



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL EN MINAS

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA CINÉTICA DE  
TOSTACIÓN DE UN CONCENTRADO DE COBRE DE LA  
MINA CHÉPICA VARIANDO LA TEMPERATURA Y EL  
TAMAÑO DE PARTÍCULA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERA CIVIL DE MINAS**

**FABIOLA XIMENA FUENTES VALENZUELA**

PROFESOR GUÍA

Dr. René Ricardo Contreras Nakagawa

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

Mg. Kenji Naito Chiang

Mg. Francisco Javier Rivas Saldaña

CURICÓ – CHILE

2020

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se desarrolló un estudio experimental acerca del comportamiento de oxidación de un mineral sulfurado de la Mina Chépica mediante un proceso de tostación oxidante bajo distintas condiciones, variando la temperatura y el tamaño de partículas en términos de la eliminación del contenido de azufre.

Para lograr un proceso de tostación efectivo, previamente se realizaron pruebas de flotación a nivel de laboratorio para separar el cobre sulfurado de otras sustancias, y de esta forma se obtuvo un concentrado de cobre con una pureza aproximada de entre 10 y 15%. Posteriormente, el concentrado de cobre fue clasificado mediante la operación de tamizado en seco para obtener las fracciones de tamaño ( $< 53 \mu\text{m}$ ,  $53 \mu\text{m}$  a  $75 \mu\text{m}$  y  $> 75 \mu\text{m}$ ) que se utilizaron durante las pruebas de tostación las cuales fueron oxidadas bajo tres condiciones de temperatura ( $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Los resultados obtenidos en las pruebas de tostación arrojaron que el efecto que tuvo la temperatura y el tamaño de partícula repercute significativamente en el grado de oxidación de las calcinas de cobre. Los análisis concluyeron que las partículas intermedias con granulometría entre  $53 \mu\text{m}$  a  $75 \mu\text{m}$  obtuvieron la mayor eliminación de azufre en forma de gas y la temperatura ideal del estudio experimental fue de  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  en donde se observó una importante transferencia de calor entre el mineral sulfurado y el oxígeno.

Las calcinas obtenidas servirán como materia prima para un estudio futuro en donde se evaluará el efecto del grado de tostación de los materiales sobre la recuperación de cobre por la vía hidrometalúrgica. La integración de los resultados de ambos estudios podrá proveer información importante para diseñar una ruta de procesamiento del mineral de la Mina Chépica y que pudiera representar una mejora en sus procesos productivos.

**Palabras claves:** Tostación, temperatura, tamaño de partícula, cobre, concentrado.

## ABSTRACT

In the present research work, an experimental study was developed on the oxidation behavior of a sulphide mineral from the Chépica Mine by means of an oxidative roasting process under different conditions, varying the temperature and the particle size in terms of the elimination of the content of sulfur.

To achieve an effective roasting process, flotation tests were previously carried out at the laboratory level to separate the sulphide copper from other substances, and in this way a copper concentrate with an approximate purity of between 10 and 15% was obtained. Subsequently, the copper concentrate was classified by means of a dry sieving operation to obtain the size fractions (<53  $\mu\text{m}$ , 53  $\mu\text{m}$  to 75  $\mu\text{m}$  and > 75  $\mu\text{m}$ ) that were used during the roasting tests, which were oxidized under three temperature conditions (500 °C, 550 °C and 600 °C).

The results obtained in the roasting tests showed that the effect of temperature and particle size has a significant effect on the degree of oxidation of copper calcines. The analyzes concluded that the intermediate particles with granulometry between 53  $\mu\text{m}$  to 75  $\mu\text{m}$  obtained the highest elimination of sulfur in the form of gas and the ideal temperature of the experimental study was 600 °C where an important heat transfer was observed between the sulphide mineral and oxygen.

The calcines obtained will serve as raw material for a future study in which the effect of the degree of roasting of the materials on the recovery of copper by hydrometallurgy will be evaluated. The integration of the results of both studies may provide important information to design a mineral processing route for the Chépica Mine that could represent an improvement in its production processes.

