

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**RECUPERACIÓN DE ORO DE MINERALES AURÍFEROS DE  
ALTAS LEYES EN EL DISTRITO DE OLLACHEA EN LA  
PROVINCIA DE CARABAYA - REGIÓN PUNO**

**TESIS**

Presentada por:

**Bach. Fabrizio David Paco Ramos**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METALURGISTA**

TACNA – PERÚ

2022

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**  
**Facultad de Ingeniería**  
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**RECUPERACIÓN DE ORO DE MINERALES  
AURÍFEROS DE ALTAS LEYES EN EL  
DISTRITO DE OLLACHEA EN LA  
PROVINCIA DE CARABAYA  
- REGIÓN DE PUNO**

**TESIS**

Tesis sustentada el 15 de marzo del 2022, siendo el jurado calificador  
integrado por:

PRESIDENTE

  
-----  
Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco

SECRETARIO

  
-----  
Dr. Tolomeo Raúl Soto Perez

VOCAL

  
-----  
Ing. Julián Nieto Quispe

ASESOR

  
-----  
Ing. Daniel Jesús Zevallos Ramos

## DEDICATORIA

**A Jehová**, por inspirarme y darme fuerzas en continuar con este proceso para obtener uno de mis anhelos más deseados.

**A mis padres**, por su amor, esfuerzo y sacrificio en todos estos años, gracias a ellos he logrado resistir hasta aquí y convertirme en lo que soy. Es un orgullo ser hijo de los mejores padres.

**A mis hermanos**, por su presencia, por estar a mi lado y por el apoyo moral, que me brindan en la vida.

**A las personas**, que me han apoyado por el trabajo que realicé con éxito y en especial a aquellas que me compartieron sus conocimientos y experiencias.

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios**, por bendecirme la vida, por guiarme a lo largo de mi existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

**A mis docentes** de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por haber compartido sus conocimientos y aportes personales, de manera especial, al ingeniero Daniel Jesús Zevallos Ramos quien me ha guiado con su paciencia y su rectitud, y a todos los docentes de la carrera, por su apoyo constante en mi formación profesional.

## ÍNDICE GENERAL

|   |            |
|---|------------|
| <b>PORTADA</b> .....                                | <b>i</b>   |
| <b>HOJA DE JURADOS</b> .....                        | <b>ii</b>  |
| <b>DEDICATORIA</b> .....                            | <b>iii</b> |
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....                        | <b>iv</b>  |
| <b>RESUMEN</b> .....                                | <b>x</b>   |
| <b>ABSTRACT</b> .....                               | <b>xi</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....                           | <b>1</b>   |
| <b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> ..... | <b>2</b>   |
| 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....                 | 2          |
| 1.1.1.    Antecedentes del problema .....           | 2          |
| 1.1.2.    Problemática de la investigación.....     | 2          |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....                  | 3          |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....              | 3          |
| 1.4. LIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....           | 3          |
| 1.5. OBJETIVOS .....                                | 4          |
| 1.5.1.    Objetivo general.....                     | 4          |
| 1.5.2.    Objetivos específicos .....               | 4          |
| 1.6. HIPÓTESIS.....                                 | 4          |
| 1.6.1.    Hipótesis general.....                    | 4          |
| 1.6.2.    Hipótesis específicas.....                | 4          |
| 1.7. VARIABLES .....                                | 4          |
| 1.7.1.    Identificación de las variables.....      | 4          |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>                                 | <b>6</b>  |
| 2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....                                      | 6         |
| 2.2. BASES TEÓRICAS.....  | 7         |
| 2.2.1. El oro.....  | 7         |
| 2.2.2. Química de cianuración del oro .....                             | 7         |
| 2.2.3. Carbón activado .....  | 9         |
| 2.2.4. Etapas del proceso de extracción del oro .....                   | 14        |
| 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS .....                                       | 21        |
| <b>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO .....</b>                           | <b>24</b> |
| 3.1. TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.....                              | 24        |
| 3.2. POBLACIÓN, MUESTRA Y MATERIAL DE ESTUDIO.....                      | 24        |
| 3.2.1. Población.....   | 24        |
| 3.2.2. Muestra .....  | 24        |
| 3.2.3. Material de estudio.....   | 24        |
| 3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....                              | 25        |
| 3.4. MÉTODO, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE<br>DATOS ..... | 26        |
| 3.4.1. Método .....   | 26        |
| 3.4.2. Técnica.....   | 26        |
| 3.4.3. Materiales, equipos, reactivos e instrumento .....               | 27        |
| 3.5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....                                   | 28        |
| 3.5.1. Análisis de datos .....  | 34        |
| <b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>                          | <b>35</b> |

|        |  |           |
|--------|--|-----------|
| 4.1.   | RESULTADOS.....  | 35        |
| 4.1.1. | Resultados del consumo de reactivo .....                   | 35        |
| 4.1.2. | Resultados de la recuperación en la lixiviación .....      | 38        |
| 4.1.3. | Resultados del balance metalúrgico en la lixiviación ..... | 40        |
| 4.2.   | ANÁLISIS DE RESULTADOS .....                               | 43        |
|        | <b>CONCLUSIONES. ....</b>                                  | <b>48</b> |
|        | <b>RECOMENDACIONES .....</b>                               | <b>49</b> |
|        | <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                     | <b>50</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1 <i>Operacionalización de variables.</i> .....                            | 26 |
| Tabla 2 <i>Parámetros de la lixiviación por agitación.</i> .....                 | 33 |
| Tabla 3 <i>Resultados del consumo de CN - lixiviación por agitación.</i> .....   | 35 |
| Tabla 4 <i>Resultados del consumo de NaOH – lixiviación por agitación.</i> ..... | 36 |
| Tabla 5 <i>Resultados del consumo de CN - lixiviación en botella.</i> .....      | 37 |
| Tabla 6 <i>Resultados del consumo de NaOH – lixiviación en botella.</i> .....    | 37 |
| Tabla 7 <i>Resultados del % de recuperación por agitación.</i> .....             | 38 |
| Tabla 8 <i>Resultados del % de recuperación en botella.</i> .....                | 39 |
| Tabla 9 <i>Balance general de la lixiviación por agitación.</i> .....            | 41 |
| Tabla 10 <i>Balance general de la lixiviación en botella.</i> .....              | 41 |
| Tabla 11 <i>Lixiviación por agitación vs. lixiviación en botella.</i> .....      | 42 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 <i>Estructura interna del carbón activado. Distribución de poros.</i> .....  | 10 |
| Figura 2 <i>Celda cilíndrica de electrodeposición de minerales.</i> .....   | 19 |
| Figura 3 <i>Diagrama de flujo de las etapas del proceso de la extracción del oro.</i> .....   | 20 |
| Figura 4 <i>Muestra del mineral aurífero utilizado para las pruebas metalúrgicas.</i> .....   | 25 |
| Figura 5 <i>Cuanteo del mineral aurífero.</i> .....   | 29 |
| Figura 6 <i>Balanza analítica usado en el pesado del mineral.</i> .....   | 30 |
| Figura 7 <i>Molino de bolas utilizado para la molienda.</i> .....   | 30 |
| Figura 8 <i>Set de mallas utilizados en el rotap.</i> .....   | 31 |
| Figura 9 <i>Gráfico de consumo de reactivos por agitación.</i> .....  | 36 |
| Figura 10 <i>Gráfico de consumo de reactivos en botella.</i> .....  | 38 |
| Figura 11 <i>Recuperación del Au en la lixiviación por agitación.</i> .....   | 39 |
| Figura 12 <i>Recuperación del Au en la lixiviación en botella.</i> .....  | 40 |
| Figura 13 <i>Comparación de la recuperación de Au</i> .....   | 43 |
| Figura 14 <i>Porcentaje de recuperación de Au en función al tiempo y consumo de reactivo en la lixiviación por agitación.</i> ..... | 45 |
| Figura 15 <i>Porcentaje de recuperación de Au en función al tiempo y consumo de reactivo en la lixiviación en botella.</i> .....    | 46 |
| Figura 16 <i>Consumo de AgNO<sub>3</sub> en función del tiempo.</i> .....   | 47 |

## RESUMEN

En el estudio de la lixiviación de minerales auríferos del distrito de Ollachea, provincia Carabaya, región Puno, se determinó el consumo de reactivos para la lixiviación por agitación y lixiviación en botella, la principal determinación fue el cianuro libre ya que comprende el ácido cianhídrico (HCN) y el ión cianuro (CN<sup>-</sup>) presentes en la solución, también se determinó el consumo de NaCN dando como resultado para la lixiviación por agitación a un tiempo de 72 horas 9,67 kg/t de mineral; por otro lado, también se tiene el consumo de NaCN dando como resultado para la lixiviación en botella a un tiempo de 72 horas 9,64 kg/t de mineral.

La disolución del oro para lograr la recuperación óptima en la cianuración del mineral por agitación, se obtiene una recuperación de oro de 81,78 % en la lixiviación en botella, y la recuperación en la lixiviación por agitación de un 81,90

%, por un tiempo de 72 horas, por lo tanto, el proceso de lixiviación en botella nos da una mejor recuperación de oro. También se realizó el balance metalúrgico para pruebas de lixiviación, en las tablas 9 y 10 se observa el balance metalúrgico obtenido en las pruebas realizadas para la tesis, considerando el consumo de reactivo, tiempo de lixiviación y por último la recuperación

**Palabras clave:** Cianuro, lixiviación, proceso metalúrgico, recuperación.

## ABSTRACT

In the study of the leaching of gold-bearing minerals in the Ollachea district, Carabaya province, Puno region, the consumption of reagents for agitation leaching and bottle leaching was determined; the main determination was free cyanide, since it comprises hydrocyanic acid (HCN) and the cyanide ion (CN<sup>-</sup>) present in the solution, the consumption of NaCN was also determined, resulting in leaching by agitation at a time of 72 hours, 9.67 kg/t of ore; On the other hand, there is also the consumption of NaCN, resulting in 9.64 kg/t of ore for bottle leaching at a time of 72 hours.

The dissolution of gold to achieve optimal recovery in the cyanidation of the ore by agitation, a gold recovery of 81.78% is obtained in bottle leaching, and the recovery in agitation leaching of 81.90%, by a time of 72 hours, therefore, the bottle leaching process gives us a better gold recovery. The metallurgical balance for leaching tests was also carried out, in tables 9 and 10 the metallurgical balance obtained in the tests carried out for the thesis is observed, considering the consumption of reagent, leaching time and finally the recovery.

**Keywords:** Cyanide, leaching, metallurgical process, recovery.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, en Puno la minería es una de las fuentes económicas más importantes para la población, hecho que ha impulsado la recuperación de oro, usando diferentes métodos metalúrgicos como la concentración gravimétrica y amalgamación, llegando a recuperaciones inferiores al 60 %, por lo que, existe la necesidad de aplicar diferentes métodos.

En minerales auríferos que contienen arsenopirita la recuperación de oro es más difícil, el tratamiento metalúrgico por procesos convencionales de cianuración para la recuperación de oro, es tema de la presente investigación, donde se brinda interesantes aportes, específicamente en el distrito de Ollachea, región Puno.

El Perú cuenta con el 5 % del total de reservas de oro del mundo que equivalen 2 800 toneladas métricas, de los cuales, no se produce mayor al 20 % de todo lo que se abastece, en su mayoría se debe a la falta de investigación y la tecnología necesaria para explotar los minerales de oro de baja ley que afecta a la pequeña y mediana minería.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

##### ***2.1.1. Antecedentes del problema***

Como antecedente del problema tenemos que la recuperación de minerales auríferos por métodos artesanales del distrito de Ollachea, provincia Carabaya, región Puno no son muy efectivos y altamente tóxicos en comparación a la lixiviación, debido al constante incremento de mineros informales esto genera un grave impacto en la comunidad afectando la salud y el medio ambiente.

