

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA E  
INGENIERÍA METALÚRGICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**“ANÁLISIS DE ORO Y PLATA EN HORNO MUFLA UTILIZANDO  
COBRE COMO COLECTOR EN LA CORPORACIÓN MINERA  
ANANEA”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**WASHINGTON BENIGNO ANTEZANA TACCA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO METALURGISTA**

**PUNO – PERÚ**

**2013**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA E INGENIERÍA METALÚRGICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

---

“ANÁLISIS DE ORO Y PLATA EN HORNO MUFLA UTILIZANDO COBRE  
COMO COLECTOR EN LA COORPORACIÓN MINERA ANANEA”

TESIS PRESENTADA POR:  
WASHINGTON BENIGNO ANTEZANA TACCA  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO METALURGISTA

APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO:



PRESIDENTE

:

  
M.Sc. JULIO ALBERTO MAQUERA GIL

PRIMER MIEMBRO

:

  
Ing. HIPOLITO CORDOVA GUTIERREZ

SEGUNDO MIEMBRO

:

  
Dr. DANTE ATILIO SALAS AVILA

DIRECTOR / ASESOR

:

  
M.Sc. ALFREDO MAMANI CANQUI

Área : Metalurgia extractiva

Tema : Análisis químico de oro y plata

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 03 de Setiembre 2013

## AGRADECIMIENTOS

*Agradecemos en primer lugar a Dios quien nos dio la vida y la ha llenado de bendiciones en todo este tiempo, a él que con su infinito amor nos ha dado la sabiduría suficiente para culminar nuestra carrera universitaria.*

*Aprovecho la oportunidad para expresar mis sinceros agradecimientos a la Universidad Nacional del Altiplano-Puno nuestra alma mater, a la facultad de Ingeniería Geología e Ingeniería Metalúrgica, Carrera Profesional de Ingeniería Metalúrgica Como muestra de superación y dedicación por el estudio.*

*A los docentes de la Carrera Profesional de Ingeniería Metalúrgica, que me han acompañado durante el largo camino, brindándome siempre su orientación con profesionalismo ético en la adquisición de conocimientos y afianzando mi formación. A mi tutor de tesis, el Ing. Alfredo Mamani Canqui, por su guía y tiempo invertido en el desarrollo y corrección de la tesis.*

**DEDICATORIA**

*A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.*

*En memoria de mis señores padres Julio Antezana S. y Flavia Tacca Vda. De Antezana que desde el cielo junto a nuestro señor que han iluminado mi camino para la conclusión de mi carrera profesional.*

*A mi esposa Beatriz por su apoyo y comprensión por darme fuerza, a mis hijos quienes han sido mi mayor motivación.*

**ATTE. WASHINGTON BENIGNO ANTEZANA TACCA**

## INDICE GENERAL

## ÍNDICE DE FIGURAS

## ÍNDICE DE TABLAS

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUMEN .....</b>   | <b>10</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>11</b> |
| <b>CAPITULO I .....</b>                                      | <b>12</b> |
| <b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>                                  | <b>12</b> |
| <b>1.1. OBJETIVO GENERAL.....</b>                            | <b>13</b> |
| 1.1.1. Objetivos Específicos                                 | 13        |
| <b>CAPITULO II.....</b>                                      | <b>14</b> |
| <b>2. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>                       | <b>14</b> |
| <b>2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>           | <b>14</b> |
| <b>2.2. MARCO LEGAL.....</b>                                 | <b>17</b> |
| <b>2.3. MARCO TEÓRICO.....</b>                               | <b>18</b> |
| 2.3.1. Propiedades físicas y químicas del oro, plata y cobre | 18        |
| 2.3.2. Reactivos   | 21        |
| 2.3.3. Aspectos fundamentales de la Fusión                   | 27        |
| 2.3.4. Fases Generadas en la Fusión                          | 28        |
| 2.3.5. Estructura de las Escorias                            | 30        |
| 2.3.6. Consideraciones para la Formación de Escorias         | 36        |
| 2.3.7. Tipos de Fusión                                       | 38        |
| <b>2.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>                 | <b>39</b> |
| 2.4.1. Problema General                                      | 39        |
| <b>2.5. JUSTIFICACIÓN.....</b>                               | <b>40</b> |
| 2.5.1. Científica  | 40        |
| 2.5.2. Técnica   | 40        |
| 2.5.3. Económica   | 40        |
| <b>CAPITULO III .....</b>                                    | <b>42</b> |
| <b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>                          | <b>42</b> |
| <b>3.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....</b>               | <b>42</b> |
| <b>3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....</b>                    | <b>42</b> |
| <b>3.3. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>                  | <b>43</b> |
| <b>3.4. HIPÓTESIS GENERAL.....</b>                           | <b>44</b> |
| 3.4.1. Hipótesis Especifica                                  | 44        |
| <b>3.5. ÁMBITO DE ESTUDIO .....</b>                          | <b>44</b> |
| 3.5.1. Accesibilidad.  | 44        |
| <b>3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA .....</b>                        | <b>45</b> |
| 3.6.1. Población   | 45        |
| 3.6.2. Muestra   | 45        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3.7. MUESTREO DEL MINERAL.....</b>                         | <b>46</b> |
| 3.7.1.    Objetivos Del Muestreo                              | 47        |
| <b>3.8. FUSIÓN DE CONCENTRADOS .....</b>                      | <b>48</b> |
| 3.8.1.    Colectores utilizados en el Método de Horno Mufla   | 51        |
| <b>3.9. DOSIFICACIÓN DE FUNDENTES .....</b>                   | <b>52</b> |
| 3.9.1.    Reactivos para la oxidación de sulfuros.            | 53        |
| 3.9.2.    Reactivos para la formación de escorias.            | 54        |
| <b>3.10. TRATAMIENTO DE LA FASE METÁLICA .....</b>            | <b>54</b> |
| 3.10.1.  Ataque con ácido nítrico.                            | 55        |
| 3.10.2.  Ataque con ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno.  | 56        |
| <b>CAPITULO IV.....</b>                                       | <b>57</b> |
| <b>4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>                       | <b>57</b> |
| <b>4.1. PREPARACIÓN DE COBRE METÁLICO POR MÉTODOS</b>         |           |
| <b>ELECTROQUÍMICOS .....</b>                                  | <b>57</b> |
| 4.1.1.    Procedimiento.                                      | 57        |
| 4.1.2.    Preparación de Hidróxido de Cobre por Precipitación | 60        |
| 4.1.3.    Procedimiento.                                      | 60        |
| 4.1.4.    Concentrado   | 61        |
| <b>CONCLUSIONES V .....</b>                                   | <b>71</b> |
| <b>REFERENCIAS VI.....</b>                                    | <b>73</b> |
| <b>ANEXOS VII .....</b>                                       | <b>75</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura N° 2. 1 Crisol con la fase escoria en la parte superior y mata parte inferior.....   | 29 |
| Figura N° 2. 2 De fases metálicas compuestas principalmente por cobre, oro y plata .....  | 31 |
| Figura N° 2. 3 Esquema de la estructura de la sílice sólida. ....   | 32 |
| Figura N° 2. 4 Esquema de la estructura de la sílice fundida.....   | 32 |
| Figura N° 2. 5 Estructura fibrosa de la sílice (Muñoz, 1993).....   | 36 |
| Figura N° 2. 6 Descargue de la muestra fundida carga que cumple con las consideraciones<br>básicas de la formación de escorias en la lingotera..... | 38 |
| <br>  |    |
| Figura N° 3. 1 Muestra de cuarteo en forma de cono, el que se divide en cuatro partes ...   | 48 |
| <br>  |    |
| Figura N° 4. 1 Varillas de hierro cubiertas por la solución de sulfato de cobre.....  | 58 |
| Figura N° 4. 2 Acumulación de cobre en las varillas de hierro.....  | 59 |
| Figura N° 4. 3 Cobre metálico en polvo .....  | 59 |
| Figura N° 4. 4 Polvo de cobre metálico .....  | 60 |
| Figura N° 4. 5 Vista de horno externo para fusión.....  | 63 |
| Figura N° 4. 6 Vista de horno interno para fusión .....   | 63 |
| Figura N° 4. 7 Vista superior de la parte interna del horno mufla. ....   | 64 |
| Figura N° 4. 8 Crisol que contiene la carga fundente colocado sobre una balanza.....  | 64 |
| Figura N° 4. 9 Crisol que sale del horno con la carga fundente .....  | 65 |
| Figura N° 4. 10 Carga fundida de color amarilla .....   | 66 |
| Figura N° 4. 11 Contrastación de los crisoles a y b.....  | 66 |
| Figura N° 4. 12 Muestra el crisol transversalmente al golpe con el martillo .....   | 67 |
| Figura N° 4. 13 fase metálica durante la disgregación en ácido nítrico diluido.....   | 68 |
| Figura N° 4. 14 Disolución de una fase metálica en ácido nítrico sobre arena. ....  | 69 |
| Figura N° 4. 15 solución de nitrato de cobre.....   | 69 |
| Figura N° 4. 16 Oro recuperado después de filtrar.....  | 70 |

**ÍNDICE DE TABLAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabla N° 2. 1 Formulas, composición y densidad de los minerales de oro.....                   | 18 |
| Tabla N° 2. 2 Propiedades fisicoquímicas del oro .....  | 19 |
| Tabla N° 2. 3 Propiedades fisicoquímicas de la plata .....                                    | 20 |
| Tabla N° 2. 4 propiedades fisicoquímicas del cobre .....                                      | 21 |
| Tabla N° 2. 5 Características del Litargirio .....  | 23 |
| Tabla N° 2. 6 Clasificación de los óxidos .....   | 34 |
| Tabla N° 2. 7 Influencia de la adición de un oxido básico en la estructura de los silic ..... | 35 |
| <br>  |    |
| Tabla N° 3. 1 Ruta y tiempo para llegar a la Corporacion Minera Ananea S.A. ....              | 45 |
| Tabla N° 3. 2 Clasificación de los silicatos .....  | 50 |
| Tabla N° 3. 3 Clasificación de los boratos .....  | 51 |
| Tabla N° 3. 4 Dosificación de fundentes para 100 g de metal presente .....                    | 55 |
| <br>  |    |
| Tabla N° 4. 1 Reactivos para la preparación de cobre metálico.....                            | 58 |
| Tabla N° 4. 2 Preparación de hidroxido de cobre .....   | 61 |
| Tabla N° 4. 3 Composición mineralógica .....  | 61 |
| Tabla N° 4. 4 Características principales del horno de fusión .....                           | 62 |



**ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| UTM   | Universal Transversal Mercador      |
| WGS84   | Sistema Geodésico Mundial           |
| Psi   | Libra fuerza por pulgada cuadra     |
| CGS   | Sistema Cegesimal de Unidades       |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>                                   | Carbonato de Sodio                  |
| Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O | Tetraborato de Sodio Decahidratado  |
| CO <sub>2</sub>   | Dióxido de Carbono                  |
| CO  | Monóxido de Carbono                 |
| SO <sub>2</sub>   | Dióxido de Azufre                   |
| NO <sub>2</sub>   | Dióxido de Nitrógeno                |
| CuO   | Oxido de Cobre                      |
| FeAsS   | Arsenopirita                        |
| ZnS   | Sulfuro de Zinc                     |
| CuFeS <sub>2</sub>  | Chalcopirita                        |
| PbS   | Sulfuro de Plomo                    |
| FeS <sub>2</sub>  | Bisulfuro de Fierro o pirita        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                    | Óxido de Hierro                     |
| D80   | Diámetro de malla                   |
| AAS   | Espectroscopia de Absorción Atómica |
| KNO <sub>3</sub>  | Nitrato de Potasio                  |
| Na <sub>2</sub> Cl  | Cloruro de Sodio                    |
| SiO <sub>2</sub>  | Oxido de Sílice                     |
| Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>                                  | Silicato sódico o Silicato de Sodio |
| KHC <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub>                    | Tartrato de Potasio                 |
| Ty  | Tyler                               |
| PM  | Peso de la Muestra Gramos           |
| g/Tm  | Gramos sobre tonelada métrica       |
| Cu  | cobre                               |

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación denominado “Análisis de oro y plata en horno mufla utilizando cobre como colector en la Corporación Minera Ananea” está enfocado al análisis de oro y plata en horno mufla por ensayo al fuego. La importancia de ensayar los minerales para obtener y mantener los máximos grados de concentrado y recuperaciones, dependió tanto del tipo de mineral como de la operación de la planta, y las condiciones requeridas para lograr los resultados metalúrgicos. El objetivo fue demostrar que el cobre como colector es significativo para analizar los rendimientos de oro y plata en menas y concentrados polisulfurados por el método de ensayo al horno mufla. La metodología usada en esta tesis es experimental por que se manipula la variable independiente, la sección describe los procedimientos seguidos y el instrumental usado. Se incluye el esquema del procedimiento experimental, imágenes de los equipos y materiales usados. Los procedimientos descritos detallan con claridad el método utilizado. La muestra utilizada para este estudio consiste en un concentrado, una mezcla de sulfuros como piritita, calcopiritita, galena y esfalerita; la muestra es tratada en una primera etapa de fundición con agentes desulfurantes, en cantidades adecuadas que permiten eliminar la fase mata, y en una segunda etapa de fundición con cantidades adecuadas de agentes fundentes y metal colector se tiene recuperaciones de oro y plata totales en una fase metálica compuesta básicamente por cobre, plata y oro. Se concluye que el cobre metálico y el hidróxido de cobre son colectores para el método de ensayo en horno mufla, demostrando a través de varias pruebas que tanto el Cu metálico como el  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  sirven como colectores para la recuperación de metales preciosos.

**Palabras Clave:** Análisis, Cobre, colector, ensayo al fuego, horno mufla.

## ABSTRACT

This research paper called "Analysis of gold and silver in muffle furnace using copper as a collector in the Ananea Mining Corporation" is focused on the analysis of gold and silver in muffle furnace by fire test. The importance of testing the minerals to obtain and maintain the maximum concentration and recovery degrees will depend on both the type of mineral and the operation of the plant, and the conditions required to achieve the metallurgical results. The objective was to demonstrate that copper as a collector is significant to analyze the yields of gold and silver in ores and polysulfurized concentrates by the muffle kiln test method. The methodology used in this thesis is experimental because the independent variable is manipulated, the section describes the procedures followed and the instruments used. The scheme of the experimental procedure, images of the equipment and materials used are included. The detailed procedures clearly detail the method used. The sample used for this study consists of a concentrate, a mixture of sulfides such as pyrite, chalcopyrite, galena and sphalerite; The sample is treated in a first stage of smelting with desulfurizing agents, in adequate quantities that can eliminate the killing phase, and in a second stage of smelting with adequate amounts of melting agents and metal collector you have total gold and silver recoveries in a metallic phase composed of copper, silver and gold. It is concluded that metallic copper and copper hydroxide are collectors for the muffle furnace test method, demonstrating through several tests that both metallic Cu and Cu (OH)<sub>2</sub> serve as collectors for the recovery of precious metals.

**Keywords:** Analysis, collector, Copper, fire test, muffle oven.

## CAPITULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

En la prospección, exploración y explotación de yacimientos minerales auríferos, es importante el análisis de oro y plata para determinar la concentración de estos metales preciosos. La cantidad de oro y plata presente en el yacimiento mineral es uno de los factores que determinan la factibilidad de la explotación del mismo. En los laboratorios de análisis químico se utilizan diferentes métodos para la determinación cuantitativa de estos metales.

La fusión consiste en añadir a la muestra mineral una mezcla fundente para formar 2 fases; una fase metálica que contiene los materiales preciosos, y una fase escoria la cual contiene óxidos y sulfatos metálicos.

Para este método de análisis se utiliza plomo como colector, debido a su bajo punto de fusión ( $327\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), al buen desempeño del plomo como colector de oro y plata, al alto grado de solubilidad de estos metales en plomo fundido y a su alta insolubilidad con otras fases que se forman durante la fusión. El plomo se puede absorber por la piel y puede llegar a producir daños severos al organismo humano. El mayor peligro se da al inhalar el metal en forma de polvo. El envenenamiento por plomo presenta los siguientes síntomas: dolor de cabeza, vómito, diarrea, vértigo, migraña, insomnio, fatiga, cefalea, y psicosis. Con estos antecedentes, se plantea la posibilidad de utilizar cobre (Cu) como colector en el método de ensayo al fuego. El cobre es un metal que funde a  $1163\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por lo que la formación de vapores de este elemento es difícil de lograr. Sin duda el cobre tiene una concentración permitida mucho más alta que la concentración permitida para el plomo.

El estudio se desarrolló en capítulos:

En el primero; se presentó la introducción y delimitación del problema, justificación de la investigación y objetivos.

En el segundo capítulo; se describieron las bases teóricas, el marco normativo y marco conceptual.

En el tercer capítulo; se integró la metodología, diseño, tipo, nivel, método, enfoque y técnicas de la investigación.

En el cuarto capítulo; realizamos los resultados y discusiones.

Finalmente se plantean las conclusiones, recomendaciones y anexos.

## **1.1. OBJETIVO GENERAL**

- Demostrar que el cobre como colector es significativo para analizar los rendimientos de colección de oro y plata en menas y concentrados poli sulfurados por el método de ensayo con horno mufla en la Corporación Minera Ananea.

