esquema de proceso de electrolixiviación del mercurio con cloruro de sodio.

**Figura 3**

*Esquema de proceso de electro lixiviación*

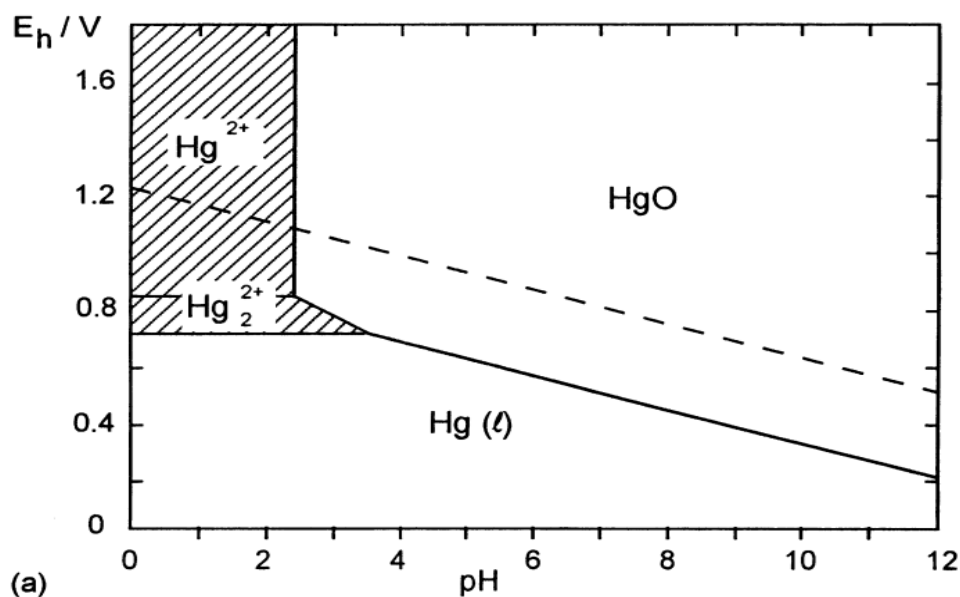


*Nota:* Se presenta las reacciones que ocurren en la celda electroquímica en la electrolixiviación del mercurio con cloruro de sodio. Fuente: Tomado de *Electroleaching: a mobile cleanup process for mercury contaminated materials* (pág. 3). Thoming, J. et.al., (1999).

En un sistema puro; sin ningún agente complejante presente, se tiene que mantener un pH por debajo de 3, con un potencial redox muy alto para poder disolver la mayor parte del mercurio. Tal como se demuestra en el diagrama de Pourbaix de mercurio (5 mmol/L de solución acuosa pura de mercurio) visualizada en la figura 4.

**Figura 4**

*Diagrama de Pourbaix de mercurio elemental*

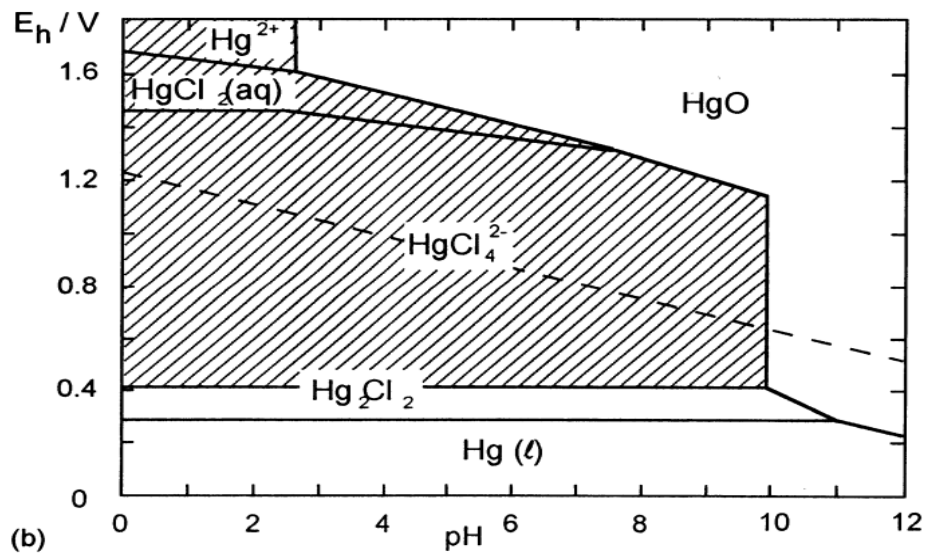


*Nota:* Se presenta el equilibrio químico del mercurio con respecto al potencial y el pH bajo condiciones termodinámicas (25 °C). Fuente: Tomado de *Electroleaching: a mobile cleanup process for mercury contaminated materials* (pág. 5). Thoming, J. et.al., (1999).

Si en un sistema de mercurio se agrega cloruro, el mercurio se vuelve soluble, incluso a pH neutro, pero se requiere un alto potencial redox, para que se produzca la disolución producto del ion hipoclorito, del mismo modo ocurre para la especie de oro y cloruro (Thoming et.al., 1999). Tal como se demuestra en el diagrama de Pourbaix de mercurio y cloruro (5 mmol/L de solución acuosa pura de mercurio y 1 mol/L NaCl) visualizada en la figura 5 y en la figura 6 se muestra el diagrama de Pourbaix de oro y cloruro ( $10^{-6}$  M de solución acuosa de oro III, 1 M de cloruro a 25 °C).

**Figura 5**

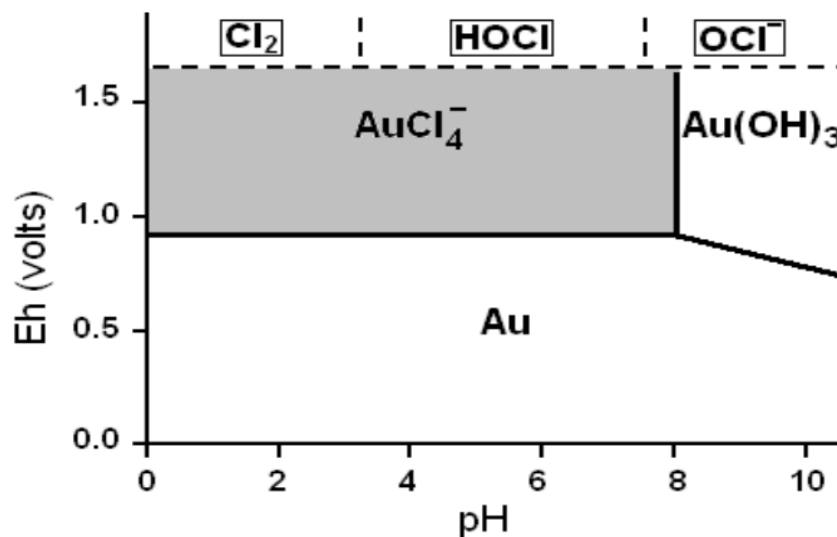
Diagrama de Pourbaix de un sistema mercurio – cloruro



Nota: Se presenta el equilibrio químico del mercurio y cloruro con respecto al potencial y el pH bajo condiciones termodinámicas (25 °C). Fuente: Tomado de *Electroleaching: a mobile cleanup process for mercury contaminated materials* (pág. 5). Thoming, J. et.al., (1999).

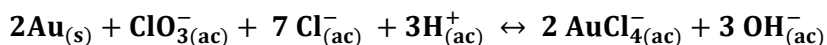
**Figura 6**

Diagrama de Pourbaix en un sistema oro - cloro



Nota: Se presenta el equilibrio químico del oro y cloro con respecto al potencial y el pH bajo condiciones termodinámicas (25 °C). Fuente: Tomado *Chloride-hypochlorite oxidation and leaching of refractory sulfide gold concentrate* (pág. 63). Mehdi, G. et.al., 2015.

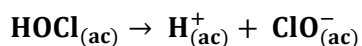
Según Santos & Correa (1995), el proceso de electrolixiviación a partir de cloruro de sodio para generar hipoclorito de sodio, es conveniente para lixiviar el mercurio que contiene residuos de la amalgamación. Este proceso también tiene efectos para el oro en lugar del mercurio, lo que significa que las trazas de oro, en caso de los residuos de minería de oro, también pueden ser extraídos, el oro disuelto se codeposita con mercurio formando una amalgama según la siguiente reacción.



Según Thoming et al., (1999), para el proceso de electrolixiviación, se debe mantener un pH de la solución entre 4 y 9. Cuando el pH desciende por debajo de 4, se forma el cloruro mercurioso (calomelano); especie insoluble, si el pH sube por encima de 9, provoca la precipitación de una gran cantidad de óxido mercúrico ( $\text{HgO}_{(s)}$ ); especie insoluble. La concentración de cloruro de sodio juega un papel importante en la disolución de mercurio para producir las especies más solubles ( $\text{HgCl}_{4(\text{ac})}^{2-}$ ), que significa que la concentración de NaCl de 1,0 mol/L es más que adecuada para asegurar la producción segura de la especie.

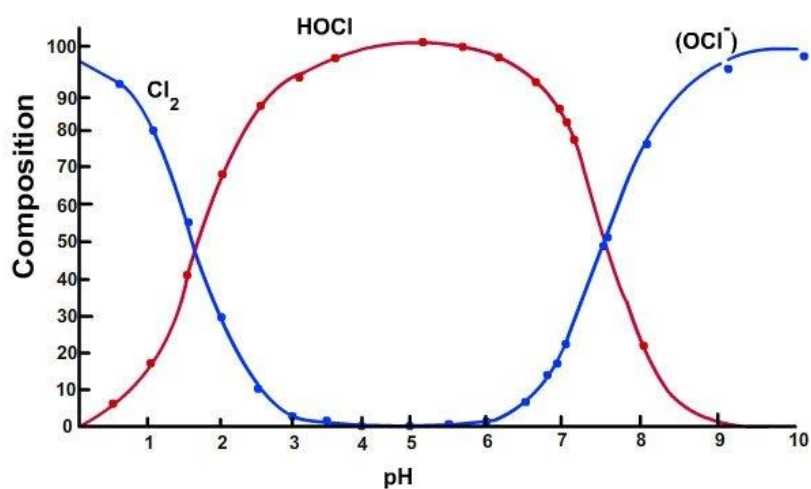
#### 2.2.6. Diagrama de distribución de especies del cloro

El diagrama de distribución de especies permite saber que especie predomina al variar el pH del sistema, así también; se puede verificar el rango de pH y que elementos empezarán a precipitar. Para el sistema de cloro, si el pH se encuentra en un rango de 5 a 6, las especies de cloro forman en casi 100 % ácido hipocloroso ( $\text{HOCl}_{(\text{ac})}$ ), mientras si el pH desciende en un rango inferior de 5, se empieza a producir cloro gas ( $\text{Cl}_{2(\text{g})}$ ), y si el pH aumenta en un rango superior de 6, se forma el ion hipoclorito ( $\text{ClO}_{(\text{ac})}^-$ ). La formación de las especies de cloro como el ácido hipocloroso y el ion hipoclorito, resultan de la interacción del agua y el cloro gas; proveniente de la oxidación de iones cloruro, así también; el ácido hipocloroso se disocia formando los iones hidrogeno e iones hipoclorito. Las reacciones se muestran a continuación y en la figura 7 se representa el diagrama de distribución del cloro (Morales, 2020).



**Figura 7**

*Diagrama de distribución del cloro*



*Nota:* Se representa las especies de cloro que predomina según el pH del sistema.

*Fuente:* Tomado de *Generación de especies de cloro activo vía un ánodo de óxidos metálicos de platino y paladio soportados en titanio* (pág. 10). Morales, M. (2020).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN**

El presente trabajo de investigación es de forma experimental, con características cuantitativa, debido que se realizó la recopilación de datos cuantificables de la formulación del lixivante verde y cuantificación de mercurio y oro lixiviado para determinar la eficiencia de lixiviación en el relave minero. El nivel de investigación es aplicativo, porque se manipuló las variables independientes, como son la concentración de hipoclorito de sodio del lixivante verde y el tiempo de lixiviación.

##### **3.1.1. Procedimiento**

Para el cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación, se realiza una formulación inicial de sales de cloruro según la información bibliográfica, considerando el poder oxidante que presentan las sales. Se realiza una prueba en puro con gotas de mercurio y se analiza los resultados de lixiviación final. Para el proceso de lixiviación del relave minero, se evalúa 4 formulaciones de lixivante frente a la concentración del hipoclorito de sodio (lejía comercial), teniendo como variables de respuesta; el potencial de oxidación y reducción (ORP); manteniendo un valor superior a los 1 000 mV, el pH del sistema en un valor de 4 a 4,5 y un tiempo de lixiviación comprendida con respecto a la caída del ORP. Así mismo, se realiza los ensayos con la finalidad de elegir el lixivante que mantenga las variables de respuesta en el tiempo de lixiviación. Al final del proceso se recupera el lixiviado final y se determina la cuantificación de mercurio en el residuo y en el lixiviado, y se analiza el porcentaje de lixiviación de la formulación establecida. En la tabla 2 se presenta

los ensayos planteados para la formulación de lixiviante verde establecidas en la presente investigación.

**Tabla 2**

*Ensayos para la formulación de lixiviante verde*

| Tipo de Lixiviante | Parámetro | Variable respuesta  |         |             |
|--------------------|-----------|---------------------|---------|-------------|
|                    |           | ORP                 | pH      | Tiempo      |
| A                  | NaClO     | Superior a 1 000 mV | 4 a 4,5 | 30 minutos  |
| B                  | NaClO     | Superior a 1 000 mV | 4 a 4,5 | 60 minutos  |
| C                  | NaClO     | Superior a 1 000 mV | 4 a 4,5 | 90 minutos  |
| D                  | NaClO     | Superior a 1 000 mV | 4 a 4,5 | 180 minutos |

Para la parte experimental de la investigación, se realiza la lixiviación del relave minero en botellas de vidrio de laboratorio de 100 mL de capacidad con tapa hermética, para el mejor contacto de lixiviante y el relave minero se emplea un agitador de rodillos. Para todas las pruebas se utiliza el mismo relave obtenido de la minera artesanal Playa Marta en Madre de Dios; previamente homogenizada por el método de cuarteo. Se envía el análisis de contenido de mercurio y oro en el relave minero y se realiza la lixiviación para las formulaciones variando la concentración de hipoclorito de sodio (lejía común), manteniendo el potencial de hidrogeno (pH) entre los valores de 4,0 a 4,5; y el potencial de oxidación reducción (ORP) con valores superiores a los 1 000 mV. Se evalúa la formulación hasta cumplir con mantener dichos parámetros y controlando el tiempo, se envía análisis de concentración de mercurio y oro para el proceso de lixiviación en los tiempos de 60 y 180 minutos. Al final del proceso se cuantifica el mercurio y oro al residuo sólido después de la lixiviación y al lixiviante recuperado. Por balance de materia se determina la eficiencia del proceso de lixiviación del oro y mercurio, por último; se realiza pruebas de voltamperometría para determinar el comportamiento electroquímico de las especies de oro y mercurio disueltos en el lixiviante y determinar la alternativa de recuperación electroquímica.

### **3.2. POBLACIÓN, MUESTRA Y UNIDAD DE ANÁLISIS**

#### **3.2.1. Población**

Relave de arenas negras amalgamadas de la minería aurífera artesanal Playa Marta.

#### **3.2.2. Muestra**

Relave de arenas negras amalgamadas almacenadas en el pozo de amalgamación de la minera aurífera artesanal Playa Marta – Madre de Dios.

#### **3.2.3. Muestreo**

El muestreo fue aleatorio simple, la toma de muestra se realizó del pozo de amalgamación de la empresa aurífera artesanal Playa Marta en Madre de Dios, se realizó la recolecta del relave minero en húmedo para no alterar el contenido de mercurio, se recolectó en un balde para su almacenado procediendo con los protocolos de seguridad, se realizó el embalaje de la muestra para su preservación y se envió a Lima al laboratorio de Electroquímica Aplicada de la Universidad Nacional de Ingeniería.

#### **3.2.4. Unidad de análisis**

Concentración inicial y final de mercurio en partes por millón del relave minero.

### **3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

#### **3.3.1. Técnicas de recolección de datos**

Las técnicas que fueron utilizada fue la observación, aplicada sobre los componentes de medición y formulación del lixiviante verde; sobre los experimentos realizados para lixiviar el mercurio y determinar la eficiencia de lixiviación del mercurio y oro presentes en el relave minero.

### **3.3.2. Instrumentos de recolección de datos**

- Libro campo.
- Cuaderno de notas.
- Ficha de registro de observación de experimentos.

### **3.3.3. Acopio y procesamiento de datos**

La toma de datos se realiza: antes del proceso de lixiviación; se determina los datos de análisis de contenido de mercurio y oro en el relave minero, en la lixiviación; se realiza el registro de pH y ORP controlando que se encuentren dentro de los parámetros establecidos para la lixiviación, y después de la lixiviación; se determina la cuantificación de mercurio y oro en el residuo y en el lixiviado recuperado.

## **3.4. HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

### **3.4.1. Hipótesis general**

El proceso sostenible de lixiviación del relave de la minera artesanal Playa Marta permite en alto grado la recuperación de mercurio.

### **3.4.2. Hipótesis específicas**

- La composición mineralógica y concentración de mercurio y oro permite la caracterización inicial del relave minero de la minera aurífera Playa Marta.
- Los componentes para la formulación del lixivante verde para el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta son los adecuados.
- Los parámetros de lixiviación favorables de tiempo y Potencial de Oxidación y Reducción (ORP) permiten el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta.

#### **3.4.3. Variable dependiente**

**Y:** Lixiviante verde.

#### **3.4.4. Variable independiente**

**X:** Tratamiento de relaves con mercurio.

#### **3.4.5. Indicadores**

**Y1:** Concentración de mercurio final en el lixiviante.

**X1:** Porcentaje de composición de sales y ácidos.

**X2:** Concentración iones hidrógeno.

**X3:** Capacidad de oxidación química.

**X4:** Avance de lixiviación.

Tabla 3

## Operacionalización de variables

|               | Variable                             | Definición conceptual                                                                                                                   | Definición operacional                                     | Dimensiones                           | Indicadores                                                                              | Unidad de medida | Tipo de variable |
|---------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|
| Dependiente   | Lixiviante verde                     | Son soluciones químicas amigables al medio ambiente utilizadas para la disolución de metales.                                           | Concentración de mercurio lixiviado en el proceso          | Eficiencia de lixiviación de mercurio | Concentración de mercurio final en el lixiviado                                          | ppm              | Cuantitativa     |
|               |                                      |                                                                                                                                         |                                                            |                                       |                                                                                          |                  |                  |
| Independiente | Tratamiento de relaves con mercurio. | Es la correcta elección y gestión de la tecnología disponible que permita el reaprovechamiento o eliminación del contenido de mercurio. | Cantidad de sales y ácidos.                                | Composición porcentual de lixiviante  | Composición porcentual de sales. Composición porcentual de ácidos.                       | g y mL           | cuantitativa     |
|               |                                      |                                                                                                                                         | Mejor eficiencia en lixiviación de mercurio en el proceso. | Parámetros del proceso de lixiviación | Concentración iones hidrogeno<br>Capacidad de oxidación química<br>Avance de lixiviación | pH, mV y min.    | cuantitativa     |

#### 3.4.6. Materiales utilizados en la investigación

- Botellas de vidrio herméticas de laboratorio
- Micropipetas
- Vasos de precipitado
- Probetas
- Fiolas
- Mortero
- Electrodo de carbono vítreo, platino y plata
- Etiquetas
- Bolsas polipropileno para muestras
- Pala
- Baldes de polietileno 20 L para recolección de muestras
- Cuaderno de apuntes
- Guantes de látex
- Cinta de embalaje
- Espátula
- Cuchara de laboratorio
- Luna reloj
- Viales
- Varilla de vidrio
- Tubo de ensayo con tapa
- Bandeja

#### 3.4.7. Equipos utilizados en la investigación

| Equipo               | Modelo        | Marca     |
|----------------------|---------------|-----------|
| Balanza digital      | ALC-210.4     | ACCULAB   |
| Estereoscopio        | Binocular     | JENA      |
| Agitador de rodillos | HTR-NZ        | HERMANN   |
| Potenciómetro ORP    | 310T          | MESULAB   |
| Potenciómetro pH     | 3510          | JENWAY    |
| Potenciostato        | Ustat200      | DROPSSENS |
| Laptop               | 14-am009009la | Hp        |

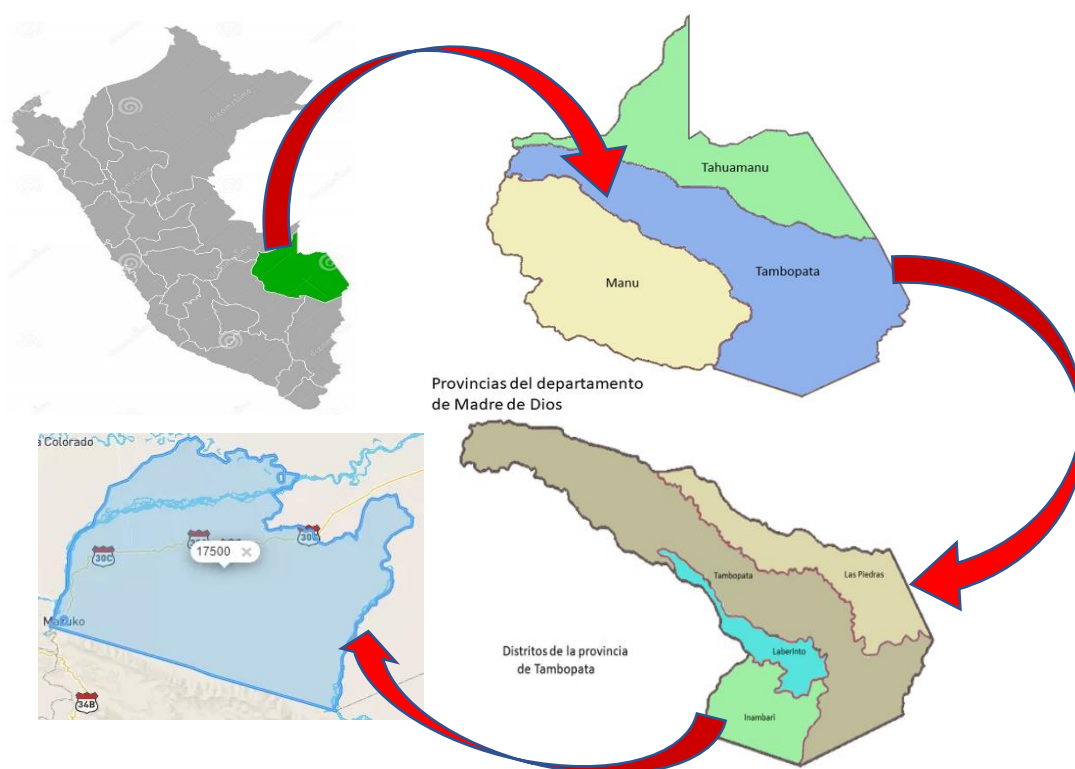
### 3.5. PROCEDIMIENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

#### 3.5.1. Ubicación y descripción del lugar de estudio

El lugar de estudio fue la Minera Artesanal Playa Marta, ubicada en el distrito de Inambari en la provincia de Tambopata, perteneciente a la Región Madre de Dios, registrada en el Ministerio de Energía y Minas con código de concesión minera 070001001, ubicada a una altitud de 238 m.s.n.m. y con coordenadas de 12° 47' 57" S, 70° 02' 28' W. Constituido como una minera de extracción de mineral metálico y conformada por 300 hectáreas de terreno. El lugar se encuentra a dos horas aproximados en vehículo partiendo de la provincia de Tambopata. En la figura 8 se observa el mapa geográfico del distrito de Inambari.

