



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**“DISEÑO DE PRE-TRATAMIENTO ALCALINO PARA PROCESO DE  
CIANURACIÓN DE ORO DESDE CONCENTRADOS DE FLOTACIÓN DE  
MENAS REFRACTARIAS”**

### **PROYECTO DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

### **INGENIERO DE MINAS**

Presentado por:

**CESAR EMILIO COELLO TORRES**

GUAYAQUIL – ECUADOR  
2017

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres Cesar y Karina quienes me han apoyado y estuvieron ahí cuando más los necesité, quienes se sacrificaron por darme una educación de excelencia.

A mi esposa Katherine, quién siempre ha estado a mi lado brindándome todo su amor.

A mi hija Charlotte, quién es la motivación y la felicidad de mis días.

A toda mi gran familia que de una u otra forma me dieron su mano para poder llegar a esta meta.

Cesar Emilio Coello Torres

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la compañía ORENAS S.A. por permitirme realizar este proyecto en sus instalaciones, pero en especial al Ing. Wilfrido Rodríguez y al personal del área de Laboratorio por la ayuda brindada.

A la ESPOL, y a los profesores que me han ayudado a crecer profesionalmente.

Al Dr. Eduardo Recalde por su valiosa recomendación en la orientación de mi tema de Proyecto de Grado.

Y un agradecimiento especial para mi familia y amigos que me apoyaron en todo momento.

Cesar Emilio Coello Torres

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Eduardo Luis Recalde Chiliza, PhD.  
DIRECTOR DE MATERIA INTEGRADORA

---

Juan Carlos Pindo Macas. Ing.  
MIEMBRO EVALUADOR

---

Paúl César Carrión Mero, PhD.  
MIEMBRO EVALUADOR

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me/nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral"

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

---

Cesar Emilio Coello Torres

## RESUMEN

El problema principal a tratar en este proyecto es la baja recuperación de oro que tiene el proceso convencional de cianuración, a este tipo de material se lo denomina *refractario*. Este término es aplicado a menas de oro que no son totalmente susceptibles a la cianuración convencional, principalmente porque el oro es ultrafino que es imposible liberar moliendo o contiene minerales que son perjudiciales al proceso.

Realizando un análisis mineralógico se determinó la presencia predominante de arsenopirita llegando a observar oro asociado a este mineral, en pequeñas cantidades se observa pirita y pirrotina. El material utilizado es proveniente del proceso de concentración.

Una oxidación alcalina de la arsenopirita utilizando hidróxido de sodio (NaOH) fue aplicado para aumentar la extracción de oro, mediante la acomplejación del arsénico con iones oxidrilo, alterando la matriz arsenopirítica que encapsula al oro.

El pretratamiento alcalino se realizó a condiciones estándar de presión y temperatura, evaluando tres variables: la concentración de NaOH (0.3-9 M), el porcentaje de sólidos (5-33 %) y el tiempo de agitación (6-48 H). Después

de aplicar el pretratamiento se realizó el ensayo de cianuración convencional para cuantificar la cantidad de oro cianurable.

Se tiene una recuperación de oro del 26.9%, después de aplicar el pretratamiento alcalino la recuperación subió hasta el 62.5% utilizando cianuro como agente lixivante. Con este resultado quedó demostrado que este es un excelente tratamiento para oro que se encuentra encapsulado dentro de la arsenopirita.

**PALABRAS CLAVE:** Cianuración – Arsenopirita – Refractariedad - Lixiviación

# ÍNDICE GENERAL

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>i</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>ii</b>
<b>TRIBUNAL DE GRADUACIÓN</b> .....	<b>iii</b>
<b>DECLARACIÓN EXPRESA</b> .....	<b>iv</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>v</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Antecedentes</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2. Definición del problema</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3. Hipótesis</b> .....	<b>5</b>
<b>1.4. Objetivos</b> .....	<b>6</b>
1.4.1. Objetivo principal _____	6
1.4.2. Objetivos secundarios _____	6
<b>1.5. Justificación y alcance</b> .....	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>8</b>
<b>MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1. Marco teórico</b> .....	<b>9</b>
2.1.1. Elección de una ruta de procesamiento _____	9
2.1.2. Factores que afectan a la metalurgia extractiva del oro _____	10
2.1.3. Menas de oro refractarias _____	13
2.1.4. Pretratamientos más comunes _____	15
2.1.5. Pretratamiento de menas refractarias arsenopiríticas con iones OH- _____	15
<b>2.2. Metodología y estructura de la investigación</b> .....	<b>16</b>
2.2.1. Estudios de lixiviación _____	17
2.2.3. Reactivos e insumos _____	25
2.2.4. Condiciones de lixiviación _____	26
2.2.5. Variables y parámetros _____	26

2.2.6. Tratamiento de relaves .....	27
<b>2.3. Equipos de análisis y de control .....</b>	<b>27</b>
2.3.1. Equipos para estudios de lixiviación .....	27
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>32</b>
<b>RESULTADO Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1 Resultados .....</b>	<b>33</b>
3.1.1. Caracterización de la muestra .....	33
3.1.2. Resultados experimentales de la aplicación del pretratamiento alcalino .....	37
3.1.3. Efectos de las variables en la recuperación de oro .....	38
<b>3.2. Discusión de los resultados .....</b>	<b>41</b>
3.2.1. Análisis mineralógico .....	41
3.2.2. Efecto de las variables en la recuperación de oro .....	43
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>45</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1. Conclusiones .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2. Recomendaciones .....</b>	<b>46</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>48</b>

## ABREVIATURAS

AAS      Espectrometría de Absorción Atómica

## SIMBOLOGÍA

OH <sup>-</sup>	Anión hidróxido
gr ton <sup>-1</sup>	gramos por tonelada
NaOH	Hidróxido de sodio
µm	Micrómetro
Kg	Kilogramo
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> / t	Ácido sulfúrico por tonelada
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Trióxido de azufre
Na <sub>2</sub> S	Sulfuro de Sodio
NaHS	Hidrosulfuro de sodio
°C	Grados centígrados
g/L	Gramos por litro
ml	Mililitro
N	Concentración normal
M	Concentración molar
NaCN	Cianuro de sodio
rpm	revoluciones por minuto
T	Tiempo

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Elección de una ruta de procesamiento mineral.....	10
<b>Figura 2.2:</b> Diagrama de flujo de la línea de investigación.....	17
<b>Figura 2.3:</b> Concentrado refractario de oro apelmazado antes del secado...18	
<b>Figura 2.4:</b> Horno de secado Carbolite serie AX.....	28
<b>Figura 2.5:</b> Cuarteador.....	29
<b>Figura 2.6:</b> Analizador de partículas por difracción laser HORIBA LA-300 ...	29
<b>Figura 2.7:</b> Equipo de espectrofotometría de absorción atómica Buck Scientific modelo 210 VGP. ....	31
<b>Figura 2.8:</b> Agitador artesanal. ....	32
<b>Figura 3.1:</b> Curva granulométrica de la muestra.....	21
<b>Figura 3.2:</b> En la fotografía de la izquierda se muestra como se ve el mineral desde el microscopio mineragráfico. En la imagen de la derecha se observan claramente minerales como la arsenopirita (apy), esfalerita (sf), pirita (pi), pirrotina (po) y oro (Au). ....	35
<b>Figura 3.3:</b> En la imagen de la izquierda se observa la muestra tal como se ve desde un microscopio mineragráfico. En la imagen de la derecha se identifican minerales como la pirita (pi), arsenopirita (apy), esfalerita (sf), cuarzo (qtz) y oro (Au).....	36
<b>Figura 3.4:</b> Efecto del porcentaje de sólidos en la recuperación de oro.....	25
<b>Figura 3.5:</b> Efecto del tiempo de agitación la recuperación de oro.....	25
<b>Figura 3.6:</b> Efecto de la concentración molar de NaOH en la recuperación de oro.....	26