En estudios recientes se ha determinado que se puede reemplazar el uso del mercurio por reactivos más amigables con el medio ambiente bajo las mismas condiciones en su método de lixiviación generando un impacto ambiental positivo y preservando la vida.

##### ***2.1.2. Problemática de la investigación***

En la región de Puno la minería informal es un problema que trae como consecuencia la contaminación ambiental, vulnerando los derechos de la población debido a la contaminación de agua y suelo que se produce causando un grave impacto ambiental.

Este trabajo tiene como relevancia, que, si no se hace algo por el medio ambiente, se seguirá contaminando el agua, suelo, aire, animales y personas. Y en un futuro cercano no habrá un lugar saludable, afectará la salud de la población, por ello, depende de cada uno, tomar conciencia y a la población de lo importante que es tener un medio ambiente sano y no perjudicar el planeta, los daños perjudican a las futuras generaciones.

La intensa actividad en la minería informal de Puno comprende la cuenca alta del río Carabaya, afluente del Ramis. Dicha zona toma el nombre de río Grande, que recibe los

deshielos del nevado de Ananea y los reboses de las lagunas Rinconada, Sillacunca, Huicha y Chulpacocha. Pertenece a la provincia de Sandía y Carabaya del departamento de Puno. El río Ramis es el principal afluente del lago Titicaca, aportando cerca del 40 % de la esorrentía que ingresa al lago.

## **2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

En la provincia de Carabaya, se desarrolla una acelerada actividad minera del oro de parte de los mineros informales que participan directamente en su producción.

La contaminación ambiental como primer problema de salud pública nacional y mundial. Por eso, se debe identificar la problemática ambiental y una de ellas está en la cuenca del río Ramis. La contaminación ambiental se da como un ciclo natural del mismo, pero a medida que el hombre fue evolucionando y sobre todo en el siglo actual, se aumentó de forma indiscriminada la contaminación ambiental.

Ante la problemática, se plantea la siguiente formulación del problema:

¿Mediante un adecuado método de los minerales auríferos, de alta ley del distrito del Ollachea, se podrá obtener una buena recuperación de oro?

## **2.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

El presente trabajo de investigación pretende desplazar el uso de mercurio en la zona, usado aún en la extracción de oro libre y encapsulado, de esta manera se reducirá al mínimo el uso de este reactivo que es muy nocivo para el medio ambiente y la salud, de manera que se planea contribuir con la pequeña minería en la región de Puno.

## **2.4. LIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La actual situación de la pandemia en el país y el mundo, con las universidades cerradas, la investigación, se ejecutan en las empresas mineras.

## **2.5. OBJETIVOS**

### **2.5.1. *Objetivo general***

- Recuperar oro de minerales auríferos de alta ley, por lixiviación por agitación y lixiviación en botella con cianuro de sodio.

### **2.5.2. *Objetivos específicos***

- Determinar el consumo de reactivos.
- Lixiviar minerales auríferos para lograr una recuperación óptima.
- Realizar un balance metalúrgico de las pruebas de lixiviación.

## **2.6. HIPÓTESIS**

### **2.6.1. *Hipótesis general***

- Es factible lograr la mejor disolución de oro a partir de minerales auríferos, mediante el proceso de lixiviación.

### **2.6.2. *Hipótesis específicas***

- Es posible lograr la disolución del oro, manejando parámetros de proceso adecuados, para lograr una recuperación óptima.
- Realizando el balance metalúrgico es posible determinar recuperaciones y consumos adecuados en las pruebas de lixiviación.

## **2.7. VARIABLES**

### **2.7.1. *Identificación de las variables***

Las variables que afectan el proceso de lixiviación son:

#### **a) Variable independiente:**

- Ley del mineral

- Granulometría del mineral
- Concentración de solución lixivante
- Adición de cal
- Temperatura de lixiviación
- Tiempo de lixiviación
- Agitación

**b) Variable dependiente:**

- Disolución de metal o recuperación

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **4.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

Villegas (2015) en su tesis titulada “Optimización del Tratamiento de Minerales Auríferos por el Método de Carbón en Pulpa (CIP) en la Planta De Beneficio Doble “D” Minera Colibrí”, indica en sus conclusiones que la planta minera Colibrí logró obtener una recuperación hasta el 95 % de oro y 94 % de plata.

León (2017) consideró al distrito de Ollachea para llevar a cabo la investigación, teniendo en cuenta que tiene como principal actividad económica laminería artesanal (MA) con uso de mercurio (Hg), durante agosto a octubre del 2017. El método ecológico (ME) en la obtención de oro es una alternativa amigable para la salud y ambiente. Planteó tres objetivos:

- Evaluar indicadores generales de eficiencia: económico, ambiental y social, para el proceso de obtención de oro empleando el método ecológico (ME) y método tradicional (MT) en minería artesanal.
- Evaluar indicadores específicos de eficiencia del ME respecto al tradicional: caudal, tiempo, recurso humano, uso de bórax, uso de mercurio, oro obtenido y costos, para el proceso de obtención de oro en la minería artesanal (MA).
- Evaluar la percepción de los mineros y población de Ollachea respecto al ME. Las evaluaciones de indicadores generales están en marco de minería sostenible, para lo cual se realizaron encuestas. Los datos de indicadores específicos fueron tomados durante demostraciones (León, 2017).

Flores Calli (2011), en su tesis titulada “Optimización del Proceso de Lixiviación de Minerales Auríferos de baja ley – Minera Aruntani SAC”, en sus conclusiones proporciona un alcance tecnológico adecuado y necesario para la optimización del proceso de lixiviación de minerales auríferos de baja ley-minera Aruntani SAC.

## **4.2. BASES TEÓRICAS**

### **4.2.1. El oro**

El oro, primer metal noble conocido por el hombre, desde el primer instante generó interés, utilizado en monedas y decorativos. En el siglo XIX, se recogía el Au directamente de los yacimientos.

Alguacil (1995) también se encuentra de manera natural en las vetas de cuarzo y en depósito de aluviones libres, con una abundancia de elementos de la corteza terrestre; por otro lado, el Au sigue siendo rentable pero no es socialmente aceptable en varios lugares, por lo que, no es comprensible que se desconozca como motor para el desarrollo (León, 2017).

### **4.2.2. Química de cianuración del oro**

La cianuración del oro es un método para la extracción del oro que se utilizó desde finales del siglo XIX. El cianuro es utilizado en todo el mundo por su bajo costo y gran actividad para la disolución del oro. Aun sabiendo de algunas perturbaciones sobre la toxicidad del cianuro, se puede aplicar con poco riesgo para la salud y el medio ambiente (Misari C. F., 2010).

El cianuro es una sal como, por ejemplo, cianuro de sodio (NaCN), cianuro de potasio (KCN) y cianuro de calcio [Ca(CN)<sub>2</sub>], se utiliza como fuente de lixiviación de cianuro. Disuelve e ioniza en agua para formar sus cationes metálicos y liberar iones de cianuro (CN<sup>-</sup>) como se muestra a continuación:



Los iones cianuro se hidrolizan en agua para formar ácido cianhídrico (HCN) y oxhidrilo (OH<sup>-</sup>) iones que aumentan el pH- de 9,3. La mitad del cianuro es de hidrógeno y la otra mitad de los iones son del cianuro total. A mayor pH, el cianuro existe con iones de cianuro libre. Durante la lixiviación algunas reacciones indeseables podrían ocurrir ya que el cianuro de hidrógeno, así como el cianuro libre, se puede oxidar para formar cianato (CNO<sup>-</sup>) que no disuelve el oro y reduce la concentración de cianuro libre (Marsden & House, 1992).



La oxidación de oro es un requisito para que se disuelva en solución de cianuro alcalino. Reduce el oxígeno y el peróxido de hidrógeno y se convierte en un agente oxidante en el segundo paso, que lleva a las siguientes reacciones químicas que proceden en paralelo (Habashi, 1999).



La suma de dos reacciones parciales se encuentra en la ecuación 7, propuesto por Elsner:



Esta es la ecuación de Elsner. Sin embargo, no describe totalmente las reacciones catódicas asociadas a la disolución (Habashi, 1999).

### **4.2.3. Carbón activado**

#### **4.2.3.1. Adsorción.**

Es un fenómeno que involucra la transferencia de masa del adsorbato (gas o líquido) en la superficie de un sólido (adsorbente). El proceso ocurre en la región interfacial, en tres etapas consecutivas. Primera (difusión externa), el adsorbato al acercarse a la superficie externa del sólido, ganando la resistencia acumulada en una fina película alrededor del adsorbente y la superficie externa que expone el sólido normalmente es menor a 1% del total existente (superficie externa e interna). En la segunda etapa, que se denomina difusión interna, el adsorbato viaja a través de la porosidad del sólido. Por último, en la última etapa, el adsorbato se adhiere a la superficie del adsorbente presentándose la adsorción propiamente dicha (Barazorda Cuellar & Lima Condori, Evaluación de la capacidad de adsorción de oro con carbón activado obtenido a partir de la cáscara de castaña, 2019).

La adsorción de plata y oro con carbón activado a partir de disoluciones cianuradas es el método aceptable en las últimas décadas que el sistema convencional de precipitación con zinc (Merrill-Crowe), debido a la mayor eficiencia de recuperación de metales preciosos, iniciando de disoluciones de lixiviación de minerales de baja ley, con capital y costos de operación bajos (De la Torre & Guevara, 2006).

El carbón activado se puede fabricar de cualquier compuesto que tenga carbono, es usual utilizar madera, cuercos de coco, carbón bituminoso, antracita, semillas de frutas, cáscaras de nueces. El tipo de materia prima y su proceso de activación dará ciertas características físicas como dureza, resistencia a la abrasión, tamaño de poro, grupos funcionales de superficie, pH, etc. (Díaz & Guevara, 2002).

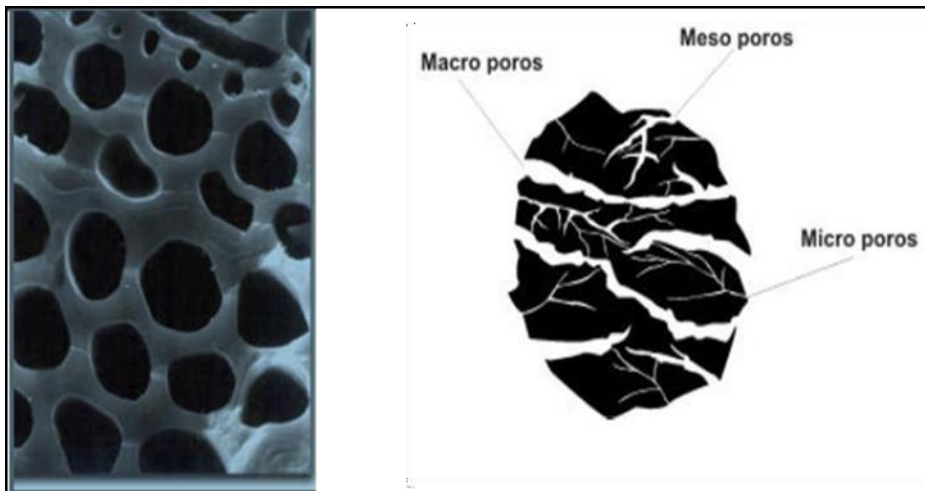
Las propiedades más importantes al obtener un carbón son el diámetro y características de los poros. Los poros se clasifican en tres, de acuerdo a su tamaño:

- Micro poros
- Poros medianos
- Macro poros

Los microporos tienen una elevada superficie y capacidad de retención al carbón, mientras que los mesoporos y macroporos se utilizan para la retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloidales, dar el acceso y la rápida difusión de moléculas a la superficie interna del sólido (Pazmiño, 2007).