### **1.1.1. Objetivos Específicos**

- Desarrollar un método para oxidar los sulfuros sin necesidad de tostar el concentrado mineral en el análisis de oro y plata en horno mufla utilizando cobre como colector en la Corporación Minera Ananea.
- Reemplazar la copelación por una disgregación ácida para disolver todos los metales a excepción del oro. En el horno mufla utilizando cobre como colector en la Corporación Minera Ananea

## CAPITULO II

### 2. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Lipa (2019) en su investigación titulada “Análisis químico de oro y plata en sus diferentes procesos en la empresa minera Aruntani S.A.C OCUVIRI-LAMPA: Laboratorio quimico” Trabajo y desarrolló en las instalaciones de la Empresa minera ARUNTANI S.A.C., al recepcionar las muestras mineralógicas que tienen un peso aproximado de 5 kg y están dentro de una bolsa debidamente codificadas, según hoja de ingreso verificó su conformidad de las mismas. Luego llevó a un horno de secado donde elimina toda la humedad a una temperatura de 150°C, en el chancado primario y redujo a un tamaño no mayor a 3/8’, luego en el chancado secundario redujo hasta un tamaño no mayor a malla 10, de inmediato pasó al cuarteo donde obtiene una cantidad de muestra representativa entre 200 a 300g y por ultimo pasa al pulverizado donde obtiene una muestra al 100% bajo la malla 150. La determinación de oro y plata por ensayo al fuego, constituye un análisis químico cuantitativo, el cual se fundamenta en el uso de elevadas temperaturas y la presencia de oxidó de plomo, donde este último por acción de agentes reductores en la etapa de fundición se oxida hasta plomo metálico el cual colecta los metales preciosos (oro y plata) y algunas impurezas, formando una aleación. La aleación es oxidada en otra etapa de fusión oxidante conocida como copelación a oxido de plomo, y de esa manera obtuvo un botón de metal precioso que es luego disgregado por un ataque ácido quedando el oro libre de la plata; dependiendo del tamaño del botón de oro se podrá seleccionar el método que cuantificara al botón de oro. Si el botón de oro es grande, este se pesa con una balanza ultramicroanalitica y si el botón de oro es pequeño se disgrega con ayuda de ácidos para luego ser cuantificados

mediante el uso del espectrofotómetro de absorción atómica. Finalmente, se describe el trabajo del Laboratorio Químico ARUNTANI S.A.C.

Nuñez y Naula (2015), en el presente trabajo de investigación tuvo como finalidad optimizar los métodos de análisis de oro por métodos gravimétricos, oxidando y fluidizado el flujo fundente con nitrato de potasio y carbonato de sodio respectivamente, así como también evaluaron la temperatura óptima de fusión en las condiciones de formulación de los reactivos fundentes propuestos en esta tesis.

En los últimos reportes realizados por el laboratorio de análisis químico en el laboratorio químico de vía seca o fireassay de la Empresa Luz del Sol S.A.C, observó que hay un desbalance en los resultados de análisis de oro en muestras oxidadas y sulfuradas, es una razón por lo que el tesista decidió hacer un estudio para optimizar las condiciones de análisis de oro por el método gravimétrico. Para hacer frente a las dificultades se planteó el siguiente problema: ¿Si se realizan la oxidación del flujo fundente con nitrato de potasio, se fluidiza con carbonato de sodio y se evalúa la temperatura de fusión, se optimiza el análisis gravimétrico de oro? El objetivo guía para el desarrollo del trabajo fue: Optimizar el análisis gravimétrico de oro por oxidación, fluidización y efecto de la temperatura del flujo fundente. La metodología empleada en el desarrollo del trabajo fue mediante pruebas experimentales, arribando a conclusiones favorables de optimización confrontados con los resultados de la caracterización de las muestras que constituyen el valor verdadero.

Pasiguan (2014) en su presente tesis descriptivo titulado "DETERMINACIÓN DE ORO Y OTROS METALES MEDIANTE ANÁLISIS QUÍMICO-METALÚRGICOS QUE OFRECE LA EMPRESA JESÚS DEL GRAN PODER S.A.", corresponde a su desempeño laboral en la Empresa "JESÚS DEL GRAN PODER S.A.", desde octubre del 2010 hasta la actualidad.

Esta empresa se ubica en la Provincia del Oro, Cantón de Portovelo (Ecuador), en la cual hasta febrero del 2014 ocupó el cargo de Supervisora de los Análisis Químico-Metalúrgicos que forman parte de los procesos y de los que realizan para atender la demanda de otras empresas de la región. A partir de entonces la tesista se encuentra laborando como Asistente del Área de Control de Calidad en su sede en Lima, ciudad en la que desarrolla sus actividades como "STIENAROS S.A.C.". Es un periodo mayor a tres años de labor propia de su especialidad, pues los análisis y las operaciones de control de calidad que ha mencionado, requieren entre otros, de conocimientos de Química Analítica e Instrumental. En esta tesis describo los tipos de análisis que han estado bajo su supervisión y que son encargados a su empresa, sobre todo, por las empresas del rubro minero que buscan una información de vital importancia, el contenido de sus minerales. Como también la tesista se ha circunscrito a tres tipos de análisis que interrelacionan sus objetivos: Determinación de oro total mediante el método Fusión-Copelación, Determinación de oro soluble por el método de Lixiviación con Cianuro- por agitación y, Determinación de oro y otros metales por el método de Absorción Atómica

Espilco (2013) en su investigación de la determinación de oro y plata por ensayo al fuego. constituyó un análisis químico cuantitativo, en el -cual se fundamentó el uso de elevadas temperaturas y la presencia de óxido de plomo, donde este último por acción de agentes reductores en la etapa de fundición se oxida hasta plomo metálico en el cual colecta los metales preciosos (oro, plata, platino) y algunas impurezas, formando una aleación.

La aleación es oxidada en otra etapa de fusión oxidante conocida como copelación a oxido de plomo, y de esa manera se obtiene un botón de metal precioso que es luego disgregado por un ataque ácido quedando el oro libre de la plata; dependiendo del tamaño del botón de oro se podrá seleccionar el método que cuantificará el botón de oro.



Si el botón de oro es grande, este se pesa con una balanza ultramicroanalítica y si el botón de oro es pequeño o se disgrega con ayuda de ácidos en tubos para luego ser cuantificado mediante el uso del espectrofotómetro de absorción atómica.

Mendoza (2015), en su investigación está basado en los conocimientos y experiencia adquiridos en la Compañía Minera Ares en el laboratorio químico de la unidad operativa Arcata. Se describen las actividades realizadas en el área de laboratorio químico iniciados con el fundamento teórico; se describen la técnica de preparación de muestras en lo que refiere a muestras geológicas y muestras de planta concentradora y la técnica de determinación de oro y plata por fire assay y su finalización por absorción atómica por gravimetría. también se describe los controles de calidad para cada operación y proceso. Como parte de la política de la empresa en cuanto al sistema de gestión integrado de seguridad, salud ocupacional, medio ambiente y de calidad en todas las etapas de trabajo, en el laboratorio se practica estos compromisos referidos a ellos

## **2.2. MARCO LEGAL**

A continuación, se presentan las principales normas de carácter general específico aplicables al presente estudio, de acuerdo a la legislación vigente en materia de recursos hídricos, medio ambiente, minería y seguridad del Perú.

Ley General del Ambiente (Ley N° 28611);

Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (Ley N° 28245);

Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental

(Ley N° 27446); Reglamento de la Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (Decreto Supremo N° 019-2009-MINAM);

Lineamientos para la elaboración de planes de contingencia a emplearse en actividades minero metalúrgicas relacionadas con la manipulación de cianuro y otras sustancias tóxicas o peligrosas (Resolución Directoral N° 134-2000-EM/DGM).

## 2.3. MARCO TEÓRICO

### 2.3.1. Propiedades físicas y químicas del oro, plata y cobre

#### 2.3.1.1. *Propiedades del oro*

El oro es de un color amarillo brillante cuando se encuentra en masa, pero puede cambiar a colores como el rubí, negro y púrpura cuando se divide en fragmentos más pequeños. El oro es el más maleable de los metales, con un solo gramo que se pueda martillar se puede ampliar hasta un rango de 300 pies (91,4 m). También es un conductor eficaz de la electricidad y del calor y no se deteriora cuando entra en contacto con el aire u otros reactivos. Los compuestos más recurrentes encontrados en el oro incluyen el ácido cloroáurico y cloruro áurico. Según el sitio web Lenntech Water Treatments, el uso del oro se remonta a alrededor de 3000 a.C. El número atómico del oro es 79, tiene un punto de derretimiento de 1.062 grados Celsius y un punto de ebullición de alrededor de 2.000 grado

Tabla N° 2. 1 Formulas, composición y densidad de los minerales de oro.

| Mineral     | Composición                       | Contenido en Oro % | Densidad |
|-------------|-----------------------------------|--------------------|----------|
| Oro natural | Au                                | >75                | 16,19    |
| Electrum    | (Ag- Au)                          | 45-75              | 13,16    |
| Calaberita  | (Ag- Au)te <sub>2</sub>           | 40                 | 9,2      |
| Silvanita   | (Ag- Au)te <sub>4</sub>           | 24-30              | 8,2      |
| Petzita     | Ag <sub>3</sub> AuTe <sub>2</sub> | 19-25              | 9,1      |

*Fuente: F. J. HEIN,*

Tabla N° 2. 2 Propiedades fisicoquímicas del oro

| Nombre                              | Oro   |
|-------------------------------------|---|
| Número atómico                      | 79  |
| Valencia                            | 1,3   |
| Estado de oxidación                 | +1  |
| Electronegatividad                  | 2,4   |
| Radio covalente (Å)                 | 1,50  |
| Radio iónico (Å)                    | 1,37  |
| Radio atómico (Å)                   | 1,44  |
| Configuración electrónica           | [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup> |
| Primer potencial de ionización (eV) | 9,29  |
| Masa atómica (g/mol)                | 196,967   |
| Densidad (g/ml)                     | 19,3  |
| Punto de ebullición (°C)            | 2970  |
| Punto de fusión (°C)                | 1063  |
| Descubridor                         | 3000 AC   |

Fuente: F. J. HEIN

### 2.3.1.2. *Propiedades de la Plata*

Elemento químico, símbolo Ag, número atómico 47 y masa atómica 107.870. Es un metal lustroso de color blanco-grisáceo. Desde el punto de vista químico, es uno de los metales pesados y nobles; desde el punto de vista comercial, es un metal precioso. Hay 25 isótopos de la plata. Sus masas atómicas fluctúan entre 102 y 117.

En la mayor parte de sus aplicaciones, la plata se alea con uno o más metales. La plata, que posee las más altas conductividades térmica y eléctrica de todos los metales, se utiliza en puntos de contacto eléctricos y electrónicos. También se emplea mucho en joyería y piezas diversas. Entre la aleación en que es un componente están las amalgamas dentales y metales para cojinetes y pistones de motores.

Tabla N° 2. 3 Propiedades fisicoquímicas de la plata

| Nombre                                   | Plata                                   |
|--|---|
| Número atómico                           | 47                                      |
| Valencia                                 | 1                                       |
| Estado de oxidación                      | +1                                      |
| Electronegatividad                       | 1,9                                     |
| Radio iónico (nm)                        | 0,126                                   |
| Radio atómico (nm)                       | 0,144                                   |
| Configuración electrónica                | [ Kr ] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup> |
| Primer potencial de ionización (kJ/mol)  | 758                                     |
| Segundo potencial de ionización (kJ/mol) | 2061                                    |
| Potencial estándar                       | 0,779 V (Ag <sup>+</sup> / Ag)          |
| Masa atómica (g/mol)                     | 107,87 g.mol <sup>-1</sup>              |
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> a 20°C)      | 10,5                                    |
| Punto de ebullición (°C)                 | 2212 °C                                 |
| Punto de fusión (°C)                     | 962 °C                                  |
| Descubridor                              | Los antiguos                            |

Fuente: F. J. HEIN

### 2.3.1.3. *Propiedades del Cobre*

Elemento químico, de símbolo Cu, con número atómico 29; uno de los metales de transición e importante metal no ferroso. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia. El cobre fue uno de los primeros metales usados por los humanos.

La mayor parte del cobre del mundo se obtiene de los sulfuros minerales como la calcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. Los minerales oxidados son la cuprita, tenorita, malaquita, azurita, crisocola y brocantita. El cobre natural, antes abundante en Estados Unidos, se extrae ahora sólo en Michigan. El grado del mineral empleado en la producción de cobre ha ido disminuyendo regularmente, conforme se han agotado los minerales más ricos y ha crecido la demanda de cobre. Hay grandes cantidades de cobre en

la Tierra para uso futuro si se utilizan los minerales de los grados más bajos, y no hay probabilidad de que se agoten durante un largo periodo.

Tabla N° 2. 4 propiedades fisicoquímicas del cobre

| Nombre                              | Cobre                                |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Número atómico                      | 29                                   |
| Valencia                            | 1,2                                  |
| Estado de oxidación                 | +2                                   |
| Electronegatividad                  | 1,9                                  |
| Radio covalente (Å)                 | 1,38                                 |
| Radio iónico (Å)                    | 0,69                                 |
| Radio atómico (Å)                   | 1,28                                 |
| Configuración electrónica           | [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup> |
| Primer potencial de ionización (eV) | 7,77                                 |
| Masa atómica (g/mol)                | 63,54                                |
| Densidad (g/ml)                     | 8,96                                 |
| Punto de ebullición (°C)            | 2595                                 |
| Punto de fusión (°C)                | 1083                                 |
| Descubridor                         | Los antiguos                         |

Fuente: F. J. HEIN

### 2.3.2. Reactivos

Son compuestos químicos utilizados con la finalidad de bajar el punto de fusión y oxidar los metales no nobles en el proceso de fundición. Es un material que recoge o arrastra la ganga y las impurezas; los fundentes se emplean en la metalurgia extractiva, eliminando y evitando la incorporación de impurezas que impidan la obtención de productos de buena calidad, con los fundentes se persigue eliminar la película de óxido y facilitar la unión del metal depositado con el metal base. El fundente primeramente debe hacerse cargo de la porción de la ganga que no se ha podido eliminar por otros métodos físicos sea por concentración o flotación. La escoria es el producto resultante de la acción del fundente con la ganga o las impurezas.

Los fundentes han de dar escorias fusibles y lo suficientemente fluidas para facilitar la separación de las impurezas del metal fundido. La función esencial del fundente es ayudar a unir las masas de metal recubiertas de óxido y forman una sola laguna del metal fundido cuando se calienta por encima del punto de fusión, por la acción de las fuerzas de tensión superficial.

El propósito primario del fundente es, pues, mantener el metal principal en estado de pureza, bien librándolo de la acción del ambiente o garantizándolo por su acción de pureza del metal o bien para poder realizar adecuadamente alguna otra operación. La carga fundente, tiene la finalidad de colectar a la escoria los metales no ferrosos para evitar en lo posible su presencia en el bullón final.

#### **2.3.2.1. Selección de los Reactivos**

La selección es regida por las leyes físicas y químicas bien establecidas que se aplican a las temperaturas de fusión. De mayor importancia son las leyes que hacen referencia la formación de las sales a partir de la reacción de los ácidos y las bases. Prácticamente todos los compuestos que forman escorias que interviene en la fusión o en los procesos de afino se puede clasificar bien como ácido o como base. El factor más importante para una óptima fundición es la selección exacta y la cantidad apropiada de los reactivos del fundente. Cada reactivo del fundente tiene un propósito específico en el proceso a continuación se detallan.

#### **2.3.2.2. Litargirio**

Es un óxido de plomo cuyo punto de fusión es 883°C, contiene 92,8% de plomo. Es un flujo básico realmente fundible y además actúa como agente oxidante y desulfurante. La reducción del litargirio proporciona a la muestra el plomo fundido necesario para colectar el

oro junto con la plata. El plomo fundido tiene un bajo punto de fusión de 327°C y una gravedad específica de 11,3 por lo que se separa fácilmente de la escoria formada el cual tiene una gravedad específica de 2,8. El bullón de plomo fundido es fácilmente oxidado otra vez a litargirio por el aire.

Un recipiente o vaso fabricado de ceniza de hueso absorbe el óxido de plomo líquido, pero se debe tener siempre cuidado del exceso del litargirio en la carga, debido a que el plomo fundido tiene una gran habilidad para disolver los metales preciosos, y el oro junto con la plata son ligeramente solubles en el litargirio. A 726°C el litargirio tiene una fuerte afinidad por la sílice formando así una escoria muy viscosa teniendo como fórmula  $PbO \cdot SiO_2$  ó  $2PbO \cdot SiO_2$ : el  $PbO \cdot SiO_2$  funde a 770°C. Alrededor de 940°C la escoria tiene una excelente fluidez y ayuda al oro junto con la plata para que esto se colecte en el bullón de plomo presente. Una vez que el silicato de plomo sea formado llega a ser muy estable y es muy difícil de descomponer.

Tabla N° 2. 5 Características del Litargirio

| <b>Formula</b>             | <b>: PbO</b>                |
|----------------------------|-----------------------------|
| <b>Nombre químico</b>      | : Óxido de plomo II         |
| <b>Nombre común</b>        | : Litargirio                |
| <b>Aspecto</b>             | : Sólido amarillo brillante |
| <b>Peso molecular</b>      | : 223,2 g/mol               |
| <b>Peso de fusión</b>      | : 883°C                     |
| <b>Gravedad específico</b> | : 9,32                      |

Fuente: Método para determinar oro y plata JIS

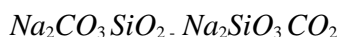
### 2.3.2.3. Carbonato de Sodio: $CO_3Na_2$

En estado de fusión tiene la propiedad de disolver o mantener en suspensión los materiales refractarios desechables, su punto de fusión es de 852°C, es un poderoso fundente básico. Los materiales refractarios son: sílice, hierro, cromo, aluminio.

La cantidad de carbonato de sodio a usarse depende de la naturaleza del mineral a analizar, es decir si es ácido o básico.

El carbonato de sodio es un poderoso y básico fundente, debido a la facilidad con que se forma los sulfuros alcalinos y sulfatos por ello actúa como desulfurante y agente oxidante. En estado de fusión tiene la propiedad de disolver o mantener en suspensión una gran proporción de materiales refractarios desechables tal como carbón o ceniza de hueso.