**Figura 8**

*Región de Madre de Dios - Provincia de Tambopata - Distrito Inambari*



*Nota:* Se representa la ubicación geográfica donde se encuentra ubicada la empresa artesanal Playa Marta. Fuente: Tomado de *Información territorial del departamento de Madre de Dios (pag.4)*, Viceministerio de Gobernanza Territorial, (2021).

### 3.5.2. Obtención del relave minero

Se obtiene el relave minero de la minera artesanal Playa Marta, la recuperación se realiza de los pozos de amalgamación en donde se encuentran vertidos dichos relaves después de la recuperación del oro con mercurio; con la ayuda de una pala y con los protocolos de seguridad, se procede a tomar las muestras del relave minero almacenándolo en un balde para su transporte a la ciudad de Lima, y al Laboratorio de Electroquímica Aplicada de la Universidad Nacional de Ingeniería. En la figura 9 se observa el recojo del relave minero de la empresa Playa Marta.

**Figura 9**

*Obtención del relave minero – Minera Playa Marta*



*Nota:* Se muestran el recojo del relave minero del pozo de amalgamación y el grupo de investigación con el titular de la empresa.

### 3.5.3. Obtención de muestra representativa

Se realiza la homogenización del relave minero por el método del cuarteo. El cuarteo es la operación que consiste en dividir en cuatro secciones y tomar dos al azar y proceder a mezclarlos (Quiroz, U. et.al., 2021).

La homogenización del relave minero se realiza en húmedo, a fin de no alterar el contenido de mercurio por volatilización. Se colocan en una bandeja de superficie plana y limpia, se mezclan enérgicamente volteando las arenas tres veces; con esto se consigue la homogenización de la muestra, se secciona en 4 partes iguales y se extrae los dos cuartos opuestos, se repiten los pasos anteriores hasta obtener 500

gramos aproximados de muestra. Una parte de esta muestra se envía al análisis de concentración de mercurio y oro. La muestra representativa se almacena en bolsas de polietileno con cierre hermético a fin de no alterar la humedad del relave minero y conservar el mercurio en la muestra. En la figura 10 se presenta la técnica de cuarteo y la muestra representativa del relave minero.

### **Figura 10**

*Obtención de muestra representativa del relave minero*



## **3.6. CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE MINERO**

### **3.6.1. Análisis del contenido de humedad**

La humedad o también denominado contenido de humedad de un suelo, es la relación expresada en porcentajes, entre el peso del agua que se encuentra contenido en una masa de suelo y el peso de las partículas sólidas (INACAL, 1998).

Se realiza la determinación según la Norma Técnica Peruana 339.127. Se realiza los ensayos por triplicado, utilizando 25 gramos aproximados de muestra representativa del relave minero. Se colocan en un crisol previamente seco y pesado, se lleva a calentamiento por medio de una estufa por 18 horas y a 40 °C, luego se lleva a un desecador por 6 horas y se procede a pesar las muestras y registrar la masa final. La diferencia de la masa inicial y final será la cantidad de humedad que presenta el relave minero.

La expresión que permite determinar el porcentaje de humedad esta dado por:

$$\% \text{ humedad} = \frac{M.\text{inicial} - M.\text{final}}{M.\text{inicial}} * 100$$

Donde:

- M. inicial : Masa inicial del relave minero húmedo.
- M. final : Masa final del relave minero seco.

### 3.6.2. Determinación pH del relave minero

El pH es la propiedad que mide el grado de acidez o alcalinidad de las soluciones acuosas (Osorio, N., 2012). Se realiza la determinación según la Norma Técnica Peruana 339.176, para ello; se efectúa los ensayos por triplicado, utilizando un vaso de precipitado de 100 mL de capacidad, se agrega 30 g aproximados de relave minero, y 75 mL de agua destilada. Se mantiene en agitación por 5 minutos y 3 minutos de sedimentación, se tapa con una luna reloj y se deja reposar por 8 horas. Luego se agita la suspensión y se realiza la medición del pH, se utiliza un potenciómetro previamente calibrado para medir los valores, se coloca el electrodo en el vaso precipitado sumergiendo en la disolución y anotando los valores obtenidos. En la figura 11 se presenta la forma de la determinación de pH del relave minero.

#### Figura 11

*Determinación de pH del relave minero*



### 3.6.3. Determinación de la densidad del relave minero

La determinación de la densidad del relave minero se realiza por el método de la probeta por triplicado. Inicialmente el relave minero se seca al medio ambiente, luego se determina la densidad aparente, para ello; se pesa en una balanza de precisión para laboratorio, una cantidad exacta de relave minero entre el valor de 50 g en peso seco, se vierte a una probeta y se registra el volumen alcanzado. Se determina la densidad aparente del relave minero.

La expresión que permite determinar la densidad aparente está dada por:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Masa del relave minero}}{\text{volumen aparente}}$$

Se obtiene la densidad real del relave minero, para ello; en otra probeta se mide un volumen exacto de 50 mL de agua destilada, se agrega el volumen de agua a la probeta conteniendo el relave minero y se mide el volumen alcanzado de la mezcla. Este volumen es el volumen real alcanzado de la mezcla, a este se le resta los 50 mL del volumen de agua destilada agregada y se obtiene el volumen real del relave minero.

La expresión que permite determinar el volumen real de la mezcla esta dado por:

$$\text{Volumen real} = \text{Volumen real de la mezcla} - \text{Volumen agua destilada}$$

La expresión que permite determinar la densidad real del relave minero esta dado por:

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Masa del relave minero}}{\text{volumen real relave minero}}$$

En la figura 12 se presenta la determinación de densidad del relave minero por el método de la probeta.

**Figura 12**

*Determinación de densidad del relave minero*



*Nota:* Se observa la determinación del volumen real alcanzado por la mezcla del relave minero y agua destilada.

#### **3.6.4. Identificación de mercurio y oro por inspección**

La identificación de mercurio y oro se determina con ayuda de un estereoscopio, para ello se utiliza 50 g de relave minero y se concentra el mineral por el método de pallaqueo con una puruña, esta operación permite concentrar en la parte central de la puruña aprovechando la estructura de este, en donde los elementos con mayor densidad; como son el oro y el mercurio se concentran en el centro y los elementos más livianos son desplazados fuera del sistema, después de terminar la operación se deja secar al ambiente y se busca elementos característicos de oro y mercurio variando la ampliación del estereoscopio para una mejor visualización.

#### **3.6.5. Cuantificación de mercurio y oro en el relave minero**

La determinación de mercurio y oro en los residuos de arenas negras producto de la amalgamación (relave minero), se determinan por el método de cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica de flama, en el laboratorio certificado Labicer - laboratorio de investigación y certificaciones. Para ello; de la muestra representativa del relave minero obtenida por el método del cuarteo, se envía una masa de 10 g en peso húmedo en una bolsa con cierre hermético para preservar la muestra, se codifica la muestra y se envía al análisis.

### 3.6.6. Caracterización de componentes mineralógicos del relave minero

El análisis de componentes mineralógicos semicuantitativo del relave minero se determina por el método de difracción de rayos X (DRX), en el laboratorio certificado Labicer - laboratorio de investigación y certificaciones. Para ello; se seca una muestra representativa del relave minero a temperatura ambiente, se pulveriza 10 g en un mortero hasta obtener una muestra homogénea, se almacena en un vial de vidrio de 10 mL de capacidad y se envía al análisis.

### 3.7. FORMULACIÓN DE LIXIVIANTE

Se propone como parámetros de lixiviación los rangos medios de los diagramas de Pourbaix las especies de oro y mercurio en un medio de cloruro, un pH entre los valores de 4 a 4,5 y de ORP con valores superiores a los 1 000 mV; rangos donde se puede lixiviar el mercurio y oro, así también; como tampón del sistema se utiliza ácido fosfórico para regular el pH.

La formulación inicial, se inicia con el cloruro de sodio, con una concentración del 6 % de la formulación; para garantizar la presencia de iones cloruro en el sistema, luego se reajusta las concentraciones de los demás reactivos para mantener la formulación entre los parámetros de pH y ORP, teniendo la formulación inicial según la tabla 4.

**Tabla 4**

*Formulación inicial del lixiviante*

| Reactivos                        | Fracción | Comp. %    |
|----------------------------------|----------|------------|
| Cloruro de sodio (sal comercial) | 0,060    | 6          |
| Hipoclorito de sodio 4 % p/p     | 0,081    | 8,11       |
| Agua retenida en el lavado       | 0,081    | 8,11       |
| Agua dilución                    | 0,405    | 40,54      |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,010    | 1,01       |
| <b>Neutralización</b>            | 0,000    |            |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,023    | 2,33       |
| Hidróxido de sodio 1M            | 0,339    | 33,95      |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>1</b> | <b>100</b> |

*Nota:* Se presenta la formulación inicial del lixiviante considerando un 3,3 % de ácido fosfórico total para mantener el sistema dentro del pH adecuado, el ácido fosfórico sobrante se neutraliza con NaOH 1 M, a fin de no disminuir el pH.

Se realiza 4 formulaciones de lixiviante, variando la concentración de hipoclorito de sodio (lejía común). En la tabla 5 se presenta la formulación del lixiviante A, en la tabla 6 la formulación del lixiviante B, en la tabla 7 la formulación del lixiviante C y en la tabla 8 la formulación del lixiviante D.

**Tabla 5**

*Formulación lixiviante A*

| Reactivos                        | Fracción | Comp. %    | Cantidad     | Unidad | Relación<br>aren. – lix. |
|----------------------------------|----------|------------|--------------|--------|--------------------------|
| Cloruro de sodio (sal comercial) | 0,060    | 5,96       | 2,94         | mL     | 0,059                    |
| Hipoclorito de sodio 4 % p/p     | 0,081    | 8,11       | 4            | mL     | 0,080                    |
| Agua retenida en el lavado       | 0,081    | 8,11       | 4            | mL     | 0,080                    |
| Agua dilución                    | 0,405    | 40,54      | 20           | mL     | 0,400                    |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,010    | 1,01       | 0,5          | mL     | 0,010                    |
| <b>Neutralización</b>            |          |            |              |        |                          |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,023    | 2,33       | 1,15         | mL     | 0,023                    |
| Hidróxido de sodio 1M            | 0,339    | 33,95      | 16,75        | mL     | 0,335                    |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>1</b> | <b>100</b> | <b>49,34</b> |        | <b>0,987</b>             |

*Nota:* Se presenta la formulación del lixiviante A, con una concentración de 8,11 % de hipoclorito de sodio.

**Tabla 6**

*Formulación lixiviante B*

| Reactivos                        | Fracción | Comp. %       | Cantidad     | Unidad | Relación<br>aren. – lix. |
|----------------------------------|----------|---------------|--------------|--------|--------------------------|
| Cloruro de sodio (sal comercial) | 0,05     | 5,41          | 2,94         | mL     | 0,06                     |
| Hipoclorito de sodio 4 % p/p     | 0,17     | 16,56         | 9            | mL     | 0,18                     |
| Agua retenida en el lavado       | 0,07     | 7,36          | 4            | mL     | 0,08                     |
| Agua dilución                    | 0,37     | 36,81         | 20           | mL     | 0,40                     |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,01     | 0,92          | 0,5          | mL     | 0,01                     |
| <b>Neutralización</b>            | 0,00     | 0,00          |              |        | 0,00                     |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,02     | 2,12          | 1,15         | mL     | 0,02                     |
| Hidróxido de sodio 1M            | 0,31     | 30,82         | 16,75        | mL     | 0,34                     |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>1</b> | <b>100,00</b> | <b>54,34</b> |        | <b>1,087</b>             |

*Nota:* Se presenta la formulación de lixiviante B aumentando el hipoclorito de sodio en 16,56 %.

**Tabla 7***Formulación lixiviante C*

| Reactivos                        | Fracción | Comp. %    | Cantidad     | Unidad   | Relación<br>aren. – lix. |
|----------------------------------|----------|------------|--------------|----------|--------------------------|
| Cloruro de sodio (sal comercial) | 0,05     | 4,95       | 2,94         | mL       | 0,059                    |
| Hipoclorito de sodio 4 % p/p     | 0,24     | 23,59      | 14           | mL       | 0,280                    |
| Agua retenida en el lavado       | 0,07     | 6,74       | 4            | mL       | 0,080                    |
| Agua dilución                    | 0,34     | 33,70      | 20           | mL       | 0,400                    |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,01     | 0,84       | 0,5          | mL       | 0,010                    |
| <b>Neutralización</b>            |          |            |              |          |                          |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,02     | 1,94       | 1,15         | mL       | 0,023                    |
| Hidróxido de sodio 1M            | 0,28     | 28,23      | 16,75        | mL       | 0,335                    |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>1</b> | <b>100</b> | <b>59,34</b> | <b>0</b> | <b>1,187</b>             |

*Nota:* Se presentan la formulación de lixiviante C aumentando el hipoclorito de sodio en 23,59 %.

**Tabla 8***Formulación lixiviante D*

| Reactivos                        | Fracción | Comp. %    | Cantidad     | Unidad | Relación<br>aren. – lix. |
|----------------------------------|----------|------------|--------------|--------|--------------------------|
| Cloruro de sodio (sal comercial) | 0,046    | 4,64       | 2,94         | mL     | 0,059                    |
| Hipoclorito de sodio 4 % p/p     | 0,284    | 28,42      | 18           | mL     | 0,360                    |
| Agua retenida en el lavado       | 0,063    | 6,32       | 4            | mL     | 0,080                    |
| Agua dilución                    | 0,316    | 31,58      | 20           | mL     | 0,400                    |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,008    | 0,79       | 0,5          | mL     | 0,010                    |
| <b>Neutralización</b>            |          |            |              |        |                          |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,018    | 1,82       | 1,15         | mL     | 0,023                    |
| Hidróxido de sodio 1 M           | 0,264    | 26,44      | 16,75        | mL     | 0,335                    |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>1</b> | <b>100</b> | <b>63,34</b> |        | <b>1,267</b>             |

*Nota:* Se presentan la formulación de lixiviante D aumentando el hipoclorito de sodio en 28,42 %.

### 3.8. LIXIVIACIÓN DE MERCURIO EN PURO

Para las pruebas iniciales, se realiza dos pruebas de lixiviación de gotas mercurio. En una botella de laboratorio de 100 mL capacidad, se agrega 2,94 mL de cloruro de sodio (sal común) y 4 mL de hipoclorito de sodio (lejía comercial), luego se añade 20 mL de agua destilada. Se lleva a un agitador de rodillos para mejorar la disolución de

las sales. Se agrega 0,5 mL de ácido fosfórico hasta obtener un pH entre 4,0 a 4,5 en la solución y el resto de ácido de la formulación se neutraliza con hidróxido de sodio 1 M. Luego se añade 1 gota de mercurio y se controla 1 hora de lixiviación. La formulación del lixiviante se presentan en la tabla 9.

**Tabla 9**

*Formulación inicial del lixiviante - mercurio en puro*

| Reactivos                        | Fracción | Comp. %    | Cantidad     | Unidad |
|----------------------------------|----------|------------|--------------|--------|
| Cloruro de sodio (sal comercial) | 0,060    | 6          | 2,94         | mL     |
| Hipoclorito de sodio 4 % p/p     | 0,081    | 8,11       | 4            | mL     |
| Agua retenida en el lavado       | 0,081    | 8,11       | 4            | mL     |
| Agua dilución                    | 0,405    | 40,50      | 20           | mL     |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,010    | 1,01       | 0,5          | mL     |
| <b>Neutralización</b>            | 0,000    |            |              |        |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,023    | 2,33       | 1,15         | mL     |
| Hidróxido de sodio 1M            | 0,339    | 33,95      | 16,75        | mL     |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>1</b> | <b>100</b> | <b>49,34</b> |        |

*Nota:* Se presenta la formulación inicial para la lixiviación de mercurio puro, siendo la formulación para 50 gramos de relave minero en peso seco.

Al final del proceso se recupera el lixivado y se envía a análisis de concentración de mercurio.

### 3.9. LIXIVIACIÓN DEL RELAVE MINERO

Para las pruebas, se realiza una lixiviación de 50 g aproximados de relave minero en peso seco. Se realiza el lavado del relave minero con agua destilada y se lleva al agitador de rodillos por 5 minutos; este proceso se repite por 3 veces para asegurar la eliminación de sólidos disueltos y arcillas que contenga el relave minero. Se calcula el agua retenida del lavado.

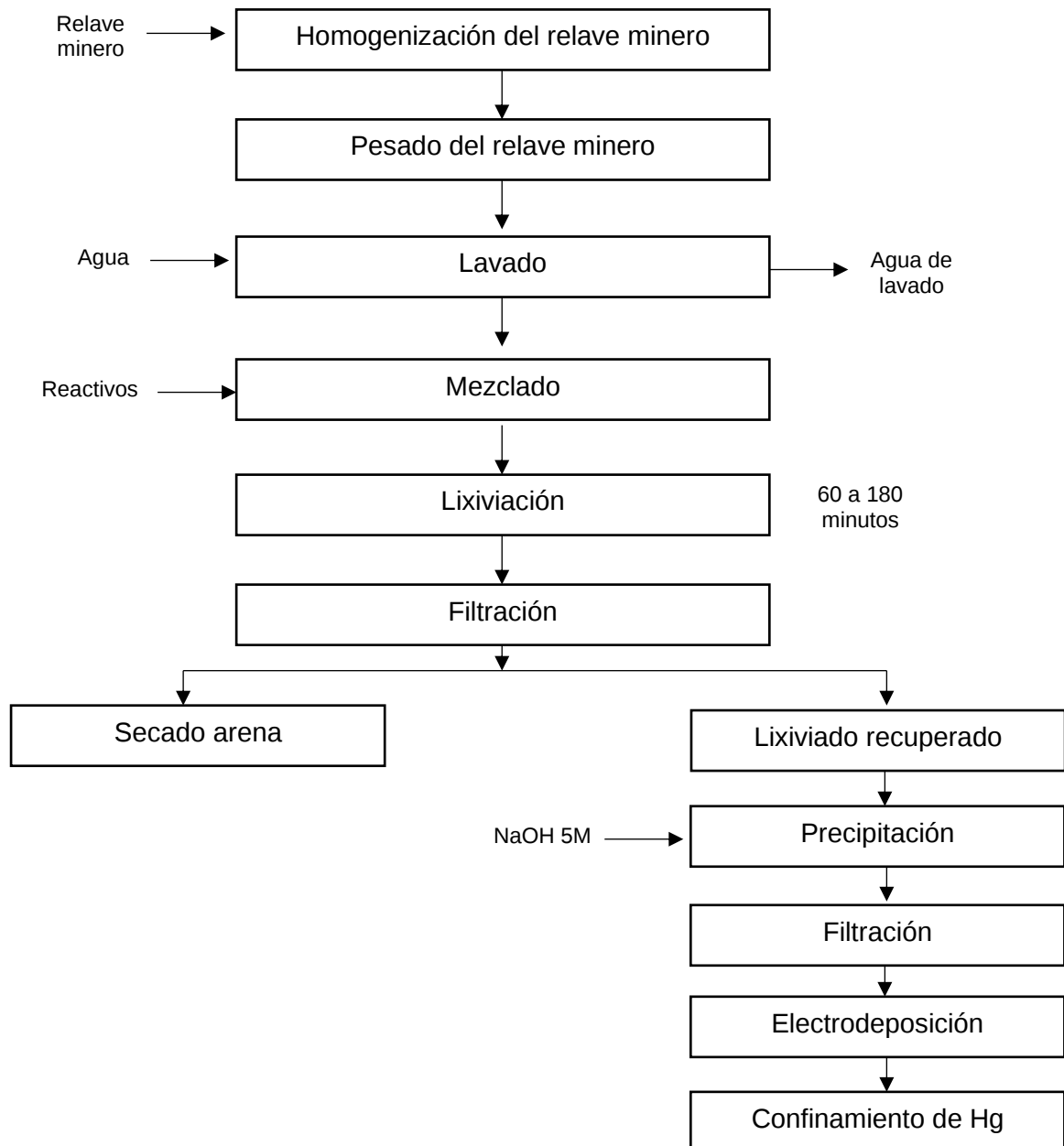
Se añade sal comercial e hipoclorito de sodio previamente medidas, seguidamente se agrega 20 mL de agua destilada, se coloca en agitación por 5 minutos y se agrega el ácido fosfórico hasta un pH entre 4,0 a 4,5.

Por otra parte, se neutraliza el ácido fosfórico sobrante con hidróxido de sodio (NaOH 1 M) y se agrega al sistema, se miden las lecturas del ORP y pH. Se controla el tiempo de inicio de lixiviación y se coloca en el equipo de agitación de rodillos para

la mejor interacción del lixiviante y el relave minero. Se registra las lecturas de los parámetros cada 15 minutos de lixiviación. En la figura 13 se observa el diagrama de flujo del proceso de lixiviación y en la figura 14 el proceso de lixiviación del relave minero.