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I:</b> Clasificación de menas refractarias .....	14
<b>Tabla II:</b> Carga de reactivos para ensayo al fuego.....	20
<b>Tabla III:</b> Condiciones de operación .....	23
<b>Tabla IV:</b> Reactivos utilizados.....	23
<b>Tabla V:</b> Reactivos a emplear en la metodología del proyecto .....	25
<b>Tabla VI:</b> Condiciones experimentales de lixiviación.....	27
<b>Tabla VII:</b> Composición mineralógica antes y después del pretratamiento alcalino .....	23
<b>Tabla VIII:</b> Datos de material de cabeza.....	23
<b>Tabla IX:</b> Resultados obtenidos después de aplicar el pretratamiento alcalino.....	24

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

En el Ecuador existen yacimientos auríferos en donde el oro se encuentra asociado principalmente al cuarzo y a sulfuros de cobre, hierro y arsénico como pirita, calcopirita, pirrotita y arsenopirita. En ciertas menas, existe un encapsulamiento del oro en la arsenopirita que lo vuelve refractario, por lo que al realizar una lixiviación con cianuro de este mineral se obtienen recuperaciones muy bajas, que hace inviable económicamente este proceso. (Morales, 2011)

La mineralización del distrito de Ponce Enríquez, consiste de fracturas rellenas de cuarzo, arsenopirita masiva, calcopirita, esfalerita y pirrotina.(Nuñez del Arco, 1983) (Holguín Ruiz, 1999)

Se denominan minerales refractarios, a aquellos que no permiten conseguir valores rentables de recuperación de oro por el método convencional de cianuración. (Mesa Espitia & Lapidus, 2015)

La naturaleza de la refractariedad en las menas del sector de Ponce Enríquez, en teoría se podría pensar que se debe a un encapsulamiento físico, ya que este tipo de oclusión es común en menas portadoras de sulfuros tales como pirita y arsenopirita.(Morales, 2011)

Existe ocurrencia de sulfuros como arsenopirita y pirita, los cuales confinan al oro en sus redes cristalinas. A nivel general, la asociación oro-arsenopirita es

el segundo sulfuro que se encuentra asociado al oro después de la pirita.(Loy & Mariño, 2016)

Existen varios métodos para el procesamiento de minerales refractarios auríferos, que solo son aplicados en países que cuentan con empresas mineras con tecnología accesible y grandes capitales. Entre los métodos que actualmente se conocen tenemos la tostación oxidante, oxidación química, oxidación a presión y la biolixiviación, los cuales son un pretratamiento para una lixiviación posterior. (Borja & Moreno, 2015)

El Ecuador a pesar de no ser un país de gran desarrollo minero, en donde el 94% de la producción nacional de oro proviene de la pequeña minería y el 6% restante de la minería artesanal (Mackenzie, 2013), ha obligado a las empresas de procesamiento mineral a investigar sobre tratamientos químicos disponibles y cómo aplicarlos en sus procesos para optimizar la extracción de oro.

### **1.1. Antecedentes**

Varias empresas de beneficio mineral, ubicadas en el sector de Ponce Enríquez, han invertido en investigación y aplicación del método de biolixiviación de minerales sulfurados, en la cual al mineral se lo oxida mediante bacterias. Este método pretende liberar el oro asociado a minerales

refractarios para posteriormente ser recuperado por el método de cianuración convencional. (Li, 2009). El gran problema de esta técnica es el tiempo de reacción, ya que es considerablemente mayor que el normalmente requerido. (Mesa Espitia & Lapidus, 2015)

En una pila de una empresa del sector, las bacterias tienen un tiempo de reacción aproximado de 100 días llegando a recuperar hasta 60 gr ton-1 donde antes se lixiviaba como máximo 1 gr ton-1. Aunque estos resultados suenan alentadores el excesivo tiempo de espera vuelve inviable económicamente este proceso, así como actualmente se lo está trabajando.

Otro pretratamiento de minerales refractarios que se ha investigado y aplicado en el país es la Tostación Oxidante, este estudio lo llevo a cabo la Escuela Politécnica Nacional en la mina Torata ubicada en la provincia de El Oro obteniendo recuperaciones de hasta el 99.5% de oro. (Morales, 2011) Pero el gran problema de esta técnica es la contaminación que produce, ya que libera gran cantidad de gases de arsénico y azufre, difíciles de tratar y las leyes ambientales actuales lo prohíben.

## **1.2. Definición del problema**

Ciertas menas auríferas del sector de Camilo Ponce Enríquez y del Ecuador, contienen minerales que encapsulan al oro convirtiéndolas en menas

refractarias y por lo tanto el proceso de cianuración convencional no es rentable económicamente. (Morales, 2011)

Las menas ricas en oro grueso y oro cianurable se encuentran cada vez más escasas. Por esto actualmente las empresas de procesamiento mineral se dedican principalmente a la venta de concentrados auríferos. (Borja & Moreno, 2015)

En el país existe poca investigación sobre métodos para el tratamiento de menas auríferas refractarias, provocando bajos ingresos económicos a empresas con este tipo de menas.

Se va a implementar un proceso a escala laboratorio como pretratamiento alcalino de menas refractarias arsenopiríticas, para liberar el oro ultrafino y encapsulado y facilitar la lixiviación con cianuro.

### **1.3. Hipótesis**

Mediante la aplicación de un **pretratamiento alcalino** previa cianuración, se **recuperará hasta el 60% de oro** en arenas refractarias proveniente del proceso de concentración.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo principal**

- ❖ Experimentar la aplicación de un pretratamiento químico mediante un ataque alcalino con iones  $\text{OH}^-$ , en concentrados de flotación de menas refractarias, capaz de liberar la partícula de oro que se encuentra encapsulada en el mineral arsenopirita, para optimizar la recuperación de oro en el proceso posterior de cianuración.

### **1.4.2. Objetivos secundarios**

- ❖ Identificar minerales y asociaciones mineralógicas en muestras antes y después de aplicar el pretratamiento, mediante microscopía óptica en secciones pulidas.
- ❖ Determinar la cantidad de oro total y oro cianurable mediante el ensayo al fuego y el ensayo de cianuración en botellas respectivamente.
- ❖ Analizar los efectos provocados en la recuperación de oro modificando las variables: concentración molar de NaOH, porcentaje de sólidos y tiempo de agitación.

- ❖ Determinar la cantidad de oro cianurable mediante el ensayo de cianuración en botellas al material después de aplicar el pretratamiento.

### **1.5. Justificación y alcance**

Como consecuencia de la baja en el precio del oro en los últimos años, las empresas se han visto en la necesidad de optimizar la extracción de oro en sus procesos. La presencia de menas refractarias, en las vetas del sector de Ponce Enríquez dificultad el contacto entre el cianuro y el oro.

Al mercado nacional han llegado empresas chinas que se dedican a la compra de concentrados de oro. Estas empresas solo pagan hasta un cierto porcentaje del contenido total de oro en el concentrado y las cuales deben cumplir unas ciertas características y condiciones sino se aplica un castigo al valor negociado.

Por tal motivo la importancia de este proyecto, para generar datos a escala de laboratorio para una futura aplicación en un proceso industrial, que incrementaría la extracción de oro aumentando las ganancias a las empresas metalúrgicas, y los cuales podrían ampliar plazas de trabajo para controlar este nuevo proceso.

Con este proyecto se espera desarrollar un pretratamiento químico para optimizar la recuperación de oro en arenas refractarias provenientes del proceso de concentración.