**Keywords:** Roasting, temperature, particle size, copper, concentrate.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi familia por el apoyo incondicional en cada momento de este trayecto universitario y a lo largo de toda mi vida. A mi madre Ximena por su espíritu constante de superación en cada obstáculo que la vida nos propuso; su dedicación a cada proceso de mi formación personal; y su persistente esfuerzo por cumplir mis sueños. A mi padre Héctor por brindar su apoyo en cada decisión de mi formación personal y profesional. A mis hermanas Carolina, Camila y María Ignacia por ser ejemplos de mujeres verdaderamente admirables y fuentes de inspiración para nunca bajar los brazos.

También agradecer a mis amigas que cumplen un rol fundamental e imprescindible no tan solo en mis años de universidad, si no en muchos momentos importantes de mi vida; por sus ímpetus cariñosos, comprensivos y bondadosos.

Sin duda debo mencionar a la familia Fuentes Gambetta por apoyarme constantemente en cada uno de mis procesos de formación; a mis tíos y primas por su preocupación a cada paso que daba y por su plena confianza en mis capacidades que me conducirían a mi éxito tanto personal como profesional.

Por último, agradezco a mis profesores por enseñarme entregándome sus fuertes conocimientos de ingeniería y contribuyendo a mi desarrollo profesional. También reconocer su comprometida labor con este proyecto de investigación para dar término a este gran proceso de formación profesional. De igual manera, agradezco a la empresa Soluciones Analíticas - SAX SPA por su gran colaboración en este proyecto de investigación en el análisis de químico de cada una de las muestras.

*A mi madre Ximena por su amor  
incondicional hacia sus hijas.  
A mis sobrinos Vicente, Pankul,  
Inara y Martín; pequeños seres  
de luz que guiaron mi camino.*

# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>iv</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivo general.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Alcances.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Procesamiento pirometalúrgico del cobre.....</b>	<b>4</b>
2.1.1 Preparación de los minerales.....	7
2.1.2 Extracción del cobre.....	7
2.1.3 Afino del cobre.....	8
<b>2.2 Procesamiento hidrometalúrgico de sulfuros de cobre.....</b>	<b>9</b>
<b>2.3 Proceso de flotación de espumas.....</b>	<b>10</b>
2.3.1 Variables del proceso de flotación.....	11
2.3.2 Fases del proceso de flotación.....	12
2.3.3 Etapas del proceso de flotación.....	13
<b>2.4 Proceso de tostación.....</b>	<b>14</b>
2.4.1 Variables del proceso de tostación.....	14
<b>2.5 Tipos de tostación.....</b>	<b>15</b>
2.5.1 Tostación oxidante.....	15
2.5.2 Tostación sulfatante.....	16
2.5.3 Tostación oxi-sulfatante.....	17
<b>2.6 Termodinámica de la tostación.....</b>	<b>17</b>
<b>2.7 Diagrama ternario de estabilidad de fases del sistema Cu-S-O.....</b>	<b>20</b>

2.7.1	Diagrama ternario Cu-S-O para tostación oxidante a 500 °C .....	21
2.7.2	Diagrama ternario Cu-S-O para tostación oxidante a 550 °C .....	22
2.7.3	Diagrama ternario Cu-S-O para tostación oxidante a 600 °C .....	23
<b>2.8</b>	<b>Cinética de la tostación .....</b>	<b>24</b>
<b>2.9</b>	<b>Modelo de núcleo recesivo .....</b>	<b>25</b>
<b>2.10</b>	<b>Técnicas analíticas de minerales.....</b>	<b>27</b>
2.10.1	Fluorescencia de rayos X .....	27
2.10.2	Espectrometría infrarroja .....	28
2.10.3	Espectroscopia de absorción atómica .....	28
<b>CAPÍTULO 3: Metodología experimental.....</b>		<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Equipos utilizados .....</b>	<b>30</b>
3.1.1	Analizador portátil de fluorescencia de rayos X.....	30
3.1.2	Balanza analítica semi-micro Boeco® BXX 22.....	31
3.1.3	Celda de flotación EDEMET® .....	31
3.1.4	Filtro de presión EDEMET® .....	32
3.1.5	Horno de secado BellHor®.....	33
3.1.6	Tamizadora Ro-Tap® RX-29-10.....	34
3.1.7	Horno de Mufla Biobase .....	34
<b>3.2</b>	<b>Materiales reactivos.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3</b>	<b>Procedimiento experimental .....</b>	<b>36</b>
3.3.1	Análisis del mineral.....	37
3.3.2	Preparación de muestras del mineral .....	37
3.3.3	Proceso de flotación Rougher .....	39
3.3.4	Proceso de flotación Cleaner .....	41
3.3.5	Obtención fracciones de tamaño .....	42
3.3.6	Prueba experimental previa de tostación .....	43
3.3.7	Proceso de tostación del concentrado sulfurado .....	47
<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADO .....</b>		<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterización del mineral .....</b>	<b>49</b>