**Figura 13**

*Diagrama de flujo del tratamiento de mercurio del relave minero*



*Nota:* Se presenta el diagrama de flujos del proceso de lixiviación del relave minero, desde la etapa de homogenización del relave hasta el confinamiento de mercurio.

**Figura 14**

*Proceso de lixiviación del relave minero*



*Nota:* Se observa la lixiviación del relave minero en botellas de laboratorio de 100 mL de capacidad, girando por la ayuda de un agitador de rodillos para mejorar la interacción entre ambos.

### **3.10. ANÁLISIS DE LIXIVIACIÓN DEL RELAVE MINERO**

Se realiza el proceso de lixiviación de 60 minutos y 180 minutos considerando las formulaciones C y D, debido a la estabilidad del proceso para este periodo de tiempo, se realiza el experimento para 50 g aproximados de relave minero en peso seco. La lixiviación se realiza en una botella de laboratorio de 100 mL de capacidad y con agitación constante con ayuda de un agitador de rodillos.

#### **3.10.1. Análisis de lixiviación de mercurio y oro formulación C**

Masa relave minero : 58,4435 g

Porcentaje de humedad : 14,252 %

Masa relave minero seco : 50,1141 g

Para la formulación C se estable una lixiviación de 60 minutos, se controla los parámetros de lixiviación de pH y ORP con respecto al tiempo. En la tabla 10 se presenta la formulación del lixivante C para 50,1141 g de relave minero en peso seco.

**Tabla 10***Lixiviación 60 minutos - Formulación lixivante C*

| Reactivos                        | Fracción | Comp.%     | Cantidad     | Unidad   | Relación<br>aren. – lix. |
|----------------------------------|----------|------------|--------------|----------|--------------------------|
| Cloruro de sodio (sal comercial) | 0,05     | 4,95       | 2,94         | mL       | 0,050                    |
| Hipoclorito de sodio 4 % p/p     | 0,24     | 23,59      | 14           | mL       | 0,240                    |
| Agua retenida en el lavado       | 0,07     | 6,74       | 4            | mL       | 0,068                    |
| Agua dilución                    | 0,34     | 33,70      | 20           | mL       | 0,342                    |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,01     | 0,84       | 0,5          | mL       | 0,009                    |
| <b>Neutralización</b>            |          |            |              |          | 0,000                    |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,02     | 1,94       | 1,15         | mL       | 0,020                    |
| Hidróxido de sodio 1M            | 0,28     | 28,23      | 16,75        | mL       | 0,287                    |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>1</b> | <b>100</b> | <b>59,34</b> | <b>0</b> | <b>1,015</b>             |

*Nota:* Se presenta la formulación del lixivante C, para la lixiviación de 50 gramos aproximados de relave minero en peso seco para un tiempo de lixiviación de 60 minutos.

Al final del proceso se recupera el lixiviado final y se envía 10 mL de muestra a análisis de laboratorio. Luego se realiza los cálculos para determinar la eficiencia de lixiviación.

### **3.10.1.1. Determinación de la cantidad de mercurio y oro en el relave minero**

La expresión que permite determinar la cantidad de mercurio y oro inicial en el relave minero están dado por:

$$Masa\ inicial\ Hg = Masa\ relave\ minero\ (kg) \times Concentración\ (ppm)$$

$$Masa\ inicial\ Au = Masa\ relave\ minero\ (kg) \times Concentración\ (ppm)$$

### **3.10.1.2. Determinación de la cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final**

La expresión que permite determinar la cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final están dado por:

$$Masa\ Hg\ lixiviado = Volumen\ lixiviado(L) \times Concentración\ (ppm)$$

$$Masa\ Au\ lixiviado = Volumen\ lixiviado(L) \times Concentración\ (ppm)$$

### 3.10.1.3. Determinación de la eficiencia en remoción de mercurio y oro

La expresión que permite determinar la eficiencia de lixiviación de mercurio y oro está dado por:

$$\% \text{ eficiencia Hg} = \frac{\text{Masa Hg inicial R.M.} - \text{Masa Hg final R.M.}}{\text{Masa Hg inicial R.M.}} * 100$$

$$\% \text{ eficiencia Au} = \frac{\text{Masa Au inicial R.M.} - \text{Masa Au final R.M.}}{\text{Masa Au inicial R.M.}} * 100$$

### 3.10.2. Análisis de lixiviación de mercurio y oro formulación D

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| Masa relave minero      | : 58,298 g |
| Porcentaje de humedad   | : 14,252 % |
| Masa relave minero seco | : 49,990 g |

Para la formulación D se estable una lixiviación de 180 minutos, se controla los parámetros de lixiviación de pH y ORP con respecto al tiempo. En la tabla 11 se presenta la formulación del lixivante D para 49,990 g de relave minero en peso seco.

**Tabla 11**

*Lixiviación 180 minutos – Formulación lixivante D*

| Reactivos                        | Fracción | Comp. %    | Cantidad     | Unidad | Relación<br>aren. – lix. |
|----------------------------------|----------|------------|--------------|--------|--------------------------|
| Cloruro de sodio (sal comercial) | 0,046    | 4,64       | 2,94         | mL     | 0,059                    |
| Hipoclorito de sodio 4 % p/p     | 0,284    | 28,42      | 18           | mL     | 0,360                    |
| Agua retenida en el lavado       | 0,063    | 6,32       | 4            | mL     | 0,080                    |
| Agua dilución                    | 0,316    | 31,58      | 20           | mL     | 0,400                    |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,008    | 0,79       | 0,5          | mL     | 0,010                    |
| <b>Neutralización</b>            |          |            |              |        |                          |
| Ácido fosfórico 75 % p/p         | 0,018    | 1,82       | 1,15         | mL     | 0,023                    |
| Hidróxido de sodio 1 M           | 0,264    | 26,44      | 16,75        | mL     | 0,335                    |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>1</b> | <b>100</b> | <b>63,34</b> |        | <b>1,267</b>             |

*Nota:* Se presenta la formulación del lixivante D, para la lixiviación de 50 gramos de relave minero en peso seco y un tiempo de lixiviación de 180 minutos.

Las lecturas de los parámetros se realizan cada 30 minutos, se trabaja con un sistema en paralelo a fin de devolver el lixiviante retirado para enviar análisis y no alterar el sistema. Se retirarán 2 mL de lixiviado en los tiempos de 15, 30, 45 y 60 minutos para determinar la lixiviación de mercurio con respecto al tiempo y se enrasa hasta 10 mL; se envía a análisis con los códigos LPA4 - 1, LPA4 - 2, LPA4 - 3 y LPA4 - 4. Para los tiempos de 60 y 120 minutos de lixiviación se retira 1 mL de lixiviado con respecto al tiempo y se enrasa hasta 10 mL, se envía a análisis con los códigos LPA2-1 y LPA2-2.

Al final de los 180 minutos del proceso de lixiviación se recupera el lixiviante y se realiza 3 enjuagues con 50 mL de agua destilada al relave minero lixiviado; a fin de recuperar la mayor parte del lixiviante adherido al sólido. Este enjuague se junta con el lixiviado recuperado y se agrega 1 mL de ácido fosfórico y 10 mL de lejía para preservar el lixiviado. Se retiran 4 mL del lixiviado final y se enrasa a 10 mL de muestra, se envía a análisis con el código de LPA2-3 para determinar el avance de reacción del mercurio y oro con respecto a los 180 minutos de lixiviación.

### **3.10.2.1. Determinación de la concentración de mercurio y oro en el lixiviado**

La expresión que permite determinar la concentración inicial de las muestras lixiviadas en el tiempo está dada por:

$$\text{Concentración de Hg en lixiviado} = \frac{\text{Concentración} * \text{Volumen final}}{\text{Volumen inicial}}$$

$$\text{Concentración de Au en lixiviado} = \frac{\text{Concentración} * \text{Volumen final}}{\text{Volumen inicial}}$$

### **3.10.2.2. Determinación de la cantidad de mercurio y oro en el lixiviado**

La expresión que permite determinar la cantidad de mercurio y oro en el lixiviado están dado por:

$$\text{Masa Hg lixiviado} = \text{Volumen lixiviado(L)} \times \text{Concentración (ppm)}$$

$$\text{Masa Au lixiviado} = \text{Volumen lixiviado(L)} \times \text{Concentración (ppm)}$$

### **3.10.2.3. Determinación de la cantidad de mercurio y oro en el residuo de la lixiviación**

La expresión que permite determinar la cantidad de mercurio y oro en el residuo final están dado por:

$$Masa\ Hg\ residuo = Masa\ residuo \times Concentración\ (ppm)$$

$$Masa\ Au\ residuo = Masa\ residuo \times Concentración\ (ppm)$$

### **3.10.2.4. Balance de materia del mercurio y oro**

La expresión que permite determinar el balance de materia está dada por:

$$Masa\ de\ Hg\ inicial = Masa\ de\ Hg\ lixiviado + Masa\ de\ Hg\ residuo$$

$$Masa\ de\ Au\ inicial = Masa\ de\ Au\ lixiviado + Masa\ de\ Au\ residuo$$

### **3.10.2.5. Determinación de la eficiencia en remoción de mercurio y oro**

La expresión que permite determinar la eficiencia de mercurio y oro en la lixiviación están dado por:

$$\% \text{ eficiencia } Hg = \frac{Masa\ Hg\ inicial\ R.M. - Masa\ Hg\ final\ R.M.}{Masa\ Hg\ inicial\ R.M.} * 100$$

$$\% \text{ eficiencia } Au = \frac{Masa\ Au\ inicial\ R.M. - Masa\ Au\ final\ R.M.}{Masa\ Au\ inicial\ R.M.} * 100$$

.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE MINERO

##### 4.1.1. Contenido de humedad del relave minero

En la tabla 12 se presentan los resultados del porcentaje de humedad del relave de la minera aurífera artesanal Playa Marta.

**Tabla 12**

*Resultados de porcentaje de humedad del relave minero*

| N°              | Masa inicial relave<br>minero(g) | Masa seca relave<br>minero (g) | Masa inicial –<br>Masa final (g) | Humedad (%)   |
|-----------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------|
| 1               | 25,4152                          | 22,2138                        | 3,2014                           | 14,412        |
| 2               | 25,0853                          | 21,9807                        | 3,1046                           | 14,124        |
| 3               | 26,2926                          | 23,0193                        | 3,2733                           | 14,220        |
| <b>Promedio</b> |                                  |                                |                                  | <b>14,252</b> |

*Nota:* Se presentan las masas para la determinación de porcentaje de humedad en suelos según la NTP 339.127

En la tabla se observa que el promedio del porcentaje de humedad del relave la minera aurífera artesanal Playa Marta es de 14,252 %.

#### 4.1.2. Análisis de pH del relave minero

En la tabla 13 se presenta los resultados de lectura de pH del relave de la minera aurífera artesanal Playa Marta.

**Tabla 13**

*Determinación de pH del relave minero*

| N°       | Masa relave<br>minero (g) | Agua destilada<br>(mL) | Tiempo de<br>agitación<br>(min) | Tiempo de<br>reposo (horas) | pH   |
|----------|---------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|------|
| 1        | 30,6216                   | 75                     | 5,0                             | 8,0                         | 6,3  |
| 2        | 30,5682                   |                        |                                 |                             | 6,6  |
| 3        | 30,1365                   |                        |                                 |                             | 6,5  |
| Promedio |                           |                        |                                 |                             | 6,47 |

*Nota:* Se presentan los datos para la determinación de pH en suelos según la NTP 339.176.

En la tabla se observa que el promedio de pH del relave minero es de 6,47 demostrando que el relave minero es ligeramente ácido.

#### 4.1.3. Densidad del relave minero

En la tabla 14 se presentan los resultados de la densidad del relave de la minera aurífera artesanal Playa Marta.

**Tabla 14**

*Resultados de la densidad del relave minero*

| N°              | Masa de R.M. (g) | Volumen aparente R.M. (mL) | Densidad aparente R.M. (g/mL) | Volumen real mezcla (mL) | Volumen real R.M. (mL) | Densidad real R.M. (g/mL) |
|-----------------|------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1               | 50,8454          | 23                         | 2,211                         | 63                       | 13                     | 3,91                      |
| 2               | 50,3520          | 22                         | 2,289                         | 62,5                     | 12,5                   | 4,03                      |
| 3               | 50,6826          | 22,5                       | 2,253                         | 63                       | 13                     | 3,90                      |
| <b>Promedio</b> |                  |                            |                               |                          |                        | <b>3,95</b>               |

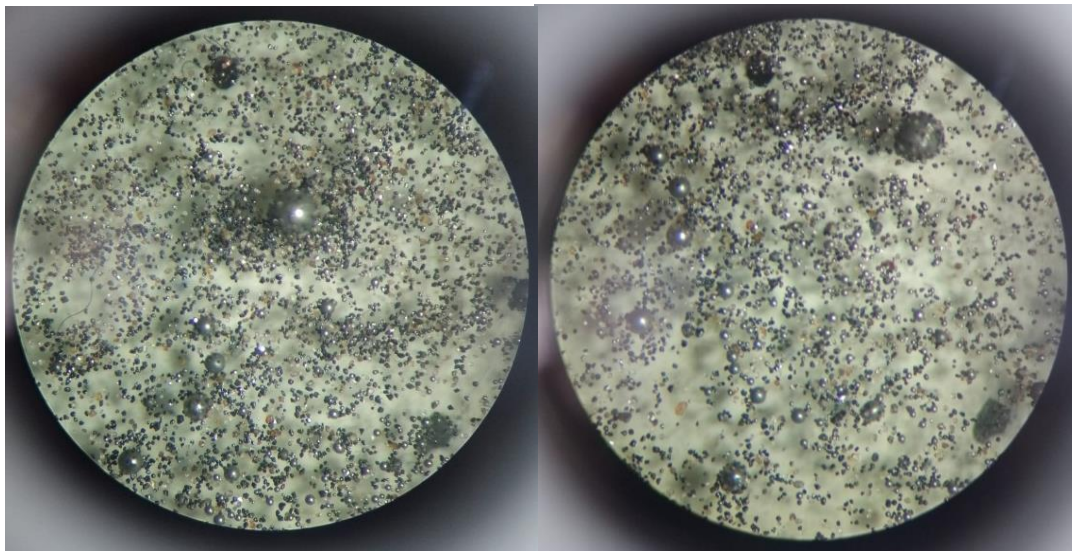
Del promedio de los ensayos, se obtiene que la densidad real del relave de la minera aurífera artesanal Playa Marta es de 3,95 g/mL. Este resultado confirma la retención de material pesado en las tolvas gravimétricas de la minería artesanal.

#### **4.1.4. Identificación de mercurio y oro por inspección**

Se identificó la presencia de mercurio en el relave minero, según la figura 15, se observa que existe presencia de pequeñas gotas de mercurio, siendo reconocidas por su característica esférica debido a su alta tensión superficial.

#### **Figura 15**

*Identificación de mercurio por inspección*

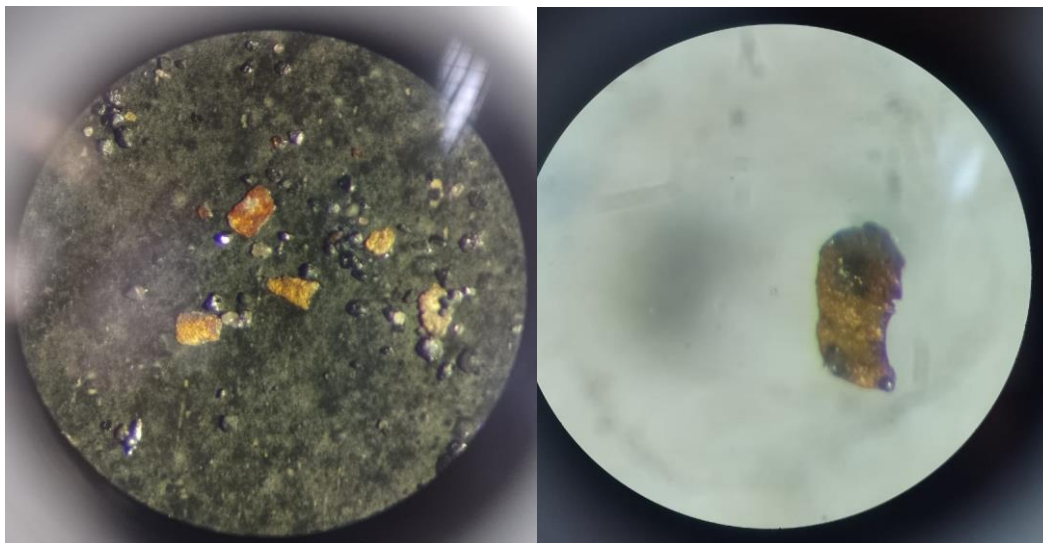


*Nota:* Se observa gotas de color metálico de forma esférica, siendo características del elemento mercurio.

Por otro lado, se identificó la presencia de oro, siendo observadas en la figura 16, donde se confirma la presencia de pequeñas chispas de oro, identificadas por su color característico, así también; se observa muestra de oro con adherencia de pequeñas gotas de mercurio producto de la amalgamación.

**Figura 16**

*Identificación de oro por inspección*



*Nota:* Se observa chispas de oro encontradas en el relave minero, así también; en la figura derecha se observa oro con pequeñas gotas de mercurio adheridas a este.

#### **4.1.5. Cuantificación de mercurio y oro en el relave minero**

Los resultados de análisis de laboratorio de concentración de mercurio y oro del relave minero se muestran en la tabla 15 y corroboradas por el informe de laboratorio presentado en el anexo 2.

**Tabla 15**

*Análisis de mercurio y oro del relave minero*

| <b>Parámetro</b> | <b>Muestra</b> | <b>Resultados</b> | <b>Unidades</b> |
|------------------|----------------|-------------------|-----------------|
| Mercurio (Hg)    | M 1            | 866,925           | mg/kg           |
| Oro (Au)         | M 1            | 95,738            | mg/kg           |

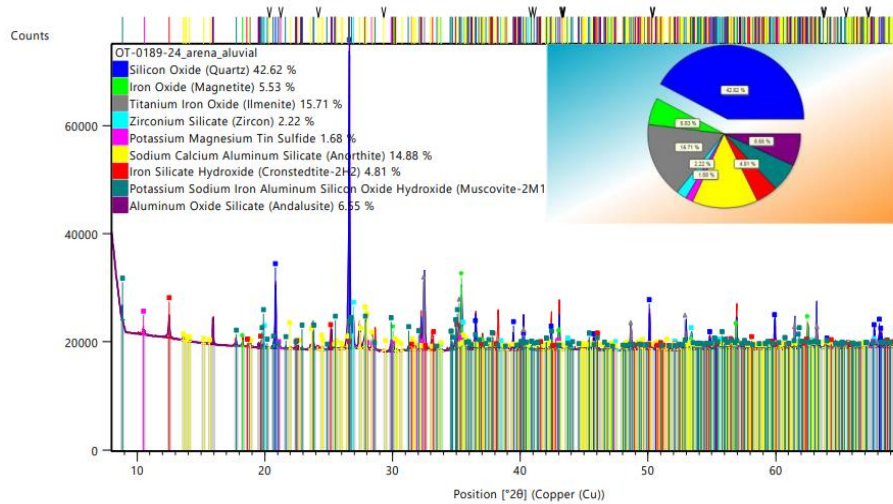
En la tabla 15 se muestra la alta concentración de mercurio en los relaves mineros, que superan en 36 veces los estándares de calidad ambiental para suelo industrial, catalogando a estos residuos como residuos tóxicos peligrosos.

#### 4.1.6. Caracterización componentes mineralógicos del relave minero

En la figura 17 se presenta las líneas de difracción de ratos X de los componentes del relave minero de la minera artesanal Playa Marta.

**Figura 17**

*Difractograma de la muestra de relave minero*



En la tabla 16 se muestran los porcentajes mineralógicos del relave minero. Corroborados por el informe de laboratorio presentado en el anexo 3.

**Tabla 16**

*Porcentaje mineralógico del relave minero*

| Nombre del mineral                    | Formula                                                                                                  | Resultado % |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Cuarzo                                | $\text{SiO}_2$                                                                                           | 42,62       |
| Ilmenita                              | $\text{TiFeO}_3$                                                                                         | 15,71       |
| Anortita                              | $\text{Na}_{0.34}\text{Ca}_{0.66}(\text{Al}_{1.66}\text{Si}_{2.34}\text{O}_8)$                           | 14,88       |
| Andalucita                            | $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)\text{O}$                                                                      | 6,55        |
| Moscovita                             | $\text{K}_{0.8}\text{Na}_{0.2}\text{Fe}_{0.05}\text{Al}_{2.95}\text{Si}_{3.1}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ | 6,00        |
| Magnetita                             | $\text{Fe}_3\text{O}_4$                                                                                  | 5,53        |
| Cronstedtita                          | $\text{Fe}_{3.7}\text{Si}_{1.3}\text{O}_5(\text{OH})_4$                                                  | 4,81        |
| Zircón                                | $\text{ZrSiO}_2$                                                                                         | 2,22        |
| Sulfuro de potasio, magnesio y estaño | $\text{K}_{0.69}\text{Mg}_{0.345}\text{Sn}_{0.655}\text{S}_2$                                            | 1,68        |

#### 4.2. ANÁLISIS LIXIVIADO DE MERCURIO EN PURO

Los resultados de análisis de concentración de mercurio en el lixiviado puro con un tiempo de lixiviación de 60 minutos se muestran en la tabla 17.

**Tabla 17**

*Análisis lixiviación de mercurio puro*

| Muestra | Masa gota de mercurio (g) | Concentración Hg lixiviado (ppm) |
|---------|---------------------------|----------------------------------|
| M1      | 0,3432                    | 564,209                          |
| M2      | 0,5136                    | 334,543                          |

*Nota:* Se muestra la masa de mercurio utilizado en el proceso de lixiviación en puro, así también; la concentración del lixiviado al final del proceso de lixiviación de 1 hora.

En la tabla 17 se muestra la concentración de la lixiviación de mercurio en sistema puro, demostrando que el lixivante formulado puede lixiviar al mercurio que se encuentra presente en el relave minero.