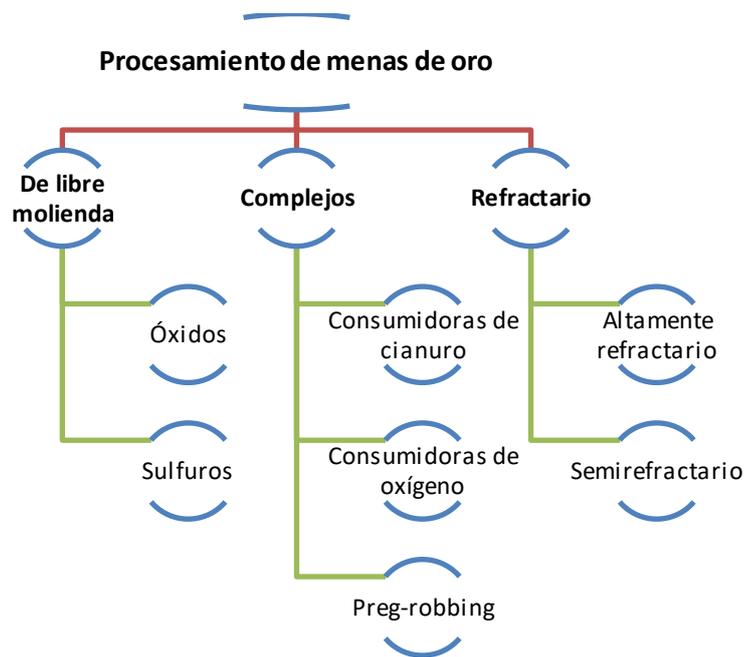
## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA**

## **2.1. Marco teórico**

### **2.1.1. Elección de una ruta de procesamiento**

En general, las menas de oro se pueden clasificar como "de libre molienda", "complejas" o "refractarias", como se ilustra en la Figura 1.1. Los minerales de libre molienda (tamaño 80% <75  $\mu\text{m}$ ) dan una recuperación de oro >90% con entre 20 y 30 horas de lixiviación convencional con cianuro. Una cantidad suficiente de cianuro se añade para dejar una concentración de entre 100 y 250 ppm a alrededor de pH 10, al final de la lixiviación. Menas que no proporcionan la recuperación económica del oro con la cianuración convencional se denominan refractarios (Swash, 1988) (Los minerales que dan una recuperación económica de oro aceptable sólo con el uso de requerimientos de cianuro u oxígeno significativamente más altos se denominarán "complejos", mientras que el término "refractario" se usará cuando la adición de un mejor reactivo dé todavía una baja recuperación de oro). (La Brooy, Linge, & Walker, 1994)



**Figura 2.1:** Elección de una ruta de procesamiento mineral. Fuente: (La Brooy et al., 1994)

### 2.1.2. Factores que afectan a la metalurgia extractiva del oro

Los principales factores mineralógicos que afectan a la metalurgia extractiva del oro se discuten brevemente a continuación. (Zhou, Jago, & Martin, 2004)

**Tamaño del Grano de Oro:** El tamaño de grano del mineral de oro puede ser un factor significativo que impulsa la eficiencia de los procesos de recuperación de oro. El oro grueso puede estar incompletamente lixiviado (o puede quedar atrapado por el circuito de cianuración), o no llevado por burbujas en flotación. El oro ultra fino no es bien recuperado por

técnicas de gravedad o flotación. Cuando el oro es muy fino ( $<10 \mu\text{m}$ ) y asociados con minerales de sulfuro, el rendimiento de cianuración puede también ser pobre. Encapsulación de oro visible en sulfuros y silicatos, es una causa común de pérdidas de oro.

**Oro submicroscópico:** El oro submicroscópico, descrito con anterioridad, es una significativamente fuente de oro perdido de muchas operaciones de cianuración. Los sulfuros de grano más finos suelen contener las concentraciones más altas de oro en solución sólida. En consecuencia, el problema es a menudo exacerbado por la pobre liberación de oro ultra fino alojado en sulfuros.

Los **revestimientos o películas** afectan principalmente a la extracción de oro por flotación y cianuración. Estos revestimientos o películas pueden ser óxidos o hidróxidos de hierro (limonita o goethita), los cuales están formados por reacciones de oxidación, disolución y precipitación. Además, los iones sulfuro reaccionan con el oro para formar sulfuro auroso insoluble. Similar pasivación puede ocurrir en la presencia de iones tioarsenita y tioantimonita.

**Plata en minerales de oro.** Salvo que ocurran como minerales de plata, la plata en las menas de oro a menudo está presente en electrum, y ocasionalmente en kustelite. El electrum rico en plata y la kustelita se

empañan rápidamente en el aire y forman una capa de sulfuro de plata de 1-2  $\mu\text{m}$  de grosor en presencia de iones sulfuro, lo que puede limitar el acceso a la solución de cianuro. Tales revestimientos son algo hidrófilos, particularmente si se produce una oxidación adicional a sulfato de plata o óxido de plata. Esto puede obstaculizar la recuperación mediante flotación.

**Telururos de oro, aurostibita y maldonita.** Estos se consideran generalmente refractarios debido a su naturaleza de disolución lenta en soluciones de cianuro.

**Presencia de consumidores de cianuro y oxígeno.** Muchas menas de oro contienen minerales que reaccionan en solución de cianuro, consumen oxígeno o cianuro o ambos, e influyen negativamente en la tasa o extensión de la lixiviación del oro. Los minerales interferentes más comunes son los sulfuros de hierro, arsénico, antimonio, cobre, zinc y telurio.

**Mineralogía de la ganga.** Esto toma varias formas:

- El cuarzo y muchos minerales de silicato son esencialmente inertes pero pueden disolverse en cierta medida en condiciones muy ácidas, como las encontradas en la bio-oxidación, para formar un silicato gelatinoso que puede recubrir superficies de oro expuestas y es difícil

de filtrar. La clorita es soluble en ácido sulfúrico y forma productos que son típicamente difíciles de filtrar.

- Los carbonatos reaccionan fácilmente con ácido sulfúrico para formar los respectivos sulfatos, por ejemplo, yeso y sulfato de magnesio. Estas reacciones a menudo consumen una cantidad significativa de ácido. Por ejemplo, 1% de caliza en un mineral requiere 10 kg de  $H_2SO_4$  / t de mineral. Los productos de reacción de la descomposición de carbonatos también pueden causar problemas aguas abajo con viscosidades de suspensión incrementadas, revestimientos sobre superficies de oro expuestas y acumulación de incrustaciones en tuberías y reactores.
- Materia carbonosa y otros materiales pueden reducir la extracción de oro durante la lixiviación de cianuro por adsorción de oro disuelto de la solución preñada, como se ha descrito anteriormente. Otros materiales identificados como adsorbentes de oro son pirofilita y pizarras.

### **2.1.3. Menas de oro refractarias**

La recuperación de metales preciosos de menas refractarias ha sido ampliamente investigada debido al agotamiento de los depósitos de los cuales puede ser fácilmente lixiviada. (Auríferos, Arce, Falcón, Santibañez, & Dávila, 2005) Existen numerosas causas y grados de comportamiento

refractario: presencia de materia carbonosa, películas pasivantes, partículas de oro finamente diseminadas en solución sólida con la matriz y oro ultra fino encapsulado. (Mesa Espitia & Lapidus, 2015)

La mineralogía mineral determina el grado de refractariedad y puede clasificarse como se muestra en la Tabla I. (La Brooy et al., 1994)

**Tabla I:** Clasificación de menas refractarias

Recuperación	< 50%	Altamente refractario
Recuperación	50-80%	Moderadamente refractario
Recuperación	80-90%	Medianamente refractario
Recuperación	90-100%	Sin refractariedad (De libre molienda)