### Figura 1

*Estructura interna del carbón activado. Distribución de poros*



*Nota.* Tomado de (Pazmiño, 2007).

Las principales características del carbón que se deben de considerar para la recuperación de oro de soluciones cianuradas en orden son:

- Dureza = de 95 a 99,5 %
- Resistencia a la abrasión en pulpa > 99%
- Alta capacidad de adsorción: “K value” = 20 a 24 Kg Au/ton C.A
- Alta velocidad de adsorción  $R = 0,06 - 0,08 \text{ mgAu/g CA / min}$
- Alta superficie específica:  $700 - 1\ 200 \text{ m}^2/\text{g CA}$
- Posible reactivación térmica.
- Tamaño de partícula (uniforme y grueso)

Se indica el tamaño del carbón activado. Es aceptable entre 1,2 x 2,4 mm a 1,7x 3,4 mm (mallas 8x16 y 6x12). Debido a que trabajar con tamaños más pequeños de carbón activado, no es conveniente, pues este es más capaz a una mayor rotura y a tener pérdidas de oro en el carbón fino, producto de la rotura, pueden ser muy altas (Gómez, Klose, & Rincón, 2010).

#### **4.2.3.2. Factores que afectan la adsorción.**

##### **a) Temperatura:**

Es el proceso exotérmico (desprende calor), por lo tanto, a mayor temperatura, menor capacidad de adsorción.

El oro en solución mientras a mayor concentración, se obtiene una velocidad de absorción mayor y capacidad mayor de oro en la carga del carbón. Los valores que se presentan en la adsorción de oro por carbón activado en procesos industriales según (Diaz & Guevara, 2002) son:

- Velocidad de adsorción:  $10 - 100 \text{ g Au / h / t CA}$
- Carga:  $5 - 10 \text{ Kg Au/t CA}$

**b) Concentración de cianuro libre:**

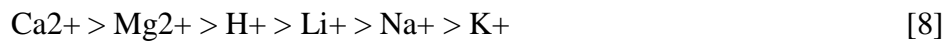
Si tenemos mayores concentraciones de cianuro de sodio (NaCN), menor es la velocidad y capacidad de carga de oro en el carbón. Sus condiciones de operación están en 0,1 – 2 g/l NaCN (Misari F. S., 1993).

**c) pH:**

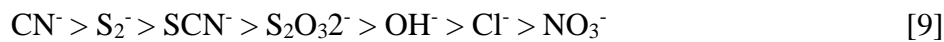
Se estima favorable la adsorción de oro al pH más bajo. No es recomendable valores inferiores a pH 10 para evitar problemas de hidrólisis del cianuro y genera ácido cianhídrico altamente tóxico (Misari F. S., 1993).

**d) Presencia de otros iones:**

Se ha comprobado que la capacidad de carga de oro en el carbón se incrementa con una mayor concentración de ion complementario en solución, teniendo preferencia en el siguiente orden (Misari F. S., 1993):



Al contrario, la capacidad de carga de oro en el carbón descenderá con una mayor concentración del anión complementario, en este orden (Misari, 1993):



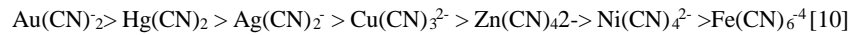
**e) Oxígeno disuelto:**

La presencia de oxígeno en solución, provocará la oxidación del cianuro y el decremento de su concentración, favorecerá la adsorción de oro en el carbón activado (Misari F. S., 1993).

**f) Adsorción de otras especies cianuradas:**

La adsorción del carbón activado, es selectiva, en cambio habrá algunas especies cianuradas que pueden adsorberse, esto dependerá de su concentración en solución y del pH (Misari F. S., 1993).

El orden de preferencia en el proceso de adsorción es como se indicantes:



Es conveniente que la plata se adsorba, la adsorción del mercurio esdañino y se presentan problemas en las etapas posteriores, sobre todo en la refinación.

Concentraciones bajas de cianuro y bajo pH el  $\text{Cu}(\text{CN})_2$  se adsorbe fácilmente en el carbón, el cual reduce la capacidad de carga del oro. A mayor concentración de cianuro y un pH más alto, favorece a las especies  $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-} > \text{Cu}(\text{CN})_4^{2-}$  que adsorben en mínima proporción en el carbón (Misari F. S., 1993).

**g) Tipo de carbón**

El carbón que se produce por diferentes métodos o materiales tienen un rango de propiedades, que afecta la velocidad de adsorción y la capacidad de cargado. Los carbones de alta actividad son blandos, esto se debe a que su estructura es más porosa y extensa que reduce la fuerza mecánica del carbón. Para un proceso en particular se requiere un tipo de carbón que depende de muchos factores incluyendo el tipo de proceso de adsorción, la concentración, la velocidad de flujo de la solución/pulpa, la velocidad de producción de oro, la velocidad de atracción del carbón y la severidad de las condiciones del proceso (Tómala Andrade, 2016).

#### **4.2.4. Etapas del proceso de extracción del oro**

En los últimos avances en la metalurgia del oro y plata siempre ha sido muy importante para desarrollar la minería aurífera, con estos nuevos métodos se ha permitido el tratamiento en los yacimientos cuya explotación en el pasado se consideraba no económica. Una de estas lo constituye el uso de carbón activado a partir de soluciones cianuradas (Asalde Horna, 2010). El proceso se divide en las siguientes etapas:

- a) Lixiviación: Agitación o pilas
- b) Carga: Adsorción con carbón activado de oro y de plata de la solución rica cianurada.
- c) Descarga: Es la desorción de oro y de plata del carbón en una solución más concentrada.
- d) Regeneración: Recuperación de las propiedades originales del carbón.
- e) Producción de oro metálico: Por técnicas de cementación o electrodeposición del oro de la solución concentrada (desorbida).

La solución estéril en la etapa de desorción se recicla o se descarta después de un cierto número de desorciones, todo depende del contenido de impurezas (Asalde Horna, 2010).

##### **4.2.4.1. Lixiviación.**

Existe un método para procesar minerales conocida como la lixiviación por cianuración. Los tratamientos metalúrgicos de las menas de oro se basan en las características del oro nativo con la plata (electrum). Esto se debe por su alto peso específico comparado con la ganga asociada, por otro lado, se debe a que el oro nativo, plata o distintas aleaciones entre estos, son solubles en soluciones cianuradas alcalinas diluidas (Asalde Horna, 2010).

Una de las variantes más importantes en la cianuración es el pH, del cual este debe mantenerse en un rango de 9,5 – 10,5 para no perder cianuro como gas cianhídrico y retardar la cinética de la lixiviación (Asalde Horna, 2010).

#### **4.2.4.2. Adsorción de oro con carbón activado.**

El licor lixiviado se genera en las operaciones de lixiviación en pilas con minerales de baja ley y están libres de sólidos suspendidos. En esta operación con la solución (licor lixiviado) circula a través de las columnas con el carbón activado en contracorriente. La operación se asemeja al proceso de intercambio de las partículas de carbón en las columnas (Asalde Horna, 2010).

#### **4.2.4.3. Desorción del oro.**

Las técnicas de desorción que se aplican en la actualidad nos permiten obtener una recuperación de oro y plata desde el carbón de forma efectiva y práctica. De acuerdo a las condiciones de la planta se emplea la selección del método de desorción. En pequeñas plantas el rendimiento de la desorción atmosférica es buena, se requiere menos equipos con bajo capital y costo de operación. En diferencia de las plantas que operan con gran tonelaje, se requiere que el tiempo de tratamiento sea corto (6 – 10 h max.) por lo que, la desorción a presión con cianuro cáustico o uso de alcohol serán los más adecuados (Asalde Horna, 2010). Existen muchos procedimientos entre ellos:

#### **Procedimiento Zadra**

Por este método el carbón activado es desorbido a presión atmosférica utilizando una solución de 0,1% de NaCN y 1% de NaOH. Una cantidad de carbón es transportada a través de recipientes de forma cilíndrica de fondo cónico, anticipadamente lavado con agua y se hace pasar de forma ascendente; estos recipientes son construidos

con acero inoxidable y aislados con fibra de vidrio (Barazorda Cuellar & Lima Condori, Evaluación de la capacidad de adsorción de oro con carbón activado obtenido a partir de la cáscara de castaña, 2019).

La temperatura se mantendrá por encima de 368,15 K (95°C) para obtener un rendimiento efectivo de elusión, del cual será de 2 volúmenes por hora, del cual asegura un traspaso adecuado de la desorción del carbón activado que asegura a la vez un flujo constante por las celdas de electrodeposición. La composición de la solución de elusión es importante en el procedimiento de Zadra, debido a que, si no se mantiene un balance de agua y se permite que la fuerza iónica, el nivel de elusión se retrasa de cierta forma, el ión cloruro es un problema en los circuitos Zadra que afecta el rendimiento de la celda (Cárdenas Oré & Espinel Maque, 2016).

### **Procedimiento con alcohol**

El proceso con solución alcalina lo desarrolló *Heinen en la US Bureau of Mines*, es el proceso atmosférico Zadra mejorado y se le denomina como proceso de re-extracción con alcohol. Se empleó alcohol para este proceso ya que necesita de una aireación, este con la finalidad de dejar escapar un crecimiento excesivo del vapor de alcohol volátil. En USA el uso de este proceso, permite de uno o más reactores de re-extracción de acero de un circuito cerrado con electrodeposición. El total de la cantidad de alcohol de la solución está entre 10-20% (etanol y metanol) 1% de NaOH y 0,1% NaCN y se mantiene en un promedio de 80°C en la re-extracción. Se ha desarrollado un nuevo proceso de re-extracción con alcohol por parte de la *Microm Research* que emplea el principio de acondicionamiento del carbón en una solución de cianuro alcalino fuerte

seguido por la desorción – destilación en una columna de fraccionamiento, utilizando metanol como el agente desorbente (Cárdenas Oré & Espinel Maque, 2016).

### **Procedimiento Zadra presurizado**

Desarrollado por *Potter en la U.S. Bureau of Mines*, es la variante presurizada del procedimiento de Zadra se dio a conocer como una necesidad para reducir los tiempos en el sistema a presión atmosférica, a raíz de la alta dependencia que se encontró de la desorción con la temperatura. El proceso opera a 393k (120 a 150 C°), además de una presión de 350 – 550Kpa (50 – 80 psi) para evadir el relampagueo con lo cual se logra una eficiente elusión del oro al cabo de 8 – 12 horas (Barazorda Cuellar & Lima Condori, Evaluación de la capacidad de adsorción de oro con carbón activado obtenido a partir de la cáscara de castaña, 2019).

### **Procedimiento Anglo Americano**

Es desarrollado por *Anglo American Research Lab* por Davidson en Sud África, como dificultad en este proceso del cual es introducir un lavado ácido (HCL) antes del ciclo de elusión. El lavado ácido es dado en el reactor de la reacción, por lo tanto, se necesita una cierta cantidad de materiales especiales y evitar colocar más tuberías para que no se llegue a mezclar el ácido y el cianuro. El desarrollo AARL nos permite reciclar soluciones de re extracción, pero esto es muy costoso. La solución cargada se introduce a electrodeposición para la recuperación final, fundición y refinación. (Cárdenas Oré & Espinel Maque, 2016).

### **Desorción Orgánica**

La *Bureau of Mines* de Estados Unidos que inicialmente desarrolló este método con solución caústica caliente, tuvo una mejora con un método nuevo que usa un 20% de

solución de alcohol NaOH para poder desorber el carbón cargado a 80°C en solo 5 a 6 horas. Se mostró que el etanol es más efectivo que el metanol, el cual es más efectivo que el isopropanol (Cárdenas Oré & Espinel Maque, 2016).