#### 4.3. LIXIVIACIÓN DEL RELAVE MINERO

En la tabla 18 se muestra el comportamiento de parámetros pH y ORP con respecto al tiempo de lixiviación según la formulación del lixivante A.

**Tabla 18**

*Comportamiento de parámetros de lixiviación – formulación lixivante A*

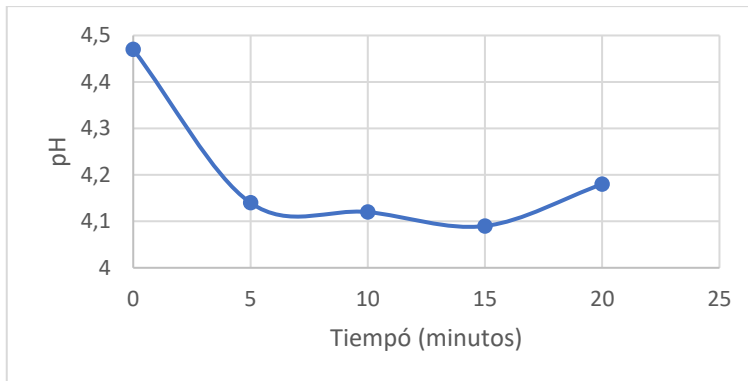
| Minutos  | 0     | 5     | 10    | 15    | 20   |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|
| pH       | 4,47  | 4,14  | 4,12  | 4,09  | 4,18 |
| ORP (mV) | 1 099 | 1 088 | 1 064 | 1 054 | 710  |

*Nota:* Se detalla los parámetros de lixiviación del relave minero con respecto al tiempo de lixiviación, hasta la caída por debajo de los 1 000 mV del ORP.

En la figura 18 se visualiza el comportamiento del pH y en la figura 19 el comportamiento del ORP con respecto al tiempo de lixiviación según la formulación de lixivante A.

**Figura 18**

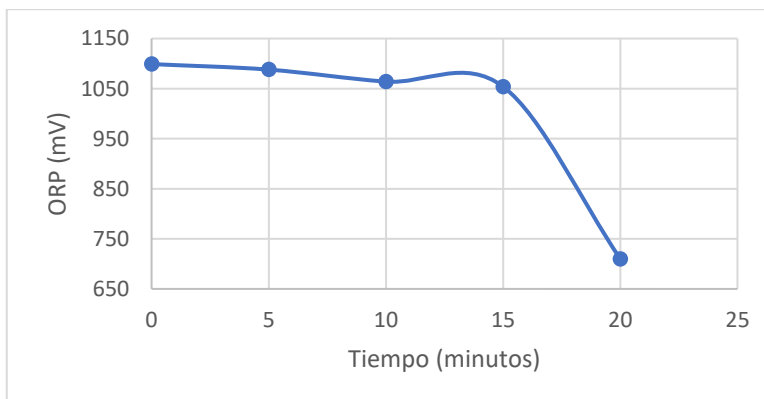
*Comportamiento del pH con respecto al tiempo - lixiviante A*



*Nota:* Se observa la variación del pH con respecto al tiempo de lixiviación del relave minero, obteniendo un rango de pH favorable para la lixiviación de mercurio y oro.

**Figura 19**

*Comportamiento del ORP con respecto al tiempo - lixiviante A*



*Nota:* Se observa la variación del ORP con respecto al tiempo de lixiviación del relave minero, presentando una caída de ORP a los 20 minutos.

En la tabla 19 se muestra el comportamiento de parámetros pH y ORP con respecto al tiempo de lixiviación de la formulación del lixiviante B.

**Tabla 19**

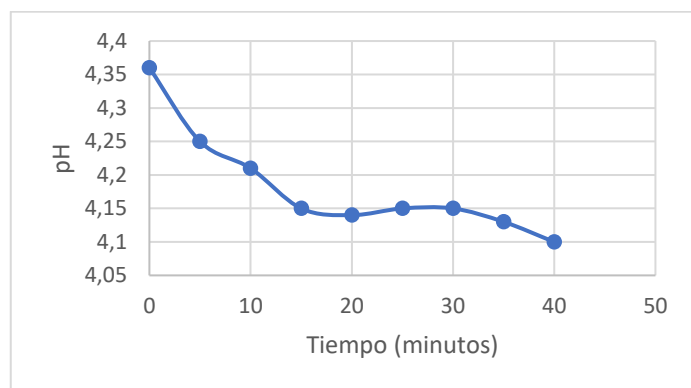
*Comportamiento de parámetros de lixiviación – formulación lixiviante B*

| Minutos  | 0     | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    | 30    | 35    | 40  |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| pH       | 4,36  | 4,25  | 4,21  | 4,15  | 4,14  | 4,15  | 4,15  | 4,13  | 4,1 |
| ORP (mV) | 1 116 | 1 107 | 1 100 | 1 090 | 1 082 | 1 071 | 1 059 | 1 041 | 970 |

En la figura 20 se visualiza el comportamiento del pH y en la figura 21 el comportamiento del ORP con respecto al tiempo según la formulación de lixiviante B.

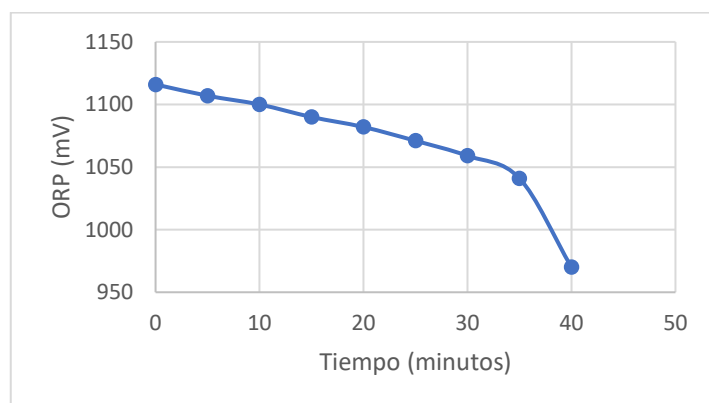
**Figura 20**

*Comportamiento del pH con respecto al tiempo - lixiviante B*



**Figura 21**

*Comportamiento del ORP con respecto al tiempo - lixiviante B*



En la tabla 20 se muestra el comportamiento de parámetros pH y ORP con respecto al tiempo de lixiviación de la formulación del lixiviante C.

**Tabla 20**

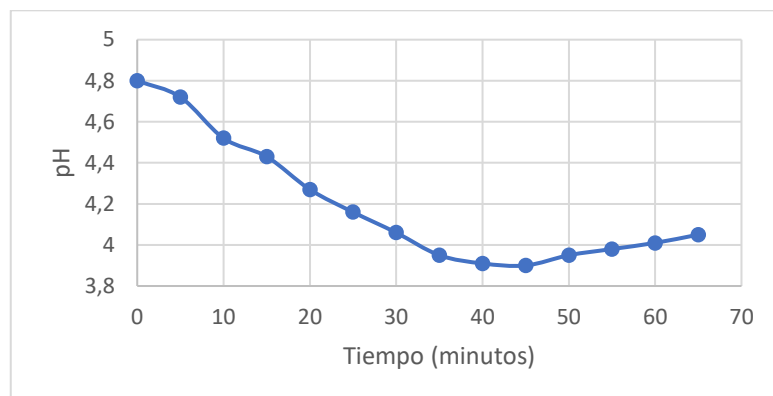
*Comportamiento de parámetros de lixiviación – formulación lixiviante C*

| Minutos  | 0     | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    | 30    |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pH       | 4,8   | 4,72  | 4,52  | 4,43  | 4,27  | 4,16  | 4,06  |
| ORP (mV) | 1 117 | 1 116 | 1 110 | 1 103 | 1 096 | 1 089 | 1 082 |
| Minutos  | 35    | 40    | 45    | 50    | 55    | 60    | 65    |
| pH       | 3,95  | 3,91  | 3,9   | 3,95  | 3,98  | 4,01  | 4,05  |
| ORP (mV) | 1 076 | 1 068 | 1 060 | 1 051 | 1 038 | 1 014 | 957   |

En la figura 22 se visualiza el comportamiento del pH y en la figura 23 el comportamiento del ORP con respecto al tiempo de lixiviación según la formulación de lixiviante C.

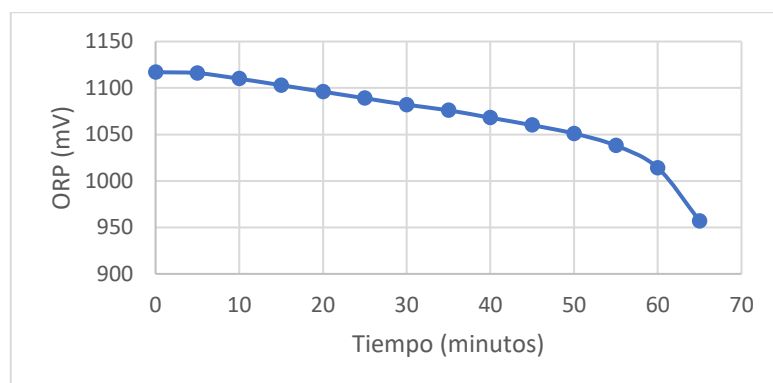
**Figura 22**

*Comportamiento del pH con respecto al tiempo - lixiviante C*



**Figura 23**

*Comportamiento del ORP con respecto al tiempo - lixiviante C*



*Nota:* Se observa la variación del ORP con respecto al tiempo para la formulación C, presentando una caída de ORP a los 65 minutos.

En la tabla 21 se muestra el comportamiento de parámetros pH y ORP con respecto al tiempo de lixiviación de la formulación del lixiviante D.

**Tabla 21**

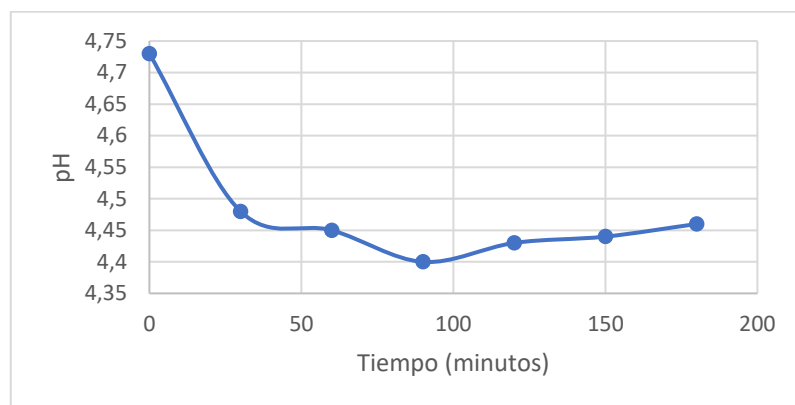
*Comportamiento de parámetros de lixiviación – formulación lixiviante D*

| Minutos  | 0     | 30    | 60    | 90    | 120   | 150   | 180   |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| pH       | 4,73  | 4,48  | 4,45  | 4,4   | 4,43  | 4,44  | 4,46  |
| ORP (mV) | 1 121 | 1 114 | 1 112 | 1 108 | 1 108 | 1 105 | 1 105 |

En la figura 24 se visualiza el comportamiento del pH y en la figura 25 el comportamiento del ORP con respecto al tiempo para la formulación del lixiviante D.

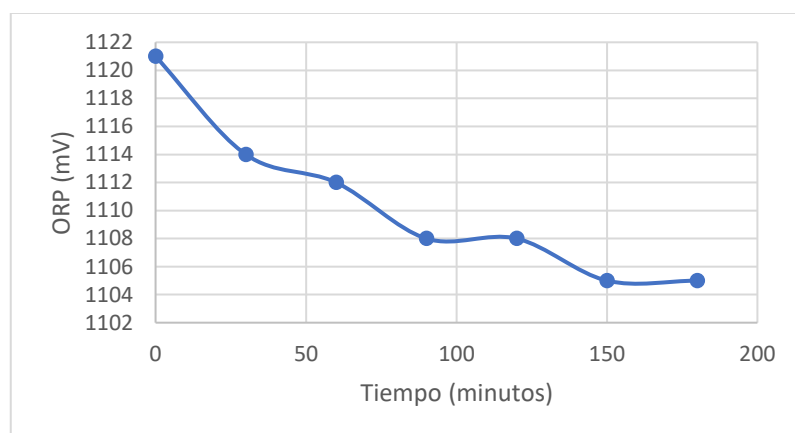
**Figura 24**

*Comportamiento del pH con respecto al tiempo - lixiviante D*



**Figura 25**

*Comportamiento del ORP con respecto al tiempo - lixiviante D*

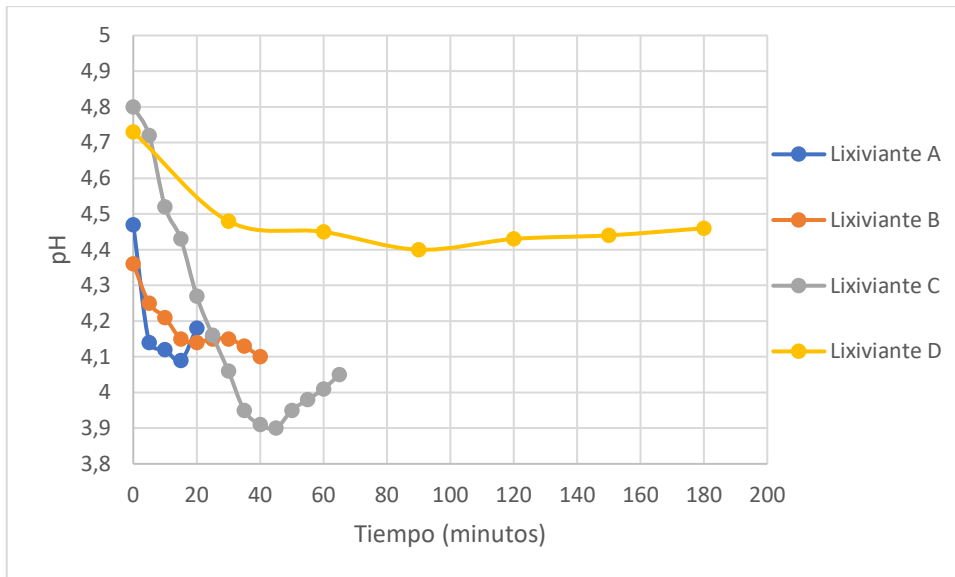


*Nota:* Se observa la variación del ORP con respecto al tiempo de lixiviación del relave minero para la formulación D, manteniendo un ORP superior a los 1 100 mV durante los 180 minutos.

En la figura 26 se representa el comportamiento del pH con respecto al tiempo de lixiviación de las 4 formulaciones de lixiviante.

**Figura 26**

*Comportamiento del pH – Formulación de lixiviantes*

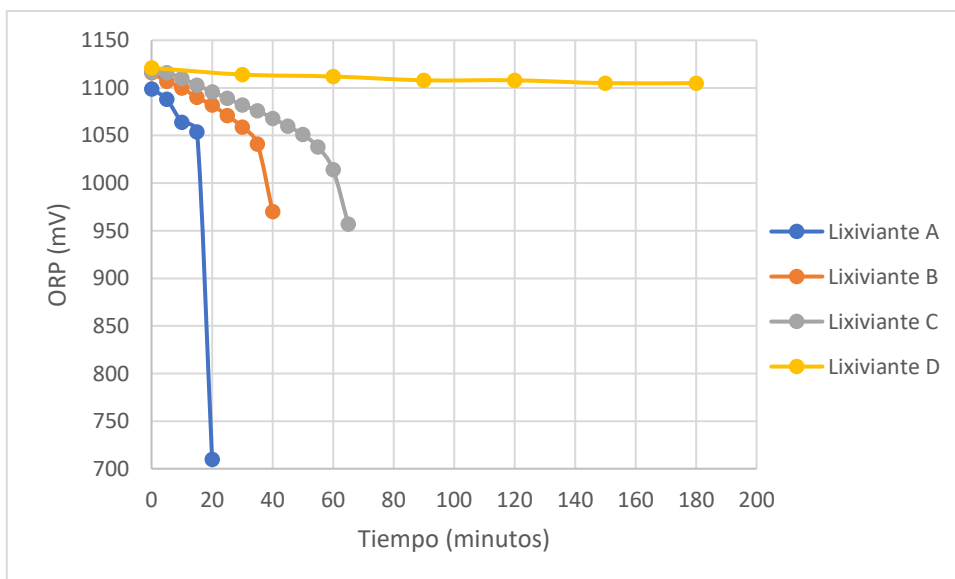


En la figura 26 se observa que el pH se mantiene estable para las 4 formulaciones de lixivante, demostrando la efectividad del ácido fosfórico como tampón del sistema.

En la figura 27 se representa el comportamiento del ORP con respecto al tiempo de lixiviación de las 4 formulaciones de lixivante.

**Figura 27**

*Comportamiento del ORP – Formulación de lixiviantes*



En la figura 27 se observa las diferentes caídas del ORP de las 4 formulaciones de lixiviante a medida que el tiempo de lixiviación ocurría. Se establece que el lixiviante C se mantienen estables los parámetros de lixiviación para un tiempo de 60 minutos, y en el lixiviante D se mantienen los parámetros de lixiviación superior a los 180 minutos de lixiviación.

#### 4.4. ANÁLISIS DE MERCURIO Y ORO EN LA LIXIVIACIÓN DEL RELAVE MINERO

##### 4.4.1. Análisis de lixiviación de mercurio y oro formulación C

En la tabla 22 se muestra el comportamiento de parámetros del proceso de lixiviación.

**Tabla 22**

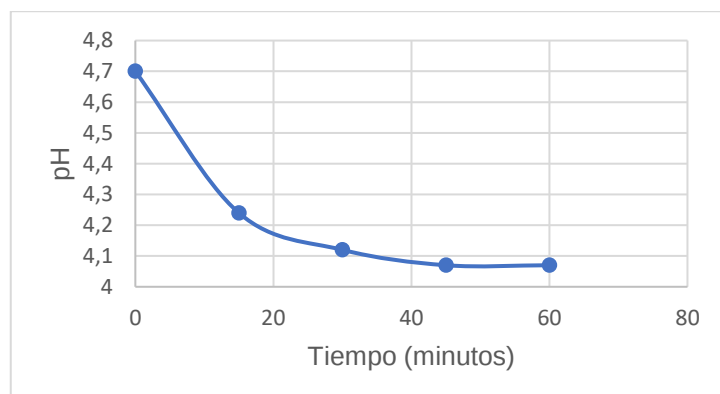
*Comportamiento de parámetros de lixiviación 60 minutos - Formulación lixiviante C*

| Minutos | 0       | 15      | 30      | 45      | 60      |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| pH      | 4,7     | 4,24    | 4,12    | 4,07    | 4,07    |
| ORP     | 1 111,5 | 1 111,3 | 1 101,1 | 1 093,1 | 1 084,1 |

En la figura 28 se visualiza el comportamiento del pH y en la figura 29 el comportamiento del ORP con respecto al tiempo de lixiviación según la formulación de lixiviante C.

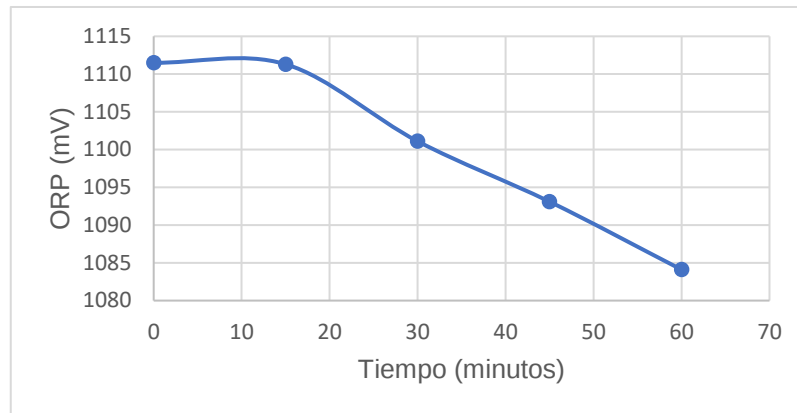
**Figura 28**

*Comportamiento del pH con respecto al tiempo – Formulación C*



**Figura 29**

*Comportamiento del ORP con respecto al tiempo – Formulación C*



Al final de proceso se recupera un lixiviado de 52,5 mL.

Los resultados de análisis de concentración de mercurio y oro en el relave minero y las masas iniciales de mercurio y oro se muestra los resultados en la tabla 23.

**Tabla 23**

*Cantidad de mercurio y oro en el relave minero*

| Masa del relave minero | Concentración Hg | Concentración Au | Masa de Hg inicial | Masa de Au inicial |
|------------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| 58,4435 g              | 866,925 ppm      | 95,738 ppm       | 50,66 mg           | 5,59 mg            |

#### 4.4.1.1. Cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final

Los resultados de concentración de mercurio y oro en el lixiviado final se presentan en la tabla 24 y corroboradas por el informe de laboratorio presentado en el anexo 2.

**Tabla 24**

*Análisis de concentración de mercurio y oro en el lixiviado final*

| Parámetro     | Muestra | Resultados | Unidades |
|---------------|---------|------------|----------|
| Mercurio (Hg) | M 2     | 844,807    | mg/kg    |
| Oro (Au)      | M 2     | 29,924     | mg/kg    |

El análisis de las masas de mercurio y oro en mg en el lixiviado final se presentan en la tabla 25

**Tabla 25***Cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final*

| Volumen<br>lixiviado final<br>(mL) | Concentración<br>Hg (ppm) | Concentración<br>Au (ppm) | Masa de Hg<br>lixiviado<br>(mg) | Masa de Au<br>lixiviado (mg) |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 52,5                               | 844,807                   | 29,924                    | 44,35                           | 1,57                         |

**4.4.1.2. Eficiencia en lixiviación de mercurio y oro**

Eficiencia de lixiviación de mercurio y oro se presentan en la tabla 26.

**Tabla 26***Eficiencia de lixiviación de mercurio y oro – formulación C*

| Lixiviación | Masa inicial (mg) | Masa final (mg) | Eficiencia (%) |
|-------------|-------------------|-----------------|----------------|
| Mercurio    | 50,66             | 6,31            | 87,54          |
| Oro         | 5,59              | 4,02            | 28,08          |

En la tabla 26 se presenta el porcentaje de lixiviación de mercurio en el relave minero con el lixivante C, obteniendo un 87,54 % de mercurio del relave minero, el residuo final de la lixiviación presenta concentración de 94,55 ppm, valor por encima de los estándares de calidad de suelo, demostrando que se requiere mayor tiempo de lixiviación.