**Fuente:** (La Brooy et al., 1994)

Una causa muy común de refractariedad es la diseminación de inclusiones de grano fino o submicroscópico de oro dentro de minerales de sulfuro como arsenopirita y pirita. Tales minerales requieren un proceso de pretratamiento para alterar o destruir la matriz de sulfuro y hacer que el oro sea accesible al cianuro y al oxígeno. El oro en alto contenido de azufre y arsénico, se encapsula como partículas de grano fino en la estructura cristalina de la matriz mineral, lo que hace que el metal sea inaccesible para el agente de lixiviación. (Li, 2009)

#### **2.1.4. Pretratamientos más comunes**

Para lograr una recuperación satisfactoria, se requiere una etapa de pretratamiento oxidativo (Carrillo, n.d.) para descomponer o al menos para modificar la matriz de sulfuro y liberar los metales preciosos antes de aplicar cualquier tratamiento convencional. (Li, 2009)

Las técnicas más comunes incluyen pre-aireación, tostado, oxidación a alta presión y oxidación biológica. (García & Freire, 2015) Sin embargo, estos procesos de pre-lixiviación tienen desventajas, tales como la generación de  $\text{SO}_2$  y  $\text{As}_2\text{O}_3$  en tostado, altos costos de inversión para operaciones de alta presión o períodos prolongados de tiempo e inhibición del crecimiento bacteriano por la presencia de arsénico en procesos biológicos. (Mesa Espitia & Lapidus, 2015)

#### **2.1.5. Pretratamiento de menas refractarias arsenopiríticas con iones $\text{OH}^-$**

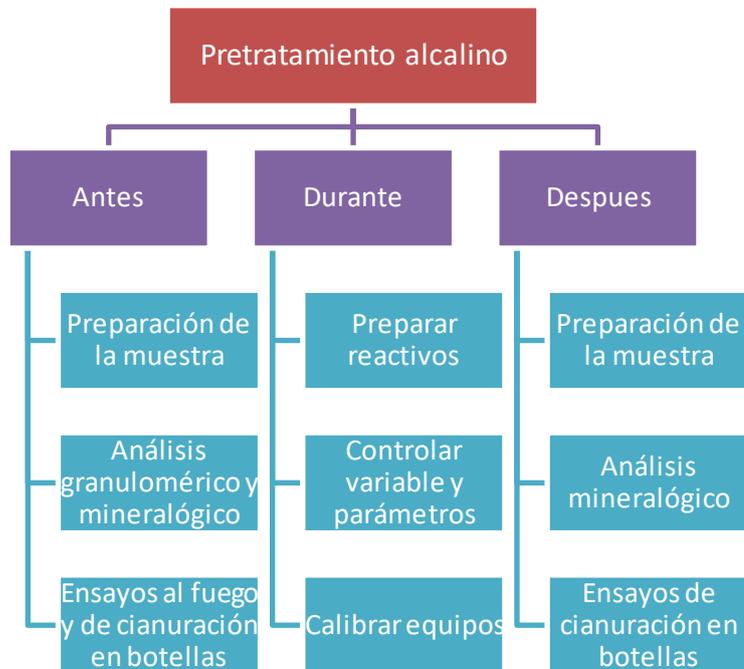
El oro se encapsula frecuentemente en la arsenopirita. Algunos pretratamientos alcalinos se han ensayado para menas de antimonio y concentrado mostrando que la extracción depende fuertemente de las concentraciones de azufre e hidróxido, temperatura y el tiempo de reacción. (Mesa Espitia & Lapidus, 2015)

Se puede lixiviar arsénico y antimonio con  $\text{Na}_2\text{S}$  y  $\text{NaOH}$  recuperando hasta el 63% de antimonio y 87% de arsénico. Se obtiene una eliminación más alta de arsénico (95%) utilizando  $\text{NaHS}$  a  $95^\circ\text{C}$ .(Mesa Espitia & Lapidus, 2015)

El principal atractivo de este pretratamiento alcalino es el bajo potencial requerido para oxidar la arsenopirita en medio alcalino (Figura 1.2). La arsenopirita es estable bajo condiciones de reducción, por lo tanto la transformación que ocurre durante la oxidación del mineral es una importante parte del mecanismo que conduce la liberación del oro (Mesa Espitia & Lapidus, 2015)

## **2.2. Metodología y estructura de la investigación**

En la figura 2.2, se muestra un diagrama de flujo para la realización de este proyecto, se muestran las actividades que se desarrollarán antes, durante y después de aplicar el pretratamiento alcalino al material refractario.



**Figura 2.2:** Diagrama de flujo de la línea de investigación.

## 2.2.1. Estudios de lixiviación

### 2.2.1.1. Preparación de la muestra

El material utilizado proviene del proceso de concentración por flotación de una planta metalúrgica ubicada en el cantón Ponce Enríquez.

La preparación de la muestra comienza secando el concentrado refractario de oro en un horno de secado a 35°C por 4 días, (Se elige

una baja temperatura para evitar una oxidación) luego este material se disgrega cuidadosamente sin llegar a sobre moler. Se toman muestras representativas usando la técnica de cuarteo de mineral para obtener muestras homogéneas.

Las muestras obtenidas se utilizan para la realización de ensayo al fuego, ensayo de cianuración en pomas, tratamiento alcalino y para el análisis mineralógico.



**Figura 2.3:** Concentrado refractario de oro apelmazado antes del secado.

## **2.2.1.2. Caracterización de la muestra**

### **2.2.1.2.1. Análisis granulométrico**

Se realiza un análisis granulométrico para establecer el  $D_{80}$  de la muestra. Para este análisis se utiliza un analizador de partículas por difracción laser.

#### **2.2.1.2.2. Análisis mineralógico**

Se realiza un análisis mineralógico en secciones pulidas para identificar minerales asociados al oro y determinar la composición mineralógica del material a utilizar.

Se toman fotografías en las secciones pulidas del material visto desde un microscopio mineragráfico, para, una vez identificado todos los minerales presentes, medir su área y expresar su ocurrencia en forma de porcentaje con respecto al área total de la fotografía.

Este análisis se realiza en muestras antes y después de haber aplicado el pretratamiento alcalino.

#### **2.2.1.2.3. Pruebas de ensayo al fuego**

Se trata de un concentrado aurífero sulfuroso y por lo tanto se procede a determinar las cargas fundentes y agentes oxidantes y reductores respectivas. Como fundentes se utiliza litargirio y carbonato de sodio, los ácidos fueron sílice y bórax, este último se utiliza para evitar la pérdida de finos, como agente reductor se utiliza nitrato de potasio.

A continuación, en la Tabla II, se presenta la carga utilizada para la realización del ensayo al fuego con 5 gramos de concentrado.

**Tabla II:** Carga de reactivos para ensayo al fuego

Reactivo	Peso (g)
Litargirio (plomo)	1650
Carbonato de sodio	750
Sílice	50
Bórax	500

### Procedimiento

1. Se realiza un cuarteo del concentrado para obtener 5 gramos de muestra.
2. Se mezcla toda la carga fundente (Se utiliza 60 gramos de carga fundente por crisol).
3. Se mezcla 60 gramos de carga fundente con los 5 gramos de concentrado y también 4 gramos de nitrato de potasio (Este último para agrandar el regulo de plomo), y posteriormente se coloca en el crisol.
4. Se coloca 4 ml de nitrato de plata (6.3 g/L), esto para agrandar el doré y sea visible.

5. Finalmente se coloca 15 gramos de bórax como capa para evitar pérdida de finos.
6. El crisol se lo lleva al horno y se funde por 30 minutos.
7. Se retira el crisol del horno y se vierte el material fundido en la lingotera y se deja enfriar. Paralelamente se coloca las copelas en el horno por 15 minutos.
8. Luego que el crisol se enfría se separa la escoria del regulo de plomo y se coloca este último en una copela y se coloca en el horno.
9. Finalmente queda solo el doré, y se procede a realizar el ataque ácido.

### **Ataque ácido**

1. Al doré se lo muele suavemente para que el ácido reaccione más rápido.
2. Se coloca el doré en un vaso de precipitados y se lo lava con agua destilada.