Cuando el calor llega a 950°C, el carbonato de sodio sufre una débil disociación con el desprendimiento de un pequeño vapor de CO<sub>2</sub> y la liberación de aproximadamente 0,4% de álcali libre. Cuando la sílice es adherida al carbonato fundido este álcali libre primero desaparece, entonces la reacción toma lugar entre la sílice y el carbonato de sodio y un cierto valor de CO<sub>2</sub> es desprendido, este último es directamente proporcional al valor de la sílice adherida alcanzando un estado de equilibrio de acuerdo a la siguiente ecuación:



Características del Carbonato de Sodio.

- Formula : Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>
- Nombre químico : Carbonato de sodio
- Nombre común : Caliza
- Aspecto : Polvo blanco higroscópico
- Peso molecular : 106,004 g/mol
- Punto de fusión : 852 °C
- Densidad : 2,533 g/cm<sup>3</sup>

#### 2.3.2.4. *Tetraborato de Sodio Decahidratado: Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O*

También conocido como **BORAX**; su punto de fusión es de 742°C. Es un fundente ácido, se combina y disuelve a los constituyentes básicos produciendo boratos. El bórax



posee poder disolvente sobre la sílice, el uso excesivo de este reactivo puede producir la pérdida de plata, así mismo consume plomo por la formación de boratos de plomo. Si el mineral es muy básico o contiene refractarios se debe emplear un exceso de bórax, se combina y disuelve prácticamente todo el óxido metálico ácido y básico, como por ejemplo. FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc., el bórax posee poder disolvente sobre la sílice, y es extremadamente viscoso cuando esta fundido, pero a rojo vivo se convierte en fluido; gramo a gramo baja el punto de fusión de la escoria y si se agrega en exceso facilita la formación de este, por esta razón es usado encima de cada crisol de fundición como una capa. Se examina la fórmula del bórax, y se nota que está constituida por dos moléculas una de meta borato y otra de anhídrido básico.

#### Características del Bórax

- Formula :  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
- Nombre Químico : Tetraborato de sodio decahidratado
- Nombre común : Bórax
- Aspecto : Sólido blanco cristalino
- Peso molecular : 201,22 g/mol
- Punto de fusión : 742 °C

#### 2.3.2.5. *Sílice: SiO<sub>2</sub>*

Es un fundente ácido poderoso, se combina con los óxidos metálicos, produce la escoria que vienen a ser los silicatos. Una de las características de los yacimientos auríferos del sur del Perú es que son **MINERALES CUARCIFEROS**, significa que tienen alto contenido de cuarzo, sílice o silicatos, razón por la cual en el Laboratorio de la Empresa Minera Luz del Sol S.A.C. **NO** usa **SILICE** en el proceso de análisis.

### 2.3.2.6. *Harina*

Es un agente reductor, por el carbón que contiene y es comúnmente usado cuando el mineral es paco u oxidado y su adición regula el tamaño del regulo de plomo. También se puede utilizar Tartrato de potasio ( $\text{KHC}_4\text{H}_4\text{O}_6$ ) en cambio de la harina, en lugar de usar clavos o nitrato de potasio. En general se usa para reducir a ciertos elementos difíciles o que forman encostramientos.

#### Características de la Harina

- Formula :  $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$
- Nombre Químico: Polisacárido - celulosa
- Nombre común : Harina
- Aspecto : Sólido blanco amarillento
- Peso molecular : 162,14 g/mol
- Punto de fusión : 742 °C

### 2.3.2.7. *Nitrato de Potasio: $\text{NO}_3\text{K}$*

Es un poderoso agente oxidante, comúnmente conocido como “NITRO”, funde a 339°C, también funde a menor temperatura sin alteración, pero a mayor temperatura se descompone desprendiendo oxígeno que oxida a los sulfuros y a muchos de los metales básicos, notablemente plomo y cobre. Si se funde solo llega a ser estable hasta una temperatura de 400°C. La reacción entre el nitro y el carbón tiene lugar en la siguiente reacción:

#### Características del Nitrato de Potasio.

- Formula :  $\text{KNO}_3$
- Nombre Químico: Nitrato de potasio
- Nombre común: Nitro ó salitre
- Aspecto : Pequeños cristales blancos

- Peso molecular: 101 g/mol
- Punto de fusión: 339 °C

### 2.3.2.8. *Nitrato de Plata: NO<sub>3</sub>Ag*

En los ensayos prácticos se utiliza no necesariamente la plata, también el cloruro de plata; los cuales son adheridas y/o añadidas a la muestra. La plata que está en forma de nitrato de plata líquido en forma de chapa de metal es utilizado en diferentes laboratorios es probable que contenga algo de oro, en el Laboratorio Químico de la Empresa Minera Luz del Sol S.A.C. se recupera para ser usado nuevamente previamente filtrado para evitar contaminación de oro y así haya alteraciones en análisis futuros. Sirve para coleccionar el oro, cuando tiene bajo contenido o no contiene plata, permite el proceso de partición en forma exacta, se agrega con la finalidad de formar el botón Doré (debe tener una proporción de 3 partes de plata y una de oro). Si se usa en solución debe tener una concentración al 10% en peso.

#### Características del Nitrato de Plata.

- Fórmula : AgNO<sub>3</sub>
- Nombre químico: Nitrato de plata
- Nombre común : Piedra infernal
- Aspecto : Cristales de colores
- Peso molecular : 169,87 g/mol
- Punto de fusión : 212 °C
- Densidad a 0 °C : 4,35 g/cm<sup>3</sup>

### 2.3.3. Aspectos fundamentales de la Fusión

En la metalurgia la fusión es la operación mediante la cual una carga compuesta por un surtido de diferentes especies metálicas (óxidos, sulfuros, sulfatos, silicatos, entre otros) se lleva a su fase líquida por mediante altas temperaturas, teniendo en cuenta circunstancias

termodinámicas para que se formen dos o más fases, insolubles entre ellas, de modo que los productos sean sencillamente separables (Schuhmann, 1968).

#### **2.3.4. Fases Generadas en la Fusión**

Las fases generadas suelen ser 4 fases las cuales son: escoria, mata, speiss, y metálica. Durante la fusión, estas fases en estado líquido se estratifican formando capas relativamente inmiscibles, y fácilmente separables, una vez que se han enfriado y se han solidificado.

##### **2.3.4.1. Escoria.**

Las soluciones de óxidos de distintos orígenes, como también fluoruros, cloruros, silicatos, fosfatos, boratos, entre otros. La escoria es el líquido que posee la menor densidad por lo que se ubica en la parte superior de la mezcla fundida. Las densidades de algunas escorias comunes se encuentran entre 2.72 y 2.84 g/cm<sup>3</sup> cuando se encuentran a temperaturas entre 1823 y 1853 K (Oliveira et al., 1999). Las escorias por lo general son productos de desperdicio y cumplen una función importante, ya que se encargan de coleccionar y retirar la mayor parte de producto que no se desea encontrar en el material valioso. Otra razón por la cual las escorias son importantes es porque sirven como protección térmica de la mezcla fundente, evitando la pérdida de calor de la misma (Schuhmann, 1968; Coudurier et al., 1971). La Figura 2.1 muestra una fotografía de una escoria generada por fusión utilizando bórax como principal agente fundente en una mezcla de óxidos de cobre y hierro.

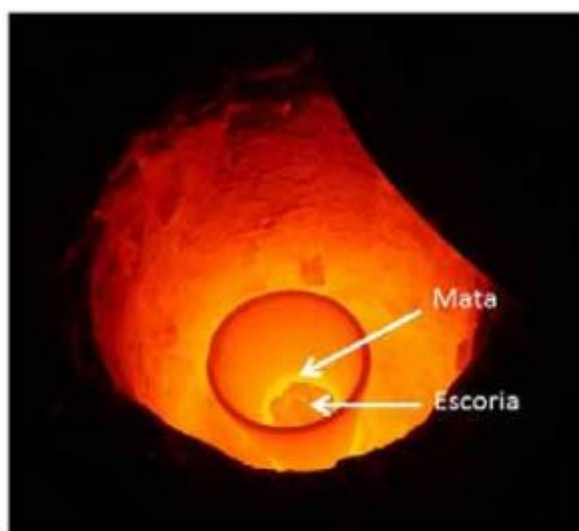
##### **2.3.4.2. Mata.**

Las soluciones de sulfuros metálicos, de los cuales los más comunes son los sulfuros de hierro, cobre, níquel, plomo y cinc. Las matas líquidas son bastante fluidas por lo que probablemente tienen viscosidades del mismo orden que los metales líquidos. Las matas en

estado líquido suelen disolver fácilmente a los metales preciosos, especialmente al oro y la plata, por lo cual es una fase indeseable en procesos de recuperación de estos metales (Rosenqvist, 1983; de la Torre, 1988). Las matas pueden tener densidades entre 4.61 y 7.7 g/cm<sup>3</sup>, y al ser más pesadas que las escorias se depositan y solidifican por debajo de éstas (Blanco, 2011).

Fotografía en la que se puede apreciar el corte transversal de un crisol de arcilla, en el cual la fase mata se ha depositado en la parte inferior, y la fase escoria en la parte superior.

Figura N° 2. 1 Crisol de arcilla con y la fase escoria en la parte superior y mata parte inferior



Elaboración propia

#### 2.3.4.3. *Speiss.*

La fase speiss está compuesta básicamente por soluciones de arseniuros y antimoniuros de metales pesados como son hierro, cobalto, níquel, cobre, entre otros. Tienen una densidad menor que la fase metálica, pero mayor que la fase escoria y la fase mata. Al igual que las fases mata éstas suelen disolver fácilmente a los metales preciosos, en especial

al oro y al platino, por lo cual es una fase indeseable en procesos de recuperación de estos metales (Rosenqvist, 1983; de la Torre, 1988).

#### **2.3.4.4. Metálica.**

La fase metálica está formada por metales puros, aleaciones de metales, o soluciones de no metales con metales. En estado líquido los metales poseen bajas viscosidades y altas tensiones superficiales, lo que resulta en un ángulo de contacto mínimo entre el metal líquido y las superficies de los materiales refractarios que los contienen, permitiéndoles fluir con mayor facilidad. La densidad de esta fase es mayor que la de las otras fases, por lo que a ésta se la encuentra en la parte inferior de la mezcla fundida.

Por ejemplo, la densidad del oro es 19.3 g/cm<sup>3</sup>, de la plata es 10.49 g/cm<sup>3</sup>, del cobre es 8.96 g/cm<sup>3</sup>, del plomo es 11.34 g/cm<sup>3</sup>, entre otros (Luque del Villar, y Sierra, 2011). Generalmente, ésta es la fase valiosa del proceso de fusión y la que se desea recuperar (de la Torre, 1988). En la Figura 2.4 se puede apreciar varias fases metálicas compuestas principalmente por cobre, oro y plata obtenidas durante esta investigación.

#### **2.3.5. Estructura de las Escorias**

La mayoría de las escorias están formadas principalmente por óxidos, los cuales están en forma abundante como parte de la ganga que se encuentra con los metales valiosos. Estos óxidos son SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Las escorias están formadas principalmente por tres tipos de óxidos: básicos, ácidos, y anfóteros (Schuhmann, 1968; Coudurier et al., 1971).

### 2.3.5.1. Óxidos básicos

Son óxidos formados por metales bivalentes como por ejemplo FeO, MgO, CoO, ZnO y PbO. Se forman al unirse el metal con oxígeno por medio de enlaces iónicos, dando lugar a la formación de redes cristalinas en tres dimensiones. Las redes cristalinas de estos óxidos se rompen durante la fusión, dando lugar a la formación de cationes rodeados por aniones de características menos rígidas (Schuhmann, 1968; Coudurier et al., 1971; Lenehan y Murray-Smith, 1986).

Figura N° 2. 2 De fases metálicas compuestas principalmente por cobre, oro y plata



Elaboración propia

Algunos óxidos metálicos son menos iónicos que otros, por lo cual es importante conocer la proporción de enlaces iónicos, ya que por medio de éstos se puede medir la predisposición de los óxidos a disociarse como iones en estado líquido (de la Torre, 1988; Gilchrist, 1989).

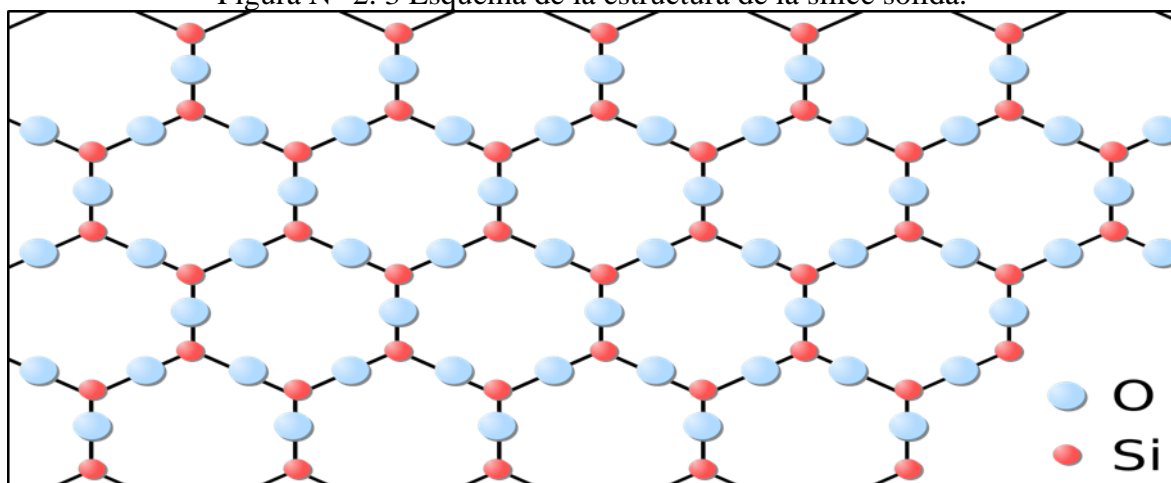
### 2.3.5.2. Óxidos ácidos.

Son óxidos que se encuentran unidos por enlaces covalentes formados por no metales, en donde los más importantes son el dióxido de sílice (SiO<sub>2</sub>) y el trióxido de boro

( $B_2O_3$ ). Adicionalmente existen ciertos metales que forman óxidos ácidos como es el caso de  $As_2O_5$ ,  $Sb_2O_5$ ,  $WO_3$ ,  $V_2O_5$ ,  $TiO_2$ , y  $Bi_2O_5$ . Estos óxidos en estado sólido forman redes tridimensionales al añadir a su estructura iones  $O^{2-}$  libres (Schuhmann, 1968; Lenehan y Murray-Smith, 1986).

El más importante de los óxidos ácidos es la sílice ( $SiO_2$ ), el cual es un compuesto covalente no conductor. En estado sólido los átomos de sílice forman una estructura en forma de un hexágono, en donde cada átomo de sílice forma una estructura tetraédrica, como se muestra en la Figura 2.5 (Gilchrist, 1989). Al fundirse la sílice, la forma de la estructura tridimensional sufre distorsiones, pero los tetraedros ( $SiO_4$ )<sup>4-</sup> se mantienen hasta cierto límite dependiendo de la temperatura. Si se aumenta la temperatura hasta  $1719.85^\circ C$  se rompen ciertos puntos de la red tridimensional, formándose así asociaciones de iones de gran tamaño

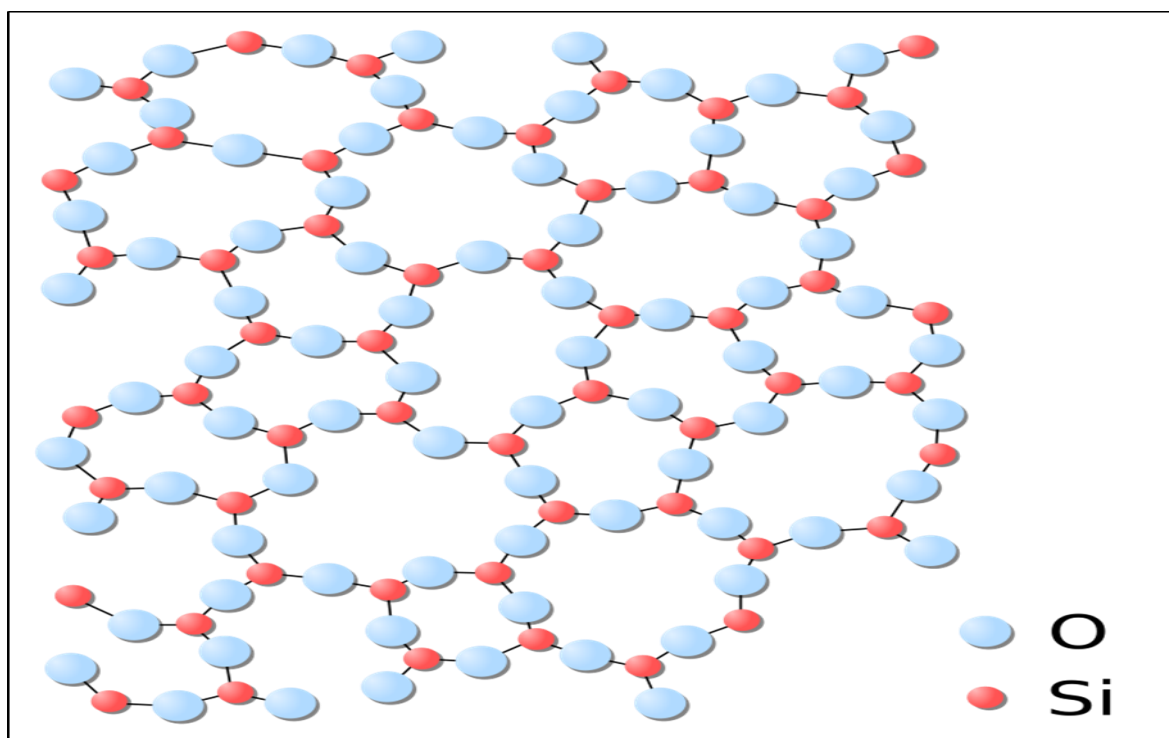
Figura N° 2. 3 Esquema de la estructura de la sílice sólida.