**4.4.2. Análisis de lixiviación de mercurio y oro formulación D****4.4.2.1. Concentración de mercurio y oro en el lixiviado final**

En la tabla 27 se muestra el comportamiento de los parámetros del proceso de lixiviación del relave minero con el lixivante D.

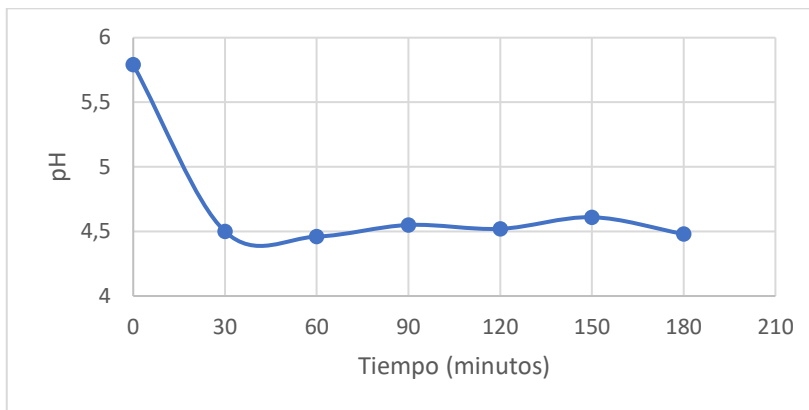
**Tabla 27***Comportamiento de parámetros de lixiviación 180 minutos - Formulación lixivante D*

| Minutos | 0       | 30      | 60      | 90      | 120     | 150     | 180     |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ph      | 5,79    | 4,5     | 4,46    | 4,55    | 4,52    | 4,61    | 4,48    |
| ORP     | 1 126,6 | 1 123,4 | 1 120,7 | 1 120,6 | 1 120,2 | 1 117,4 | 1 116,7 |

En la figura 30 se visualiza el comportamiento del pH y en la figura 31 el comportamiento del ORP con respecto al tiempo de lixiviación según la formulación de lixiviante D.

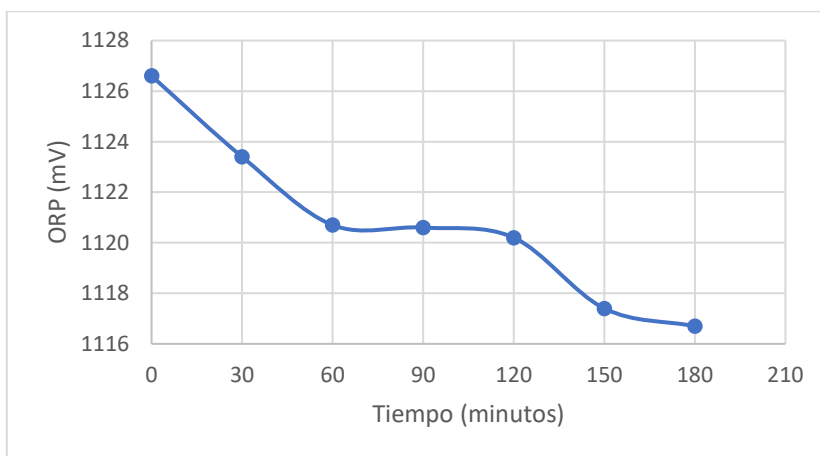
**Figura 30**

*Comportamiento del pH con respecto al tiempo – Formulación D*



**Figura 31**

*Comportamiento del ORP con respecto al tiempo – Formulación D*



El análisis de las concentraciones de mercurio y oro en el lixiviado final se presentan en la tabla 28 y corroboradas por el informe de laboratorio presentado en el anexo 4.

**Tabla 28**

*Análisis de mercurio y oro en la muestra de lixiviado final – 180 min*

| Parámetro     | Muestra | Resultados | Unidades |
|---------------|---------|------------|----------|
| Mercurio (Hg) | M 2     | 79,758     | mg/kg    |
| Oro (Au)      | M 2     | 3,471      | mg/kg    |

En la tabla 29 se presenta la concentración inicial de mercurio y oro para la muestra diluida enviada a laboratorio.

**Tabla 29**

*Análisis de concentración de mercurio y oro en el lixiviado*

| Parámetro     | Muestra         | Resultados | Unidades |
|---------------|-----------------|------------|----------|
| Mercurio (Hg) | Lixiviado final | 199,395    | mg/kg    |
| Oro (Au)      | Lixiviado final | 8,678      | mg/kg    |

*Nota:* Se presenta las concentraciones de mercurio y oro en el lixiviado final que tuvo una recuperación total de 215 mL.

#### 4.4.2.2. Cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final

El cálculo de la cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final, son presentados en la tabla 30.

**Tabla 30**

*Cantidad de mercurio y oro en el lixiviado final*

| Volumen<br>lixiviado final<br>(mL) | Concentración<br>Hg (ppm) | Concentración<br>Au (ppm) | Masa de Hg<br>lixiviado<br>(mg) | Masa de Au<br>lixiviado<br>(mg) |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 215                                | 199,395                   | 8,678                     | 42,87                           | 1,87                            |

#### 4.4.2.3. Cantidad de mercurio y oro en el residuo de la lixiviación

El análisis de las concentraciones de mercurio y oro en el residuo de la lixiviación (arena), se presentan en la tabla 31 y corroboradas por el informe de laboratorio presentado en el anexo 4.

**Tabla 31**

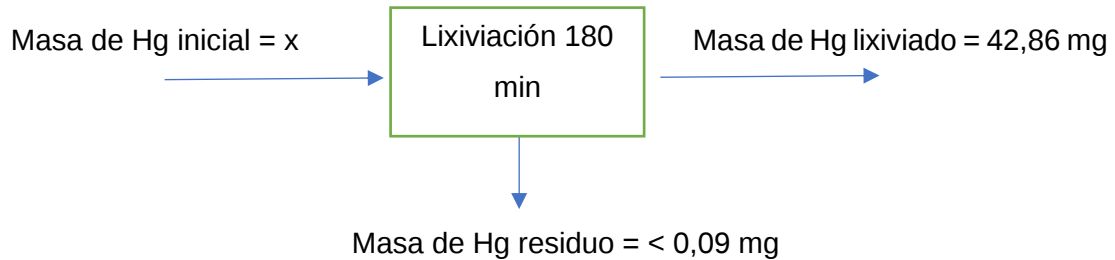
*Análisis de concentración de mercurio y oro en el residuo*

| Parámetro     | Muestra | Resultados (mg/kg) | Masa Hg residuo (mg) |
|---------------|---------|--------------------|----------------------|
| Mercurio (Hg) | M 1     | < 1,458            | < 0,09               |
| Oro (Au)      | M 1     | < 0,688            | < 0,042              |

*Nota:* Se presenta las concentraciones y masas de mercurio y oro en el residuo de la lixiviación (arena), corroborados en el anexo 4 representadas en el análisis de la muestra M 1 con código RPA 2.

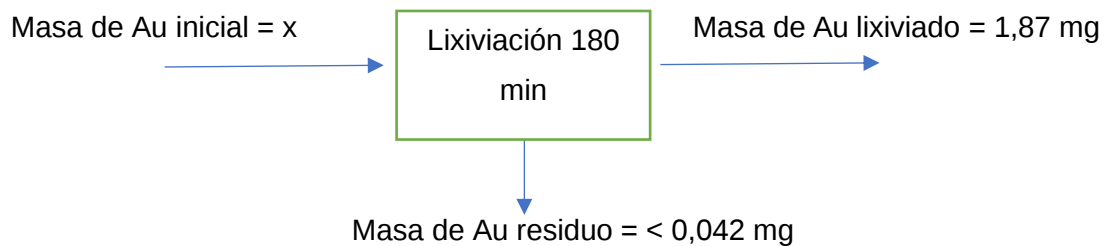
#### 4.4.2.4. Balance de materia del mercurio y oro

Se presenta el diagrama de balance de materia del mercurio en el proceso de lixiviación.



$$\text{Masa de Hg inicial} = 42,86 \text{ mg} + 0,09 \text{ mg} = 42,95 \text{ mg}$$

Diagrama de balance de materia de oro en el proceso de lixiviación.



$$\text{Masa de Au inicial} = 1,87 \text{ mg} + 0,042 \text{ mg} = 1,912 \text{ mg}$$

#### 4.4.2.5. Eficiencia en remoción de mercurio y oro

La eficiencia de lixiviación de mercurio y oro se presentan en la tabla 32.

**Tabla 32**

*Eficiencia de lixiviación de mercurio y oro – formulación D*

| Lixiviación | Masa inicial (mg) | Masa final (mg) | Eficiencia (%) |
|-------------|-------------------|-----------------|----------------|
| Mercurio    | 42,95             | < 0,09          | 99,79          |
| Oro         | 1,912             | < 0,042         | 97,80          |

En la tabla 32 se presenta que la eficiencia de lixiviación del mercurio fue de 99,79 %, teniendo el residuo final de lixiviación una concentración de mercurio menor a 1,458 ppm, valor por debajo de los estándares de calidad. Demostrando el tratamiento del relave minero y la eficiencia de la formulación D.

#### 4.4.2.6. Lixiviación de mercurio y oro con respecto al tiempo

Los resultados del análisis de mercurio de las muestras enviadas a laboratorio se presentan en la tabla 33 y corroboradas por el informe de laboratorio presentado en el anexo 6.

**Tabla 33**

*Concentración de muestras lixiviado 15, 30, 45 y 60 minutos*

| Muestra    | Código   | Concentración de Hg (ppm) |
|------------|----------|---------------------------|
| 15 minutos | LPA4 - 1 | 86,582                    |
| 30 minutos | LPA4 - 2 | 132,449                   |
| 45 minutos | LPA4 - 3 | 146,457                   |
| 60 minutos | LPA4 - 4 | 164,466                   |

*Nota:* Se presenta las concentraciones de mercurio en las muestras de 2 mL de lixiviado enrasado en 10 mL de muestra, corroborados en el anexo 6 representadas en el análisis de las muestras; M 2 con código LPA 4 – 1, M 3 con código LPA 4 - 2, M 4 con código LPA 4 - 3 y M 5 con código LPA 4 - 4.

El volumen del lixiviante inicialmente fue de 57 mL. Los cálculos de la concentración de mercurio en los tiempos de 15, 30, 45, 60 minutos, se muestran en la tabla 34.

**Tabla 34**

*Porcentaje de lixiviación de mercurio en 15, 30, 45 y 60 minutos*

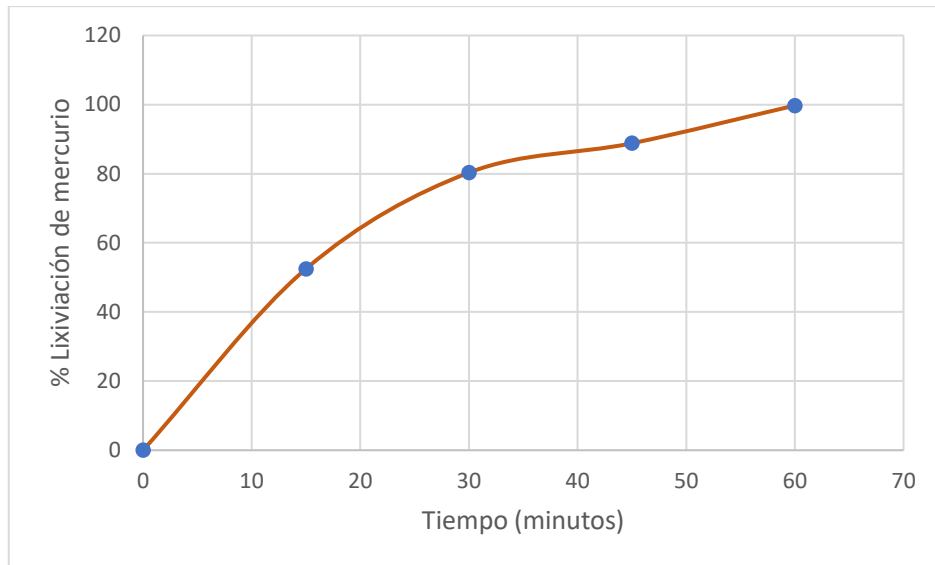
| Tiempo lixiviación (minutos) | Volumen lixiviado (mL) | Concentración de Hg (ppm) | Masa Hg en el lixiviado (mg) | Eficiencia recuperación (%) |
|------------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 0                            | 57                     | 0                         | 0                            | 0                           |
| 15                           | 57                     | 432,91                    | 24,67                        | 52,49                       |
| 30                           | 57                     | 662,245                   | 37,75                        | 80,32                       |
| 45                           | 57                     | 732,285                   | 41,74                        | 88,81                       |
| 60                           | 57                     | 822,33                    | 46,87                        | 99,72                       |

*Nota:* Se presenta los porcentajes lixiviación de mercurio con respecto al tiempo en el proceso de lixiviación, requiriendo 60 minutos para lixiviar el mercurio en un 99,72 % del relave minero.

Se realiza el gráfico de lixiviación de oro con respecto al tiempo según la figura 32.

**Figura 32**

*Lixiviación de mercurio con respecto al tiempo*



Los resultados del análisis de oro de las muestras enviadas a laboratorio se presentan en la tabla 35 y corroboradas por el informe de laboratorio presentado en el anexo 5.

**Tabla 35**

*Concentración de muestras lixiviado 60 y 120 minutos*

| Muestra          | Código   | Concentración de Au (ppm) |
|------------------|----------|---------------------------|
| M1 - 60 minutos  | LPA2 - 1 | 1,439                     |
| M2 - 120 minutos | LPA2 - 2 | 1,816                     |

*Nota:* Se presenta las concentraciones de mercurio y oro en la muestra de 1 mL de lixiviado enrasado en 10 mL de muestra, corroborados en el anexo 5 representadas en el análisis de las muestras, M 1 con código LPA 2 – 1 y M 2 con código LPA 2 – 2.

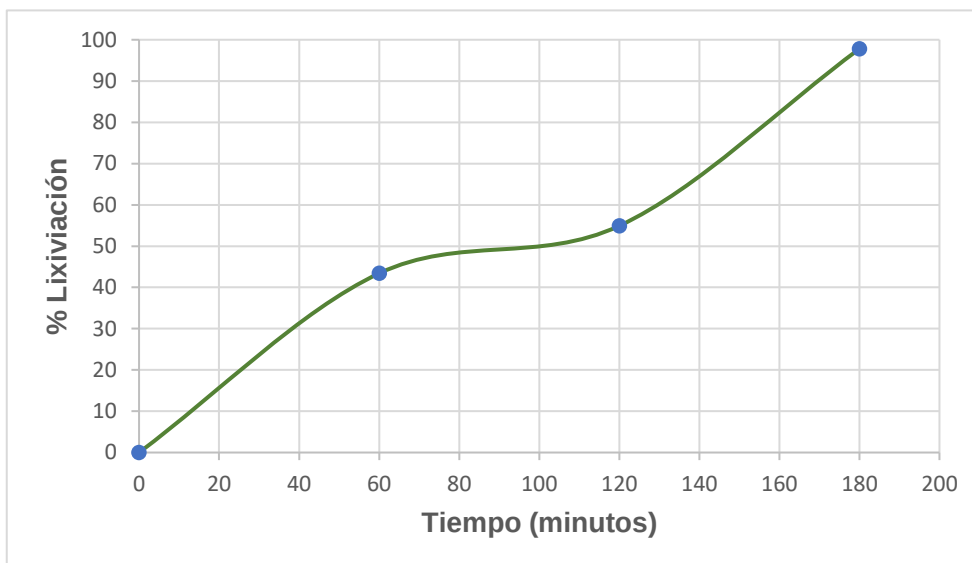
Los cálculos de la concentración de oro en el lixiviado en los tiempos de 60, 120 y 180 minutos, se muestran en la tabla 36.

**Tabla 36***Porcentaje de lixiviación de oro en 60, 120 y 180 minutos*

| Muestra     | Volumen lixiviado (mL) | Concentración de Au (ppm) | Masa Au en el lixiviado (mg) | Eficiencia lixiviación (%) |
|-------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 0 minutos   | 57                     | 0                         | 0                            | 0                          |
| 60 minutos  | 57                     | 14,39                     | 0,82 mg                      | 42,89                      |
| 120 minutos | 57                     | 18,16                     | 1,04 mg                      | 54,92                      |
| 180 minutos | 215                    | 8,678                     | 1,87 mg                      | 97,80                      |

*Nota:* Se presenta los porcentajes lixiviación de oro con respecto al tiempo, requiriendo 180 minutos para lixiviar el oro en un 97,8 % del relave minero.

Se realiza el gráfico de lixiviación de mercurio con respecto al tiempo según la figura 33.

**Figura 33***Lixiviación de oro con respecto al tiempo*

En la tabla 37 se presenta el resumen de resultado de análisis de comparación de los lixiviantes C y D.

**Tabla 37***Resumen de datos de lixiviación*

| Formulación | Tiempo lixiviación (min) | Concentración del Relave Minero (ppm) |            |          |          | Porcentaje de lixiviación % |       |
|-------------|--------------------------|---------------------------------------|------------|----------|----------|-----------------------------|-------|
|             |                          | Hg inicial                            | Au inicial | Hg final | Au final | Hg                          | Au    |
| C           | 60                       | 866,56                                | 95,738     | 107,967  | 68,784   | 87,54                       | 28,08 |
| D           | 180                      | 859,17                                | 32,797     | < 1,458  | < 0,688  | 99,56                       | 97,8  |

*Nota:* Se presenta el resumen del resultado de la lixiviación del relave minero; obteniendo como mejor formulación el lixivante D, con una lixiviación de mercurio del 99,56% y de oro en un 97,8 %, con un tiempo de lixiviación de 180 minutos.

#### 4.5. RECUPERACIÓN DE MERCURIO

##### 4.5.1. Precipitación del lixiviado

Al lixiviado final se agregó hidróxido de sodio 5 M hasta pH de 9,83 para precipitar las especies del hierro del lixiviado, obteniendo un aumento del tamaño de precipitado y separación de la parte líquida. Se dejó reposar por 5 minutos para separar los flock del líquido. Luego se procedió a filtrar con ayuda de un papel filtro, obteniendo un lixiviado con mayor claridad. En la figura 34 se observa la decantación del precipitado en el lixiviado al aumentar el pH.

**Figura 34***Precipitación del lixiviado*

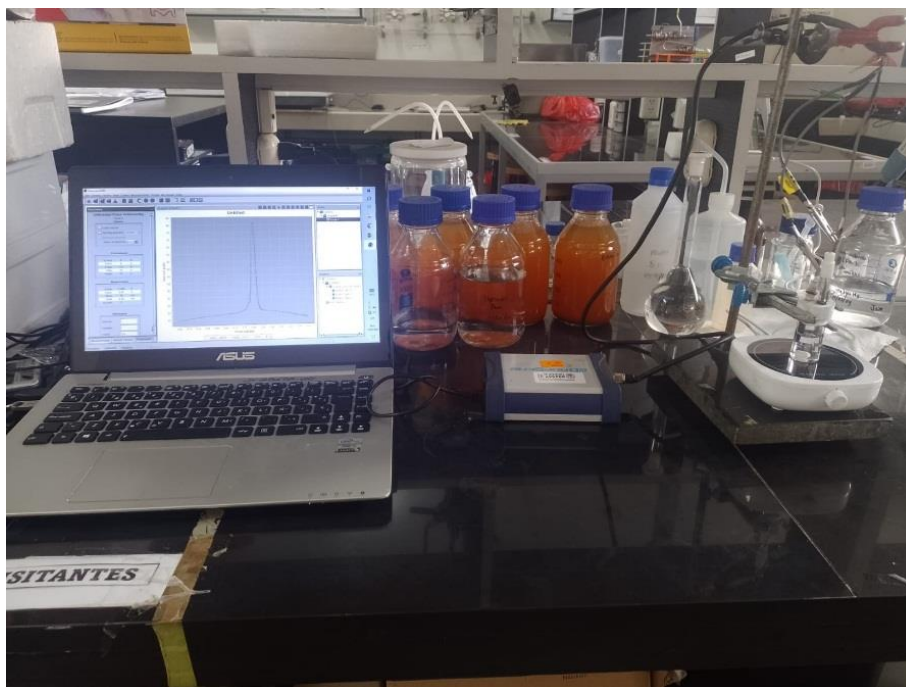
*Nota:* Se presenta el proceso de decantación del lixiviado al aumentar el pH del sistema para mejorar el filtrado.

#### 4.5.2. Obtención de curva de calibración electroquímica para mercurio

Se armó un sistema de celda electroquímica y se instaló un galvanostato para las lecturas electroquímicas, tal como se muestra en la figura 35. Se realizó un análisis de ciclovoltamperometría del lixiviado, agregando 1 mL de lixiviado filtrado con 0,9 mL de ácido nítrico 0,1 M. Como electrolito de soporte, se utilizó electrodo de trabajo carbón vítreo, como electrodo de referencia Ag/AgCl y como contra electrodo grafito, con una velocidad de barrido de 0,04 V/seg entre un rango de - 1 V hasta 1 V. Obteniendo el diagrama de ciclovoltamperometria presentado en la figura 36.

**Figura 35**

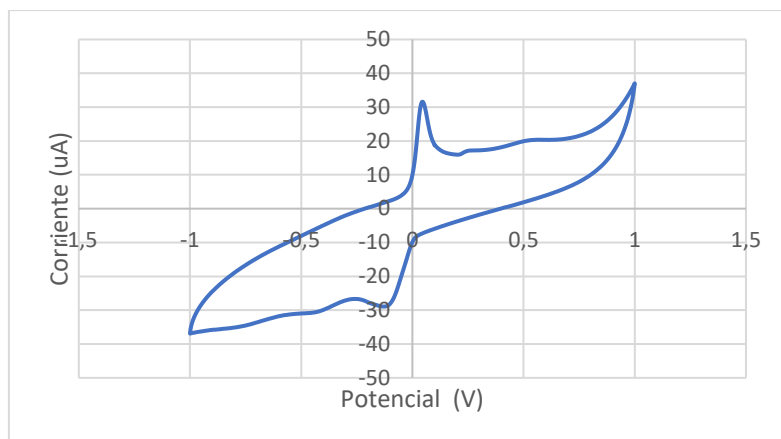
*Sistema electroquímico*



*Nota:* Se presenta el sistema de medición electroquímico, conformados por una celda electroquímica, un galvanosato y una laptop para la reproductibilidad de los datos.