3. Posteriormente se añade 4 ml de ácido nítrico 15.8 N y se calienta a aproximadamente a 70°C por 5 minutos (el ácido disuelve la plata y queda solo polvo de oro como sólido)
4. Se deja reposar la solución por 5 minutos para que las partículas de oro se asienten y se lava con agua destilada.
5. Luego se disuelve las partículas de oro con agua regia (ácido nítrico y ácido clorhídrico, 1:3) calentándolo por 5 minutos.
6. Se deja enfriar y se vierte la solución en una probeta y se enrasa con ácido clorhídrico al 10% hasta 25 ml.
7. Finalmente se hace lectura de oro total en el equipo de Espectrometría de Absorción Atómica (AAS).

#### **2.2.1.2.4. Pruebas de cianuración en botellas**

Se realizan pruebas de cianuración en botellas para determinar la cantidad de oro cianurable y así establecer la recuperación de oro que se obtendría con una cianuración convencional.

En las tablas III y IV se muestran respectivamente las condiciones de operación y reactivos utilizados para estas pruebas.

**Tabla III: Condiciones de operación**

<b>Peso de la muestra</b>	1 kilogramos
<b>Volumen de agua</b>	2 Litros
<b>Porcentaje de sólidos</b>	33.3%
<b>pH</b>	12
<b>Tiempo de cianuración</b>	15 horas

**Tabla IV: Reactivos utilizados**

<b>Reactivos</b>	<b>Uso</b>
Cal	Controlar el pH
Cianuro de sodio	Disolver el oro
Nitrato de plata (1.2 g/L)	Valorante en titulación
Yoduro de potasio (10%)	Indicador en titulación

### **Procedimiento**

1. Se realiza un cuarteo de la muestra general de concentrado de oro y se toman 3 muestras de 1 kilogramo cada una.
2. Se etiquetan 3 botellas, en donde se realizan las pruebas de cianuración y se colocan las muestras y 2 litros de agua en cada una de ellas.

3. Se agregan 3 gramos de cal en cada botella para subir el pH hasta 12, se agita por 20 minutos hasta disolver toda la cal y se verifica el pH.
4. Para comenzar el ensayo de cianuración, inicialmente se agregan 3 gramos de NaCN en cada botella y se colocan en el agitador a 100 rpm.
5. Después de 15 minutos se retiran 20 ml de solución de cada botella y se procede a filtrar.
6. Con una pipeta se toman 5 ml de cada muestra filtrada y se lleva a titular para determinar la concentración de cianuro libre y la cantidad de cianuro de sodio que se debe adicionar para mantener la concentración inicial.
7. Otros 10 ml de los 20 ml de muestra filtrada se llevan a realizar lectura en un equipo de AAS para determinar la concentración de oro cianurable.
8. Se toman de la misma forma 20 ml de muestra a los 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 4, 6, 8 10, 12 y 15 horas y se repiten los pasos 5, 6 y 7.

9. A las 15 horas se detiene la agitación, y el material presente en cada botella se vierte en recipientes para ser llevados a un horno de secado.

10. Luego del secado, se toma la cantidad necesaria de muestra para realizar un ensayo de fuego para determinar el oro presente en las colas.

### 2.2.3. Reactivos e insumos

Los reactivos que se utilizaron durante todo el desarrollo del proyecto se muestran en la tabla 2.5. Se utilizaron soluciones a diferentes concentraciones de los agentes químicos, algunos reactivos son de grado analítico (Merck Suprapure grade) y otros de grado comercial.

**Tabla V:** Reactivos a emplear en la metodología del proyecto

Reactivo	Fórmula química	Peso Molecular (g/mol)	Pureza (%)
<b>Ensayo al fuego</b>			
<b>Litargirio</b>	PbO	223.2	-
<b>Carbonato de sodio</b>	NaCO <sub>3</sub>	105.98	-
<b>Sílice</b>	SiO <sub>2</sub>	60.08	-
<b>Bórax</b>	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O	381.4	-
<b>Nitrato de potasio</b>	KNO <sub>3</sub>	101.1	98.00
<b>Nitrato de plata</b>	AgNO <sub>3</sub>	169,87	99.80
<b>Agua destilada</b>	H <sub>2</sub> O	18	-
<b>Acido nítrico</b>	H <sub>3</sub> NO <sub>3</sub>	63.01	99,00

<b>Ácido clorhídrico</b>	HCl	36.46	98,00
<b>Ensayo de cianuración en botellas</b>			
<b>Cal</b>	CaO	56.00	90.00
<b>Cianuro de sodio</b>	NaCN	49.00	98.00
<b>Nitrato de plata</b>	AgNO <sub>3</sub>	169.87	99.80
<b>Yoduro de potasio</b>	KI	166.00	99.00
<b>Pretratamiento alcalino</b>			
<b>Hidróxido de sodio</b>	NaOH	39.99	98.00

#### 2.2.4. Condiciones de lixiviación

El pretratamiento se lo realiza a condiciones normales de presión y temperatura. En el ensayo de cianuración en botellas, todas las pruebas son realizadas con una dosis estándar de 3 gramos de cal y 8 gramos de cianuro de sodio y un tiempo de agitación de 15 horas.

El agitador utilizado para el ensayo de cianuración en botellas y para el pretratamiento alcalino gira a una velocidad constante de 100 rpm.

#### 2.2.5. Variables y parámetros

Las variables a utilizar son la concentración de hidróxido de sodio, el porcentaje de sólidos y el tiempo de agitación. La metodología experimental es igual para todos los ensayos, previo cambio en las variables.

**Tabla VI:** Condiciones experimentales de lixiviación.

# Ensayo	Concentración NaOH (M)	Tiempo (h)	Porcentaje de sólidos
1	9	12	33,3
2	9	12	5
3	9	12	10
4	9	48	5
5	3	12	33,3
6	3	12	5
7	3	12	10
8	3	48	5
9	1	12	33,3
10	1	12	5
11	1	12	10
12	1	48	5
13	0,8	48	5
14	0,5	48	5
15	0,3	48	5
16	0,1	48	5

### 2.2.6. Tratamiento de relaves

Una vez finalizado el pretratamiento se realiza la lixiviación con cianuro, después de esto el relave presente en las botellas se vierten en bandejas que son llevados a un horno de secado para posteriormente realizar el ensayo al fuego a las colas y el análisis mineralógico.

## 2.3. Equipos de análisis y de control

### 2.3.1. Equipos para estudios de lixiviación

A continuación, se muestra los equipos utilizados para la preparación de la muestra, control del tamaño de la partícula, equipo de secado, etc.

## Horno de secado

Para la preparación de la muestra se la dejó libre de humedad utilizando un horno de secado marca Carbolite serie AX.



**Figura 2.4:** Horno de secado Carbolite serie AX.

## Cuarteador

Se utilizó un cuarteador para obtener muestras más homogéneas. Se tomaron muestras para realizar el análisis mineralógico, análisis granulométrico, ensayos de cianuración, ensayos al fuego y aplicación del pretratamiento alcalino.



**Figura 2.5:** Cuarteador

### **Análisis granulométrico**

Para la determinación de la distribución y tamaño de partículas se utiliza un analizador de partículas por difracción laser marca HORIBA LA-300, este equipo tiene un rango de medición de partículas de entre 0.1 y 600  $\mu\text{m}$ .



**Figura 2.6:** Analizador de partículas por difracción laser HORIBA LA-300

## **Microscopio minerográfico**

Para la identificación mineralógica se utilizó un microscopio minerográfico marca Olympus BX51 el cual es un microscopio estereoscópico (binocular) petrográfico que permite la observación y estudio de láminas de muestras sólidas minerales, hasta 500 aumentos, con posibilidad de captura de imágenes mediante una cámara fotográfica.