Fuente: LUCIO. F. "EL ORO METAL PRECIOSO", Revista Minera N° 186

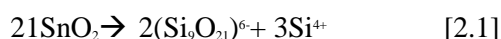
Figura N° 2. 4 Esquema de la estructura de la sílice fundida





Fuente: LUCIO. F. "EL ORO METAL PRECIOSO", Revista Minera N° 186

Como  $(\text{Si}_9\text{O}_{21})^{6-}$  y una pequeña cantidad de iones  $\text{Si}^{4+}$  como se indica en la reacción [2.1] (Gilchrist, 1989):



### 2.3.5.3. Óxidos anfóteros.

Los óxidos anfóteros son aquellos que poseen propiedades tanto de los óxidos básicos, como de los óxidos ácidos, esto quiere decir que se comportan como ácidos frente a óxidos básicos y como bases frente a óxidos ácidos. Algunos de los óxidos anfóteros más importantes que se encuentran en yacimientos de metales preciosos son:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$  y  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (Schuhmann, 1968; Coudurier y Wilkomirsky, 1971; Lenehan y Murray-Smith, 1986; Gilchrist, 1989).

La fuerza de atracción de un ión metálico hacia un ión de oxígeno es proporcional a la proporción  $z/A^2$ , en donde  $z$  es la carga del ión metálico, y  $A$  es igual a la suma de los radios iónicos (Gilchrist, 1989). La Tabla 2.1 presenta la clasificación de los óxidos en

función de su acidez. En ésta también se observa que mientras menor es la fuerza de atracción, mayor es el carácter iónico. La atracción es mayor en los casos del fósforo y el silicio los cuales tienen iones pequeños que llevan grandes cargas eléctricas y estas de hecho atraen al oxígeno fuertemente formando aniones muy estables.

Tabla N° 2. 6 Clasificación de los óxidos

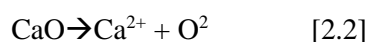
| Óxido                          | $z/A_2$ | % de enlace iónico | Tipo de óxido |
|--------------------------------|---------|--------------------|---------------|
| Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.18    | 65                 |               |
| BaO                            | 0.27    | 65                 |               |
| SrO                            | 0.32    | 61                 |               |
| CaO                            | 0.35    | 61                 |               |
| MnO                            | 0.42    | 47                 | Básico        |
| FeO                            | 0.44    | 38                 |               |
| ZnO                            | 0.44    | 44                 |               |
| MgO                            | 0.48    | 54                 |               |
| BeO                            | 0.69    | 44                 |               |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.72    | 41                 |               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.75    | 36                 | Anfótero      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.83    | 44                 |               |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.83    | 41                 |               |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 1.17    | --                 |               |
| SiO <sub>2</sub>               | 1.22    | 36                 | Acido         |
| P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 1.66    | 28                 |               |

Fuente: Gilchrist, 1989

#### 2.3.5.4. Formación de Escorias

Las escorias en su mayoría están formadas por óxidos ácidos y básicos, se forman por la ruptura de las redes tridimensionales de óxidos ácidos, por medio de los iones simples que se forman de la disociación de los óxidos básicos. Por ejemplo, si a la sílice que forma

una red tridimensional se le adiciona un óxido básico como el óxido de calcio, el cual se disocia de acuerdo a la reacción [2.2]:



Este óxido básico ingresará en las cadenas tridimensionales Si-O, generando varios cortes, haciendo que las redes se vayan rompiendo paulatinamente. En la Tabla 2.2 se puede observar que el número de vértices destruidos depende de la fracción molar del óxido metálico, es decir, depende de la relación entre O/Si. Cuando la concentración molar del óxido metálico es menor al 12%, se sabe que todavía existen enlaces tridimensionales. Cuando la concentración molar del óxido metálico es mayor al 12% hay un mejor rompimiento de las cadenas tridimensionales, dando lugar a la formación de varios iones de grandes tamaños, que luego van disminuyendo de tamaño hasta llegar a iones pequeños de  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ . Esto hace que se produzcan variaciones en las características de la fase líquida, disminuyendo la viscosidad y aumentando la conductividad iónica. Esto quiere decir que cuando se añade mayor cantidad de óxido metálico la relación entre O/Si es mayor (Muñoz, 1993).

Tabla N° 2. 7 Influencia de la adición de un oxido básico en la estructura de los silicatos

| Relación<br>O/Si | FORMULA                           | ESTRUCTURA  |
|------------------|-----------------------------------|---|
| 2/1              | $\text{SiO}_2$                    | Tetraedros: forman red hexagonal                  |
| 5/2              | $\text{MO} \cdot 2 \text{SiO}_2$  | Laminar: Un vértice se rompe                      |
| 3/1              | $\text{MO} \cdot \text{SiO}_2$    | Fibroso: Dos vértices se rompen                   |
| 7/2              | $3\text{MO} \cdot 2 \text{SiO}_2$ | $2(\text{SiO}_4)^{6-}$ : Tres vértices se rompen  |
| 4/1              | $2\text{MO} \cdot \text{SiO}_2$   | $(\text{SiO}_4)^{4-}$ : Cuatro vértices se rompen |

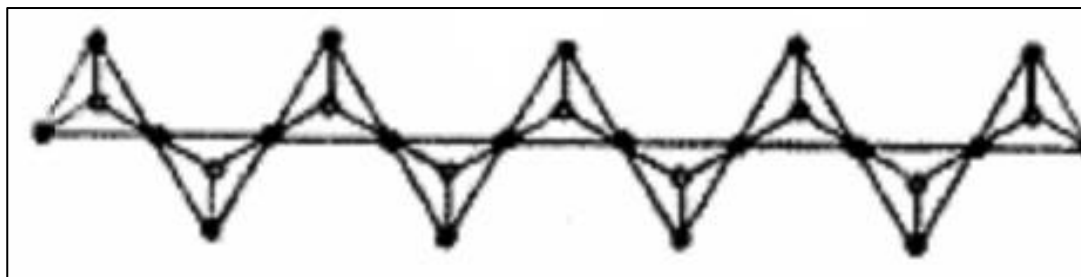
Fuente: Schuhmann, 1968

Al necesitarse una fase líquida poco viscosa se desea tener una composición de iones  $(\text{SiO}_4)^+$  predominante, para lo cual la composición del ortosilicato  $2\text{MO} \cdot \text{SiO}_2$  es la adecuada con una relación de Oxígeno/Silicio de 4/1. En la Figura 2.7 se muestra la estructura fibrosa de la sílice, la cual tiene dos vértices destruidos por cada tetraedro. La Figura 2.8 indica la estructura de la sílice, en donde, todos los vértices de la red hexagonal están destruidos. Además, se observa que los tetraedros se encuentran separados por iones metálicos, y en la Figura 2.9, se puede observar la estructura de los silicatos sólidos, sin una estructura ordenada, debido al aumento de la temperatura.

### 2.3.6. Consideraciones para la Formación de Escorias

La escoria debe tener una composición adecuada que se encargue de la recolección y eliminación de forma efectiva de diferentes elementos e impureza

Figura N° 2. 5 Estructura fibrosa de la sílice



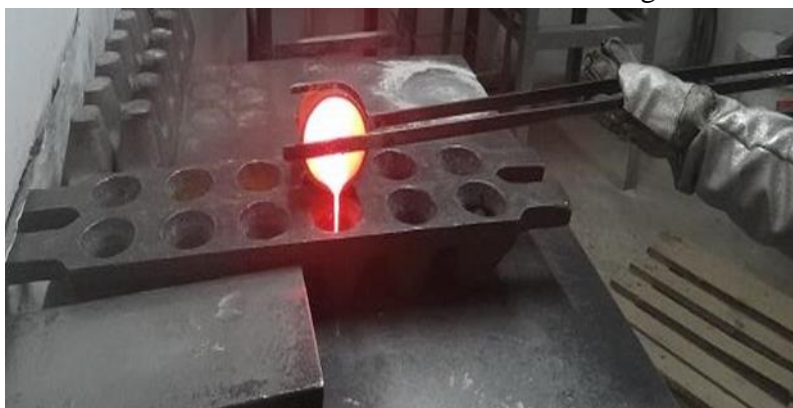
*Fuente: Lucio. F. "El Oro Metal Precioso, (Muñoz, 1993)*

Que no interesan en la fase metálica, y que se encuentran en el mineral de análisis interfiriendo en la recuperación del metal precioso (Schuhmann, 1968). Algunas de las consideraciones importantes para la formación de escorias son: temperatura, composición, viscosidad y densidad. Para la eliminación de impurezas, la temperatura de fusión es importante y depende básicamente de la composición de la carga. La fase escoria suele ser la fase más difícil de fundir debido a la presencia de sílice, la cual funde a una temperatura de  $1719.8^\circ\text{C}$  (Bolufer, 2009). Mientras mayor es la cantidad de sílice, la escoria tiende a ser

menos fusible, por lo que a cargas ácidas o con gran cantidad de sílice se añade una mezcla fundente para disminuir la temperatura de fusión de las escorias hasta aproximadamente 899.85°C (Schuhmann, 1968).

Otro parámetro a considerar es la viscosidad de la carga en estado líquido. La viscosidad de una escoria depende básicamente de su composición y temperatura. La viscosidad es una propiedad difícil de medir experimentalmente a altas temperaturas. Si aumenta la temperatura la viscosidad de una escoria de composición específica tiende a disminuir. En cuanto a la composición, si la cantidad de sílice aumenta se producen escorias más viscosas. El aumentar el contenido de óxidos básicos contribuye a la disminución de la energía de activación, lo que disminuye la temperatura de fusión de la escoria, y por ende, se tienen escorias menos viscosas (Schuhmann, 1968; Coudurier y Wilkomirsky, 1971). Las densidades de las escorias son muy importantes, ya que la escoria al estar formada en su mayor parte por óxidos hace que ésta sea la más liviana, permitiendo de esta manera la separación de las fases en la fusión por medio de sedimentación de las fases más pesadas que son: fase mata, fase speiss y fase metálica, en orden ascendente (de la Torre, 1988). También debe tomarse en cuenta la composición de la escoria, ya que debe ser lo menos corrosiva hacia el material refractario, siendo aconsejable la utilización de escorias básicas para materiales refractarios básicos y escorias ácidas para refractarios ácidos (Schuhmann, 1968). La Figura 2.10 muestra una fotografía de una carga que cumple con las consideraciones básicas para la formación de escorias. En esa fotografía se tiene que con las proporciones adecuadas de la mezcla fundente se llega a tener escorias bastante fluidas, lo que permite una buena separación de las fases que se generan durante la fusión.

Figura N° 2. 6 Descargue de la muestra fundida carga que cumple con las consideraciones básicas de la formación de escorias en la lingotera.



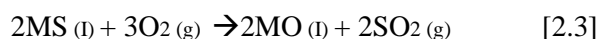
Elaboración propia

### 2.3.7. Tipos de Fusión

En metalurgia extractiva existen diferentes tipos de fusión de los cuales los más importantes son: fusión oxidante y fusión reductora.

#### 2.3.7.1. *Fusión oxidante.*

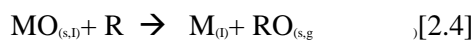
La fusión oxidante es un proceso exotérmico que tiene como objetivo originar una oxidación de compuestos metálicos por medio de un cambio de fase (de sólido a líquido), y la adición de reactivos oxidantes tales como el aire, oxígeno, óxidos metálicos, entre otros. Una de las aplicaciones más comunes de la fusión oxidante es la desulfuración de matas. La reacción [2.3] es un ejemplo de fusión oxidante que ilustra el proceso de desulfuración:



En donde MS es el sulfuro metálico y MO es el óxido metálico que se forma (Rovira, 1982).

#### 2.3.7.2. *Fusión reductora.*

La fusión reductora es un proceso endotérmico en donde un óxido metálico se reduce, el cual puede estar en estado sólido o líquido, a metal en estado líquido, como se indica en la reacción.



En donde MO es el óxido metálico, R es el agente reductor y M es el metal en la forma líquida. Los agentes reductores más comunes son: carbono, monóxido de carbono, hidrógeno, aluminio y magnesio (Rovira, 1982).

## 2.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente trabajo es el producto de experiencias y la necesidad adquirida de haber realizado mis prácticas pre profesionales en CORPORACION MINERA ANANEAS S.A. Empresa que me dio la oportunidad de realizar mis prácticas pre profesionales.

La importancia de ensayar los minerales para obtener y mantener los máximos grados de concentrado y recuperaciones, dependerá tanto del tipo de mineral como de la operación de la planta. Y las condiciones requeridas para lograr los resultados metalúrgicos óptimos.

Debido a la importancia que radica el desarrollo de las pruebas metalúrgicas y químicas a nivel de laboratorios, y que sirva a su vez de soporte a las labores de planta.

### 2.4.1. Problema General

- ¿Cuál es el reactivo utilizado como colector en horno mufla para un análisis de oro y plata en la Corporación Minera Ananea?

#### 2.4.1.1. Problemas Específicos

- ¿Cuál es el método para oxidar sulfuros en concentrados gravimétrico en el análisis de oro y plata en horno mufla utilizando cobre como colector en la Corporación Minera Ananea?

- ¿Cuál es la disgregación ácida para disolver todos los metales a excepción del oro en el análisis de oro y plata en horno mufla utilizando cobre como colector en la Corporación Minera Ananea?

## **2.5. JUSTIFICACIÓN**

### **2.5.1. Científica**

El estudio se justifica en términos de desarrollo científico; el análisis de minerales de metales preciosos requiere de constantes cambios e innovaciones según la naturaleza del mineral y el empleo de nuevas tecnologías, ya que los análisis químicos vienen experimentando cambios continuos de acuerdo al avance científico y tecnológico; para que los resultados sean confiables debería estar de acorde con el avance científico y conforme con las normas vigentes.

### **2.5.2. Técnica**

Existen muchos métodos de análisis de oro como: por métodos clásicos y experimentales (Instrumentación o Absorción Atómica, Vía Seca o Fire assay el método combinado), sin embargo, cada laboratorio tiene sus propios métodos de análisis según la naturaleza del mineral y la concentración de los metales en que se encuentran, por ello se requiere de un estudio experimental para optimizar el análisis de oro por gravimetría y así garantizar la confiabilidad de sus resultados.

### **2.5.3. Económica**

En el análisis químico de minerales de oro y plata se usan diferentes tipos de formulación de fundentes y condiciones de operación, en la medida que se utilizan estos reactivos químicos, los costos por análisis varían, como también los impactos que causan al



medio ambiente por los gases tóxicos que emiten en la fusión, el estudio se trata de minimizar los impactos ambientales generados por esta actividad

## CAPITULO III

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

En la sección se describe los procedimientos seguidos y el instrumental usado. Se incluyen esquema del procedimiento experimental, imágenes de los equipos y materiales usados. Los procedimientos descritos detallan con claridad el método utilizado.

#### 3.1. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Hernandes, Fernandez, y Baptista (2014) “Este método de razonamiento consiste en tomar conclusiones generales para obtener explicaciones particulares. El método se inicia con el análisis de los postulados, teoremas, leyes, principios, etc, de aplicación universal y de comprobada validez, para aplicarlos a soluciones o hechos particulares” (p.59). Entonces a partir de este método, se recuperará el oro a través de un proceso de flotación utilizando reactivos.

“la investigación se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido, los estudios pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto), como de los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos” Según el metodólogo (Arias, 2012 p.135).

#### 3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de la investigación es experimental, según sostiene Hernandez, Fernandez, & Baptista (2014), los cambios en la variable ya ocurrieron y el investigador tiene que limitarse a la observación de situaciones ya existentes dada la incapacidad de influir sobre

las variables y sus efectos. La investigación es experimental porque utilizaremos un método ya establecido y nos regiremos a él.

El diseño que se utilizará es experimental, que se realizan con la manipulación deliberada de variables y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para analizarlos (Bernal, 2010)

El presente trabajo de investigación se basa en el diseño de pruebas experimentales a nivel de laboratorio.

Según Arias, (2012) este trabajo puede ser considerado una investigación aplicada, debido a que este tipo de investigación parte del conocimiento generado por la investigación básica, tanto para identificar problemas sobre los que se debe intervenir como para definir las estrategias de solución.

Debido a la naturaleza de los problemas planteados, ya que se utilizarán conocimientos de ingeniería metalúrgica a fin de ser aplicados para el desarrollo del análisis de oro y plata en horno mufla utilizando cobre como colector.

### **3.3. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN**

El nivel de investigación es: experimental.

Según, Bernal, (2010) Define los estudios experimental como “aquellos cuyo objetivo es caracterizar un evento o situación concreta, indicando sus rasgos peculiares o diferenciadores.

Partiremos de un diagnóstico de la situación actual de la empresa para proponer una alternativa de solución a la problemática, explicando todo lo que se va realizando en el

desarrollo de la investigación para después proponer un Plan de seguridad y salud en el trabajo.

### 3.4. HIPÓTESIS GENERAL

- El cobre tiene condiciones específicas para actuar como colector y realizar los rendimientos de colección de oro y plata en menas y concentrados poli sulfurados por el método de ensayo al fuego

#### 3.4.1. Hipótesis Especifica

- El cobre como colector tiene propiedades para oxidar sulfuros en concentrados gravimétrico al realizar el análisis de oro y plata.
- . El cobre como colector, forma una disgregación acida que disuelve todos los metales a excepción del oro.