**Figura 36**

*Diagrama de ciclovoltamperometria del lixiviado filtrado*



*Nota:* Se presenta el diagrama de ciclovoltamperometría emitida por el galvanostato, obteniendo un pico de intensidad de corriente cerca al potencial 0,1 V, potencial característico de reducción de especie de mercurio, identificando que existe mercurio en la muestra de lixiviado.

Se realizó el análisis para la obtención de la curva de calibración del mercurio, para ello se armó una celda electroquímica conformada por una celda y los electrodos de trabajo, referencia y contraelectrodo, tal como se muestran en la figura 37.

**Figura 37**

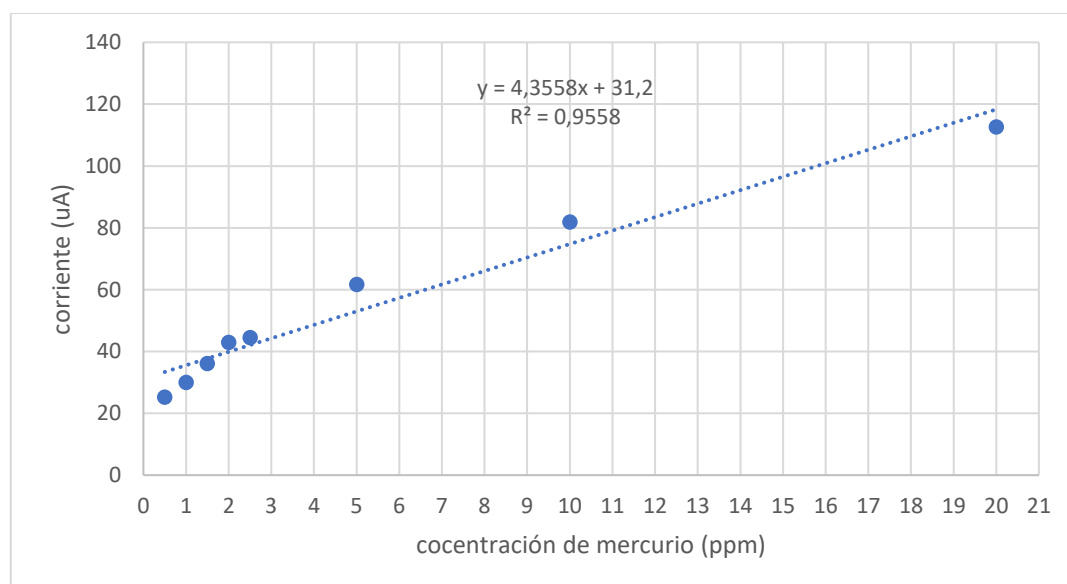
*Celda electroquímica*



Se utilizó la técnica electroquímica de redisolución anódica con un barrido de diferencial de pulso cuadrado, utilizando patrón de mercurio de 100 ppm de cloruro de mercurio II en medio de ácido nítrico 0,1 M como electrolito de soporte, se utilizó como electrodo de trabajo carbón vítreo, como electrodo de referencia Ag/AgCl y como contra electrodo grafito. Se utilizó un potencial de deposición de - 0,4 V, un tiempo de deposición de 30 segundos sin agitación y un tiempo de equilibrio de 5 segundos, una velocidad de barrido de 0,04 V/seg, un potencial de pulso de 0,05 V y un rango de barrido de 0,1 V hasta 0,6 V. los resultados de los picos de potenciales a diferentes concentraciones de mercurio se presentan en la figura 38.

**Figura 38**

*Curva de calibración de mercurio*



Se verifica de la figura 38, se tienen una mejor linealidad para el mercurio en los rangos de 0,5 a 2,5 ppm de mercurio en la celda electroquímica, por ello, se trabajó dentro de este rango para encontrar la curva de calibración.

Se realizó el análisis para la obtención de la curva de calibración del mercurio, para ello se utilizó la técnica de redisolución anódica con un barrido de diferencial de pulso cuadrado, utilizando patrón de mercurio en medio de ácido nítrico 0,1 M como electrolito de soporte, se utilizó como electrodo de trabajo carbón vítreo, como electrodo de referencia Ag/AgCl y como contra electrodo grafito. Se utilizó un potencial de deposición de - 0,4 V, un tiempo de deposición de 60 segundos con agitación para el tiempo de deposición, un tiempo de equilibrio de 5 segundos, una

velocidad de barrido de 0,04 V/seg, un potencial de pulso de 0,05 V y un rango de barrido de 0,1 V hasta 0,6 V. Los datos de obtención de la corriente pico de las diversas concentraciones de mercurio y de los ensayos por triplicado se muestran en la tabla 38.

**Tabla 38**

*Datos de curva de calibración electroquímica de mercurio*

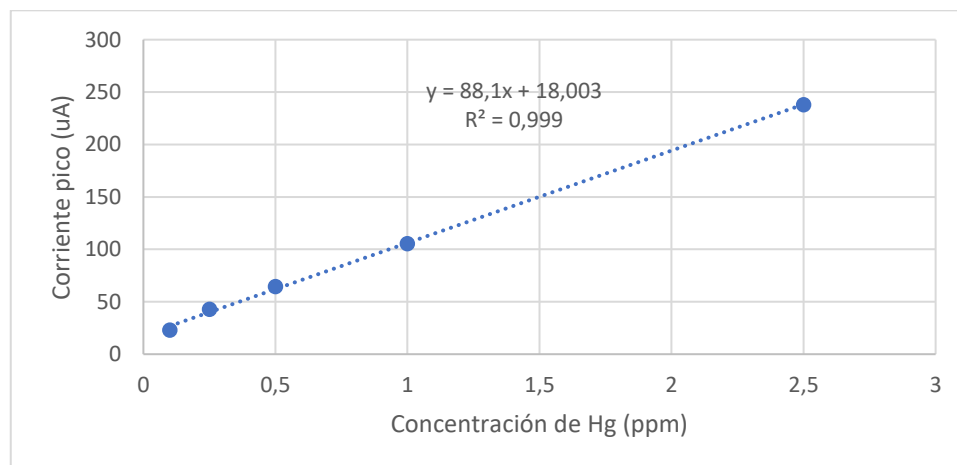
| Conc.<br>Hg<br>(ppm) | Corriente pico (uA) |           |            | Promedio   | SD       | RSD      |
|----------------------|---------------------|-----------|------------|------------|----------|----------|
|                      | Rep1                | Rep2      | Rep3       |            |          |          |
| 0,1                  | 22,57916            | 22,53166  | 23,359583  | 22,823472  | 0,464892 | 2,036905 |
| 0,25                 | 40,88333            | 43,78333  | 43,333332  | 42,666667  | 1,560718 | 3,657932 |
| 0,5                  | 63,27916            | 63,937512 | 65,925003  | 64,380556  | 1,377438 | 2,139525 |
| 1                    | 104,21250           | 105,54166 | 106,520836 | 105,425001 | 1,158580 | 1,098962 |
| 2                    | 235,54876           | 237,95416 | 236,785625 | 236,762852 | 1,202859 | 0,508044 |

*Nota:* Se presenta el promedio de pico de intensidad de corriente para las diversas concentraciones de mercurio.

Se representa gráficamente el promedio de los picos de intensidad de corriente con respecto a las concentraciones de mercurio, observadas en la figura 39.

**Figura 39**

*Curva de calibración*



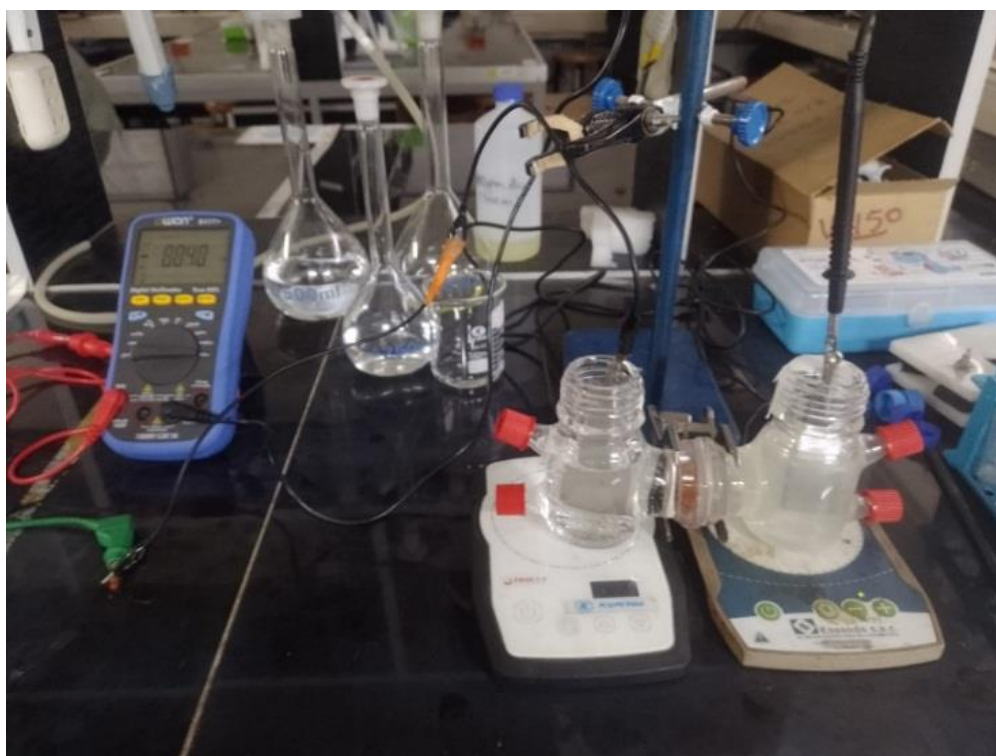
*Nota:* Se presenta la curva de calibración electroquímica para el mercurio en un rango de concentraciones de 0,1 M a 2,5 M.

#### 4.5.3. Electrodeposición de mercurio

En una celda con membrana se realizó la electrodeposición de mercurio usando como electrodo para el cátodo un grafito de placa, con un área superficial de  $13,11 \text{ cm}^2$  y como ánodo se utilizó acero comercial, como solución electrolito se utilizó nitrato de potasio 2 M. Se conectó a una fuente de energía y se suministró 0,040 A. Se obtuvo muestras de 50 microlitros del sistema a medida que en tiempo de electrodeposición transcurría, se agregó 10 mililitros de ácido nítrico 1 M para determinar las lecturas de concentración por técnica de redisolución anódica y un barrido de diferencial de pulso cuadrado. En la figura 40 se muestra el sistema de electrodeposición y en la figura 41 el electrodo de placa de grafito al final del proceso de electrodeposición.

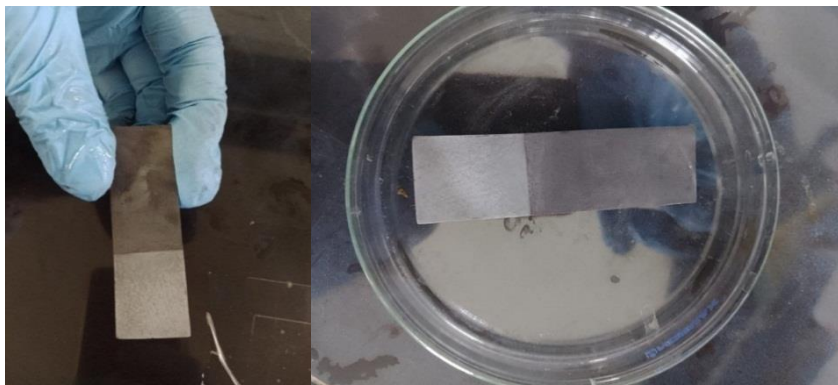
**Figura 40**

*Sistema de electrodeposición de mercurio*



## Figura 41

*Cátodo recubierto con mercurio después de la electrodeposición*

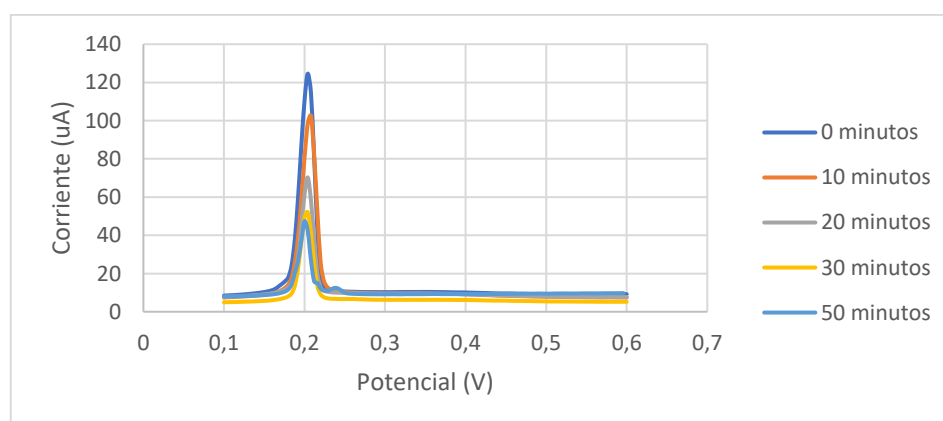


*Nota:* Se presenta la placa de grafito después del proceso de electrodeposición, con recubrimiento metálico de mercurio.

Se realizó el análisis de las muestras tomadas en el tiempo de electrodeposición, para ello se utilizó la técnica de redisolución anódica con un barrido de diferencial de pulso cuadrado, utilizando las muestras mercurio en medio de ácido nítrico 0,1 M como electrolito de soporte, se utilizó como electrodo de trabajo carbón vítreo, como electrodo de referencia Ag/AgCl y como contra electrodo grafito. Se utilizó un potencial de deposición de -0,4 V, un tiempo de deposición de 60 segundos, con agitación para el tiempo de deposición, un tiempo de equilibrio de 5 segundos, una velocidad de barrido de 0,04 V/seg, un potencial de pulso de 0,05 V y un rango de barrido de 0,1 V hasta 0,6 V, presentados en la figura 42 y tabla 39.

## Figura 42

*Diagramas de diferencial de pulso de electrodeposición de Hg*

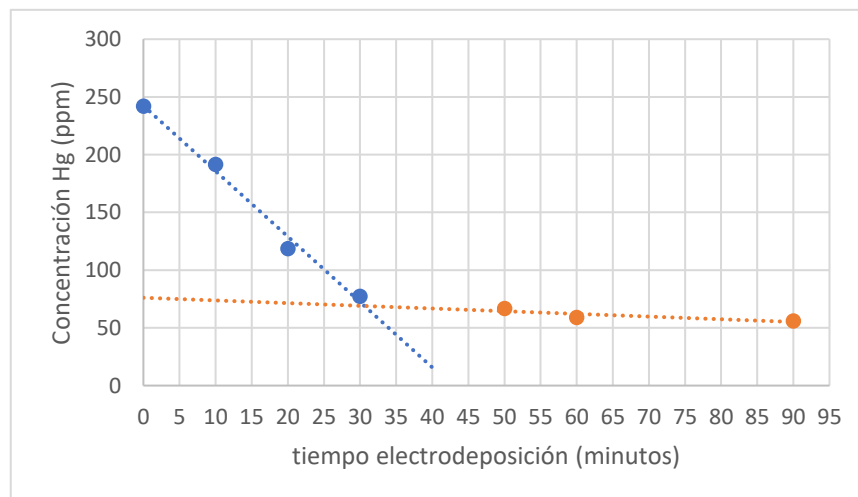


**Tabla 39***Cálculo de concentración de mercurio con respecto al tiempo*

| Tiempo (min) | Corriente pico (uA) | contracción curva calibración (ppm) | Concentración en el sistema (ppm) |
|--------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 0            | 124,570839          | 1,209623598                         | 241,9247196                       |
| 10           | 102,383331          | 0,957779012                         | 191,5558025                       |
| 20           | 70,26667            | 0,593231215                         | 118,6462429                       |
| 30           | 52,070827           | 0,386694972                         | 77,33899432                       |
| 50           | 47,396663           | 0,333639762                         | 66,72795233                       |
| 60           | 44,004166           | 0,295132418                         | 59,02648354                       |
| 90           | 42,612499           | 0,27933597                          | 55,8671941                        |

*Nota:* Se presenta los picos de corriente de mercurio con respecto al tiempo de electrodeposición y la concentración de mercurio en el sistema.

Se realizó la gráfica de concentración de mercurio en el lixiviado con respecto al tiempo de electrodeposición, tal como se aprecia en la figura 43.

**Figura 43***Concentración de mercurio en el sistema de electrodeposición*

Se realizó dos segmentaciones en la gráfica de electrodeposición, siendo la mayor eficiencia de electrodeposición para un tiempo de 30 minutos, después de ello; la electrodeposición se vuelve ineficiente debido que la disminución de mercurio en la solución.

Se obtuvo una recuperación de mercurio por electro deposición de:

$$\% \text{ recuperación de Hg} = \frac{(\text{Conc. inicial} - \text{Conc. final}) * 100}{\text{Conc. inicial}}$$

$$\% \text{ recuperación de Hg} = \frac{(241,9247 - 55,8671) \text{ ppm} * 100}{241,9247 \text{ ppm}} = 76,9 \%$$

Para un tiempo de lixiviación de 90 minutos se recuperó el 76,9 % de mercurio del lixiviado filtrado, pero el tiempo con mejor eficiencia en el proceso es de 30 minutos. Teniendo una recuperación de 68,03 %.

$$\% \text{ recuperación de Hg} = \frac{(241,9247 - 77,338) \text{ ppm} * 100}{241,9247 \text{ ppm}} = 68,03 \%$$

## CONCLUSIONES

Se caracterizó el relave de la minera artesanal Playa Marta por espectrofotometría de absorción atómica de flama, siendo la concentración de mercurio de 866,925 ppm y de oro de 95,738 ppm, y por difracción de rayos X se identificó los siguientes minerales: cuarzo en 42,62 %; ilmenita en 15,71%; Anortita en 14,88%; andalucita en 6,55 %; moscovita en 6,0 %; magnetita en 5,53 %; cronstedtita en 4,81 %; zircón en 2,22 % y sulfuro de potasio, magnesio y estaño en un 1,68 %.

Se determinó los componentes adecuados del agente lixiviante, conformado por un lixiviante con formulación para la lixiviación de mercurio y oro presentes en el relave de la minera Playa Marta, obteniendo una relación general de 1,267 de lixiviante por cada 1 gramos de pasivo ambiental en peso seco, para los componentes del lixiviante fueron: cloruro de sodio (sal común) en una relación con el relave minero en peso seco de 0,059 mL/g; hipoclorito de sodio en una relación de 0,360; agua para dilución en 0,40; ácido fosfórico 0,01 y para la etapa de neutralización para mantener el pH entre los parámetros, ácido fosfórico en una relación de 0,023 e hidróxido de sodio 1 M en una relación de 0,335.

Se determinó los parámetros de lixiviación eficientes para el relave de la minera Playa Marta, siendo estos: el potencial de hidrogeno; que debe mantenerse en el proceso de lixiviación entre los valores de 4,0 a 4,5; el potencial de oxidación y reducción (ORP), con valores superiores a los 1 000 mV, y el tiempo de lixiviación, comprendidos en 60 minutos para lixiviar el mercurio en un 99,560 % y 180 minutos para lixiviar al oro en un 97,80 %.

Se desarrolló un proceso sostenible de lixiviación verde para el tratamiento de relaves de la minera Playa Marta, teniendo un relave minero con una concentración inicial de 866,925 ppm mercurio; valor catalogado como residuo tóxico peligroso debido que superó los estándares de calidad ambiental para suelo. Al final del proceso de lixiviación se obtuvo un residuo (arena) con concentración menor a 1,458 ppm de mercurio; obteniendo un valor menor por debajo del estándar de calidad de suelo de la Normativa Peruana, demostrando el tratamiento de la lixiviación de mercurio del relave minero y obteniendo un residuo no peligroso para la salud humana.