**Figura 2.7:** Microscopio minerográfico marca Olympus BX51

## **Equipo de espectrofotometría de absorción atómica**

El equipo de lectura de oro en solución fue el Buck Scientific modelo 210 VGP.



**Figura 2.8:** Equipo de espectrofotometría de absorción atómica Buck Scientific modelo 210 VGP.

### **Agitador**

Agitador artesanal, utilizado para los ensayos de cianuración en botellas y para la realización del pretratamiento alcalino. Tiene una velocidad de giro de 100 rpm.



**Figura 2.9:** Agitador artesanal.

## **CAPÍTULO 3**

### **RESULTADO Y DISCUSIÓN**

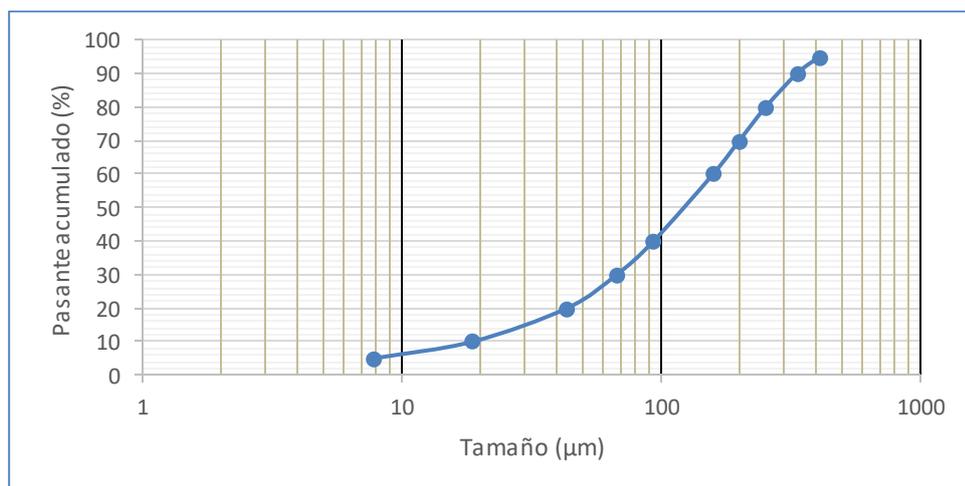
## 3.1 Resultados

### 3.1.1. Caracterización de la muestra

#### 3.1.1.1. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se realizó en un analizador de partículas por difracción laser HORIBA LA-300, este equipo tiene un rango de medición de partículas de entre 0.1 y 600  $\mu\text{m}$ , para este análisis se utilizó 1 gramo de material.

En la figura 3.1 se observa la curva granulométrica de la muestra, teniendo un  $D_{80}$  de 254  $\mu\text{m}$ .

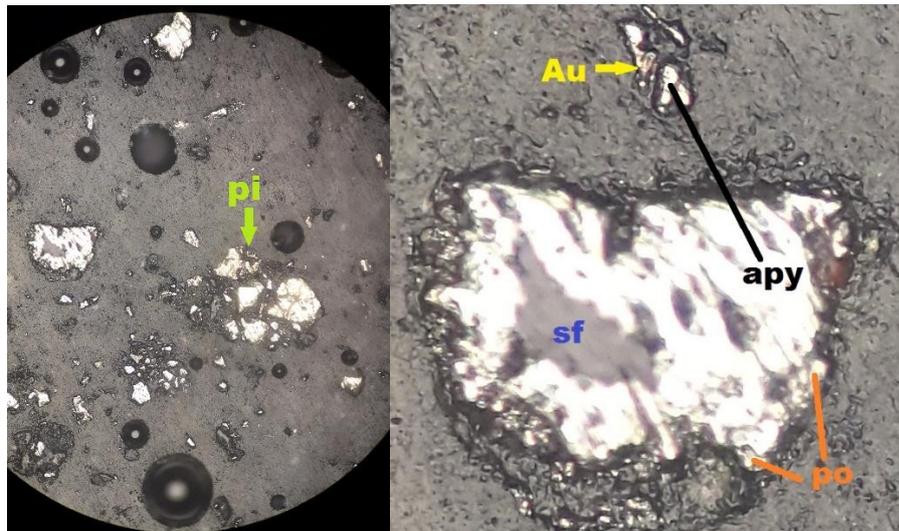


**Figura 3.1:** Curva granulométrica de la muestra.

### 3.1.1.2. Análisis mineralógico

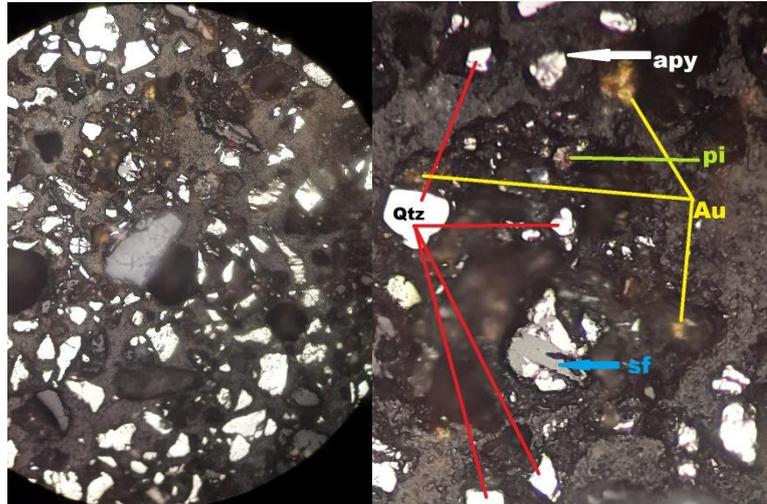
Los análisis mineralógicos se realizaron a muestras antes y después de aplicar el pretratamiento alcalino y además a muestras cianuradas ya pretratadas.

En las figuras 3.2 y 3.3 se observan muestras del material vistas desde un microscopio minerográfico antes y después de aplicar el pretratamiento alcalino, respectivamente. Se identifican minerales como arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), pirrotina ( $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y oro ( $\text{Au}$ ). Se determinó la composición mineral de la muestra sumando áreas correspondientes a cada mineral para luego dividirlo para el área total de la fotografía. Para obtener resultados más precisos se tomaron varias fotografías en una muestra y los valores fueron promediados.



**Figura 3.1:** En la fotografía de la izquierda se muestra como se ve el mineral desde el microscopio mineragráfico. En la imagen de la derecha se observan claramente minerales como la arsenopirita (apy), esfalerita (sf), pirita (pi), pirrotina (po) y oro (Au).

En la figura 3.2 se observa mayor presencia de arsenopirita y se visualiza una pequeña parte de oro junto a este mineral. El segundo mineral predominante es la pirita seguido de la pirrotina.



**Figura 3.2:** En la imagen de la izquierda se observa la muestra tal como se ve desde un microscopio mineragráfico. En la imagen de la derecha se identifican minerales como la pirita (pi), arsenopirita (apy), esfalerita (sf), cuarzo (qtz) y oro (Au).

En la figura 3.3 se observa una muestra después de haber aplicado el pretratamiento alcalino. Se puede visibilizar más fácilmente el oro, además se observa menos arsenopiritas pero más presencia de cuarzo.

En la tabla VII se muestra la composición mineralógica en muestras antes y después de aplicar el pretratamiento alcalino, así como de muestras ya cianuradas pos tratamiento.

**Tabla VII.** Composición mineralógica antes y después del pretratamiento alcalino

Mineral	Composición mineralógica (%)	
	Antes del pretratamiento	Después del pretratamiento
Arsenopirita (apy)	48	9
Pirita (py)	28	21

<b>Pirrotina (po)</b>	8	7
<b>Quarzo (Qzt)</b>	10	53
<b>Esfalerita (Sf)</b>	5	6
<b>Oro (Au)</b>	1	4

### 3.1.1.3. Pruebas de ensayo al fuego y ensayo de cianuración en botellas

Los valores iniciales de oro total, oro cianurable y oro en colas del material antes de aplicar el tratamiento se muestran en la tabla VIII.