### 3.5. ÁMBITO DE ESTUDIO

La CORPORACIÓN MINERA ANANEA S. A. se encuentra ubicada en la Rinconada - Cerro lunar de Oro.

Paraje : Cerro lunar de Oro.  
Distrito : Ananea  
Provincia : San Antonio de Putina  
Departamento : Puno

Coordenadas Geográficas

Latitud : 40° 37' 10''  
Longitud : 69° 26' 50''  
Altitud : 5000 – 5200 *m.s.n.m*

#### 3.5.1. Accesibilidad.

El área es accesible por presentar algunas rutas conocidas: Ananea Rinconada Lunar de Oro cubriendo una distancia de 25 km. Hacia la corporación Minera Ananea, de carretera

trocha carrozable en un tiempo de 45 minutos y el tiempo de viaje desde Puno a la Corporación Minera Ananea S.A. se describe en el siguiente cuadro.

Tabla N° 3. 1 Ruta y tiempo para llegar a la Corporación Minera Ananea S.A.

| <u>Ruta inicio</u> | <u>Ruta final</u> | <u>Tiempo</u> | <u>Carretera</u> | <u>Distancia</u><br><u>(Kilómetros)</u> |
|--------------------|-------------------|---------------|------------------|---|
| Puno               | Juliaca           | 0.45minutos   | Asfaltada        | 40                                      |
| Juliaca            | Putina            | 2.00 horas    | asfaltada        | 89                                      |
| Putina             | Ananea            | 1.00horas     | asfaltada        | 62                                      |
| Ananea             | La Rinconada      | 0.40 min      | Trocha           | 20                                      |
| La Rinconada       | Corporación CMASA | 0.15 min      | trocha           | 5                                       |
| TOTAL              | -----             | 4.40 horas    | -----            | 216 Km.                                 |

Elaboración propia

### 3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA

#### 3.6.1. Población

Para Hernández et al. (2014) “La población es un conjunto de elemento acotados en un tiempo y en un espacio determinado, con alguna característica común ya sea observable o medible”. La población para esta investigación será el mineral de la Corporación minera Ananea.

#### 3.6.2. Muestra

Para Hernández et al., (2014) La muestra es el subconjunto de la población.

El tamaño de muestra para la presente investigación se enfocará en utilización del muestreo del mineral.

### 3.7. MUESTREO DEL MINERAL

Operación de remover una pequeña fracción o parte, que se denominara muestra, desde un conjunto de material de mucho mayor volumen, de tal manera que las características del conjunto pueden estimarse estudiando las características de la muestra. Si la materia muestreada es rigurosamente homogénea, es decir, si todas sus partes o elementos constitutivos son idénticos entre sí, no importara lo pequeña que sea la fracción que se considere o la forma en que se extraiga y siempre presentara las mismas características del total. Las menas de interés metalúrgico están constituidas por partículas de diversos tamaños y composiciones. Estas partículas heterogéneas no constituyen un medio continuo, sino discreto. Esto permite que junto a una partícula pueda haber otras de composición o tamaño completamente distinto produciéndose un cambio brusco de composición al pasar de una partícula a otra. Este fenómeno se denomina heterogeneidad de constitución y no permite que los lotes de materia puedan ser muestreadas en forma exacta. La necesidad de determinar características físicas y químicas de grandes volúmenes o lotes de material sea en reposo o en movimiento, se presenta en casi todas las operaciones y procesos minero - metalúrgicos. Por razones económicas y prácticas el conocimiento de los lotes se obtiene a través de determinaciones realizadas sobre una fracción o muestra del material:

a) Para programar la producción de frentes de explotación de una Mina. b) Para evaluar la operación global. c) Para evaluar el control metalúrgico de una planta de procesamiento d) Para valorar los concentrados.

Por la importancia de cada una de las operaciones, es claro que una mala práctica de muestreo tendrá consecuencias nefastas. Por ejemplo, a menudo surgen diferencias entre leyes de mineral informadas por la mina y aquellas recibidas por la Concentradora. También pueden existir diferencias inexplicables entre la alimentación y salida de material en la

Concentradora, o entre los envíos de concentrados y recepción de ellos en Fundición, o lo que es más grave aún, entre los análisis del vendedor y el comprador de minerales o concentrados. Sin lugar a dudas, podría haber muchas razones para explicar esas diferencias, pero la metodología de muestreo empleado es tal vez una de las más importantes

### 3.7.1. Objetivos Del Muestreo

El muestreo es una serie de operaciones que se ejecutan con el propósito de controlar y establecer las condiciones en que se desarrolla la operación global de un proceso extractivo. De tal forma el muestreo es importante por cuanto los errores derivados de una muestra real tomada repercuten en la representatividad de los análisis y estudios que se realicen con esta muestra. Así, las operaciones de control pueden efectuarse en forma satisfactoria solo si el muestreo se hace en forma correcta y si la muestra, que es una pequeña fracción del lote, es realmente representativa de este.

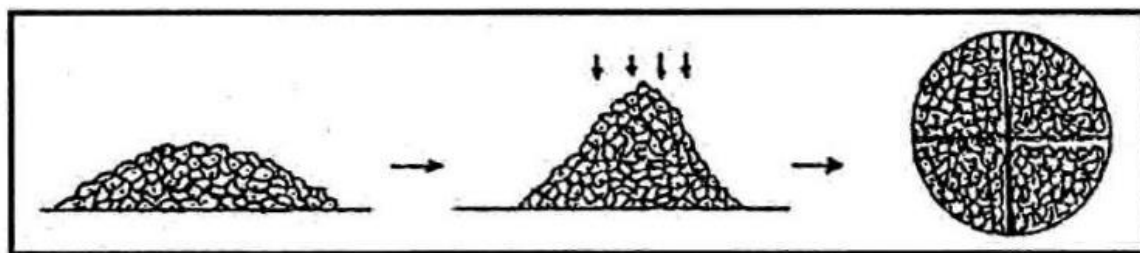
### 3.5. MÉTODOS Y DISPOSITIVOS DE MUESTREO EN LABORATORIO

La obtención de una muestra de laboratorio, para realizar análisis granulométrico,

análisis químico y/o mineralógico, se puede realizar mediante diversas técnicas. Un requisito previo muy importante es una buena mezcla del material. La mezcla se efectúa frecuentemente con paño roleador, este varía en tamaño de acuerdo a la cantidad de muestra. Para muestras de peso considerable, el roleo se efectúa con la participación de dos personas que sujetan el paño por sus extremos haciéndolo rodar el material de una esquina a la otra. Esta operación se realiza durante varios minutos. Para casos en que la muestra es de mucha mayor cantidad se utilizan mezcladores mecánicos. Cuando la muestra es pequeña aproximadamente a 3 Kg, la operación la realiza una sola persona con un paño roleador sobre una mesa de trabajo.

a) Cono y Cuarteo.- Uno de los métodos más antiguos de los demás, limitándose en la actualidad en su uso en lotes de menos de una tonelada con tamaño de partículas máximo de 50 mm La homogenización ya sea por roleo en caso de muestras pequeñas y por medio de una pala en caso que la cantidad de material de muestreo es muy grande se apila en forma cónica, esta operación se repite de 2 a 3 veces con la finalidad de homogenizarlos, de ello se forma un cono y después una torta circular plana para luego dividirlos en cuatro partes a lo largo de las dos diagonales perpendiculares entre sí. Los dos cuartos opuestos se separarán como muestras y el par restante representara el rechazo. Se vuelve a mezclar y el proceso se repite varias veces hasta obtener el tamaño apropiado de muestra. Con la muestra de se forma un cono, el que se divide en cuatro partes, después de aplastarlo.

Figura N° 3. 1 Muestra de se forma un cono, el que se divide en cuatro partes, después de aplastarlo



Fuente: Procesamiento de Minerales — TECSUP 2007

### 3.8. FUSIÓN DE CONCENTRADOS

Para la fusión de concentrados es necesaria la adición de una mezcla fundente, es decir, de reactivos químicos que ayuden a la formación de una escoria líquida a la temperatura mínima de fusión de los escorificantes.

La determinación de una dosificación óptima de la mezcla fundente requiere de un análisis mineralógico del material que se va analizar. Un mineral que contenga una ganga ácida requerirá una mezcla fundente básica, al igual que un mineral con una ganga básica necesitará una mezcla fundente ácida (Bugbee, 1940; Lenehan y Murray-Smith, 1986). Los



principales fundentes o reactivos de fusión utilizados para la recuperación de oro y plata son: sílice, bórax, bicarbonato de sodio, nitrato de potasio y una fuente de carbono como reductor.

La sílice ( $\text{SiO}_2$ ) es un reactivo de fusión fuertemente ácido, que se combina con los óxidos metálicos para formar silicatos, los cuales son fundamentales en la mayoría de escorias. La sílice forma cinco clases de silicatos los cuales se clasifican de acuerdo a la relación de oxígeno en la base u óxidos metálicos con el oxígeno del ácido o sílice (Bugbee, 1940; Lenehan y Murray-Smith, 1986; Smith, 1987). La Tabla 3.1 indica las relaciones de oxígeno entre el ácido y base, y la clasificación de los silicatos. El objetivo de la sílice como constituyente en la mezcla fundente es el de formar la fase escoria. El bórax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) es un fundente ácido, activo y muy fusible, se funde en su propia agua de cristalización, al calentarlo se hincha por la eliminación de agua, se funde formando un vidrio viscoso a  $526.85^\circ\text{C}$ , y se vuelve un líquido muy fluido sobre los  $726.85^\circ\text{C}$ . El bórax disuelve a la mayoría de óxidos metálicos por lo que el propósito del borax en la mezcla fundente es ayudar en la formación de escoria.

En pocas cantidades, disminuye la temperatura para la formación de escoria y genera una fusión ordenada y tranquila. La disolución de óxidos metálicos por medio de bórax se lleva a cabo en dos etapas: primero el bórax se funde a una forma vidriosa transparente, que consiste de una mezcla de metaborato de sodio y anhídrido bórico, como se observa en la reacción :

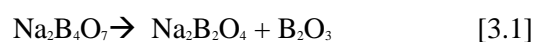
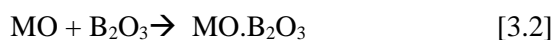


Tabla N° 3. 2 Clasificación de los silicatos

| Nombres        | Formula                | Relación de Oxígeno |
|----------------|------------------------|---------------------|
|                |                        | Acido : Base        |
| Subsilicato    | 4MO. SiO <sub>2</sub>  | 1:2                 |
| Monosilicato   | 2MO. SiO <sub>2</sub>  | 1:1                 |
| Sesquisilicato | 4MO.3SiO <sub>2</sub>  | 1.5:1               |
| Metasilicato   | MO. SiO <sub>2</sub>   | 2:1                 |
| Trisilicato    | 2MO.3 SiO <sub>2</sub> | 3:1                 |

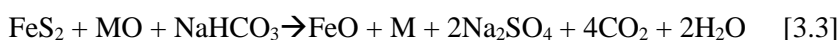
Fuente:(Lenehan y Murray-Smith, 1986)

El anhídrido bórico reacciona con el óxido metálico para formar un borato metálico como se indica en la reacción :



Se conocen cinco clases de boratos, estos tienen una clasificación similar a los silicatos y se presenta en la Tabla 3.2 (Bugbee, 1940; Lenehan y Murray-Smith, 1986; Smith, 1987). La mezcla fundente se añade para tener una escoria constituida principalmente de borosilicatos, los cuales a su vez existen en forma de metasilicatos y metaboratos, ya que estos disuelven los óxidos metálicos y forman escorias fusibles y de menor viscosidad a las temperaturas de trabajo del horno de fusión (Bugbee, 1940; Lenehan y Murray-Smith, 1986).

El bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>) es un reactivo de fusión fuertemente alcalino, y se utiliza en el ensayohorno mufla debido a su bajo costo y a su pureza. Al estar en presencia de aire oxida los sulfuros a sulfatos, por esta razón el bicarbonato de sodio, al igual que el carbonato de sodio, puede ser considerado como un fundente oxidante y desulfurante. Los sulfatos son producidos con mayor facilidad en presencia de un agente oxidante como un óxido metálico. Esta formación de sulfato se aprecia en la reacción



El nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ) es un energético agente oxidante, se funde a  $356.85^\circ\text{C}$ , a mayores temperaturas sufre ruptura de enlaces, liberando oxígeno. El oxígeno que se libera reacciona oxidando al sulfuro y muchos de los metales, en especial plomo y cobre. Es utilizado en horno mufla especialmente para la oxidación de sulfuros, arseniuros y antimoniuros. La oxidación de sulfuros metálicos a óxidos por medio de nitrato de potasio se aprecia en la reacción [3.4] (Bugbee, 1940; Lenehan y Murray-Smith, 1986; Smith, 1987):



Tabla N° 3. 3 Clasificación de los boratos

| Nombre       | Fórmula                                   | Relación de Oxígeno |
|--------------|---|---------------------|
|              |   | Ácido: Base         |
| Ortoborato   | $3\text{MO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$   | 1:1                 |
| Piroborato   | $2\text{MO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$   | 1.5:1               |
| Sesquiborato | $3\text{MO} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$  | 2:1                 |
| Metaborato   | $\text{MO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3$    | 3:1                 |
| Tetraborato  | $2 \text{MO} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$ | 6:1                 |

Fuente: (Lenehan y Murray-Smith, 1986)

### 3.8.1. Colectores utilizados en el Método de Horno Mufla

El análisis por ensayo en horno mufla de una muestra de concentrado gravimétrico, consiste en fundir a temperaturas en un rango de  $1126.8 - 1226.8^\circ\text{C}$  a la carga con la ayuda de una mezcla fundente, generalmente constituida por bórax, carbonato de sodio, nitrato de potasio y un colector. El colector es comúnmente un metal, una sal u óxido metálico que se coloca en conjunto con los fundentes. Este metal debe tener la capacidad de disolver los metales preciosos y coleccionarlos de manera eficaz formando la fase metálica, para posteriormente separarlos por medio de otros procesos.

Los colectores de oro más importantes son plomo, estaño, plata y cobre (Smith, 1987). El plomo es el colector más utilizado para el análisis por ensayo en horno mufla, al

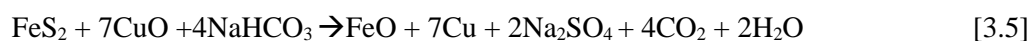
ser muy efectivo en la colección del oro y principalmente por su baja temperatura de fusión la cual está cerca de los  $326.85^{\circ}\text{C}$ . Se lo utiliza como litargirio u óxido de plomo ( $\text{PbO}$ ), por lo que se requiere un proceso de metalización de  $\text{PbO}$  a  $\text{Pb}$ , por medio de la adición de un reductor. El estaño se lo utiliza en forma de óxido estannoso ( $\text{SnO}_2$ ). Es un buen colector de metales preciosos, sin embargo el tratamiento de la fase metálica para la posterior separación de metales preciosos presenta serias dificultades debido a la poca solubilidad del estaño en ácidos minerales, lo que hace ineficiente su utilización. De todos los colectores el mejor que se conoce es la plata, ya que forma aleaciones con oro en cualquier proporción. El problema de la plata es que se oxida fácilmente a óxido de plata, además que la utilización de este metal es bastante costosa y por razones económicas no resulta rentable. Sin embargo, se la utiliza como co-colector junto con el plomo, y se lo añade a la carga como una solución de nitrato de plata. El cobre es un buen colector de los metales preciosos, ya que cumple las mismas funciones que los metales anteriores (Smith, 1987). Un aspecto que puede presentar dificultades al utilizar cobre como colector es su alta temperatura de fusión, que se encuentra cerca de los  $1166.8^{\circ}\text{C}$ . La utilización de metales colectores es muy importante especialmente en minerales de baja concentración, ya que en este tipo de minerales los metales preciosos se encuentran dispersos y en muy pocas cantidades, siendo muy difícil la sedimentación y formación de la fase metálica (Smith, 1987). El ensayo en horno mufla sin la adición de un colector se aplica en concentrados que tengan cantidades de oro superiores a los 300-500 g/ton, y que no contengan sulfuros, ya que éstos son los que dificultan la formación de la escoria, al producir la fase mata en la fusión (Marsden y House, 1992).

### 3.9. DOSIFICACIÓN DE FUNDENTES

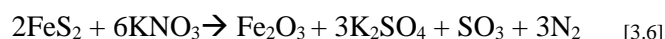
La dosificación teórica de fundentes que se debe añadir tanto para la oxidación de sulfuros como para la escorificación de óxidos se determina considerando la estequiometría de las reacciones que se llevan a cabo con cada sulfuro y óxido metálico presente en la mena o concentrado mineral.

### 3.9.1. Reactivos para la oxidación de sulfuros.

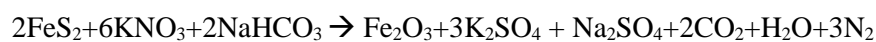
Para llevar a cabo el método de análisis de oro por ensayo en horno mufla es necesario tratar previamente a los sulfuros para lograr la formación de las fases escoria y metálica, y minimizar la formación de la mata, que tiende a disolver los metales preciosos. El pretratamiento consiste en la oxidación de los sulfuros metálicos por medio de lautilización de agentes desulfurantes como el bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) y el nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ). El  $\text{NaHCO}_3$  en presencia de óxido de cobre reacciona directamente con el sulfuro para formar óxido metálico, cobre metálico, sulfato de sodio, dióxido de carbono y agua. El proceso de desulfuración de la pirita se ilustra en la reacción [3.5] (Lenehan y Murray-Smith, 1986; Smith, 1987):



El nitrato de potasio a temperaturas mayores a  $356.85^\circ\text{C}$  se descompone liberando oxígeno el cual oxida los sulfuros metálicos a óxidos metálicos. Un ejemplo claro en el que se utiliza  $\text{KNO}_3$  para la oxidación de sulfuros es el proceso de desulfuración de la pirita, el cual se aprecia en la reacción (Lenehan y Murray-Smith, 1986; Smith, 1987).