## RECOMENDACIONES

1. Dentro del proceso de lixiviación, el hipoclorito de sodio se descompone a cloro gas elemental, reconocido por el color verde amarillento y el olor picante e irritante. Se recomienda trabajar el proceso de lixiviación en campana de extracción de gases, a fin de no contaminar el área de trabajo y al personal.
2. Para realizar el escalamiento del proceso, se recomienda utilizar un reactor tanque con agitación, donde exista una bomba de extracción de gases para evitar la sobrepresión del sistema y retirar el cloro gas, así también; tener tanques de burbujeo para la minimización del gas cloro.
3. Se recomienda investigar una línea de tratamiento de gas cloro, a fin de obtener un subproducto como el ácido clorhídrico, o una recuperación de producto convirtiéndolo a hipoclorito de sodio.
4. Se recomienda escalar el proceso a una planta piloto, a fin de realizar el tratamiento de los pasivos ambientales de la minería aurífera artesanal en Madre de Dios, confinando el mercurio y recuperando el oro.
5. Debido a la alta concentración de mercurio presente en los relaves de la minería aurífera artesanal en Madre de Dios, se recomienda el manejo de estos pasivos con los protocolos de seguridad a fin de no tener contaminación al ecosistema y al personal de trabajo.
6. Se recomienda que la presente investigación pueda ser analizada como política ambiental para el tratamiento de los relaves mineros de las empresas auríferas artesanales de la Región Madre de Dios, a fin de tratar sus pasivos ambientales antes de ser introducidos al ecosistema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala, Y. et.al., (2019) *Manual de ensayos para laboratorio: agregados (AG) para mezclas asfálticas*. México. 130 págs.  
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt551.pdf>
- Beltran, M. & Gómez, A. (2016) *Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg) mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión*.  
<https://pdfs.semanticscholar.org/58c0/dd79d03c4d01209871cdbc502efe232d2de.pdf>
- Bernad, I. O., García, J. S., Valiño, M. D., & Fernández, S. V. (2007). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*. 109.
- Cerda, M. et.al. (2019) *Edafología – guía de prácticas* Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Ayacucho-Perú. 123 págs.
- CNPMLTA (2019) *Guía para el manejo y almacenamiento de mercurio*. Medellín – Colombia. 4 págs.  
[https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/33418/Guia\\_hg.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/33418/Guia_hg.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Colpas, F. (2016) *Adsorción de mercurio utilizando carbones activados modificados con peróxido de hidrogeno y calentamiento*. 8 págs.  
<https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v27n5/art09.pdf>
- Cooney, D. (1998) *Adsorption Design for Wastewater Treatment*. Washington, U.S.A. (1998) Lima- Perú. 400 págs.  
<https://centroderecursos.cultura.pe/es/registrobibliografico/los-pueblos-ind%C3%ADgenas-de-madre-de-dios-historia-etnograf%C3%ADa-y-coyuntura>
- CPILAP (2023) *Estudio: Contaminación por mercurio en comunidades indígenas asentadas en los ríos Madre de Dios y Beni*. Lima – Perú. 14 Págs.
- Delgadillo, A. et. al. (2011) *Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación*. 16 págs.  
<https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- DGCA (2016). *Manual de buenas prácticas en minería aurífera aluvial para facilitar una adecuada recuperación de áreas*. Lima-Perú. 28 págs.  
<https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2017/02/2017-01-30-Manual-de-buenas-pr%C3%A1cticas-en-miner%C3%ADa-aur%C3%ADfera-aluvial-para-facilitar-una-adecuada-recuperacion-de-%C3%A1reas-FINAL-3.pdf>

- Ferrer, A. (2003) *Meatl poisoning*. 14 págs. <https://scielo.isciii.es/pdf/asisna/v26s1/ocho.pdf>
- Fiñana, I. T., Cejudo, A. G., & Fernández, E. (2001). 6. *pH y amortiguadores: Tampones fisiológicos*.
- Gaono, X. (2004) *El mercurio como contaminante global – Desarrollo de metodologías para su determinación de suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente*. 246 págs. <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/3174/xgm1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García, F. & Rodriguez, J. (2010) *El mercurio. Situación actual, problemas y soluciones*. 09 págs. [https://www.researchgate.net/profile/Jose-Rodriguez-Maroto/publication/236625481\\_El\\_mercurio\\_Situacion\\_actual\\_problemas\\_y\\_soluciones/links/02e7e52dff89ef3b16000000/El-mercurio-Situacion-actual-problemas-y-soluciones.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jose-Rodriguez-Maroto/publication/236625481_El_mercurio_Situacion_actual_problemas_y_soluciones/links/02e7e52dff89ef3b16000000/El-mercurio-Situacion-actual-problemas-y-soluciones.pdf)
- Hirald, V. M. (2018). *Planta móvil de limpieza de suelos contaminados utilizando la oxidación*. 105.
- Huamán, E. et.al. (2017) *Efecto tóxico y eco toxicológico de arenas negras de la minería artesanal en Madre de Dios*. 09 págs. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v83n4/a05v83n4.pdf>
- Huamán, F. et.al. (2020) *Caracterización preliminar de residuos de minería aluvial en la región Madre de Dios – Perú*. 13 págs. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v32n2/2224-5421-ind-32-02-232.pdf>
- Huertas, B. & García, A. (2003). *Los pueblos indígenas de Madre de Dios- Historia, etnografía y coyuntura*. Lima- Perú. 400 págs. <https://centroderecursos.cultura.pe/es/registrobibliografico/los-pueblos-ind%C3%ADgenas-de-madre-de-dios-historia-etnograf%C3%ADa-y-coyuntura>
- IIAP (2021). *Minería aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio*. Lima -Perú. 54 págs. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/mineria-aurifera-madre-dios-contaminacion-mercurio-una-bomba-tiempo>
- INACAL (1998). *Norma técnica peruana 339.127:1998 (revisada el 2014). Metodo de ensayo para determinar el contenido de humedad del suelo*. 10 págs. <https://www.studocu.com/pe/document/servicio-nacional-de-capacitacion-para-la-industria-de-la-construccion/laboratorio-suelos-asfalto-y-concreto/ntp-3391271998-revisada-el-2019-contenido-de-humedad/34415052>
- INEI. (2018). *Censo Nacional (2017). Perú*. 908 págs. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1571/17TOMO\\_01.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1571/17TOMO_01.pdf)

- INS. (2012) *Contaminación con mercurio por la actividad minera*. Bogotá - Colombia. Volumen 32.
- ISO 11265 (1996) *Determination of the specific electrical conductivity*.
- ISO 11464 (1994) *Soil quality – pretreatment of samples for physico-chemical analysis*.
- Kozin, L. & Hansen, S. (2013) *Mercury Handbook – Chemistry, applications and environmental impact*. 321 págs.
- Lopez, R. & Chamizo, H. (2023) *Exposición a la contaminación antropogénica por mercurio y sus efectos en la salud*. 24 págs.  
[https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2215-38962023000200009#:~:text=Se%20se%C3%B1alan%20efectos%20terat%C3%B3genos%20asociados,defectos%20en%20el%20tubo%20neural](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-38962023000200009#:~:text=Se%20se%C3%B1alan%20efectos%20terat%C3%B3genos%20asociados,defectos%20en%20el%20tubo%20neural).
- Mendoza, J., Navarro, A., Viladevall, M., & Doménech, Y. (2005). *Caracterización y tratamiento térmico de suelos contaminados por mercurio*.
- MINAM (2017) *Estándares nacionales de calidad ambiental (ECA)*. Lima- Perú. Págs.. 46. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Proyecto-de-DS-ECA-AIRE.pdf>
- MINAM (2017) *Informe sobre la identificación de existencias de mercurio y compuestos de mercurio superiores a 50 toneladas, y fuentes de suministro de mercurio que generan existencias superiores a 10 toneladas por año en el Perú*. Lima – Perú. Págs. 43.
- MINAM (2015) *Por la ratificación del convenio de Minamata*. Lima – Perú. 36 págs.  
<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/ratificacion-convenio-minamata#:~:text=Con%20esta%20decisi%C3%B3n%2C%20el%20Per%C3%BA,orientadas%20a%20reducir%20el%20mercurio>.
- MINAM (2014) *Guía para el muestreo de suelos*. Lima – Perú. 72 págs.  
<https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>
- MINEM (2021) *Anuario minero 2021*. Lima – Perú. 143 págs.  
<https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUARIOS/2021/AM2021.pdf>
- MINEM (2022) *Anuario minero 2022*. Lima – Perú. 160 págs.  
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4700376/2022.pdf?v=1689975935>
- Morales Castillo, M. (2020). *Generación de especies de cloro activo vía un ánodo de óxidos metálicos de platino y paladio soportados en titanio* [Bnemérita Universidad Autónoma de Puebla].

<https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/7ffd8cda-6789-48fd-a527-1751c79ccb84>

- Navarro, A. & Cañadas, I. (2007) *Desorción térmica solar de suelos mineros e industriales contaminados por mercurio*. 16 págs.  
[https://www.researchgate.net/profile/Andres-Navarro-4/publication/259458289\\_Desorcion\\_termica\\_solar\\_de\\_suelos\\_mineros\\_e\\_industriales\\_contaminados\\_por\\_mercurio/links/0c96052bc0b101e296000000/Desorcion-termica-solar-de-suelos-mineros-e-industriales-contaminados-por-mercurio.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Andres-Navarro-4/publication/259458289_Desorcion_termica_solar_de_suelos_mineros_e_industriales_contaminados_por_mercurio/links/0c96052bc0b101e296000000/Desorcion-termica-solar-de-suelos-mineros-e-industriales-contaminados-por-mercurio.pdf)
- Navarro, A. & Villadevall, M. (2005) *Caracterización y tratamiento térmico de suelos contaminados por mercurio*. 13 págs.  
[https://www.researchgate.net/profile/Andres-Navarro-4/publication/228353960\\_Caracterizacion\\_y\\_tratamiento\\_termico\\_de\\_suelos\\_contaminados\\_por\\_mercurio/links/00b7d52c2ae4cbd197000000/Caracterizacion-y-tratamiento-termico-de-suelos-contaminados-por-mercurio.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Andres-Navarro-4/publication/228353960_Caracterizacion_y_tratamiento_termico_de_suelos_contaminados_por_mercurio/links/00b7d52c2ae4cbd197000000/Caracterizacion-y-tratamiento-termico-de-suelos-contaminados-por-mercurio.pdf)
- Obregon, D. et.al. (2019) *Remoción de mercurio empleando carbón activado preparado a partir de aguaje (Mauritia flexuosa)*. 18 págs.  
<http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v86n1/2309-8740-rsqp-86-01-70.pdf>
- OGEI (2019). *Carpeta geo referencial Departamento Madre de Dios – Perú*. Lima-Perú. 20 págs.  
[file:///C:/Users/yoryon/Desktop/investigaci%C3%B3n%20UNI/MADRE%20DE%20DIOS/17\\_carpeta\\_georeferencial\\_madre\\_de\\_dios\\_iii.pdf](file:///C:/Users/yoryon/Desktop/investigaci%C3%B3n%20UNI/MADRE%20DE%20DIOS/17_carpeta_georeferencial_madre_de_dios_iii.pdf)
- OSINERMIN (2012) *La industria de la Minería en el Perú – 20 años de contribución al crecimiento y desarrollo económico del país*. Lima – Perú. 166 págs.  
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/607053/Osinergmin-Industria-Mineria-Peru-20anios.pdf>
- Osores et. al. (2012) *Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: Un problema de salud pública*. 5 págs.  
<file:///C:/Users/yoryon/Desktop/investigaci%C3%B3n%20UNI/MADRE%20DE%20DIOS/INVESTIGACION%20MADRE%20DE%20DIOS.pdf>
- Osorio, N. (2012) *pH del suelo y disponibilidad de nutrientes*. Medellín – Colombia. 4 págs. <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf>
- Plenge, F. O., & Jaimes, J. E. R. (2012). *Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: Un problema de salud pública*.
- Puicon, Y. & Hurtado, J. (2019) *Bioremediación de suelos contaminados con mercurio utilizando Pseudomonas sp. Aisladas de zonas de minería informal*.  
<https://www.aidisnet.org/wp-content/uploads/2019/07/233-Peru-oral.pdf>
- Quiroz, U. (2021) *Uso de cloro electrogenerado a partir de NaCl en medio ácido como una propuesta para la lixiviación de oro aluvial*. 13 págs.

- Ramírez et al. (2019) *Minería artesanal para la extracción de oro mediante el uso de mercurio: Estudio del arte del impacto ambiental en los medios agua, aire y suelo*. 09 págs. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v32n3/0379-3982-tem-32-03-3.pdf>
- Rubio, C. J. (2010). El impacto de la minería aurífera en el Departamento de Madre de Dios (Peru). *Observatorio Medioambiental*, 13.
- Santiago, C. (2001) *Toxicología del mercurio. Actuaciones preventivas en sanidad laboral y ambiental*. 66 págs. <http://www.gama-peru.org/jornada-hg/espanol.pdf>
- Santos, L. & Correa, L. (1995) *Electroleaching process for remediation of mercury contaminated soils*. 12 págs. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-0421-0\\_141](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-0421-0_141)
- SINEACE. (2020). *Caracterización de la región Madre de Dios*. Lima-Perú. 23 págs. <https://repositorio.sineace.gob.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12982/6232/Caracterizaci%C3%B3n%20Regional%20Madre%20de%20Dios.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Soriano, M. (2018) *Conductividad eléctrica del suelo*. Universitat Politècnica de valència. 10 págs. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/105110/Soriano%20-%20Conductividad%20el%C3%A9ctrica%20del%20suelo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tejada, C. et.al. (2015) *Kinetics of adsorption in mercury removal using cassava (manihot esculenta) and lemon (citrus limonum) wastes modified with citric acid*. 16 págs. <http://www.scielo.org.co/pdf/inun/v19n2/v19n2a03.pdf>
- Terán, L. V. (2014). *Características de los líquidos*. Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria Págs. 9
- Thoming, L. et.al. (1999) *Electroleaching: a mobile cleanup process for mercury contaminated materials* 17 págs. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-03754-6\\_25](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-03754-6_25)
- UNEP (2008) *El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala - Modulo3*. 20 págs. Ginebra-Suiza. [https://ige.org/archivos/IGE/mercurio\\_en\\_la\\_Mineria\\_de\\_Au.pdf](https://ige.org/archivos/IGE/mercurio_en_la_Mineria_de_Au.pdf)
- Vega, C. et.al. (2018) *Mercurio en peces de pozas mineras en Madre de Dios, Perú*. Lima - Perú. Págs. 6
- Vidal, J. (2010) *Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (cecropia peltata)*. <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/n27/n27a07.pdf>

- Vogel, A. (1974) *Química analítica cualitativa*. Londres. 634 págs.
- Volke, T. & Velasco, J. (2002) *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. México. 62 págs.  
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=mj9rVEScHCcC&oi=fnd&dq=Tecnologías+de+remediación+para+suelos+contaminados.+México&ots=k9dPXNSPk9&sig=1o5pvRrP7XADsJFWucl1BR-flxk>
- Woods, R., Doyle, F. M., Electrochemical Society, & Electrochemical Society (Eds.). (2000). *Electrochemistry in mineral and metal processing V: Proceedings of the International Symposium*. Electrochemical Society.

## ANEXO 1

### Concesión minera Playa Marta



Página : 1 de 2

#### RESUMEN DEL DERECHO MINERO

| Datos Generales      |                                          |                  |                        |
|----------------------|------------------------------------------|------------------|------------------------|
| Código               | 070001001                                | Nombre           | PLAYA MARTA            |
| Fecha de Formulación | 30/01/2001                               | Situación        | VIGENTE                |
| Procedimiento        | TITULADO(CONCESION)                      | Tipo             | PETITORIO (D.LEG. 708) |
| Has. Formuladas      | 300.00                                   | Sustancia        | METALICA               |
| Has. Rectificadas    |                                          | Has. Formadas    |                        |
| Has. Reducidas       |                                          | Has. Disponibles |                        |
| Ubicación            | UADA-ARCHIVO CENTRAL desde el 05/07/2023 |                  |                        |

#### Titular Referencial

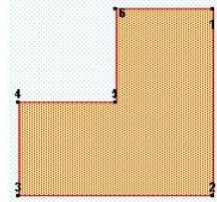
| Tipo     | Nombre de Razón Social | Dirección                                                       | % Participación |
|----------|------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------|
| JURIDICO | INVERSIONES DJL S.A.C. | JR. ICA K-19<br>URB.FONAVI<br>MADRE DE DIOS/TAMBOPATA/TAMBOPATA | 100             |

#### Demarcaciones

| Departamento  | Provincia | Distrito |
|---------------|-----------|----------|
| MADRE DE DIOS | TAMBOPATA | INAMBARI |

#### Cartas

| Código | Descripción | Zona UTM |
|--------|-------------|----------|
| 26-V   | COLORADO    | 19       |

| Coordenadas UTM PSAD56 |              |            | Coordenadas WGS84 |            |  |
|------------------------|--------------|------------|-------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Vertice                | Norte        | Este       | Norte             | Este       |                                                                                       |
| 1                      | 8,588,000.00 | 390,000.00 | 8,587,628.98      | 389,811.27 |                                                                                       |
| 2                      | 8,586,000.00 | 390,000.00 | 8,585,628.94      | 389,811.28 |                                                                                       |
| 3                      | 8,586,000.00 | 388,000.00 | 8,585,628.93      | 387,811.24 |                                                                                       |
| 4                      | 8,587,000.00 | 388,000.00 | 8,586,628.95      | 387,811.24 |                                                                                       |
| 5                      | 8,587,000.00 | 389,000.00 | 8,586,628.96      | 388,811.26 |                                                                                       |
| 6                      | 8,588,000.00 | 389,000.00 | 8,587,628.98      | 388,811.25 |                                                                                       |

#### Pagos

| Nro. Recibo | Monto         | Fecha Pago | Nro. Cuenta | Banco                  | Concepto |
|-------------|---------------|------------|-------------|------------------------|----------|
| 201 0073893 | S/ 600.00     | 30/01/2001 | 0000173177  | LA NACION              | Tramite  |
| 201 0091019 | US \$/ 300.00 | 30/01/2001 | 06909000082 | BAN. NAC. (WIESE SUD.) | Vigencia |

#### Resoluciones

| Nro. Resolución    | Fec. Resolución | Decisión              | Plazo   |
|--------------------|-----------------|-----------------------|---------|
| 00215-2001-INACC/J | 14/05/2001      | CONCESION MINERA      | 15 días |
| OCM                | 19/02/2001      | EXPIDASE LOS CARTELES | 30 días |

Fecha de emisión: miércoles 27 de septiembre del 2023

## ANEXO 2

### Concentración de mercurio y oro pasivo ambiental



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
LABORATORIO LABICER  
ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN



#### INFORME DE ENSAYO N° 1372 – 23 – LABICER

1. DATOS DEL CLIENTE
  - 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE ELECTROQUÍMICA APLICADA – FC – UNI
  - 1.2. D.N.I / R.U.C. : --
  - 1.3. DIRECCIÓN : --
2. CRONOGRAMA DE FECHAS
  - 2.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 10 / 11 / 2023
  - 2.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 13 / 11 / 2023
  - 2.3. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 16 / 11 / 2023
3. ANÁLISIS SOLICITADO : ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE ORO Y MERCURIO
4. DATOS DE LA MUESTRA
  - 4.1. TIPO DE MUESTRA : SUELOS Y LÍQUIDOS
  - 4.2. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA :

| MUESTRA | DESCRIPCIÓN                      |
|---------|----------------------------------|
| M1      | Arena húmeda de pasivo (Hg y Au) |
| M2      | Solución (Hg y Au)               |
| M3      | Solución (Au)                    |

- 4.3. OBSERVACIONES (SI APLICA) : --
5. LUGAR DE RECEPCIÓN Y ANÁLISIS : LABORATORIO LABICER-UNI
6. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 22.0 °C; Humedad relativa: 62%
7. RESULTADOS

| PARÁMETRO    | MUESTRA | RESULTADOS | UNIDADES | MÉTODO DE REFERENCIA <sup>(1)</sup>                                                                                                                                           |
|--------------|---------|------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oro, Au      | M1      | 95.738     | mg/kg    | Determination of gold in rocks, ores, and other geological materials by atomic absorption techniques.<br><sup>(3)</sup><br>(Espectrofotometría de absorción atómica de flama) |
|              | M2      | 29.924     | mg/kg    |                                                                                                                                                                               |
|              | M3      | 44.694     | mg/kg    |                                                                                                                                                                               |
| Mercurio, Hg | M1      | 866.925    | mg/kg    | EPA 7471B (Tratamiento de muestra)<br>SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 3111C<br>(Cuantificación por Espectrofotometría de absorción atómica de flama)                                 |
|              | M2      | 844.807    | mg/kg    |                                                                                                                                                                               |

<sup>(1)</sup> Método de ensayo de referencia o técnica aceptada por el cliente.

<sup>(2)</sup> Ramesh, S.L., et al. (2001). Determination of gold in rocks, ores, and other geological materials by atomic absorption techniques. Atomic Spectroscopy, 22(1), 263 – 269.

#### 8. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas, descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

  
Bach. Jesús Utano Reyes  
Analista  
LABICER – UNI



  
M.Sc. Ily Marilú Maza Mejía  
Jefe de Laboratorio  
CQP 1149

#### NOTAS:

1. LABICER-UNI no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.
2. LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluidos en los ítems 1 y del 4.1 al 4.2 del presente documento.
3. Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
4. Este documento carece de validez sin sello y firmas correspondientes.

## ANEXO 3

### Informe Difracción de Rayos X



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
LABORATORIO LABICER  
ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN



#### INFORME DE ENSAYO N° 0329 – 24 – LABICER

1. **DATOS DEL CLIENTE**
  - 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE ELECTROQUÍMICA APLICADA – FC – UNI
  - 1.2. D.N.I / R.U.C. : --
  - 1.3. DIRECCIÓN : --
2. **CRONOGRAMA DE FECHAS**
  - 2.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 26 / 03 / 2024
  - 2.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 27 / 03 / 2024
  - 2.3. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 10 / 04 / 2024
3. **ANÁLISIS SOLICITADO** : ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X
4. **DATOS DE LA MUESTRA**
  - 4.1. TIPO DE MUESTRA : SUELO
  - 4.2. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA : 01 MUESTRA DE ARENA PASIVO AMBIENTAL (SÓLIDO)
  - 4.3. OBSERVACIONES (SI APLICA) : ENVASE PLÁSTICO
5. **LUGAR DE RECEPCIÓN Y ANÁLISIS** : LABORATORIO LABICER - UNI
6. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 23; Humedad relativa: 67%
7. **RESULTADOS**
  - 7.1. **ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

| PARÁMETRO                                                                                                                                                                                               | RESULTADO | UNIDADES | MÉTODO DE REFERENCIA <sup>(1)</sup>  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------|--------------------------------------|
| Óxido de silicio, SiO <sub>2</sub>                                                                                                                                                                      | 42.62     | %        | Difracción de Rayos X <sup>(2)</sup> |
| Óxido de hierro (Magnetita), Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>                                                                                                                                             | 5.53      | %        |                                      |
| Óxido de titanio y hierro (Ilmenita), TiFeO <sub>3</sub>                                                                                                                                                | 15.71     | %        |                                      |
| Silicato de circonio (Circón), Zr(SiO <sub>4</sub> )                                                                                                                                                    | 2.22      | %        |                                      |
| Sulfuro de potasio, magnesio y estaño, K <sub>0.69</sub> Mg <sub>0.34</sub> Sn <sub>0.65</sub> S <sub>2</sub>                                                                                           | 1.68      | %        |                                      |
| Silicato de sodio, calcio y aluminio (Anortita), Na <sub>0.34</sub> Ca <sub>0.66</sub> (Al <sub>1.66</sub> Si <sub>2.34</sub> O <sub>8</sub> )                                                          | 14.88     | %        |                                      |
| Hidróxido silicato de hierro (Cronstedtita), Fe <sub>3.7</sub> Si <sub>1.3</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>                                                                                       | 4.81      | %        |                                      |
| Hidróxido óxido de potasio, sodio, hierro, aluminio y silicio (Moscovita), K <sub>0.8</sub> Na <sub>0.2</sub> Fe <sub>0.05</sub> Al <sub>2.95</sub> Si <sub>3.1</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> | 6.00      | %        |                                      |
| Silicato óxido de aluminio (Andalucita), Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )O                                                                                                                           | 6.55      | %        |                                      |

<sup>(1)</sup> Método de ensayo de referencia o técnica aceptada por el cliente.