### **Regeneración**

El carbón activado disminuye su eficiencia de adsorción, ya que es importante controlar seguidamente la calidad de carbón. Esto se observa claramente al analizar los valores de oro en la solución barren, observamos que los valores de oro se incrementan de manera continua (Asalde Horna, 2010).

#### **4.2.4.4. Producción de oro.**

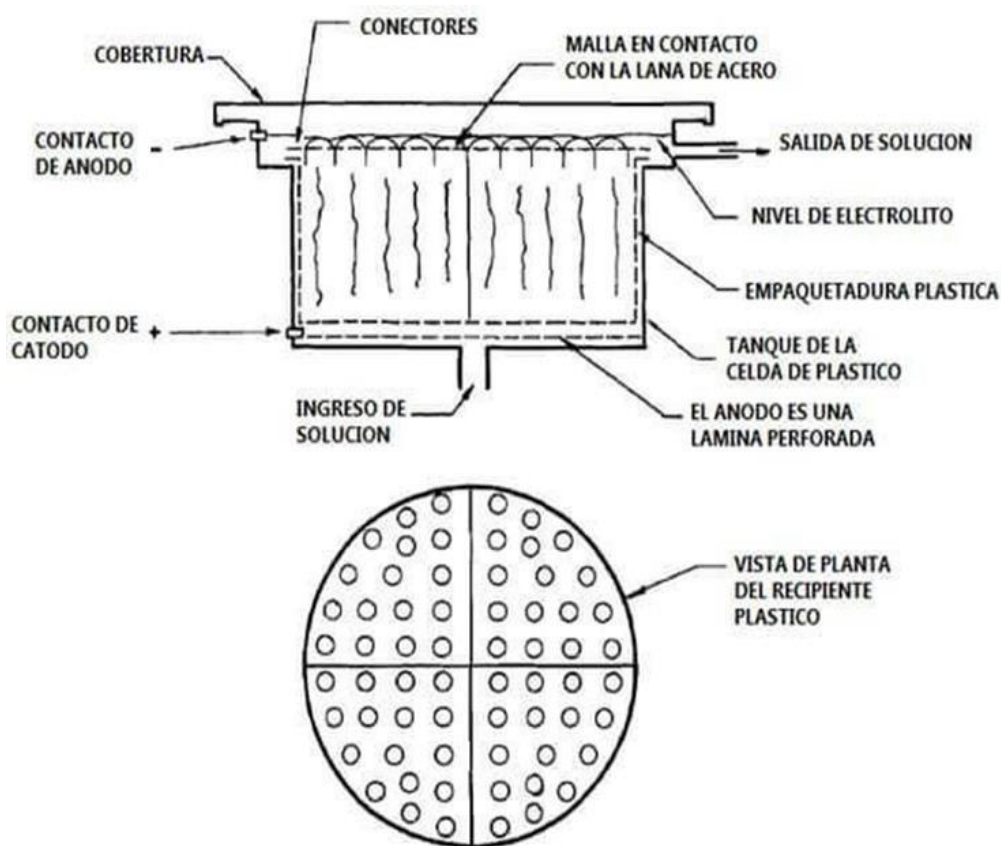
Mediante técnicas de electrodeposición o cementación del oro de la solución concentrada (desorbida) (Asalde Horna, 2010).

### **Electrodeposición**

El producto de la desorción contiene un circuito con celdas electrolíticas con cátodos de lana de acero donde son recuperados por concentración del fierro con ácido sulfúrico, enviando a fundición el producto sólido. Este proceso los desechos de la solución de ácido sulfúrico se neutralizan con soda cáustica (Varillas Sanchez, 2014).

**Figura 2**

*Celda cilíndrica de electrodeposición de minerales*



*Nota.* Tomado de (Lazaro Yachachin, 2006).

## **Fundición**

Los procesos de desorción y electrodeposición dan como resultado un producto de cemento de oro, plata y otras impurezas (cobre, sílice, plomo, hierro. etc.), estos son sometidos al proceso de fundición, según (Paz Rubio, 1998) estas consisten:

- a) Se hace el secado rápido del cemento.
- b) Lo mezclamos con carbonato de sodio y el bórax para eliminar las impurezas y una mínima cantidad de sílice para limpiar el hierro.
- c) Realizamos la fundición en un crisol a una temperatura superior

a los 1273,15°K (1000°C). Luego de 1 hora, se realiza la colada del fundido en unos moldes rectangulares para 10 kg de metal.

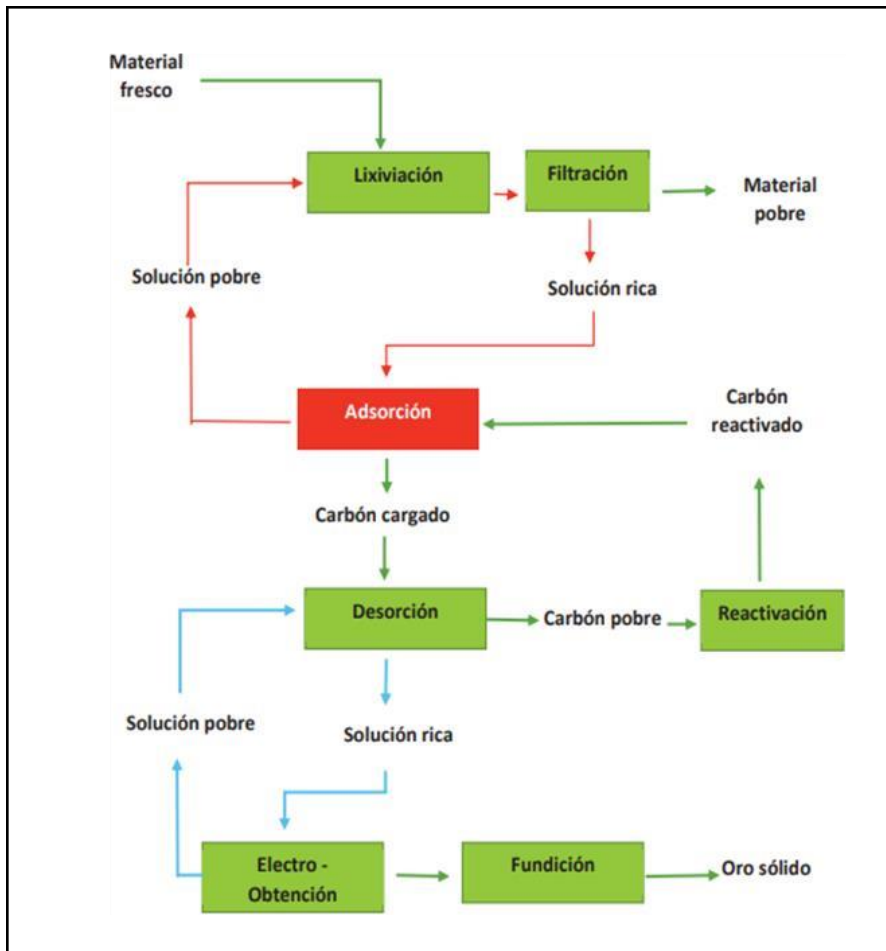
- d) Obtenemos el bullón de oro
- e) El bullón de oro se somete a la refinación

### Existen dos formas de refinar el bullón

Refinación química y electroquímica. En la figura 3 se muestra el diagrama de etapas del proceso de extracción del oro en una empresa minera.

**Figura 3**

*Diagrama de flujo de las etapas del proceso de la extracción del oro*



*Nota.* Tomado de (Asalde Horna, 2010).

### 4.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

- **Minerales oxidados:** Un mineral oxidado, tal vez en una división que es atípica de los yacimientos sulfuros primarios, y para los cuales es requerible un procesamiento exclusivo. La oxidación y otros procesos llevan a deshacer la estructura de la roca, lo que considera una extensión en la permeabilidad. Esto usualmente permite que se obtengan altas extracciones por lixiviación mediante la lixiviación en pilas de una mineral de mina; aunque, el tamaño de las partículas de minerales puede ser muy grueso. Un rasgo perjudicial de la oxidación y cambio de la roca es la formación de importantes cantidades de sílice hidratada, amorfa y/o pobremente cristalina, minerales de arcilla, sales de sulfato y fases negativas de óxido e hidróxido. Algunas de estas fases tienen solubilidad relativamente alta en comunicación y lixiviación con cianuro; y pueden pender como fuertes cianicidas (consumidores de cianuro), requerido a la formación de áreas extremadamente grandes y de fresca cubierta con un alto potencial de adsorción. Otras fases, como los minerales de arcilla y sílice amorfa, pueden afectar el procesamiento en medidas grandes.
- **Mineral sulfurado:** Son los minerales que tienen como constitución por la relación entre el azufre y elementos metálicos, como son Cu, Fe, Pb, y Zn, entre otros. Los minerales sulfurados de cobre más comunes son calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelina ( $\text{CuS}$ ) y enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ). Un subproducto envidioso de estos yacimientos es el molibdeno, que se encuentra en forma de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ). (R. Padilla).
- **Granulometría:** Es el tamaño de las partículas del mineral que se utiliza en lixiviación. Esto mantiene en circulación las partículas de oro más pesadas a la molienda hasta que

ellos sean más pequeñas o lo suficientemente delgadas para rebozar el clasificador en el circuito de cianuración.

- **Lixiviación:** Es el procedimiento del cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la explotación de un disolvente fluido. Ambas fases están en contacto cercano y el soluto puede difundirse desde el sólido a la etapa líquida, lo cual esta produce una división de los componentes originales del sólido.
- **Cianuración:** Técnica metalúrgica para obtener oro de mineral de baja calidad, que se busca convertir el oro (insoluble en agua) en aniones metálicos complejos de aurocianida, solubles en agua.
- **Cianuro de Sodio:** El cianuro de sodio (NaCN) es la sal sódica del ácido cianhídrico (HCN). implica un compuesto sólido e incoloro que hidroliza con el agua y óxido de carbono (IV) para dar carbonato de sodio y ácido cianhídrico.
- **Precipitación:** Método para la recuperación del oro que consiste en la adhesión del zinc en una ratio de 5 y 30 veces el requerimiento estequiométrico de los metales preciosos en dependencia de la composición de la solución y la efectividad operativa. una solución que contiene 5 g/t de oro requeriría una tasa de adición de zinc de 17 g/t en solución, con 10 veces el requerimiento estequiométrico. El polvo de zinc (malla 600), se agrega a la solución preñada (solución rica), o puede ser premezclada con una solución de cianuro, para preparar la superficie de zinc, se agregará como un lodo.
- **Relaves:** Son los desechos de mineral con baja ley o subproductos tóxicos de procesos mineros, generalmente es una mezcla de tierra, minerales, agua y roca. Los relaves contienen elevadas concentraciones de químicos y elementos que modifican el medio ambiente, por lo que deben ser enviados y almacenados en “tranques o pozas de

relaves” donde lentamente los contaminantes se van decantando en el lecho y el agua es recuperada.

- **Cinética de disolución:** Es el tiempo en el que lleva un resultado la reacción, en su mayor parte, en la etapa de menor velocidad del cual es importante identificar su incremento de velocidad. Es una reacción fisicoquímica que involucra la fase sólida y líquida en cinco etapas:
  - Difusión de los reactantes desde la solución hasta la interfase sólida y líquido.
  - Adsorción de los reactantes en la superficie del sólido.
  - Reacción en la superficie.
  - Desorción de estos productos de la reacción en la superficie del sólido.
  - Difusión de los productos de la interfase sólido – líquidos a la solución
  
- **Depósito:** Un cuerpo mineralizado que se ha definido físicamente con suficiente perforación, excavación de zanjas y trabajos subterráneos y que se ha encontrado contiene una ley promedio suficiente de metal o metales para garantizar la exploración y/o los gastos de desarrollo. Un depósito como este no califica como un cuerpo de mineral comercialmente minable, ni como uno que contenga reservas de mineral, hasta que se hayan resuelto los factores legales, técnicos y económicos finales.
  