<b>4.2</b>	<b>Pruebas de flotación</b> .....	<b>50</b>
4.2.1	Caracterización granulométrica del concentrado .....	50
4.2.2	Caracterización química del concentrado.....	51
<b>4.3</b>	<b>Prueba experimental previa de tostación</b> .....	<b>53</b>
<b>4.4</b>	<b>Pruebas de tostación de partículas muy pequeñas, intermedias y muy grandes</b> .....	<b>55</b>
4.4.1	Prueba de tostación con partículas muy pequeñas .....	55
4.4.2	Prueba de tostación con partículas intermedias .....	58
4.4.3	Prueba de tostación con partículas muy grandes .....	59
<b>4.5</b>	<b>Comportamiento de oxidación de las calcinas de cobre</b> .....	<b>62</b>
<b>4.6</b>	<b>Velocidad de reacción de las calcinas de cobre</b> .....	<b>64</b>
<b>4.7</b>	<b>Termodinámica de la prueba de tostación</b> .....	<b>65</b>
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES</b> .....		<b>68</b>
<b>CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES</b> .....		<b>70</b>
<b>CAPITULO 7: REFERENCIAS</b> .....		<b>71</b>
<b>CAPITULO 8: APÉNDICE Y ANEXOS</b> .....		<b>75</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Diagrama proceso hidrometalúrgico del cobre (Biswas & Davenport, 1994).	5
<b>Figura 2.2:</b> Diagrama proceso pirometalúrgico del cobre (Biswas & Davenport, 1994).	6
<b>Figura 2.3:</b> Diagrama de flujo del proceso pirometalúrgico del cobre (Elaboración propia).	8
<b>Figura 2.4:</b> Diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico de sulfuros de cobre (Elaboración propia).	10
<b>Figura 2.5:</b> Proceso de flotación dentro de una celda (Abarca Rodríguez, 2011).	11
<b>Figura 2.6:</b> Diagrama de flujo de las etapas de flotación (Elaboración propia).	13
<b>Figura 2.7:</b> Diagrama ternario Cu-S-O a 500 °C (Elaboración propia).	22
<b>Figura 2.8:</b> Diagrama ternario Cu-S-O a 550 °C (Elaboración propia).	23
<b>Figura 2.9:</b> Diagrama ternario Cu-S-O a 600 °C (Elaboración propia).	24
<b>Figura 2.10:</b> Modelo de núcleo recesivo de una partícula (Parra Sánchez, 2018).	26
<b>Figura 3.1:</b> Analizador portátil de fluorescencia de rayos X (ThermoFisher, 2018).	31
<b>Figura 3.2:</b> Celda de flotación EDEMET (Elaboración propia).	32
<b>Figura 3.3:</b> Filtro de presión EDEMET® (EDEMET, 2018).	33
<b>Figura 3.4:</b> Horno de secado BellHor® (COTECNO, 2020).	33
<b>Figura 3.5:</b> Tamizadora Ro-Tap® (MATEX, 2020).	34
<b>Figura 3.6:</b> Horno Mufla Biobase MC2.5-12 (HR Representaciones, 2020).	35
<b>Figura 3.7:</b> Imagen satelital Mina Chépica (GoogleEarth, 2020).	36