**Tabla VIII.** Datos de material de cabeza.

	<b>MÉTODO DE DETERMINACIÓN</b>	<b>Ppm</b>	<b>LEY (g/ton)</b>
<b>ORO TOTAL</b>	ENSAYO AL FUEGO	9.8	49
<b>ORO CIANURABLE</b>	ENSAYO DE CIANURACIÓN EN BOTELLAS	6.6	13.2
<b>ORO EN COLAS</b>	ENSAYO AL FUEGO	6.36	31.8
<b>RECUPERACIÓN</b>	26.9%		

### 3.1.2. Resultados experimentales de la aplicación del pretratamiento alcalino

En la tabla IX se muestran los resultados obtenidos en 17 ensayos analizando 3 variables como son: la concentración de NaOH (M), Tiempo (H) y Porcentaje de sólidos (%). Cabe recalcar cada uno de estos ensayos

fue replicado 3 veces y los valores que en se muestran en la tabla es un promedio de esos valores.

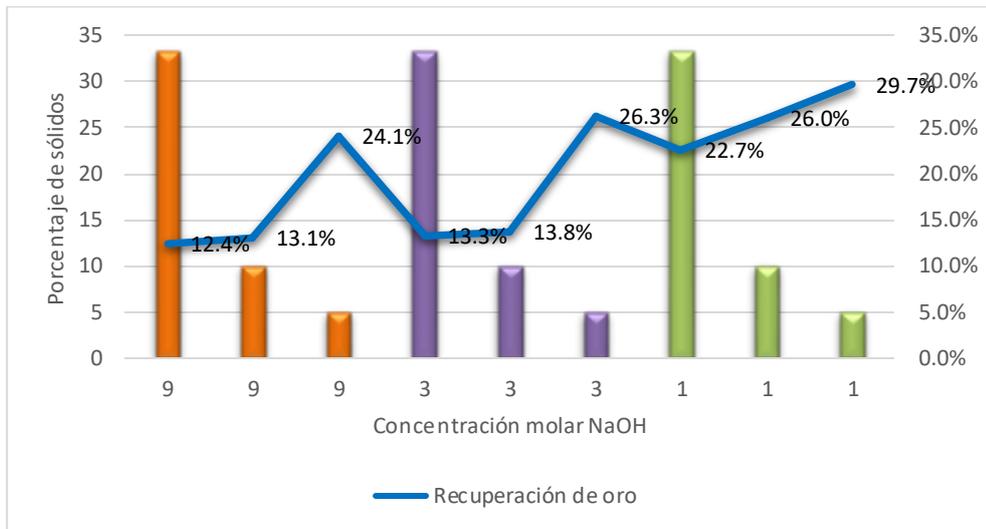
**Tabla IX.** Resultados obtenidos después de aplicar el pretratamiento alcalino

# de Ensayos	Variables			Oro Cianurable	Oro en Colas	Oro Total	% de Recuperación
	Concentración de NaOH (M)	Tiempo (H)	Porcentaje de sólidos (%)	Ley g/ton	Ley g/ton	Ley g/ton	
1	Sin Pretratamiento			13,2	31,8	49	26,9%
2	9	12	33,3	6,1	42,9		12,4%
3	9	12	5	11,8	37,0		24,1%
4	9	12	10	6,4	42,5		13,1%
5	9	48	5	9,3	39,6		18,9%
6	3	12	33,3	6,5	42,5		13,3%
7	3	12	5	12,9	36,2		26,3%
8	3	12	10	6,8	43,3		13,8%
9	3	48	5	12,1	36,7		24,7%
10	1	12	33,3	11,1	37,9		22,7%
11	1	12	5	14,5	34,3		29,7%
12	1	12	10	12,8	36,3		26,0%
13	1	48	5	19,2	29,6		39,2%
14	0,8	48	5	22,1	26,7		45,1%
15	0,5	48	5	<b>30,6</b>	19,6		<b>62,5%</b>
16	0,3	48	5	19,6	29,5		40,0%
17	0,1	48	5	15,2	33,6		31,0%

### 3.1.3. Efectos de las variables en la recuperación de oro

#### 3.1.3.1. Efecto del porcentaje de sólidos

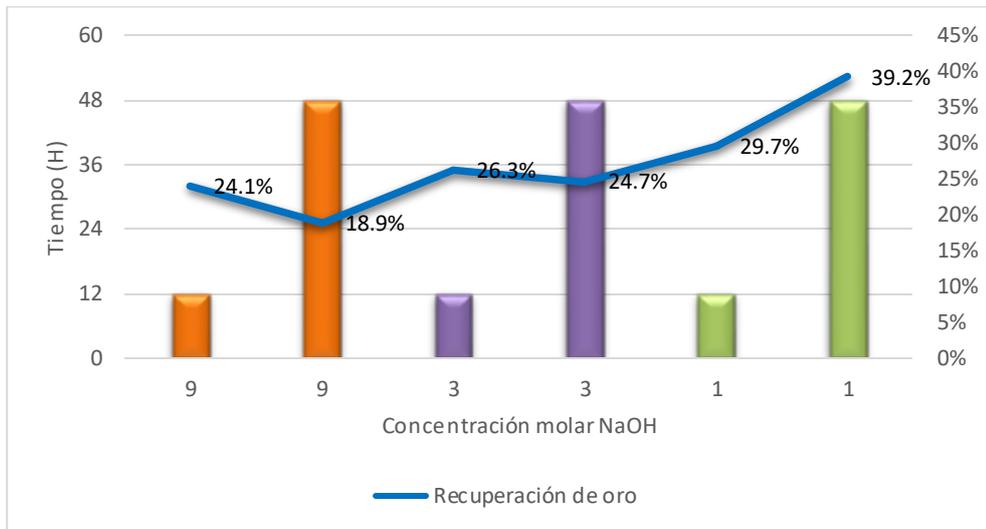
En la figura 3.4 se muestra la variación de la recuperación de oro variando el porcentaje de sólidos en 5, 10 y 33.3%, con un tiempo de agitación constante de 12 horas.



**Figura 3.4:** Efecto del porcentaje de sólidos en la recuperación de oro.

### 3.1.2.2. Efecto del tiempo de agitación

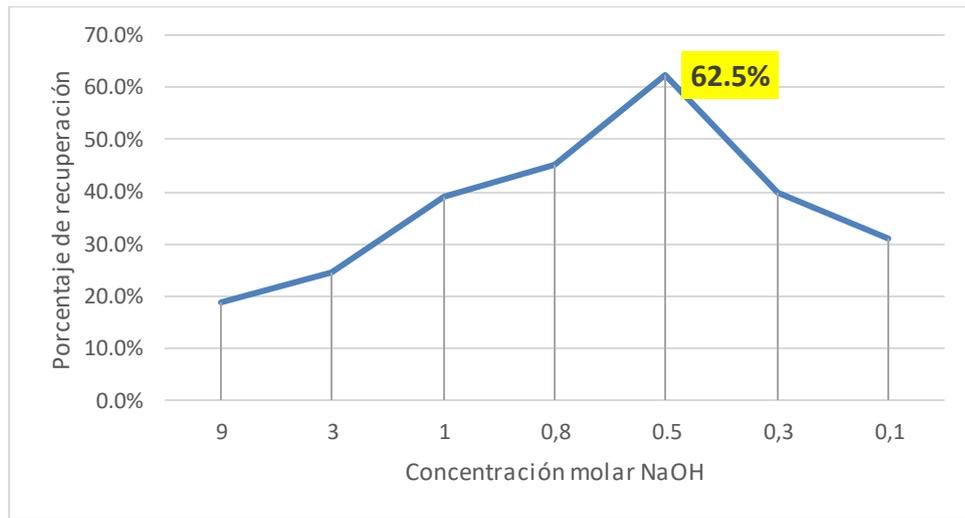
En la figura 3.5 se muestra la variación de la recuperación de oro variando el tiempo de agitación en 12 y 48 horas, con un porcentaje de sólidos constante de 5%.