- **Electrodeposición:** Es el proceso de eliminación de cobre de la solución por la acción de las corrientes eléctricas.
  
- **Recuperación:** Es el porcentaje de metal valioso en el mineral recuperado por medio de un tratamiento metalúrgico.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

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

El tipo de investigación es aplicada, debido a que se determinará los parámetros de operación del proceso de lixiviación de minerales auríferos.

El nivel de la investigación es experimental, porque se realiza pruebas experimentales para determinar los parámetros óptimos del proceso de recuperación de oro de los minerales auríferos.

#### **6.2. POBLACIÓN, MUESTRA Y MATERIAL DE ESTUDIO**

##### **6.2.1. Población**

Son minerales auríferos provenientes del distrito de Ollachea en la provincia de Carabaya región de Puno.

##### **6.2.2. Muestra**

Las muestras fueron extraídas de lotes y estos contienen minerales auríferos, puesto que seguidamente se realizaron pruebas a fin de determinar el mejor método de recuperación del oro. De los cuales definimos su ley de acuerdo a la veta donde extraemos el mineral.

##### **6.2.3. Material de estudio**

El mineral de estudio son minerales auríferos, para la recuperación de oro que se utilizarán los reactivos como el cianuro de sodio a bajas concentración para su disolución.

#### **Figura 4**

*Muestra del mineral aurífero utilizado para las pruebas metalúrgicas*



*Nota.* Elaboración propia.

### **6.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

La operacionalización de las variables para las pruebas metalúrgicas se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1***Operacionalización de variables*

| <b>Variable</b>                             | <b>Indicador</b>                     | <b>Escala de medición</b> | <b>Nivel o rango</b> |
|---|--------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| <b>Independiente:</b>                       |                                      |                           |                      |
| <b>Ley del mineral</b>                      | Tamaño de mineral                    | g/t                       | 0,225 - 0,232        |
| <b>Granulometría del mineral</b>            | Tamaño de mineral                    | Número de malla           | M-200                |
| <b>Concentración de solución lixiviante</b> | Concentración de solución lixiviante | g                         | 1 - 5                |
| <b>Adición de cal</b>                       | Consumo de cal                       | g/T                       | 1 - 2                |
| <b>Tiempo de lixiviación</b>                | Tiempo de lixiviación                | h                         | 0 - 72               |
| <b>Dependiente:</b>                         |                                      |                           |                      |
| <b>Recuperación</b>                         | Oro disuelto en el licor             | %                         | 20 - 85              |

*Nota.* Elaboración propia.

## **6.4. MÉTODO, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE**

### **DATOS**

Se describirán los métodos, técnicas e instrumentos utilizados para recolección de datos:

#### **6.4.1. Método**

El método utilizado para la realización de las pruebas de lixiviación de oro, son las de lixiviación por agitación y lixiviación en botella.

#### **6.4.2. Técnica**

La técnica aplicada fue experimental por el % de extracción del oro que se mide a través de la relación entre concentración de oro en la solución acuosa al total que vendría a ser el % de recuperación resultante, el contenido de oro inicialmente en la cabeza del mineral con el contenido de oro final en el relave, todo ello, en función al tiempo.

### **6.4.3. *Materiales, equipos, reactivos e instrumento***

Para la realización de las pruebas de lixiviación se utilizaron los siguientes materiales, equipos, reactivos e instrumento:

#### **6.4.3.1. Materiales.**

- Vasos precipitados con capacidad de 500 ml
- Papel filtro
- Probeta graduada de 25
- Bureta de 25 ml
- Matraz Erlenmeyer 250 ml
- Embudo de vidrio
- Pizeta
- Tamiz malla -200 tyler
- Bandeja metálica
- Cucharas
- Bolsas plásticas
- Botella de vidrio de 2 l
- Accesorios de limpieza

#### **6.4.3.2. Equipos.**

- Molino de bolas (110v de acero inox.)
- Rotap
- Plancha eléctrica (PLD-6016 Digital 30x50 | Aceq Laboratorios)
- Balanza digital (marca Patrick de 30kg)
- Tanque agitador (marca ELE, modelo ESF-750)

- Equipo de protección personal (marca 3M)

#### **6.4.3.3. Reactivos.**

- Nitrato de plata (4,33 g/l)
- Yoduro de potasio
- Cianuro de sodio (NaCN)
- Hidróxido de sodio (NaOH)

#### **6.4.3.4. Instrumento.**

- pH metro

### **6.5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

En primer lugar, se seleccionó 20 kg de mineral aurífero proveniente del distrito de Ollachea, provincia Carabaya, región Puno, esta muestra se homogenizó y mediante el cuarteo se obtuvo una muestra representativa de 4 kg de mineral.

## Figura 5

*Cuanteo del mineral aurífero*



*Nota.* Elaboración propia.

### **a) Determinación del consumo de reactivos**

Para la determinación de consumos de reactivos se realizó el siguiente procedimiento:

Primeramente, la mineralogía del mineral, con una balanza analítica se procedió a pesar 300 g, luego, se realizó la molienda utilizando 15 kg de bolas de acero, una vez cumplido con el tiempo de molienda, se procedió a utilizar el rotap por unos 15 minutos, seguidamente se pasó por la malla N° 200, luego se pesó 120 g de mineral y el resto se guardó para las pruebas posteriores.

**Figura 6**

*Balanza analítica usado en el pesado del mineral*



*Nota. Elaboración propia.*

**Figura 7**

*Molino de bolas utilizado para la molienda*



*Nota. Elaboración propia.*

**Figura 8**

*Set de mallas utilizados en el rotap*



*Nota.* Elaboración propia.

En seguida, se procedió a determinar las propiedades físicas y químicas del mineral, y para ello se cogió un pedazo del mismo mineral, pesándolo, dio como resultado 0,029 kg que equivale a 29 g. Por el método de la probeta se determinará la densidad del mineral realizando el siguiente cálculo:

$$V = 510 - 500 = 10 \text{ ml}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{29}{10} = 2.9 \text{ g/ml}$$

Para el procedimiento de la determinación del cianuro libre, se preparó el titulante, para ello, se pesó 2,165 g de nitrato de plata y se aforó con agua a 500 ml, luego se preparó el indicador del cual se pesó 1 g de yoduro de potasio al 5 % y se mezcló con agua de 10 ml.

Luego se tomó 10 ml de solución cianurada rica en oro (de los dos métodos), se agregó 3 gotas de IK (yoduro de potasio al 5 %), luego se hizo la titulación con la solución  $\text{AgNO}_3$  (4,33 g/l), para la determinación del consumo del cianuro. Inicialmente estuvo en una concentración de 1,5 g/l y el promedio resulta 0,44 g/l, entonces podemos calcular el consumo del cianuro.

$$\text{Consumo Cianuro} = [\text{CN}_i] - [\text{CN}_f]$$

#### **b) Estudio de la disolución del oro para lograr la recuperación óptima**

Para la realización de este punto se utilizó un vaso precipitado en el cual, se colocó 120 g de mineral aurífero molido, luego se agregó 360 ml de agua, se esperó 5 minutos, seguidamente se introdujo el indicador pH, ya que la solución estaba en un pH 10, para incrementar a pH 11 se pesó 2 g de cal, se le agregó a la mezcla y se colocó a la agitadora, se repitió 3 veces el mismo paso, para en un intervalo de tiempo de 1 minuto, volver a introducir el indicador a fin de obtener el Ph adecuado.

Una vez obtenido el pH 11, se dejó agitando por 20 minutos, luego se procedió a pesar 0,0025 g de NaCN y se agregó a la mezcla, se dejó en la agitadora durante los tiempos establecidos, finalmente, se filtró la mezcla para poder obtener la solución cianurada rica en oro.

Dicho procedimiento se realizó por el método de lixiviación en botella, se utilizó los mismos reactivos y los mismos tiempos, una vez obtenida las soluciones ricas en oro se procedió al respectivo análisis a fin de determinar el % de recuperación.

### c) Balance metalúrgico en las pruebas de lixiviación

Para la realización del balance metalúrgico se tomó en consideración los principales parámetros utilizados en las pruebas realizadas.

**Tabla 2**

*Parámetros de la lixiviación por agitación*

|                      |          |          |
|----------------------|----------|----------|
| <b>Código lote</b>   | Ollachea |          |
| <b>Procedencia</b>   | Puno     |          |
| <b>Tipo</b>          | Sulfuro  |          |
| <b>Peso Mineral</b>  | 2000     | g        |
| <b>Agua</b>          | 5        | L        |
| <b>Fuerza</b>        | 0,2      | %        |
| <b>NaCN inicial</b>  | 10       | g        |
| <b>NaOH inicial</b>  | 20,7     | g        |
| <b>Dilución</b>      | 2,5      |          |
| <b>pH</b>            | 11       |          |
| <b>Ley Cabeza Au</b> | 0,225    | g/t      |
| <b>Ley Cabeza Au</b> | 0,232    | g/t      |
| <b>Malla</b>         | 81,99    | % -m 200 |

*Nota.* Elaboración propia.

Por último, en las pruebas de agitación y de botella se obtuvieron muestras de solución rica de oro, por ambos métodos, se hizo el lavado de ripio que quedó en el papel filtro, este se colocó en las bandejas metálicas y se pasó a poner en la plancha eléctrica para poder eliminar la humedad y finalmente se realizó los balances metalúrgicos para cada prueba.

### **6.5.1. *Análisis de datos***

El análisis de datos se efectuó con Microsoft Excel para los cálculos y el balance metalúrgico de las pruebas de lixiviación.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 8.1. RESULTADOS

A continuación, se muestran resultados de las pruebas realizadas en la investigación.

##### 8.1.1. Resultados del consumo de reactivo

De las pruebas realizadas con respecto al consumo de reactivo se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 3**

*Resultados del consumo de CN - lixiviación por agitación*

| Tiempo | pH | Consumo AgNO3 ml | Fuerza (%) | Cianuro Libre (g) | Adición NaCN en prueba (g) | Consumo CN g/T |
|--------|----|------------------|------------|-------------------|----------------------------|----------------|
| 0      | 0  | 8,0              | 0,200      | 10,00             | 0,00                       | 0,00           |
| 1      | 11 | 4,0              | 0,100      | 5,00              | 5,00                       | 2,50           |
| 2      | 11 | 4,8              | 0,120      | 6,00              | 4,00                       | 4,50           |
| 4      | 11 | 6,4              | 0,160      | 8,00              | 2,00                       | 5,50           |
| 8      | 11 | 7,2              | 0,180      | 9,00              | 1,00                       | 6,00           |
| 12     | 11 | 7,3              | 0,183      | 9,13              | 0,00                       | 6,44           |
| 24     | 11 | 5,5              | 0,138      | 6,88              | 0,00                       | 7,56           |
| 48     | 11 | 4,2              | 0,104      | 5,19              | 0,00                       | 8,41           |
| 72     | 11 | 2,1              | 0,053      | 2,66              | 0,00                       | 9,67           |