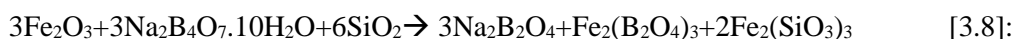
La acción combinada del bicarbonato de sodio con el nitrato de potasio, tiene resultados favorables en la desulfuración de concentrados minerales. La desulfuración de la pirita combinando estos agentes se describe en la reacción (Bugbee, 1940; Lenehan y Murray-Smith, 1986; Smith, 1987):



De manera similar se pueden escribir las reacciones de desulfuración para los otros sulfuros. Los cálculos teóricos de dosificación de estos agentes oxidantes de sulfuros se realizan considerando la estequiometría de las reacciones que se llevan a cabo con cada sulfuro metálico.

### 3.9.2. Reactivos para la formación de escorias.

Una vez oxidados los sulfuros se procede a la formación de escorias, la cual consiste en la formación de boratos y silicatos. Se sugiere la formación de metaboratos y metasilicatos debido a que son los más fluidos, y al ser menos viscosos permiten el paso de los metales preciosos y el metal colector con mayor facilidad hasta la parte inferior del crisol para formar la fase metálica (Lenehan y Murray-Smith, 1986). Los agentes oxidantes y fundentes para la formación de escorias son principalmente bórax, y sílice, los cuales en proporciones adecuadas reaccionan con los óxidos metálicos para formar metasilicatos y metaboratos. Un ejemplo de este proceso es la escorificación del óxido de hierro, el cual se ilustra en la reacción [3.8]:



Los cálculos teóricos de dosificación de la mezcla fundente para la escorificación de los óxidos metálicos se realizan tomando en cuenta la estequiometría de la formación de los respectivos metaboratos y metasilicatos, a partir de los óxidos metálicos.

### 3.10. TRATAMIENTO DE LA FASE METÁLICA

Alternativamente a la copelación, en este proyecto se utilizaron dos métodos para la separación de los metales preciosos de la fase metálica: a) ataque con ácido nítrico, y b) ataque con una mezcla de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno.

### 3.10.1. Ataque con ácido nítrico.

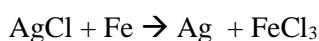
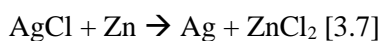
Este método consiste en el tratamiento de la fase metálica con solución diluida de ácido nítrico (25 – 35 % w/w) caliente, y libre de cloruros, en donde toda la fase metálica es solubilizada, a excepción del oro. El oro metálico es separado de la solución por filtración.

Tabla N° 3. 4 Dosificación de fundentes para 100 g de metal presente

| <b>Metal</b>  | <b>Sílice<br/>SiO<sub>2</sub>(g)</b> | <b>Bórax<br/>Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>.10H<sub>2</sub>O(g)</b> | <b>Bicarbonato<br/>de sodio<br/>NaHCO<sub>3</sub>(g)</b> | <b>Nitrato de Potasio<br/>KNO<sub>3</sub>(g)</b> |
|---------------|--------------------------------------|---|--|--|
| <b>100g</b>   |                                      |   |  |  |
| <b>Cobre</b>  | 63.09                                | 200   | 1058.27  | 209.36   |
| <b>Hierro</b> | 107.61                               | 341.09  | 1804.83  | 448.06   |
| <b>Plomo</b>  | 19.34                                | 61.29   | 81.08  | 30.19  |
| <b>Cinc</b>   | 61.27                                | 194.22  | 256.92   | 95.67  |

Elaboración propia

Es secado y pesado. El oro metálico que se recupera se encuentra en polvo, por lo que para obtener un botón de oro de color amarillo y de brillo metálico, el polvo se funde en un crisol con bórax, sílice y carbonato de sodio, logrando obtener un botón de oro. A la solución remanente del ataque con ácido nítrico se agrega ácido clorhídrico o cloruro de sodio para formar un precipitado de cloruro de plata (AgCl), se filtra la solución, y el AgCl se lava varias veces con agua. El precipitado de cloruro de plata se coloca en un vaso de precipitación, en donde se añade una solución de hidróxido de sodio hasta alcanzar un pH de 12, y de esta manera formar hidróxido de plata, posteriormente se añade una fuente de carbono (azúcar) hasta que la plata precipita por completo. Otro método es añadir al precipitado de cloruro de plata polvo de cinc o hierro, para producir la cementación de la plata por medio de las reacciones



Para llevar a cabo las reacciones de precipitación de la plata, y para disolver el exceso de Zn o Fe, se añade una solución de ácido sulfúrico al 10% y se agita en caliente por dos horas aproximadamente. La plata que se obtiene se deja secar, y después se funde en un crisol con bórax, sílice, y carbonato de sodio para tener un botón de plata (Muñoz, 1993).

### **3.10.2. Ataque con ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno.**

El método consiste en atacar a la fase metálica con 10 ml de una solución de ácido sulfúrico de pH 1 y 10 ml de peróxido de hidrógeno concentrado. El peróxido de hidrógeno es el oxidante para la plata y el cobre presentes en la fase metálica, y el ácido sulfúrico proporciona el ligando  $\text{SO}_4^{2-}$  para estos metales. Al reaccionar estos agentes con la fase metálica se observa efervescencia hasta que la fase metálica se disuelve por completo. En caso de que se detenga la efervescencia y no se haya disuelto la fase metálica por completo, es necesario añadir el ácido y el peróxido en las mismas cantidades iniciales, hasta que la fase metálica desaparezca y se recupere oro sólido y un precipitado de sulfato de plata, quedando en solución el sulfato de cobre. A continuación, se retira el oro sólido y el sulfato de plata de la solución por filtración, y se lava varias veces con agua destilada, y se seca. Una vez seco se pesa y se obtiene un peso del papel, del sulfato de plata y del oro. Se coloca el sulfato de plata y el oro en un vaso de precipitación y se pesa el papel filtro solo. Al vaso con los metales preciosos se añade ácido nítrico diluido para formar nitrato de plata y recuperar el oro insoluble. El oro es separado de la solución por filtración, se lava varias veces con agua, se deja secar, y se pesa teniendo así la cantidad de oro presente en la muestra. Al tener el peso del precipitado de oro y sulfato de plata por diferencia, se determina la cantidad de sulfato de plata presente en la muestra de mineral y por estequiometría se determina la cantidad de plata existente en la misma.

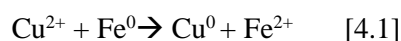


## CAPITULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1. PREPARACIÓN DE COBRE METÁLICO POR MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS

De la siguiente reacción:



Podemos deducir que la obtención del cobre metálico en polvo se realiza utilizando sulfato de cobre pentahidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) y hierro metálico. El procedimiento se realiza de la siguiente manera: El sulfato de cobre es disuelto en agua, y una vez disuelto se añade ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) hasta alcanzar un pH de 2. En esta solución se coloca una varilla de hierro.

De esta manera nos fijamos que el cobre precipita en forma metálica mientras que el hierro se disuelve en la solución ácida y así se forma la reacción de óxido-reducción.

##### 4.1.1. Procedimiento.

Se colocan 13 L de agua en un recipiente de 20 litros de capacidad. Posteriormente se coloca 1 kilogramo de sulfato de cobre pentahidratado, y se agita hasta que el sulfato de cobre se disuelve completamente en el agua. Una vez disuelto el sulfato de cobre se añade 77.21 gramos de ácido sulfúrico al 33%, para tener un pH aproximado de 2. A continuación se coloca una varilla de hierro, con un peso aproximado de 560 gramos, y se deja reaccionar, una vez formado el cobre metálico, se retiran las varillas de hierro, se filtra la solución, y es secado el precipitado. El proceso se realiza por duplicado.

#### 4.1.1.1. Resultados.

Las cantidades de reactivos detallados se colocaron en el recipiente para la preparación de cobre metálico y la cantidad de producto obtenido.

Tabla N° 4. 1 Reactivos para la preparación de cobre metálico

| Reactivos y Producto                 | Prueba 1 | Prueba 2 | Total (g) |
|--------------------------------------|----------|----------|-----------|
| CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O | 1 kg     | 1 kg     | 2 kg      |
| H <sub>2</sub> O                     | 13 L     | 13 L     | 26 L      |
| Fe                                   | 668 g    | 578 g    | 1246 g    |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>       | 77.21 g  | 77.21 g  | 154.42 g  |
| Cu recuperado                        | 246 g    | 254 g    | 500 g     |

Elaboración propia

Figura N° 4. 1 Varillas de hierro cubiertas por la solución de sulfato de cobre



Elaboración propia

La presente fotografía en la cual se puede observar dos varillas de hierro cubiertas por la solución de sulfato de cobre. En el fondo del recipiente se puede apreciar la acumulación de cobre metálico que se va formando por la reacción electroquímica. A esta

preparación la llamamos de cobre metálico en polvo por medio de sulfato de cobre y varillas de hierro en medio ácido.

Figura N° 4. 2 Acumulación de cobre en las varillas de hierro



Elaboración propia

Hace visible que no todo el cobre recuperado se encuentra en polvo, muestra la acumulación de cobre en las varillas de hierro formando una capa gruesa de difícil separación sobre éstas.

Se puede apreciar también que en el fondo del recipiente está el cobre metálico en polvo formado durante el proceso electroquímico.

Figura N° 4. 3 Cobre metálico en polvo



Elaboración propia

Cobre metálico en polvo recuperado después del proceso electroquímico.

Figura N° 4. 4 Polvo de cobre metálico

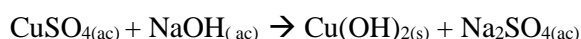


Elaboración propia

Polvo de cobre metálico recuperado después del proceso electroquímico.

#### 4.1.2. Preparación de Hidróxido de Cobre por Precipitación

Teniendo la reacción:



Con la cual se realizó la prueba de hidróxido de cobre,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , en los ensayos, y determinar si era factible su utilización como colector. Se realizó dicho procedimiento donde el hidróxido de cobre es obtenido por medio de una reacción de precipitación, en donde, intervienen el sulfato de cobre e hidróxido de sodio en solución.

#### 4.1.3. Procedimiento.

Se disuelve un kilogramo de sulfato de cobre en 10 litros de agua. En otro recipiente se disuelve 320.62 gramos de hidróxido de sodio en 3 litros de agua. Una vez disueltos ambos reactivos se mezclan en un solo recipiente en donde reaccionan y forman el precipitado de  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ . Se filtra la solución, y al precipitado obtenido se lava cuatro veces con agua destilada para eliminar los remanentes de sulfato de sodio. Se deja secar en la estufa por 12 horas a una temperatura de  $77^\circ\text{C}$  aproximadamente. Este proceso se repitió en ocho ocasiones, con el fin de abastecerse de suficiente  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ .

#### 4.1.3.1. Resultados.

Se detallan las cantidades de reactivos que se colocaron para la preparación de 2 lotes de hidróxido de cobre. Por medio del método de precipitación se recuperó 638.2 gramos de hidróxido de cobre en polvo, en aproximadamente 48 h. La cantidad de  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  es suficiente para llevar a cabo 60 fundiciones.

Tabla N° 4. 2 Preparación de hidroxido de cobre

| Reactivos y Productos                     | Prueba 1 | Prueba 2 | Total (g) |
|---|----------|----------|-----------|
| $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ | 1kg      | 1kg      | 2 kg      |
| $\text{H}_2\text{O}$                      | 13 L     | 13 L     | 26 L      |
| NaOH                                      | 321 g    | 321 g    | 642 g     |
| $\text{Cu}(\text{OH})_2$                  | 325.8 g  | 312.4 g  | 638.2 g   |

Elaboración propia

Tabla N° 4. 3 Composición mineralógica

| FORMULA  | MINERAL           |
|--|-------------------|
| $\text{SiO}_2$   | Cuarzo            |
| $\text{FeO}_2$   | Pirita            |
| $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$ | Grupo Plagioclasa |
| $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$      | Muscovita         |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$                                      | Hematita          |
| $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$            | Caolinita         |
| $\text{Fe}_3\text{O}_4$                                      | Magnetita         |
| FeAsS  | Arsenopirita      |
| $\text{CaCO}_3$  | Calcita           |

Elaboración propia

#### 4.1.4. Concentrado

El concentrado utilizado en esta investigación fue molido varias veces mediante una trituradora de mandíbulas, posteriormente fue concentrado por un sistema de canalones

#### 4.1.4.1. Horno mufla

El horno consta de dos partes principales: una cámara de fusión y un soporte que sostiene la cámara. Tanto la carcasa que cubre la cámara de fusión y el soporte son metálicos. La cámara de fusión está formada de un recubrimiento de cemento refractario Concrax 1500, seguido de una capa de cemento aislante CORAL 80. La tapa de la cámara de fusión fue fabricada con cemento aislante en su totalidad, la misma que se aprecia en la Figura 4.6. El horno posee una entrada de gas con un venterol, un mechero, válvula de gas industrial, y utiliza gas doméstico como combustible. En condiciones óptimas de operación se puede alcanzar 1167°C, temperatura adecuada para llevar a cabo la fusión del concentrado. La cámara de fusión sirve para sostener el crisol tiene un soporte interno hecho del mismo material refractario del horno.

A continuación, la siguiente tabla muestra las características principales del horno de fusión utilizado para este proyecto.

Tabla N° 4. 4 Características principales del horno de fusión

|  |           |
|--|-----------|
| Altura total (m)                       | 1.15      |
| Altura de la cámara de fusión (m)      | 0.65      |
| Diámetro del horno (m)                 | 0.50      |
| Soporta crisoles de capacidad (L)      | 1-2       |
| Temperatura máxima (°C)                | 1400-1500 |
| Espesor de la sección aislante (cm)    | 10        |
| Espesor de la sección refractaria (cm) | 10        |
| Diámetro de apertura de cámara (cm)    | 30        |

Elaboración propia

Las Figuras muestran fotografías de como luce el horno externa e internamente.

- Tapa
- Venterol
- Mechero
- Alimentación de gas



- Soporte de la cámara
- Vista externa de la cámara de fusión

Figura N° 4. 5 Vista de horno externo para fusión



Elaboración propia

Figura N° 4. 6 Vista de horno interno para fusión



Elaboración propia

Figura N° 4. 7 Vista superior de la parte interna del horno mufla.



Elaboración propia

La cual muestra una fotografía del horno en funcionamiento, en el cual se puede observar un crisol siendo colocado dentro del horno, con ayuda de una pinza metálica apropiada para ese procedimiento.

Figura N° 4. 8 Crisol que contiene la carga fundente colocado sobre una balanza analítica,



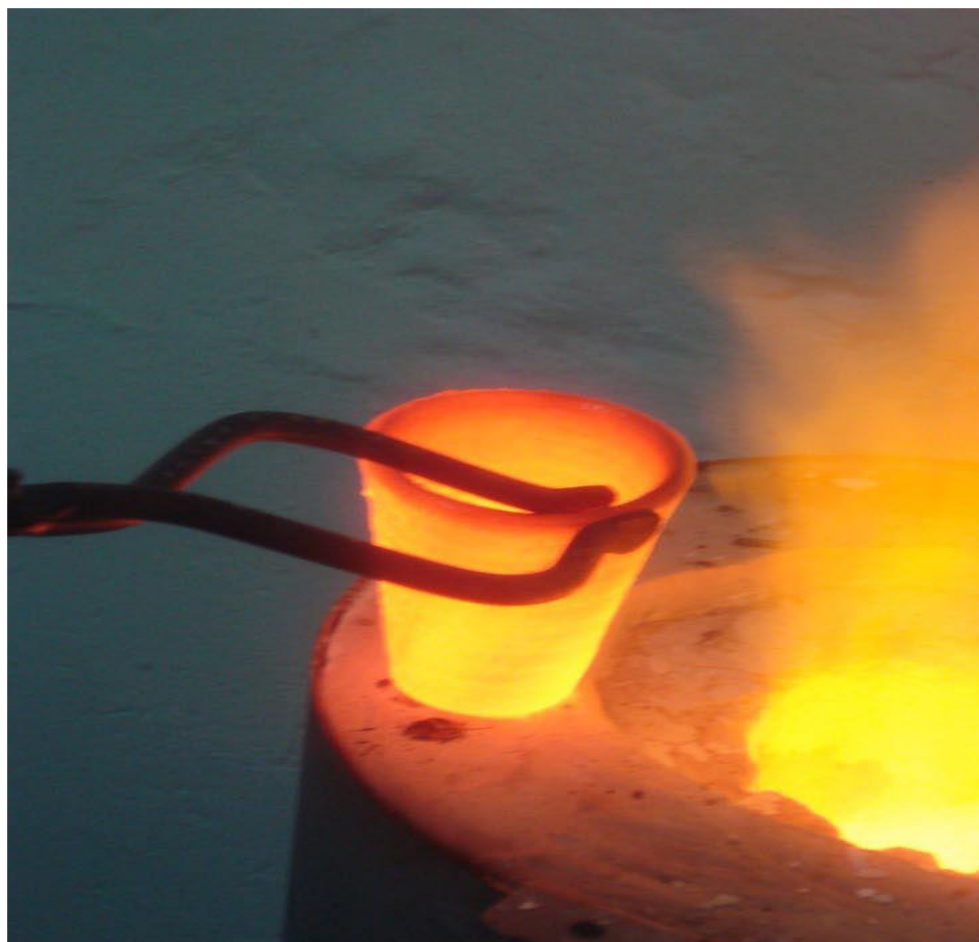
Elaboración propia



Presenta una fotografía de un crisol que contiene la carga fundente colocado sobre una balanza analítica, se observa la altura máxima de la carga fundente en el crisol para evitar derrames en el horno, es decir, máximo las  $\frac{3}{4}$  partes del mismo, ya que el bórax al fundirse tiende a hincharse.