**Figura 3.5.** Efecto del tiempo de agitación la recuperación de oro.

### 3.1.2.3. Efecto de la concentración molar de NaOH

En la figura 3.6 se muestra como varía la recuperación de oro variando la concentración molar de NaOH desde 9 a 0.1 M. Manteniendo constante el tiempo de agitación de 48 horas y un porcentaje de sólidos de 5%.



**Figura 3.6:** Efecto de la concentración molar de NaOH en la recuperación de oro.

### 3.2. Discusión de los resultados

Al aplicar una cianuración convencional al material proveniente del proceso de concentración la recuperación de oro es de 26.9% utilizando cianuración convencional, lo cual se trata de un material altamente refractario. Después de aplicar el pretratamiento la recuperación llegó hasta el 62.5%.

#### 3.2.1. Análisis mineralógico

De acuerdo al análisis mineralógico, el mineral más predominante en el concentrado es la arsenopirita llegando a obtener un 48% de este mineral en la muestra. Se observó como este mineral se asociaba al oro

encontrándose partículas junto a este. El segundo mineral de mayor ocurrencia es la pirita (28%).

Luego de la aplicación del pretratamiento alcalino, la presencia de arsenopirita disminuye, encontrándose tan solo un 9% de este mineral. Pero la presencia de cuarzo aumenta considerablemente (53%). Aquí ya se observa con más claridad la presencia de oro.

La arsenopirita en medio ácido presenta una oxidación en 2 etapas. Inicialmente la arsenopirita se oxida a rejalgar ( $\text{As}_2\text{S}_2$ ) y Fe(II), después comienza la segunda etapa donde el Fe(II) se oxida a Fe(III). (Mesa Espitia & Lapidus, 2015)

El oro está asociado con el arsénico en una matriz arsenopirítica, es por esto la importancia de alterar dicha matriz. En este caso se lo hizo vía complejación del arsénico con iones hidroxilos provenientes del NaOH. Como resultado el oro es liberado facilitando la lixiviación. (Mesa Espitia & Lapidus, 2015)

La oxidación alcalina de la arsenopirita puede ser representado por la siguiente ecuación:



### **3.2.2. Efecto de las variables en la recuperación de oro**

Se realizaron en total 17 ensayos obteniendo el experimento #15 la mayor recuperación de oro llegando hasta el 62.5%, este ensayo contó con una concentración 9 M de NaOH, un tiempo de agitación de 48 horas y 5% de sólidos.

#### **3.2.2.1. Efecto del porcentaje de sólidos**

El porcentaje de sólidos es pieza clave en este pretratamiento ya que inicialmente experimentando con un porcentaje de sólidos del 33.3% las recuperaciones disminuían.

El porcentaje de sólidos es inversamente proporcional a la recuperación de oro, ya que a menos cantidad de sólidos existe una mayor extracción de oro, llegando a obtener la máxima recuperación un 5% de sólidos.

#### **3.2.1.2. Efecto del tiempo de agitación**

El tiempo de agitación es directamente proporcional a la recuperación de oro, obteniendo mayores recuperaciones a 48 horas de agitación. Un caso particular es a una concentración 9 M de NaOH donde se observa en la figura 3.6 como a 12 horas la recuperación es mayor que a 48

horas, pero esta tendencia cambia conforme disminuye la concentración de NaOH.

### **3.2.1.3. Efecto de la concentración molar de NaOH**

Como se observa en la figura 3.6 la recuperación de oro aumenta conforme disminuye la concentración molar de NaOH hasta llegar a su pico máximo en 0.5 M, obteniendo en este punto la máxima recuperación de oro con 62.5%.

# **CAPÍTULO 4**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1. Conclusiones**

1. El pretratamiento alcalino funciona con éxito ya que se logró aumentar 35.6% más la recuperación de oro, alcanzando hasta el 62.5%.
2. La alteración de la matriz arsenopirítica, mediante la complejación del arsénico con iones  $\text{OH}^-$  permitió que el oro se libere y facilite la lixiviación con cianuro.
3. Aunque la recuperación subió, el material sigue siendo refractario, pero esto puede mejorar si se aplica algún otro agente lixivante como por ejemplo Tiosulfato. Ya que de acuerdo a estudios realizados aplicando este mismo pretratamiento, el tiosulfato puede aumentar hasta un 18% más la recuperación en comparación con el cianuro, es decir en teoría podría aumentar hasta 80.5%

#### **4.2. Recomendaciones**

1. Experimentar una lixiviación con tiosulfato ya que de acuerdo a estudios realizados la recuperación puede aumentar hasta 81%.
2. Experimentar otro pretratamiento en combinación con el alcalino, ya que en teoría lo que se liberó es oro que se encuentra encapsulado

dentro de la arsenopirita, se podría experimentar una liberación de oro asociada a la pirita o la pirrotina lo que provocaría aumentar aún más la recuperación.

3. Estos fueron experimentos a nivel laboratorio, se recomienda realizar estas pruebas en plantas piloto para corroborar estos resultados.
4. Realizar una evaluación financiera del proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

- Auríferos, R. D. E. C., Arce, V. A., Falcón, R. C., Santibañez, L. P., & Dávila, D. L. (2005). Refractariedad de concentrados auríferos, 8, 5–14.
- Borja, T., & Moreno, J. (2015). *Estudio para la optimización de un circuito flotación- cianuración de concentrados sulfurosos en la planta de beneficio La López para el procesamiento del mineral de la mina Jerusalén en el cantón Camilo Ponce Enríquez.*
- Carrillo, J. R. P. F. R. (n.d.). Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales refractarios <sup>^ \* ^</sup>, 254(c), 254–261.
- García, N., & Freire, V. (2015). Biooxidación de concentrados refractarios de oro con alto contenido de arsénico, 304–308.
- Holguín Ruiz, B. J. (1999). *Pretratamiento por tostación de concentrados sulfurosos de flotación del sector de Ponce Enríquez.*
- La Brooy, S. R., Linge, H. G., & Walker, G. S. (1994). Review of gold extraction from ores. *Minerals Engineering*, 7(10), 1213–1241. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(94\)90114-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)90114-7)
- Li, D. X. (2009). Developments in the pretreatment of refractory gold minerals by nitric acid. *World Gold Conference. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2, 145–150. Retrieved from [www.onemine.org](http://www.onemine.org)
- Loy, J., & Mariño, D. (2016). *Estudio de la alteración mineralógica a través del análisis macroscópico y de la Difracción de Rayos X (DRX) de las muestras de las rocas de caja y vetas de Bella Rica - Ponce Enríquez, Provincia del Azuay.*
- Mackenzie, W. (2013). *Principales carencias respecto mejores prácticas*

*Ecuador.*

Mesa Espitia, S. L., & Lapidus, G. T. (2015). Pretreatment of a refractory arsenopyritic gold ore using hydroxyl ion. *Hydrometallurgy*, 153, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.02.013>

Morales, D. (2011). *Procesamiento de un mineral aurifero refractario para la recuperacion de oro.*

Nuñez del Arco, E. (1983). *Geología del Ecuador.*

Swash, P. M. (1988). A mineralogical investigation of refractory gold ores and their beneficiation , with special reference to arsenical ores, 88(5), 173–179.

Zhou, J., Jago, B., & Martin, C. (2004). Establishing the Process Mineralogy of Gold Ores. *Sgs Minerals - Technical Bulletin*, 1–16.