*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 4**

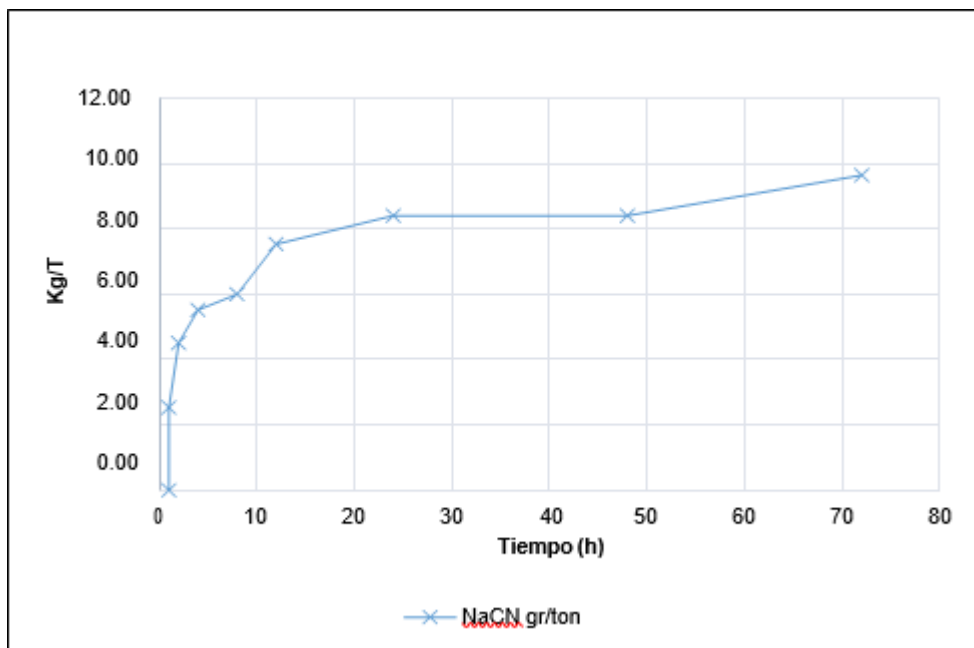
*Resultados del consumo de NaOH – lixiviación por agitación*

| Tiempo | pH | NaOH en prueba (g) | Consumo NaOH | Consumo NaOH Kg/T |
|--------|----|--------------------|--------------|-------------------|
| 0      | 0  | 20,70              | 10,35        | 10,35             |
| 1      | 11 | 0,00               | 0,00         | 10,35             |
| 2      | 11 | 0,00               | 0,00         | 10,35             |
| 4      | 11 | 0,00               | 0,00         | 10,35             |
| 8      | 11 | 0,00               | 0,00         | 10,35             |
| 12     | 11 | 0,00               | 0,00         | 10,35             |
| 24     | 11 | 0,00               | 0,00         | 10,35             |
| 48     | 11 | 0,00               | 0,00         | 10,35             |
| 72     | 11 | 0,00               | 0,00         | 10,35             |

*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 9**

*Gráfico de consumo de reactivos por agitación*



*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 5***Resultados del consumo de CN - lixiviación en botella*

| <b>Tiempo</b> | <b>pH</b> | <b>Consumo AgNO3 ml</b> | <b>Fuerza (%)</b> | <b>Cianuro Libre (g)</b> | <b>Adición NaCN en prueba (g)</b> | <b>Consumo CN g/T</b> |
|---------------|-----------|-------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 0             | 0         | 8,1                     | 0,200             | 9,90                     | 0,00                              | 0,00                  |
| 1             | 11        | 3,9                     | 0,100             | 5,01                     | 4,50                              | 2,53                  |
| 2             | 11        | 4,6                     | 0,120             | 5,95                     | 3,00                              | 4,51                  |
| 4             | 11        | 6,6                     | 0,160             | 8,00                     | 2,00                              | 5,52                  |
| 8             | 11        | 6,9                     | 0,180             | 9,00                     | 1,00                              | 6,00                  |
| 12            | 11        | 7,2                     | 0,183             | 9,10                     | 0,00                              | 6,42                  |
| 24            | 11        | 5,1                     | 0,138             | 6,85                     | 0,00                              | 7,53                  |
| 48            | 11        | 4,0                     | 0,104             | 5,20                     | 0,00                              | 8,40                  |
| 72            | 11        | 2,0                     | 0,053             | 2,64                     | 0,00                              | 9,64                  |

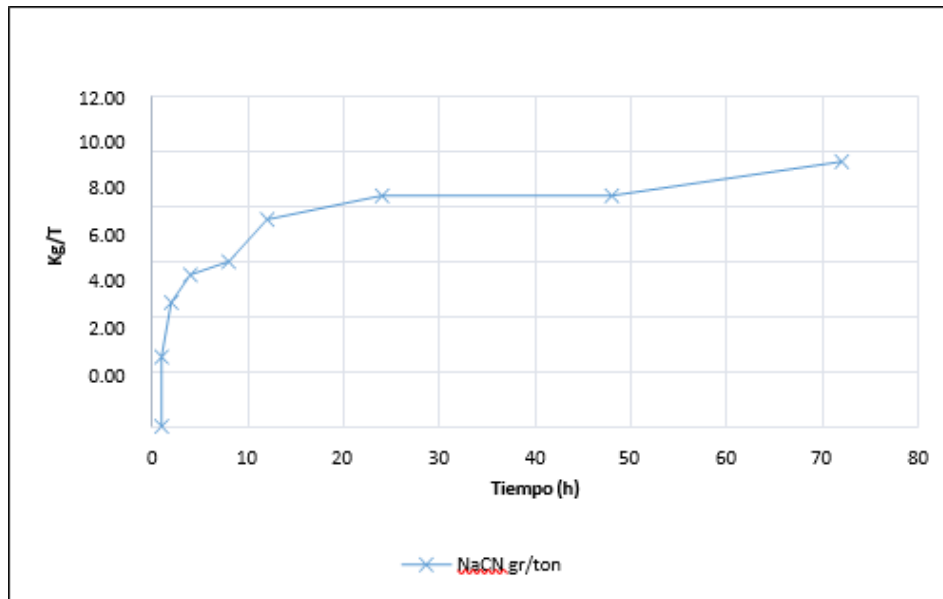
*Nota.* Elaboración propia.**Tabla 6***Resultados del consumo de NaOH – lixiviación en botella*

| <b>Tiempo</b> | <b>pH</b> | <b>NaOH en prueba (g)</b> | <b>Consumo NaOH</b> | <b>Consumo NaOH Kg/T</b> |
|---------------|-----------|---------------------------|---------------------|--------------------------|
| 0             | 0         | 20,70                     | 10,35               | 10,35                    |
| 1             | 11        | 0,00                      | 0,00                | 10,35                    |
| 2             | 11        | 0,00                      | 0,00                | 10,35                    |
| 4             | 11        | 0,00                      | 0,00                | 10,35                    |
| 8             | 11        | 0,00                      | 0,00                | 10,35                    |
| 12            | 11        | 0,00                      | 0,00                | 10,35                    |
| 24            | 11        | 0,00                      | 0,00                | 10,35                    |
| 48            | 11        | 0,00                      | 0,00                | 10,35                    |
| 72            | 11        | 0,00                      | 0,00                | 10,35                    |

*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 10**

*Gráfico de consumo de reactivos en botella*



*Nota.* Elaboración propia.

### **8.1.2. Resultados de la recuperación en la lixiviación**

De la lixiviación tanto por agitación y en botella se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 7**

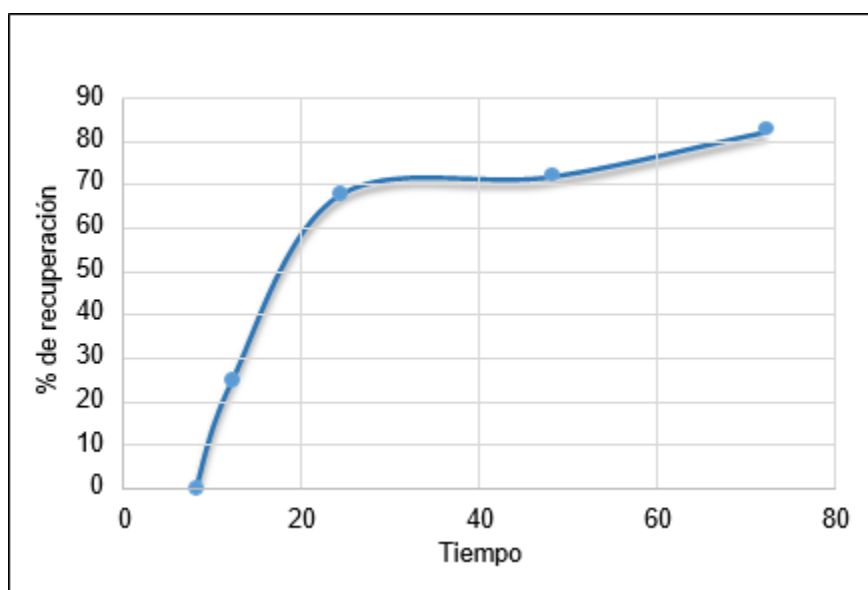
*Resultados del % de recuperación por agitación.*

| Tiempo | pH | Fuerza (%) | Ley Au Oz/Tc | % Recuperación agitación |
|--------|----|------------|--------------|--------------------------|
| 0      | 0  | 0,200      | 0,225        | 0,00                     |
| 1      | 11 | 0,100      | 0,225        | 0,00                     |
| 2      | 11 | 0,120      | 0,225        | 0,00                     |
| 4      | 11 | 0,160      | 0,225        | 0,00                     |
| 8      | 11 | 0,180      | 0,225        | 0,00                     |
| 12     | 11 | 0,183      | 0,17         | 21,55                    |
| 24     | 11 | 0,138      | 0,074        | 65,52                    |
| 48     | 11 | 0,104      | 0,064        | 70,26                    |
| 72     | 11 | 0,053      | 0,041        | 81,90                    |

*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 11**

*Recuperación del Au en la lixiviación por agitación*



*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 8**

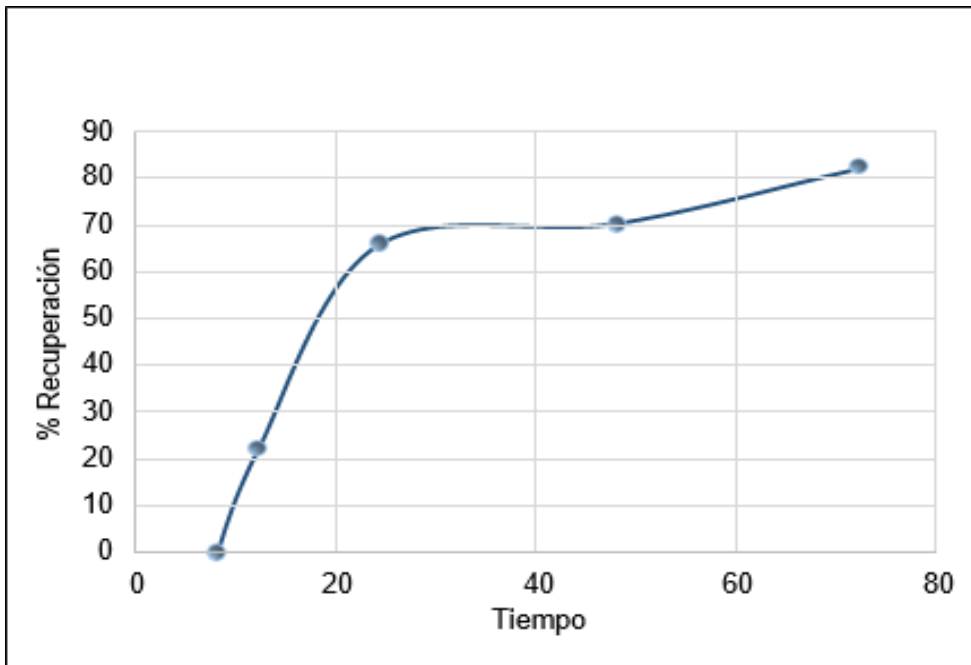
*Resultados del % de recuperación en botella*

| Tiempo | pH | Fuerza (%) | Ley Au Oz/Tc | % Recuperación botella |
|--------|----|------------|--------------|------------------------|
| 0      | 0  | 0,200      | 0,232        | 0,00                   |
| 1      | 11 | 0,100      | 0,232        | 0,00                   |
| 2      | 11 | 0,120      | 0,232        | 0,00                   |
| 4      | 11 | 0,160      | 0,232        | 0,00                   |
| 8      | 11 | 0,180      | 0,232        | 0,00                   |
| 12     | 11 | 0,183      | 0,182        | 24,44                  |
| 24     | 11 | 0,138      | 0,08         | 67,11                  |
| 48     | 11 | 0,104      | 0,069        | 71,56                  |
| 72     | 11 | 0,053      | 0,042        | 81,78                  |

*Nota.* Elaboración propia.