<sup>(2)</sup> La identificación de las fases cristalinas es el resultado con mayor probabilidad (Score) brindado por el software HighScore Plus V4.9.1 de Malvern Panalytical utilizando la Base de datos PDF4++-2023. El análisis semicuantitativo se basa en uso del Método de Refinamiento Rietveld mostrando un balance de las fases cristalinas al 100%. Equipo: DIFRACTÓMETRO DE RAYOS X. PANALYTICAL, EMPYREAN. Ver difractograma en Anexo 3, Figura N°1.



## ANEXO 4

### Concentración de mercurio y oro residuo y 180 minutos lixiviación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
LABORATORIO LABICER  
ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN



#### INFORME DE ENSAYO N° 0184 – 24 – LABICER

1. **DATOS DEL CLIENTE**
    - 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE ELECTROQUÍMICA APLICADA – FC – UNI
    - 1.2. D.N.I. / R.U.C. : --
    - 1.3. DIRECCIÓN : --
  2. **CRONOGRAMA DE FECHAS**
    - 2.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 08 / 02 / 2024
    - 2.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 19 / 02 / 2024
    - 2.3. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 19 / 02 / 2024
  3. **ANÁLISIS SOLICITADO** : ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE ORO Y MERCURIO
  4. **DATOS DE LA MUESTRA**
    - 4.1. TIPO DE MUESTRA : SÓLIDO Y LÍQUIDO
    - 4.2. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
- | MUESTRA | DESCRIPCIÓN                                  |
|---------|----------------------------------------------|
| M1      | RESIDUO LIXIVIADO PASIVO AMBIENTAL COD: RPA2 |
| M2      | LIXIVIADO 180 MIN COD: LPA 2-3               |
- 4.3. OBSERVACIONES (SI APLICA) : --
  5. **LUGAR DE RECEPCIÓN Y ANÁLISIS** : LABORATORIO LABICER-UNI
  6. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 23.0 °C; Humedad relativa: 43%
  7. **RESULTADOS**

| PARÁMETRO    | MUESTRA | RESULTADOS             | UNIDADES | MÉTODO DE REFERENCIA <sup>(1)</sup>                                                                                                                                        |
|--------------|---------|------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oro, Au      | M1      | < 0.688 <sup>(3)</sup> | mg/kg    | Determination of gold in rocks, ores, and other geological materials by atomic absorption techniques. <sup>(2)</sup><br>(Espectrofotometría de absorción atómica de flama) |
|              | M2      | 3.471                  | mg/kg    |                                                                                                                                                                            |
| Mercurio, Hg | M1      | < 1.458 <sup>(3)</sup> | mg/kg    | EPA 7471B (Tratamiento de muestra)<br>SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 3111C<br>(Cuantificación por Espectrofotometría de absorción atómica de flama)                              |
|              | M2      | 79.758                 | mg/kg    |                                                                                                                                                                            |

<sup>(1)</sup> Método de ensayo de referencia o técnica aceptada por el cliente.

<sup>(2)</sup> Ramesh, S.L., et. al. (2001). Determination of gold in rocks, ores, and other geological materials by atomic absorption techniques. Atomic Spectroscopy, 22(1), 263 – 269.

<sup>(3)</sup> Límite de detección del método.

8. **VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO**  
Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas, descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Bach. Jesús Utano Reyes  
Analista  
LABICER – UNI



M.Sc. Ily Marilú Maza Mejía  
Jefe de Laboratorio  
CQP 1149

#### NOTAS:

1. LABICER-UNI no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.
2. LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluidos en los ítems 1 y del 4.1 al 4.2 del presente documento.
3. Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
4. Este documento carece de validez sin sello y firmas correspondientes.

LU-RUA-F-032, v01 / INFORME DE ENSAYO N° 0184-24- LABICER

Página 1 de 1

Prohibida la alteración o uso indebido del presente informe. Prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de LABICER-UNI.  
Av. Túpac Amaru 210, Rimac-Lima-Perú. Teléfonos: (511) 481 1070 Anexo: 5018 / (511) 382 0500. E-mail: [labicer@uni.edu.pe](mailto:labicer@uni.edu.pe)

## ANEXO 5

### Concentración de mercurio y oro 60 y 120 minutos lixiviación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
LABORATORIO LABICER  
ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN



#### INFORME DE ENSAYO N° 0192 – 24 – LABICER

1. **DATOS DEL CLIENTE**
  - 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE ELECTROQUÍMICA APLICADA – FC – UNI
  - 1.2. D.N.I / R.U.C. : --
  - 1.3. DIRECCIÓN : --
2. **CRONOGRAMA DE FECHAS**
  - 2.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 20 / 02 / 2024
  - 2.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 22 / 02 / 2024
  - 2.3. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 22 / 02 / 2024
3. **ANÁLISIS SOLICITADO** : ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE ORO Y MERCURIO
4. **DATOS DE LA MUESTRA**
  - 4.1. TIPO DE MUESTRA : LÍQUIDO
  - 4.2. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

| MUESTRA | DESCRIPCIÓN                    |
|---------|--------------------------------|
| M1      | LIXIVIADO 60 MIN COD: LPA 2-1  |
| M2      | LIXIVIADO 120 MIN COD: LPA 2-2 |

- 4.3. OBSERVACIONES (SI APLICA) : --
5. **LUGAR DE RECEPCIÓN Y ANÁLISIS** : LABORATORIO LABICER-UNI
6. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 23.7 °C; Humedad relativa: 47%
7. **RESULTADOS**

| PARÁMETRO    | MUESTRA | RESULTADOS | UNIDADES | MÉTODO DE REFERENCIA <sup>(1)</sup>                                                                                                                                        |
|--------------|---------|------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oro, Au      | M1      | 1.439      | mg/kg    | Determination of gold in rocks, ores, and other geological materials by atomic absorption techniques. <sup>(2)</sup><br>(Espectrofotometría de absorción atómica de flama) |
|              | M2      | 1.816      | mg/kg    |                                                                                                                                                                            |
| Mercurio, Hg | M1      | 73.389     | mg/kg    | EPA 7471B (Tratamiento de muestra)<br>SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 3111C<br>(Cuantificación por Espectrofotometría de absorción atómica de flama)                              |
|              | M2      | 72.693     | mg/kg    |                                                                                                                                                                            |

<sup>(1)</sup> Método de ensayo de referencia o técnica aceptada por el cliente.

<sup>(2)</sup> Ramesh, S.L., et. al. (2001). Determination of gold in rocks, ores, and other geological materials by atomic absorption techniques. Atomic Spectroscopy, 22(1), 263 – 269.

#### 8. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas, descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Bach. Jesús Utano Reyes  
Analista  
LABICER – UNI



M.Sc. Ily Marilú Maza Mejía  
Jefe de Laboratorio  
CQP 1149

#### NOTAS:

1. LABICER-UNI no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.
2. LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluidos en los ítems 1 y del 4.1 al 4.2 del presente documento.
3. Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
4. Este documento carece de validez sin sello y firmas correspondientes.

LU-RUA-F-032, v01 / INFORME DE ENSAYO N° 0192-24- LABICER

Página 1 de 1

Prohibida la alteración o uso indebido del presente informe. Prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de LABICER-UNI.  
Av. Túpac Amaru 210, Rímac-Lima-Perú. Teléfonos: (511) 481 1070 Anexo: 5018 / (511) 382 0500. E-mail: [labicer@uni.edu.pe](mailto:labicer@uni.edu.pe)

## ANEXO 6

### Concentración de mercurio 15, 30, 45 y 60 minutos lixiviación



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
**LABORATORIO LABICER**  
**ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN**



#### INFORME DE ENSAYO N° 0239 – 24 – LABICER

1. **DATOS DEL CLIENTE**
  - 1.1. NOMBRE / RAZÓN SOCIAL : LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DE ELECTROQUÍMICA APLICADA – FC – UNI
  - 1.2. D.N.I / R.U.C. : --
  - 1.3. DIRECCIÓN : --
2. **CRONOGRAMA DE FECHAS**
  - 2.1. FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : 28 / 02 / 2024
  - 2.2. FECHA DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO : 05 / 03 / 2024
  - 2.3. FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME : 07 / 03 / 2024
3. **ANÁLISIS SOLICITADO** : ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE MERCURIO
4. **DATOS DE LA MUESTRA**
  - 4.1. TIPO DE MUESTRA : LIXIVIADO
  - 4.2. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

| MUESTRA | DESCRIPCIÓN                                    |
|---------|------------------------------------------------|
| M1      | RESIDUO LIXIVIADO PASIVO AMBIENTAL COD: LPA 4  |
| M2      | LIXIVIADO PASIVO AMBIENTAL 15 min COD: LPA 4-1 |
| M3      | LIXIVIADO PASIVO AMBIENTAL 30 min COD: LPA 4-2 |
| M4      | LIXIVIADO PASIVO AMBIENTAL 45 min COD: LPA 4-3 |
| M5      | LIXIVIADO PASIVO AMBIENTAL 60 min COD: LPA 4-4 |

- 4.3. OBSERVACIONES (SI APLICA) : ENVASES DE PLÁSTICO
5. **LUGAR DE RECEPCIÓN Y ANÁLISIS** : LABORATORIO LABICER-UNI
6. **CONDICIONES AMBIENTALES** : Temperatura: 22.7 °C; Humedad relativa: 43%
7. **RESULTADOS**

| PARÁMETRO    | MUESTRA | RESULTADOS             | UNIDADES | MÉTODO DE REFERENCIA <sup>(1)</sup>                                                                                                           |
|--------------|---------|------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mercurio, Hg | M1      | < 2.093 <sup>(2)</sup> | mg/kg    | EPA 7471B (Tratamiento de muestra)<br>SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 3111C<br>(Cuantificación por Espectrofotometría de absorción atómica de flama) |
|              | M2      | 86.582                 |          |                                                                                                                                               |
|              | M3      | 132.449                |          |                                                                                                                                               |
|              | M4      | 146.457                |          |                                                                                                                                               |
|              | M5      | 164.466                |          |                                                                                                                                               |

<sup>(1)</sup> Método de ensayo de referencia o técnica aceptada por el cliente.

<sup>(2)</sup> Límite de detección del método.

#### 8. VALIDEZ DEL INFORME DE ENSAYO

Los resultados del informe de ensayo sólo son válidos para la(s) muestra(s) ensayadas, descrita(s) en el ítem 4 del presente documento.

Bach. Jesús Utano Reyes  
Analista  
LABICER –UNI



M.Sc. Christian Jacinto Hernández  
Jefe de Laboratorio (e)  
CQP 1154

#### NOTAS:

1. LABICER-UNI no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.
2. LABICER-UNI no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, incluidos en los ítems 1 y del 4.1 al 4.2 del presente documento.
3. Los resultados de los ensayos obtenidos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
4. Este documento carece de validez sin sello y firmas correspondientes.

LU-RUA-F-032, v01 / INFORME DE ENSAYO N° 0239-24- LABICER

Página 1 de 1

Prohibida la alteración o uso indebido del presente informe. Prohibida la reproducción parcial, salvo autorización escrita de LABICER-UNI.

Av. Túpac Amaru 210, Rímac-Lima-Perú. Teléfonos: (511) 481 1070 Anexo: 5018 / (511) 382 0500. E-mail: [labicer@uni.edu.pe](mailto:labicer@uni.edu.pe)

## ANEXO 7

**Desarrollo de un proceso sostenible de lixiviación verde en el tratamiento de relaves de la minería aurífera artesanal: Caso Minera Aurífera**

**Playa Marta – Madre de Dios**

**Graduando: Jairo CASTILLON MENDIVIL**

| PROBLEMA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | OBJETIVOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | HIPÓTESIS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>General</b></p> <p>¿Es posible desarrollar un proceso sostenible de lixiviación verde para el tratamiento de relaves de la minería aurífera artesanal Playa Marta?</p> <p><b>Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuál es la composición mineralógica y concentraciones de mercurio y oro que caracteriza inicialmente al relave de la minera aurífera artesanal Playa Marta?</li> <li>• ¿Cuáles serán los componentes adecuados para la formulación del lixivante verde para el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta?</li> <li>• ¿Cuáles son los parámetros de lixiviación favorables de tiempo y Potencial de Oxidación y Reducción (ORP) para el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta?</li> </ul> | <p><b>General</b></p> <p>Desarrollar un proceso sostenible de lixiviación verde para el tratamiento de relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta.</p> <p><b>Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar inicialmente el relave de la minera aurífera artesanal Playa Marta mediante la composición mineralógica y concentración de mercurio y oro.</li> <li>• Determinar los componentes adecuados para la formulación del lixivante verde para el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta.</li> <li>• Determinar los parámetros de lixiviación favorables de tiempo y Potencial de Oxidación y Reducción (ORP) para el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta.</li> </ul> | <p><b>General</b></p> <p>El proceso sostenible de lixiviación del relave de la minera artesanal Playa Marta permite en alto grado la recuperación de mercurio</p> <p><b>Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La composición mineralógica y concentración de mercurio y oro permite la caracterización inicial del relave minero de la minera aurífera Playa Marta.</li> <li>• Los componentes para la formulación del lixivante verde para el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta son los adecuados.</li> <li>• Los parámetros de lixiviación favorables de tiempo y Potencial de Oxidación y Reducción (ORP) permiten el tratamiento de los relaves de la minera aurífera artesanal Playa Marta.</li> </ul> |



ESCUELA DE

**POSGRADO**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD 015-2024-UNSCH-EPG/OGH**

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de Posgrado en segunda instancia para la **Escuela de Posgrado – UNSCH**; en cumplimiento a la Resolución De Consejo Directivo N°109-2024-UNSCH-EPG/CD, Reglamento de Originalidad de trabajos de Investigación de la UNSCH, otorga lo siguiente:

**CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD**

|                                              |                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AUTOR</b>                                 | Bach. Jairo Castillon Mendivil                                                                                                                                           |
| <b>DENOMINACIÓN DEL PROGRAMA DE ESTUDIOS</b> | MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL                                                                                                                                         |
| <b>GRADO ACADÉMICO QUE OTORGA</b>            | MAESTRO                                                                                                                                                                  |
| <b>DENOMINACIÓN DEL GRADO ACADÉMICO</b>      | MAESTRO(A) EN INGENIERÍA AMBIENTAL                                                                                                                                       |
| <b>TÍTULO DE TESIS</b>                       | Desarrollo de un proceso sostenible de lixiviación verde en el tratamiento de relaves de la minería aurífera artesanal: Caso Minera Aurífera Playa Marta - Madre de Dios |
| <b>EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD</b>            | 8% de similitud                                                                                                                                                          |
| <b>N° DE TRABAJO</b>                         | 2458834811                                                                                                                                                               |
| <b>FECHA</b>                                 | 19 de setiembre de 2024                                                                                                                                                  |

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es procedente otorgar la constancia de originalidad con depósito.

Se expide la presente constancia, a solicitud del interesado para los fines que crea conveniente.

19 de setiembre de 2024.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN  
CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
Escuela de Posgrado  
Dr. Oscar Gutiérrez HuamaniCC.  
Archivo  
OGH/

# Desarrollo de un proceso sostenible de lixiviación verde en el tratamiento de relaves de la minería aurífera artesanal: Caso Minera Aurífera Playa Marta – Madre de Dios

*por Jairo Castillon Mendivil*

---

**Fecha de entrega:** 19-sep-2024 05:58a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2458834811

**Nombre del archivo:** Tesis\_Mastr\_a\_Ingenier\_a\_Ambietal.docx (15.27M)

**Total de palabras:** 19722

**Total de caracteres:** 105443

# Desarrollo de un proceso sostenible de lixiviación verde en el tratamiento de relaves de la minería aurífera artesanal: Caso Minera Aurífera Playa Marta – Madre de Dios

## INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

|   |                                                                                               |      |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 | <a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a><br>Fuente de Internet                     | 1 %  |
| 2 | <a href="https://repositorio.unsch.edu.pe">repositorio.unsch.edu.pe</a><br>Fuente de Internet | 1 %  |
| 3 | <a href="https://repositorio.unfv.edu.pe">repositorio.unfv.edu.pe</a><br>Fuente de Internet   | <1 % |
| 4 | <a href="https://doku.pub">doku.pub</a><br>Fuente de Internet                                 | <1 % |
| 5 | <a href="https://scielo.sld.cu">scielo.sld.cu</a><br>Fuente de Internet                       | <1 % |
| 6 | <a href="https://www.scribd.com">www.scribd.com</a><br>Fuente de Internet                     | <1 % |
| 7 | <a href="https://dspace.ucuenca.edu.ec">dspace.ucuenca.edu.ec</a><br>Fuente de Internet       | <1 % |
| 8 | <a href="https://revistas.sqperu.org.pe">revistas.sqperu.org.pe</a><br>Fuente de Internet     | <1 % |

|    |                                                                                                                                      |      |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 9  | tesis.pucp.edu.pe:8080<br>Fuente de Internet                                                                                         | <1 % |
| 10 | repositorio.unac.edu.pe<br>Fuente de Internet                                                                                        | <1 % |
| 11 | bdigital.unal.edu.co<br>Fuente de Internet                                                                                           | <1 % |
| 12 | oa.upm.es<br>Fuente de Internet                                                                                                      | <1 % |
| 13 | repositorio.upao.edu.pe<br>Fuente de Internet                                                                                        | <1 % |
| 14 | renati.sunedu.gob.pe<br>Fuente de Internet                                                                                           | <1 % |
| 15 | docplayer.es<br>Fuente de Internet                                                                                                   | <1 % |
| 16 | www.uniatlantico.edu.co<br>Fuente de Internet                                                                                        | <1 % |
| 17 | Submitted to Universidad del Norte, Colombia<br>Trabajo del estudiante                                                               | <1 % |
| 18 | Submitted to Universidad Nacional de Colombia<br>Trabajo del estudiante                                                              | <1 % |
| 19 | Acuna Bocanegra, Rodolfo Javier   Casquero Rojas, Sergio Adolfo   Chiu Castro, Stephany Carolina   de Jesus Diaz Hinostroza, Gloria. | <1 % |

# "Planeamiento Estrategico para la Region Madre De Dios.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020

Publicación

|    |                                                                                                          |      |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 20 | <a href="http://ciencia.lasalle.edu.co">ciencia.lasalle.edu.co</a><br>Fuente de Internet                 | <1 % |
| 21 | <a href="http://repositorio.unapiquitos.edu.pe">repositorio.unapiquitos.edu.pe</a><br>Fuente de Internet | <1 % |
| 22 | <a href="http://repositorio.uni.edu.pe">repositorio.uni.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                 | <1 % |
| 23 | <a href="http://www.minem.gob.pe">www.minem.gob.pe</a><br>Fuente de Internet                             | <1 % |
| 24 | <a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a><br>Fuente de Internet                         | <1 % |
| 25 | <a href="http://d.documentop.com">d.documentop.com</a><br>Fuente de Internet                             | <1 % |
| 26 | <a href="http://uaeh.edu.mx">uaeh.edu.mx</a><br>Fuente de Internet                                       | <1 % |

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo



ESCUELA DE

**POSGRADO**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR  
EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO(A) EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 000445-2024-UNSCH-EPG/D.**

Siendo las 4:00 p.m. del 22 de julio de 2024 se reunieron en el auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, el Jurado Examinador y Calificador de Tesis, presidido por el **Dr. Emilio Germán RAMIREZ ROCA** Director de la Escuela de Posgrado, el **Mtro. Abel Nilo JUSCAMAYTA TOMASEVICH** Director de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia, e integrado por los siguientes miembros: **Dr. Leon Fernando PEREZ CHAUCA** y el **Mtro. Abrahan Fernando TREJO ESPINOZA**; para la sustentación oral y pública de la tesis intitulada: **DESARROLLO DE UN PROCESO SOSTENIBLE DE LIXIVIACIÓN VERDE EN EL TRATAMIENTO DE RELAVES DE LA MINERÍA AURÍFERA ARTESANAL: CASO MINERA AURÍFERA PLAYA MARTA - MADRE DE DIOS**. En la ciudad de Ayacucho del 2024 presentado por el **Bach. Jairo CASTILLON MENDIVIL**. Teniendo como asesor al **Dr. Adolfo LA ROSA-TORO GOMEZ**.

Acto seguido se procedió a la exposición de la tesis, con el fin de optar el Grado Académico de **MAESTRO(A) EN INGENIERÍA AMBIENTAL**. Formuladas las preguntas, éstas fueron absueltas por el graduando.

A continuación, el Jurado Examinador y Calificador de Tesis procedió a la votación, la que dio como resultado el siguiente calificativo: DIECISIETE (17).

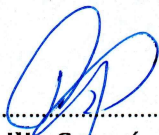
**CALIFICACION (x)**

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Aprobado(a) por Unanimidad.    | x |
| Aprobado(a) por Mayoría.       | — |
| Desaprobado(a) por Unanimidad. | — |
| Desaprobado(a) por Mayoría.    | — |

(x) Marcar con aspa.

Luego, el presidente del Jurado recomienda que la Escuela de Posgrado proponga que se le otorgue al **Bach. Jairo CASTILLON MENDIVIL**, el Grado Académico de **MAESTRO(A) EN INGENIERÍA AMBIENTAL**. Siendo las 5.55 pm hrs. se levanta la sesión.

Se extiende el acta en la ciudad de Ayacucho, a las 5.55 pm hrs. del 22 de julio de 2024.

  
.....  
**Dr. Emilio Germán RAMIREZ ROCA**  
Director(e) de la Escuela de Posgrado.

  
.....  
**Mtro. Abel Nilo JUSCAMAYTA TOMASEVICH**  
Director de la UPG – FIQM.

  
.....  
**Dr. Leon Fernando PEREZ CHAUCA**  
Miembro.

  
.....  
**Mtro. Abrahan Fernando TREJO ESPINOZA**  
Miembro.

  
.....  
**Dr. Marco Rolando ARONES JARA**  
Secretario Docente.

**Observaciones:**