La principal desventaja de estos crisoles es que al estar sometidos a cambios bruscos de temperatura tienden a romperse, al igual que se consumen debido a la acción del bicarbonato de sodio que actúa como agente formador de escoria. El crisol que contiene la mezcla a fundir se coloca en el horno hasta que esté completamente líquida y fluida. El crisol con la mezcla fundida se retira del horno, y se deja en reposo hasta enfriarse.

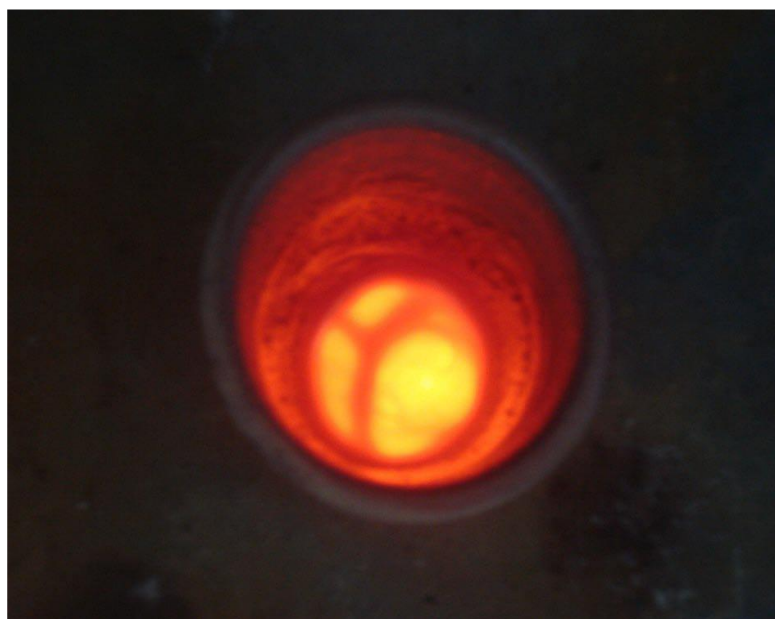
Figura N° 4. 9 Crisol que sale del horno con la carga fundente



Elaboración propia

Presenta una fotografía de un crisol luego de salir del horno.

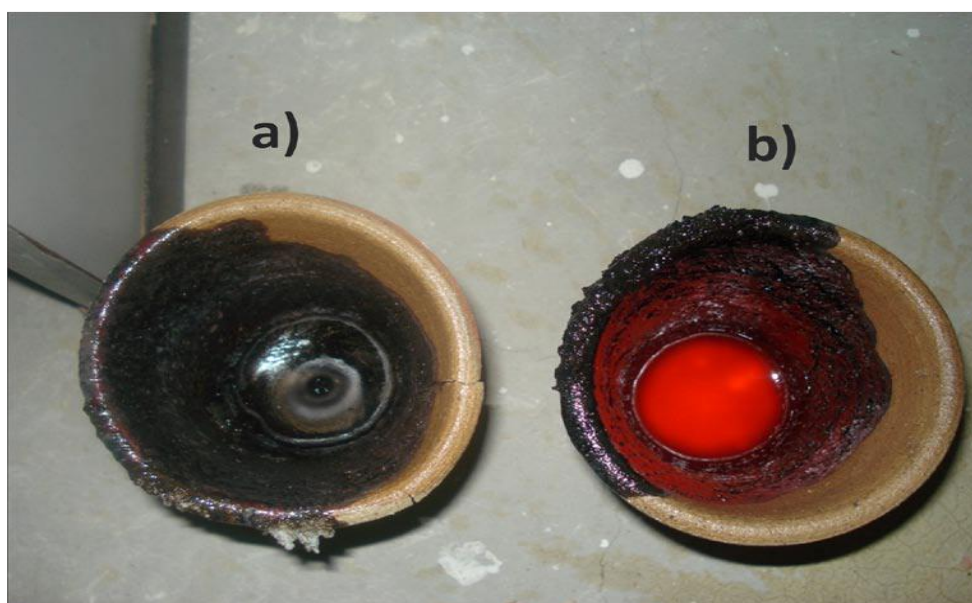
Figura N° 4. 10 Carga fundida de color amarilla



Elaboración propia

Ilustra un crisol que contiene la carga fundida. En la misma fotografía se puede apreciar la diferencia de temperatura en la mezcla, con un color amarillo intenso se aprecia la fase escoria, este color se debe a que al ser la capa más liviana alcanza una mayor temperatura en menos tiempo. La fase metálica se presenta con un color anaranjado, que indica una menor temperatura ya que se trata de una fase más densa.

Figura N° 4. 11 Contrastación de los crisoles a y b



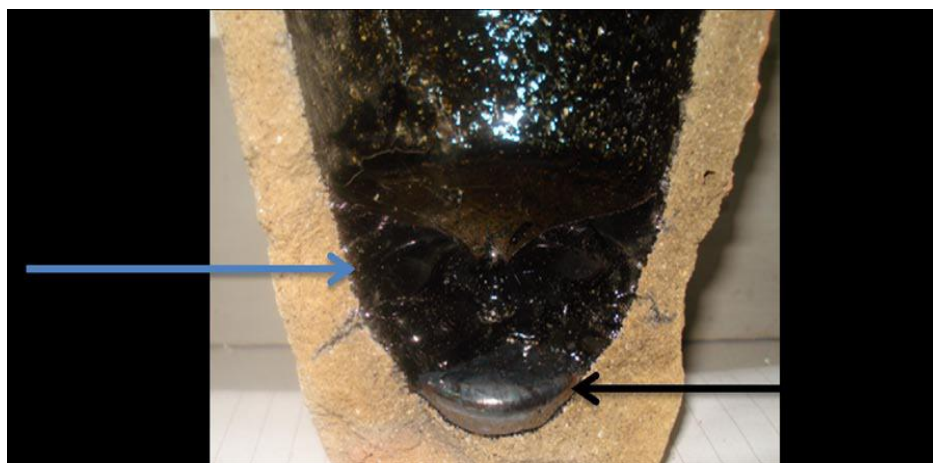
Elaboración propia

Fotografía que contrasta un crisol a) con la carga fundida a temperatura ambiente y otro b) con la carga fundida después de sacarla del horno, también se puede observar que hubo derrames de la mezcla en ambos por un lado del crisol sufriendo fracturas debido al efecto del choque térmico. Esto se debe a la inclinación de éste dentro del horno.

Muestra el crisol transversalmente al golpe con el martillo, donde se puede fácilmente apreciar, separar, y recuperar las diferentes fases generadas en el proceso de fusión. Al aplicar las fuerzas de impacto se puede apreciar las fases que se formaron:

La fase escoria es fácilmente reconocible, por sus características vidriosas, y su color verde, negro o marrón, dependiendo de los óxidos metálicos que contenga. Una buena escoria generalmente es bastante brillante, y siempre se ubica en la parte superior de la mezcla fundida y solidificada.

Figura N° 4. 12 Muestra el crisol transversalmente al golpe con el martillo



Elaboración propia

Corte transversal de un crisol en el cual se aprecian las fases mata y escoria generadas en la fusión.

La fase mata generalmente es del color de los sulfuros, gris o plomo si se trata de sulfuros de hierro y/o cobre, y en casos de Sulfuros de cobre y/o plomo, es gris verdoso o dorado. Como es de esperarse, cuando hay mezclas de éstos dos, predomina el color del sulfuro que se encuentra en mayor cantidad. Al golpear la mata, ésta tiende a pulverizarse,

debido a la poca maleabilidad y ductilidad de los sulfuros. La fase metálica, a diferencia de las anteriores es maleable y dúctil, por lo que fuerzas de impacto producirán que ésta se deforme. La fase metálica recuperada es atacada con ácido nítrico diluido para disolver el cobre y la plata en forma de nitratos, y así recuperar el oro sólido insoluble. Se filtra la solución de nitratos solubles recuperando el oro sólido por medio de un embudo y papel filtro, el oro contenido en el papel filtro se coloca en un secador y una vez eliminado el agua, se pesa, después se retira el oro y se pesa el papel filtro, determinando por diferencia la cantidad de oro presente.

Muestra una fotografía de la fase metálica durante la disgregación en ácido nítrico diluido. El calentamiento se realiza sobre una hornilla eléctrica, y para asegurar una mejor distribución de calor, se coloca el vaso de precipitación con la solución ácida sobre una cama de arena. Muestra también la etapa durante la disgregación con una mezcla de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno.

Figura N° 4. 13 fase metálica durante la disgregación en ácido nítrico diluido



Elaboración propia



Figura N° 4. 14 Disolución de una fase metálica en ácido nítrico sobre una cama de arena.



Elaboración propia

Fotografía en la cual se disuelve una fase metálica en una mezcla de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno sobre una cama de arena.

Figura N° 4. 15 solución de nitrato de cobre



Elaboración propia

Se observa la solución de nitratos de cobre y de plata recuperada por filtración, mientras que el oro sólido permanece retenido en el papel filtro.

Figura N° 4. 16 Oro recuperado después de filtrar



Elaboración propia

Fotografía del oro recuperado después de filtrar la solución de nitrato de plata y nitrato de cobre proveniente de la disolución de la fase metálica en ácido nítrico.

En esta última figura se aprecia que el oro metálico recuperado no presenta el color amarillo ni el brillo característico de los metales. Los metales brillan debido a que cuando la luz cae sobre ellos, ésta es absorbida casi en su totalidad en forma de ondas electromagnéticas por los electrones de enlace, saltando de un orbital a otro permitiendo cambios de energía los cuales corresponden a toda la gama de frecuencias en la región visible del espectro.

## CONCLUSIONES V

El primer paso fue probar como colectores para el método de ensayo con horno mufla cobre metálico e hidróxido de cobre. Por medio de varias pruebas se observó que tanto el Cu metálico como el  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  sirven como colectores para la recuperación de metales preciosos.

La preparación de cobre metálico en polvo requiere de más tiempo, y la separación del cobre formado sobre el hierro es más compleja, asimismo, todo el cobre metálico formado no resulta estar en polvo. Por esta razón se empezó a probar con hidróxido de cobre en los ensayos en lugar de cobre metálico, debido a que el hidróxido de cobre se obtiene de una manera relativamente rápida por medio de precipitación en comparación al cobre metálico. Además, todo el  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  que se recupera se encuentra en polvo lo que ayuda a tener una mezcla homogénea antes de fundirla, teniendo una mayor recuperación de metales preciosos.

Los análisis consiste en añadir a 60 g de mineral, 40 g de bórax, 20 g de  $\text{NaHCO}_3$ , y 25 g de  $\text{KNO}_3$ , y posteriormente se procede a añadir 40 g de bórax, 15 g de  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  y 3 g de harina en el crisol, es la etapa de metalización. La harina se utiliza como agente reductor del  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ , ya que es una fuente de carbono y sirve para reducir el hidróxido de cobre a cobre metálico, para que de esta manera éste colecte los metales preciosos.

## RECOMENDACIONES

Todos los ensayos brindan suficientes argumentos para la utilización de cobre en forma de hidróxido de cobre como colector en el método de horno mufla, dejando a un lado la utilización de plomo. Si este se aplica en laboratorios, y/o en la industria, beneficiaría a los trabajadores que realizan el análisis a diario.

Se recomienda la utilización desde crisoles que soporten altas temperaturas y que resistan por más tiempo dentro del horno permitiendo que la mezcla se funda por completo.

Otra recomendación importante sería el conseguir un proveedor que fabrique crisoles que sean más resistentes a la acción del bicarbonato de sodio, y sean más resistentes al efecto del choque térmico.



## REFERENCIAS VI

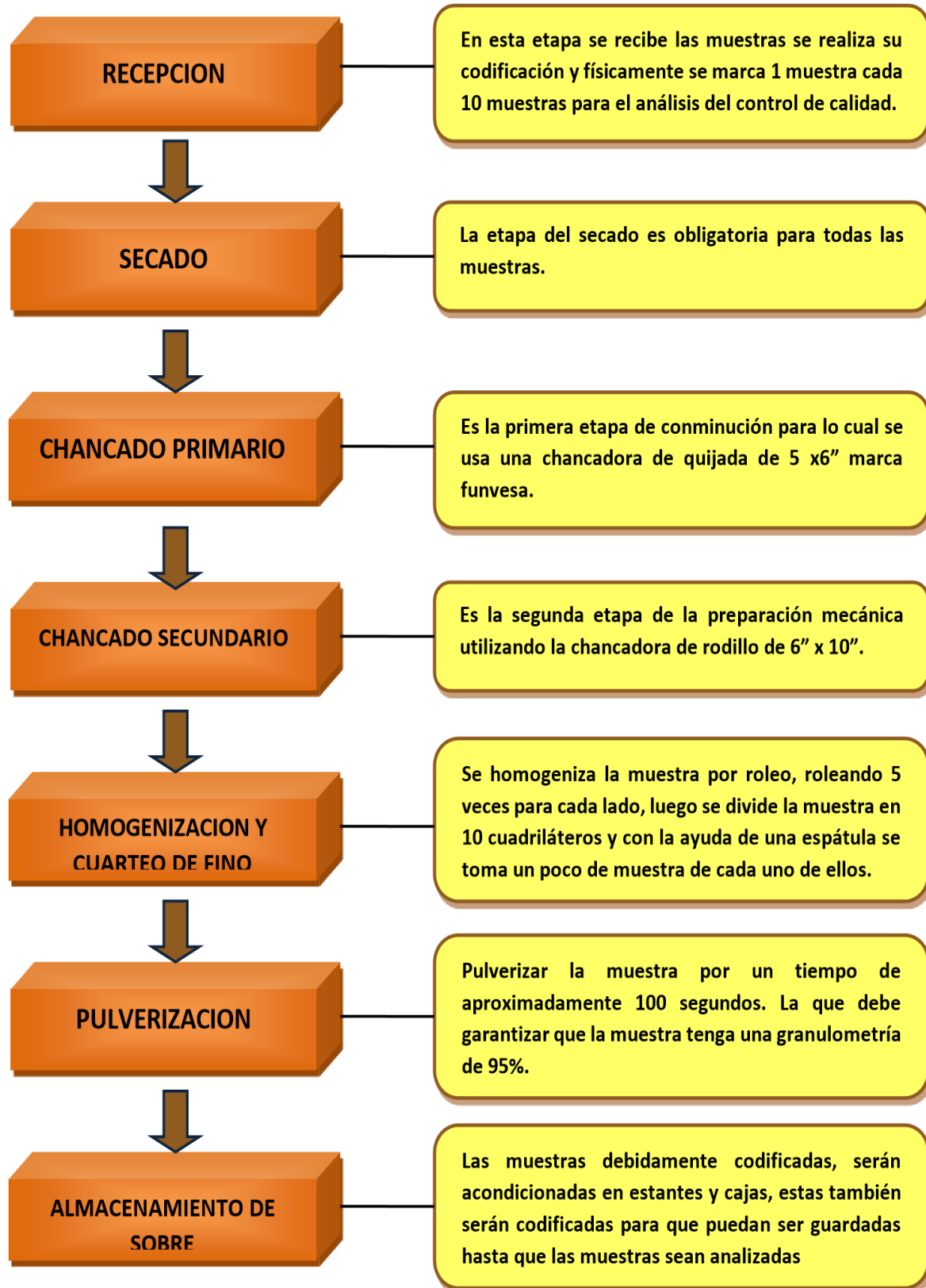
- Arias, F. G. (2012). *El Proyecto de Investigación* (6a ed.). Caracas: Editorial Episteme, C.A.
- Bernal, C. A. (2010). *Metodología de la investigación* (3a ed.). Bogotá: Perarson Educacion.
- Espilco de la Cruz, A. (2013). *CONTROLDE CALIDAD EN ANALISIS DE ORO Y PLATA REALIZADOS POR ENSAYOS AL FUEGO EN MINERALES*. Universidad Nacional del Callao.
- Hernandes, sampieri roberto, Fernandez, collado carlos, & Baptista, lucio maria del pilar. (2014). *Metodologia de la Invetigacion* (6a ed.). Mexico D.F.: McGRAUW-HILL
- . Lenehan W.C., y Murray-Smith R. de L., 1986, ASSAY AND ANALYTICAL PRACTICE IN THE SOUTH AFRICAN MINING INDUSTRY, The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, pp 41-230
- Lipa Maldonado, R. A. (2019). *Análisis químico de oro y plata en sus diferentes procesos en la empresa minera Aruntani S.A.C OCUVIRI-LAMPA: Laboratorio químico*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Marsden J., y House I., 1992, THE CHEMISTRY OF GOLD EXTRACTION, Ellis Horwood Limited, West Sussex, England, 680 pp
- Mendoza Raime, U. (2015). *METODO PARA LA DETERMINACION DE ORO Y PLATA EN MUESTRAS CONCENTRADAS DE MINERALES*. Universidad Nacional del Callao.
- Muñoz G., 2011, Comunicación Personal.
- Núñez Arzapalo, R. A., & Naula Ramos, V. F. (2015). *OPTIMIZACIÓN DEL ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO DE ORO POR OXIDACIÓN DEL FLUJO FUNDENTE EN LA EMPRESA LUZ DEL SOL S.A.C*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Oliveira F., et al., 1999, TENSION SUPERFICIAL, VISCOSIDAD Y DESIDAD DE ALGUNAS ESCORIAS, Revista de Metalurgia, Madrid, España, pp 91-99.