**Figura 12**

*Recuperación del Au en la lixiviación en botella*



*Nota.* Elaboración propia.

### **8.1.3. Resultados del balance metalúrgico en la lixiviación**

A continuación, se presenta el resultado del balance metalúrgico realizado en las pruebas de lixiviación por agitación y en botella.

**Tabla 9***Balance general de la lixiviación por agitación*

| <b>Tiempo</b> | <b>Consumo<br/>AgNO<sub>3</sub>ml</b> | <b>Cianuro<br/>Libre (gr)</b> | <b>consumo<br/>CN Kg/T</b> | <b>consumo<br/>NaOH<br/>Kg/T</b> | <b>Ley Relave<br/>Au<br/>Oz/Tc</b> | <b>%<br/>Recuperación<br/>por agitación</b> |
|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---|
| <b>1</b>      | 8,0                                   | 10,00                         | 0,00                       | 10,35                            | 0,225                              | 0,00  |
| <b>1</b>      | 4,0                                   | 5,00                          | 2,53                       | 10,35                            | 0,225                              | 0,00  |
| <b>2</b>      | 4,8                                   | 6,00                          | 4,51                       | 10,35                            | 0,225                              | 0,00  |
| <b>4</b>      | 6,4                                   | 8,00                          | 5,52                       | 10,35                            | 0,225                              | 0,00  |
| <b>8</b>      | 7,2                                   | 9,00                          | 6,00                       | 10,35                            | 0,225                              | 0,00  |
| <b>12</b>     | 7,3                                   | 9,13                          | 7,53                       | 10,35                            | 0,17                               | 21,55                                       |
| <b>24</b>     | 5,5                                   | 6,88                          | 8,40                       | 10,35                            | 0,074                              | 65,52                                       |
| <b>48</b>     | 4,2                                   | 5,19                          | 8,41                       | 10,35                            | 0,064                              | 70,26                                       |
| <b>72</b>     | 2,1                                   | 2,66                          | 9,64                       | 10,35                            | 0,041                              | 81,90                                       |

*Nota.* Elaboración propia.**Tabla 10***Balance general de la lixiviación en botella*

| <b>Tiempo</b> | <b>Consumo<br/>AgNO<sub>3</sub>ml</b> | <b>Cianuro<br/>Libre (gr)</b> | <b>consumo<br/>CN Kg/T</b> | <b>consumo<br/>NaOH<br/>Kg/T</b> | <b>Ley relave<br/>Au<br/>Oz/Tc</b> | <b>%<br/>Recuperación<br/>en botella</b> |
|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|
| <b>1</b>      | 8,0                                   | 10,00                         | 0,00                       | 10,35                            | 0,232                              | 0,00                                     |
| <b>1</b>      | 4,0                                   | 5,00                          | 2,53                       | 10,35                            | 0,232                              | 0,00                                     |
| <b>2</b>      | 4,8                                   | 6,00                          | 4,51                       | 10,35                            | 0,232                              | 0,00                                     |
| <b>4</b>      | 6,4                                   | 8,00                          | 5,52                       | 10,35                            | 0,232                              | 0,00                                     |
| <b>8</b>      | 7,2                                   | 9,00                          | 6,00                       | 10,35                            | 0,232                              | 0,00                                     |
| <b>12</b>     | 7,3                                   | 9,13                          | 7,53                       | 10,35                            | 0,182                              | 24,44                                    |
| <b>24</b>     | 5,5                                   | 6,88                          | 8,40                       | 10,35                            | 0,08                               | 67,11                                    |
| <b>48</b>     | 4,2                                   | 5,19                          | 8,41                       | 10,35                            | 0,069                              | 71,56                                    |
| <b>72</b>     | 2,1                                   | 2,66                          | 9,64                       | 10,35                            | 0,042                              | 81,78                                    |

*Nota.* Elaboración propia.

**Tabla 11***Lixiviación por agitación vs. lixiviación en botella*

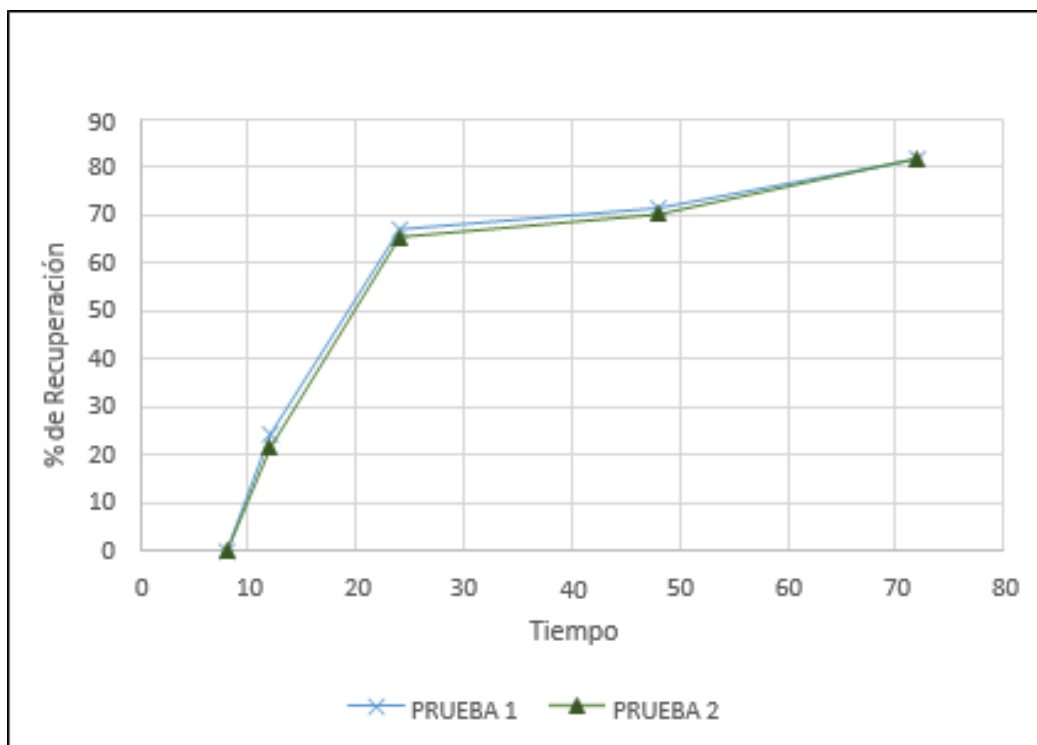
| <b>Tiempo</b> | <b>% Recuperación por agitación</b> | <b>% Recuperación en botella</b> |
|---------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| <b>1</b>      | 0,00                                | 0,00                             |
| <b>1</b>      | 0,00                                | 0,00                             |
| <b>2</b>      | 0,00                                | 0,00                             |
| <b>4</b>      | 0,00                                | 0,00                             |
| <b>8</b>      | 0,00                                | 0,00                             |
| <b>12</b>     | 21,55                               | 24,44                            |
| <b>24</b>     | 65,52                               | 67,11                            |
| <b>48</b>     | 70,26                               | 71,56                            |
| <b>72</b>     | 81,90                               | 81,78                            |

*Nota.* Elaboración propia.

En la figura 13 se puede observar el resultado de la lixiviación. A mayor tiempo hay una recuperación de 81,90 % en la lixiviación por agitación, mientras tanto, para la lixiviación en botella la recuperación es de un 81,78 %, a mayor tiempo la recuperación es mayor.

**Figura 13**

*Comparación de la recuperación de Au*

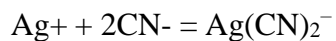


*Nota.* Elaboración propia.

## 8.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La determinación del cianuro libre (CN) comprende el ácido cianhídrico (HCN) y el ion cianuro (CN<sup>-</sup>) presentes en la solución y el cianuro total (CN), comprende el cianuro presente en la solución, en todas sus formas, incluyendo los cianuros estables (cianuros de hierro).

Por lo que, se utilizó el método para concentraciones de cianuro mayores de 5mg/l(ppm) en soluciones claras. La técnica trata por la reacción del nitrato de plata con el ion cianuro en solución alcalina que forma el complejo soluble Ag(CN)<sub>2</sub> según la reacción:

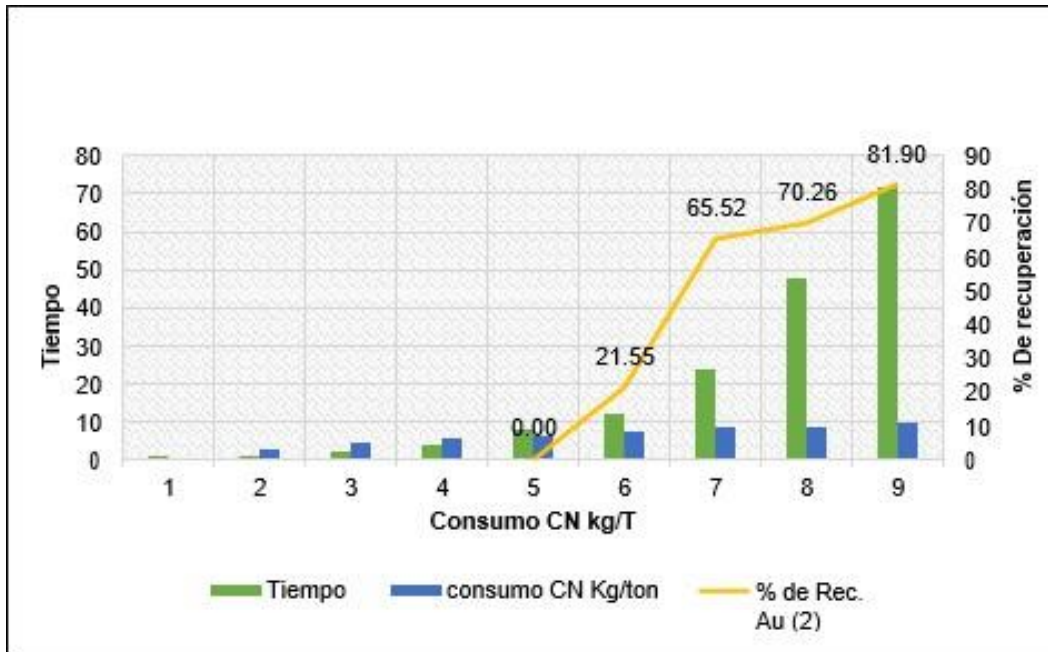


Cuando no hay más cianuro en solución, el exceso de plata precipita como  $\text{AgCN}$  o también puede reaccionar con el indicador (generalmente  $\text{IK}$ ) para formar  $\text{AgI}$ . Ya sea de los 2 casos, el punto final de la titulación lo proporciona la aparición de una turbidez permanente, blanca o amarillo claro. Con la ausencia de indicador y teniendo metales en solución, el método cuantifica el cianuro libre, los cianuros de zinc y una parte de los cianuros de cobre (<10%). Para evitar la sobreestimación del cianuro libre contenido en soluciones de cianuración con cobre, se necesita adicionar como indicador un mililitro de  $\text{KI}$  al 5 %, como en todas las técnicas de volumetría, se recomienda realizar la titulación tres veces y sacar un promedio de los resultados. En la titulación de soluciones en las que además de oro existe una gran diversidad de iones, se recomienda el uso del indicador yoduro de potasio.

En las pruebas realizadas a nivel de laboratorio en la lixiviación por agitación se determinó el consumo del  $\text{NaCN}$ , en la figura 14 se puede observar el % de recuperación todo esto en función del tiempo y el consumo del cianuro, por lo que, se puede decir que a mayor tiempo el porcentaje de recuperación es mayor y el consumo del cianuro es 9,67.

**Figura 14**

*Porcentaje de recuperación de Au en función al tiempo y consumo de reactivo en la lixiviación por agitación*



*Nota.* Elaboración propia.

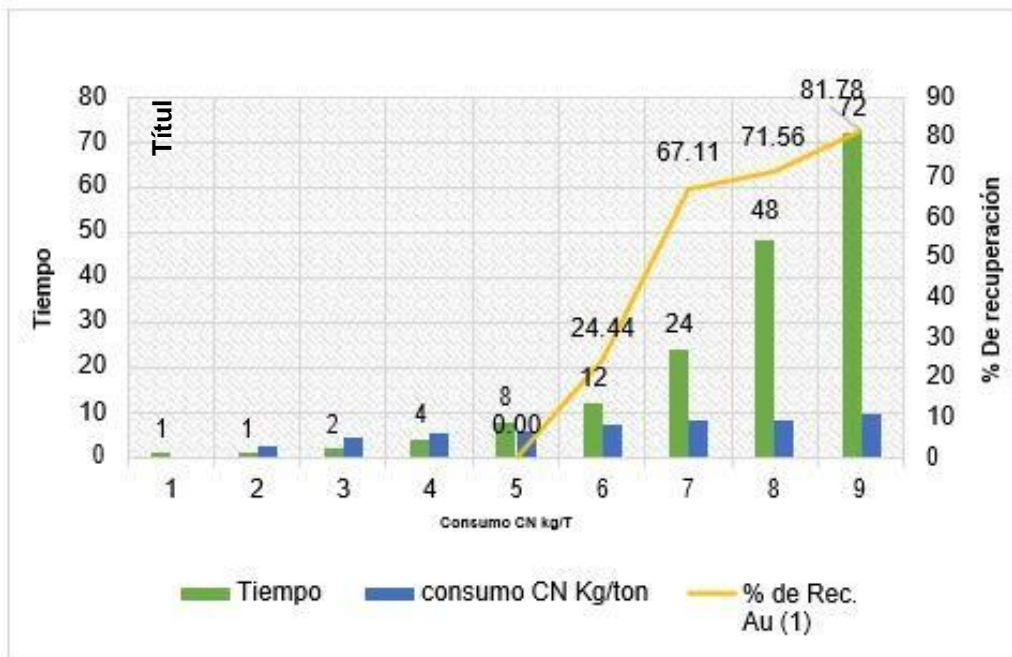
Como se puede observar en la figura 15, el más alto punto de extracción (81,90%) de oro se obtiene en la lixiviación por agitación, se debe a dos factores principales, la elevada concentración de cianuro (10000 ppm) y al tamaño reducido de las partículas (60 % a – 74  $\mu\text{m}$ ). La extracción más baja se logra con la cianuración por agitación (21,55 %), por el tiempo de lixiviación de 72 horas, lo cual, se determina por el tamaño grueso de las partículas, de +/- 6 pulg.

En las pruebas realizadas a nivel laboratorio en la lixiviación por agitación se determinó el consumo del NaCN, en la figura 15 se puede observar el % de recuperación todo esto en función del tiempo y el consumo del cianuro, por lo que, se puede decir que a mayor tiempo el porcentaje de recuperación es mayor y el consumo del cianuro es 9,64.

En lo que respecta a la ley de cabeza, las cabezas calculadas en la prueba delixiviación en botella presentan un valor más alto (0,232 g/TM).

**Figura 15**

*Porcentaje de recuperación de Au en función al tiempo y consumo de reactivo en la lixiviación en botella.*

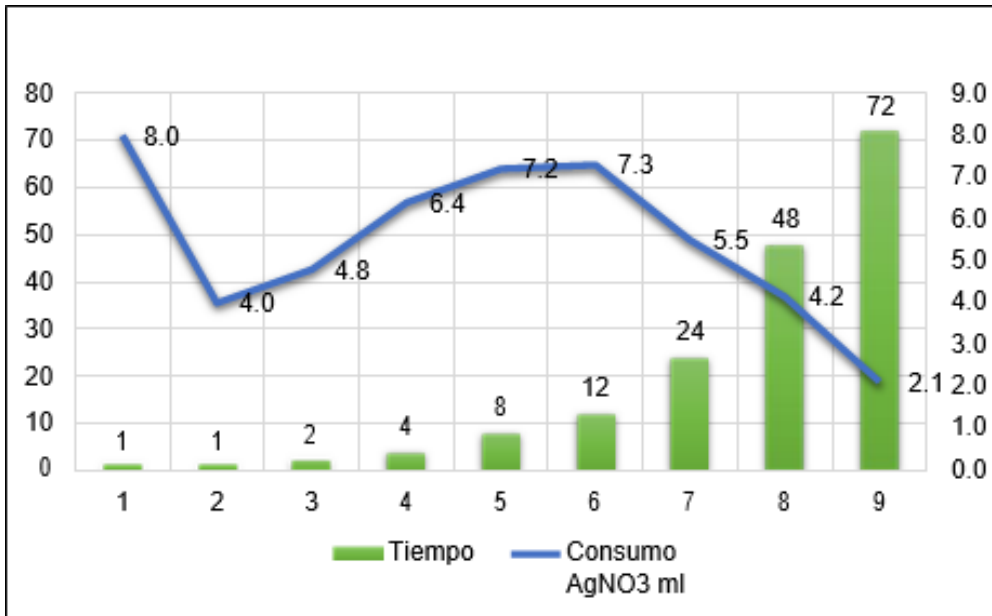


*Nota.* Elaboración propia.

En el proceso metalúrgico se debe controlar la cantidad de cianuro libre en la solución (que disuelve el oro) para comprobar la cantidad de cianuro libre en la solución se emplea el método de la titulación por nitrato de plata, en la figura 16 podemos mostrar el consumo del nitrato de plata, el cual, nos indica que a mayor tiempo de lixiviación el consumo es menor por lo que no interfiere en el porcentaje de recuperación del oro.

**Figura 16**

*Consumo de AgNO<sub>3</sub> en función del tiempo*



*Nota.* Elaboración propia.

El balance metalúrgico indica que la extracción durante la lixiviación en botella, durante un tiempo de 72 h, indica que la extracción fue 81,78 % y 81,90 % en la lixiviación por agitación que son valores muy aceptables, que principalmente se debe a la granulometría del 60 % a un tamaño menor a 74  $\mu\text{m}$ , teniendo un incremento en la recuperación del 0,12 % en la lixiviación por agitación.

## CONCLUSIONES

- Se determinó el consumo de reactivos para la lixiviación por agitación y lixiviación en botella, el más importante fue el cianuro libre ya que comprende el ácido cianhídrico (HCN) y el ión cianuro ( $\text{CN}^-$ ) presentes en la solución, también se determinó el consumo de NaCN dando como resultado para la lixiviación por agitación a un tiempo de 72 horas 9,67 kg/t de mineral, por otro lado, también se tiene el consumo de NaCN dio como resultado para la lixiviación en botella en un tiempo de 72 horas 9,64 kg/t de mineral.
- El estudio de la disolución del oro para lograr la recuperación óptima fue en la cianuración del mineral por agitación, que se obtiene una recuperación de oro 81,90%, y la recuperación en la lixiviación en botella fue de un 81,78 %, por un periodo de tiempo de 72 horas. Es decir, durante el proceso de optimización por lixiviación en botella, permite el mayor rendimiento en la recuperación de oro, mismos que se pueden observar en la figura 13.
- De acuerdo al balance dado en las tablas 9 y 10 se puede observar el balance metalúrgico obtenido de la tesis considerando el consumo de reactivo, tiempo de lixiviación y por último la recuperación.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda para los minerales sulfurados auríferos que se realice su respectiva mineralización de las muestras para poder identificar sus características que representarían limitaciones en procesos convencionales de cianuración.
- Se sugiere que dicho estudio se aplique al tamaño de partícula en el cual se desarrollará todo el proceso.
- Se deberá realizar un estudio de impacto ambiental de la zona destinada a fin de prevenir, corregir e informar acerca de los potenciales impactos ambientales negativos que pudieran perjudicar el estudio.
- De igual forma, se recomienda realizar pruebas a nivel piloto, con los resultados obtenidos de la presente tesis de grado, ejecutando los dos métodos de lixiviación.
- Realizar pruebas metalúrgicas comparativas con reactivos que puedan sustituir al cianuro, como por ejemplo el goldmax y sandios, porque se debe explorar alternativas que favorezcan al medio ambiente y sean más amigables a la naturaleza.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto, M. (2003). *Los delitos contra la administración pública en el código penal peruano, 2da ed.* Lima: Palestra Editores.
- Alguacil, F. J. (1995). El refinado del oro. *Revista Metalúrgica*, 182-191.
- Asalde Horna, R. M. (2010). *Optimización de un Proceso de Recuperación de Oro mediante.* Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Barazorda Cuellar, K. R. y Lima Condori, E. (2019). *Evaluación de la capacidad de adsorción de oro con carbón activado obtenido a partir de la cáscara de castaña.* Cuzco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cuzco.
- Cárdenas Oré, G. A. y Espinel Maque, H. (2016). *Diseño evaluativo y balance del proceso de.* Arequipa: Universidad Nacional San Agustín.
- Código Penal Peruano. (s.f.). Art. 388.
- De la Torre, E. y Guevara, A. (2006). *Tratamiento de minerales refractarios de oro.* Quito.
- Díaz, X., & Guevara, A. (2002). *Taller de cianuración, una alternativa a la amalgamación.* Quito.
- Flores, G. y García, J. (1982). *Manual de Prácticas Procesal en los Juicios por Peculado, 2º ed.* Quito.
- García, O. (1999). *El Delito de Malversación (apropiación, utilización temporal y administración desleal de caudales públicos).* Aranzadi.

- Gómez, A., Klose, W. y Rincón, S. (2010). *Carbón activado de cuesco de palma*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Habashi, F. (1999). *Textbook of Hydrometallurgy*. Canada: Quebec.
- Lázaro Yachachin, E. M. (2006). *Implementación de una planta de desorción presión de carbón activado y electrodeposición de oro de 6 toneladas*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- León, B. R. (2017). *“Eficiencia del método ecológico sin mercurio respecto al tradicional con mercurio en la extracción de oro en minería artesanal en Ollachea -Puno*. Obtenido de Universidad Nacional el Altiplano:  
[http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6409/Le%C3%B3n\\_Banegas\\_Ruth%20\\_Gabriela.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/6409/Le%C3%B3n_Banegas_Ruth%20_Gabriela.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Marsden, J. y House, L. (1992). *The chemistry of gold extraction*. Interdisciplinary Science Reviews.
- Misari, C. F. (2010). *Metalurgia del oro*. Lima: San Marcos.
- Misari, F. S. (1993). *Metalurgia del oro*. Lima: Universidad Nacional de San Marcos.
- Mularz, J. (2005). *Teoría de la Administración I: Paradigmas y debates en torno a la Reforma Administrativa*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos13/parde/parde.shtml#que>. 176
- Olaizo, I. (1999). *El delito de Cohecho*. Valencia.
- Paz Rubio, J. A. (1998). *Estudio de la implementación de adsorción en carbón en pulpa como*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Pazmiño, J. (2007). *Generalidades del carbón activado*.

Tómala Andrade, C. (2016). *Análisis de un sistema de adsorción y desorción de oro de carbón.*

Guayaquil: Escuela Superior politécnica Del litoral.

Varillas Sanchez, J. C. (2014). *Uso de resina AuRIX100 para optimizar la recuperación del oro*

*de.* Huancayo: Universidad del Centro del Perú.