- Pasiguan Rivera, C. K. (2014). *DETERMINACIÓN DE ORO Y OTROS METALES MEDIANTE ANÁLISIS QUÍMICO- METALÚRGICOS QUE OFRECE LA EMPRESA JESUS DEL GRAN PODER S.A.* Universidad Nacional de Piura.
- Paladines A., y Díaz X., 2003, ECUADOR, LA MINERÍA DEL ORO, El libro de la minería del oro en Iberoamérica, Espí J.A. editor, Red XIII-V CITED, Madrid, España, pp 277-284
- Rosenqvist T., 1983, PRINCIPLES OF EXTRACTIVE METALLURGY, Second Edition, McGraw-Hill Inc. New York, 528 pp.
- Schuhmann Jr., 1968, INGENIERÍA METALURGICA, Tomo I, Centro Regional de Ayuda Técnica, Agencia para el Desarrollo Internacional, México, pp 325-348
- Smith E., 1987, THE SAMPLING AND ASSY OF THE PRECIOUS METALS, Met-Chem, Research, Inc., Boulder, Colorado, 492 pp.
- Tosiani T., Torres M., y Mendoza W., 2000, ANÁLISIS DE ORO EN MUESTRAS GEOLÓGICAS: MÉTODO COLORIMÉTRICO PARA SER UTILIZADO EN EL CAMPO, Volumen 25, Interciencia, Caracas, Venezuela, pp 342-345.
- Young R., 1998, ANALYSIS FOR GOLD, Obtenido en línea el 26 de Mayo de 2011, Disponible en: <http://www.topnews.in/expert-analysis-gold-and-silver-futures-trading-2200863.pdf>
- Zaninovic X., y Jankelevich A., 2001, EL COBRE Y LA SALUD, COOPER International Cooper Association, Ltd., Santiago, Chile, pp 1-3.

## ANEXOS VII

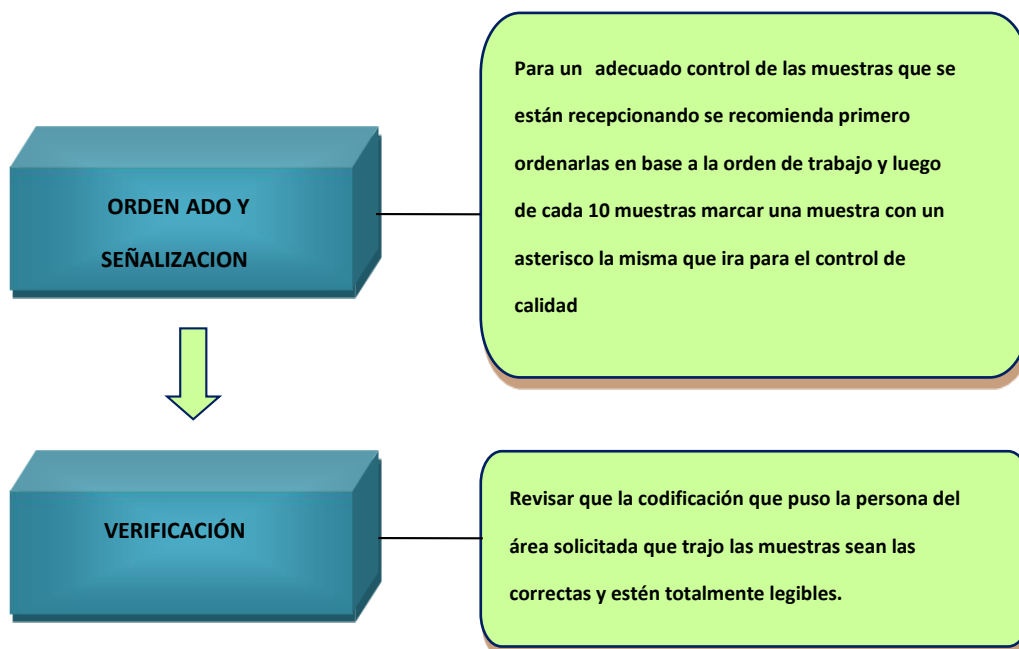
## ANEXO A

## .1. ETAPAS DE LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS



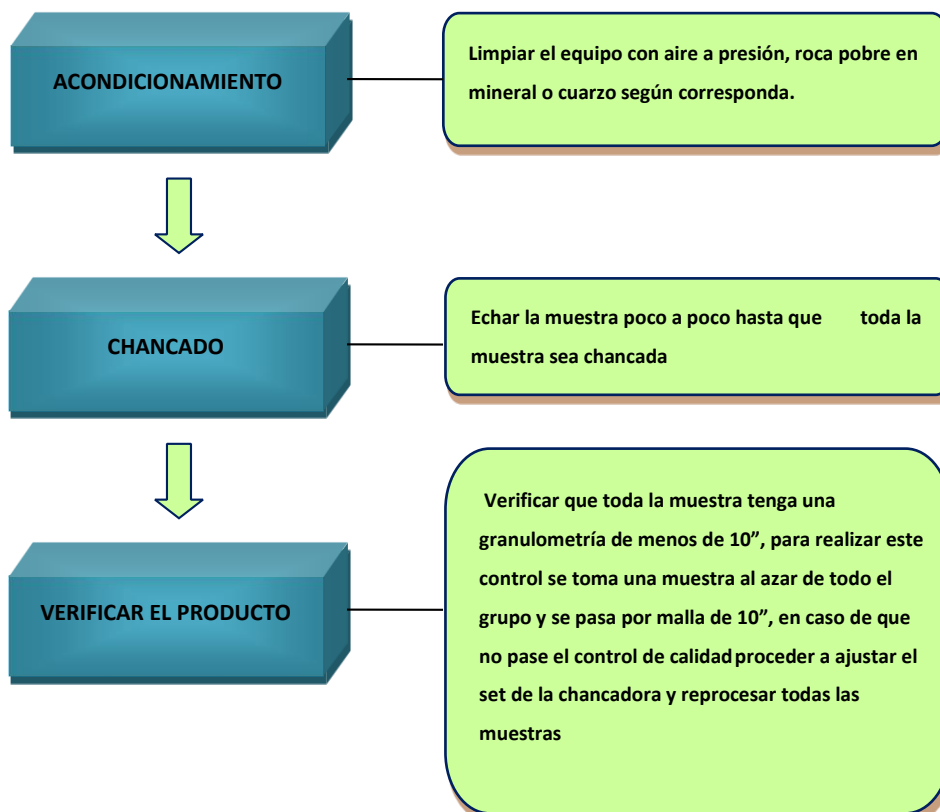
**ANEXO B**

**2. ETAPA DE RECEPCIÓN.**



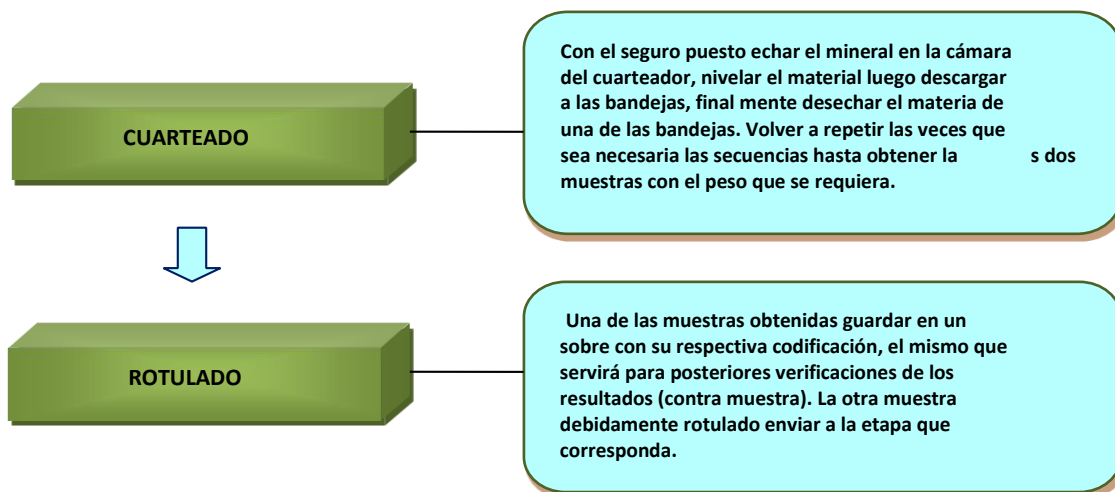
**ANEXO C**

**3. CHANCADO PRIMARIO**



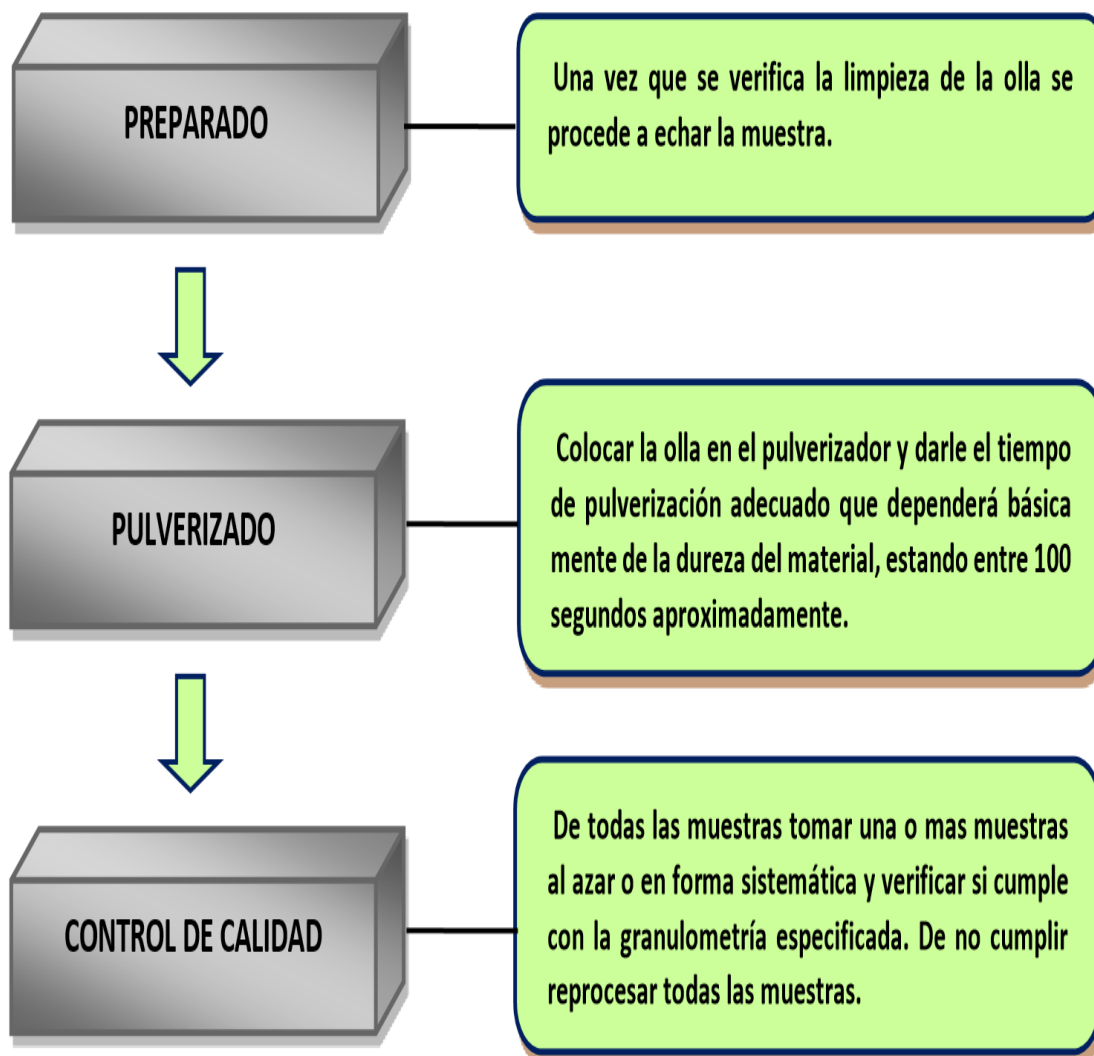
**ANEXO D**

**4. CUARTEADO.**



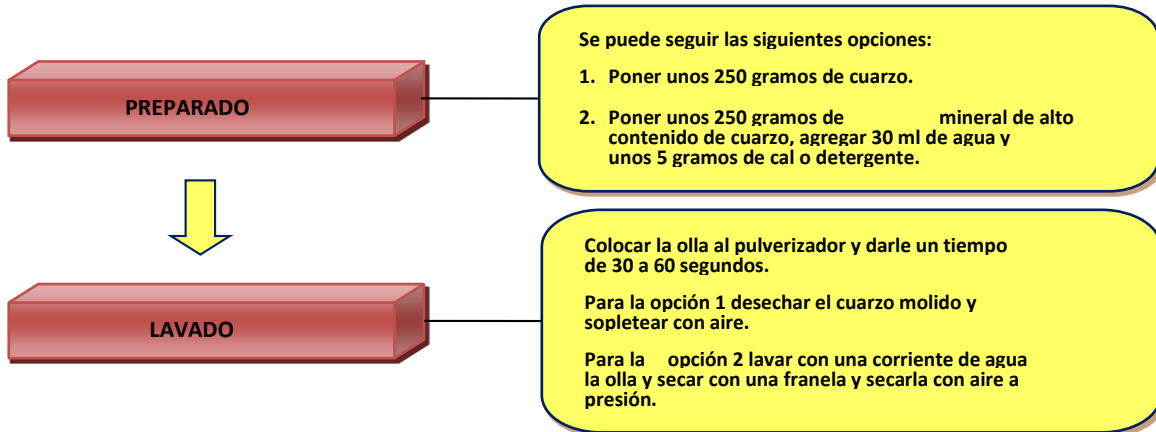
**ANEXO E**

**5. PULVERIZADO**



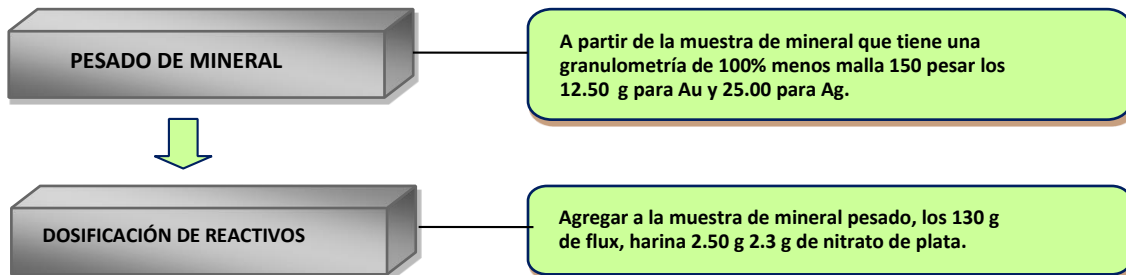
**ANEXO F**

**LAVADO DE PULVERIZADOR**

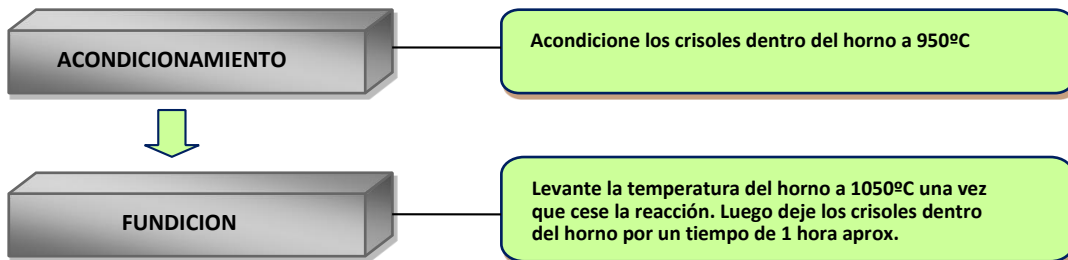


**Anexo G**

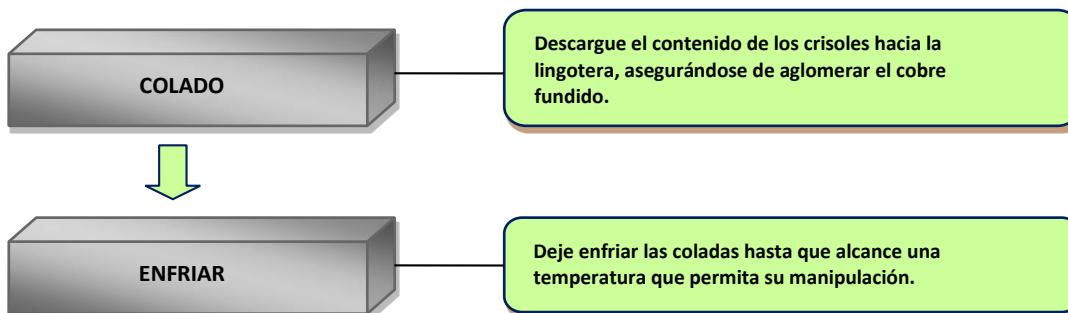
**PESADO**



**Fusión**



**Colado**



**ANEXO H****TRATAMIENTO DE FASES METÁLICAS CON ACIDO NÍTRICO**

- Pesar la muestra y colocarla en un vaso de precipitación de 250 mL •  
Añadir 25 mL de  $\text{HNO}_3$  y 25 mL de  $\text{H}_2\text{O}$ . • Tapar los vasos de precipitación con lunas de reloj. • Colocar en calentamiento en un baño de arena hasta que la fase metálica este disuelta por completo.
- Una vez disuelta la fase metálica al fondo del vaso se recupera el oro presente en 60 g de mineral.
- Filtrar el contenido del vaso de precipitación para separar el oro de la solución de nitrato de cobre y nitrato de plata formado.
- Lavar con agua destilada. • Secar en la estufa el papel filtro con el oro. • Una vez seco pesar el papel filtro con el oro recuperado. • Con un pincel hacer caer el oro recuperado en un frasco. • Finalmente pesar el papel filtro solo y por diferencia obtener el peso del oro recuperado.