<b>Figura 3.8:</b> Diagrama de flujo de operaciones (Elaboración propia).....	37
<b>Figura 3.9:</b> Preparación de las muestras del mineral para flotación Rougher (Elaboración propia).....	39
<b>Figura 3.10:</b> Cinética de Flotación Rougher en celdas EDEMET® (Elaboración propia). .....	40
<b>Figura 3.11:</b> Cinética de Flotación Cleaner en celdas EDEMET® (Elaboración propia). .....	41
<b>Figura 3.12:</b> Variación de masas en muestras de la prueba experimental inicial de tostación (Elaboración propia).....	44
<b>Figura 3.13:</b> Concentración de elementos representativos de la prueba experimental inicial de tostación (Elaboración propia).....	45
<b>Figura 3.14:</b> Variación de masas en muestras de la prueba experimental final de tostación (Elaboración propia).....	46
<b>Figura 3.15:</b> Concentración de elementos representativos de la prueba experimental final de tostación (Elaboración propia). ....	47
<b>Figura 4.1:</b> Análisis granulométrico del material de mineral sulfurado de cobre (Lobos Salinas, 2019). ....	49
<b>Figura 4.2:</b> Cantidad de concentrado por tamaño de partícula (Elaboración propia). ...	51
<b>Figura 4.3:</b> Concentración de cada elemento por tamaño de partícula (Elaboración propia).....	52
<b>Figura 4.4:</b> Eliminación de masa y azufre de la muestra del proceso experimental previo de tostación en fase inicial (Elaboración propia). ....	54
<b>Figura 4.5:</b> Eliminación de masa y azufre de la muestra del proceso experimental previo de tostación en fase final (Elaboración propia).....	54

<b>Figura 4.6:</b> Variación de masas en muestras de la prueba de tostación en partículas muy pequeñas (Elaboración propia).....	56
<b>Figura 4.7:</b> Concentración de elementos representativos de la prueba de tostación en partículas muy pequeñas (Elaboración propia). .....	57
<b>Figura 4.8:</b> Variación de masas en muestras de la prueba de tostación en partículas intermedias (Elaboración propia).....	58
<b>Figura 4.9:</b> Concentración de elementos representativos de la prueba de tostación en partículas intermedias (Elaboración propia). .....	59
<b>Figura 4.10:</b> Variación de masas en muestras de la prueba de tostación en partículas muy grandes (Elaboración propia). .....	60
<b>Figura 4.11:</b> Concentración de elementos representativos de la prueba de tostación en partículas muy grandes (Elaboración propia). .....	61
<b>Figura 4.12:</b> Comportamiento del contenido de azufre a distintas temperaturas y tamaños de partículas (Elaboración propia).....	62
<b>Figura 4.13:</b> Ecuaciones de las velocidades de reacción en función de la temperatura por tamaños de partículas (Elaboración propia).....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1:</b> Reactivos específicos para pruebas de flotación (Elaboración propia).....	35
<b>Tabla 3.2:</b> Condiciones para flotación Rougher (Elaboración propia).....	40
<b>Tabla 3.3:</b> Condiciones para flotación Cleaner (Elaboración propia).....	42
<b>Tabla 3.4:</b> Tamaños de partículas para pruebas de tostación (Elaboración propia).....	42
<b>Tabla 3.5:</b> Temperaturas para pruebas de tostación (Elaboración propia).....	48
<b>Tabla 4.1:</b> Concentración de cada elemento por tamaño de partícula (Elaboración propia).....	51
<b>Tabla 4.2:</b> Balance estequiométrico de la reacción 4.4 (Elaboración propia).....	66
<b>Tabla 4.3:</b> Balance estequiométrico de la reacción 4.5 (Elaboración propia).....	66
<b>Tabla 4.4:</b> Balance estequiométrico de la reacción 4.6 (Elaboración propia).....	67
<b>Tabla 8.1:</b> Datos del comportamiento del azufre para las distintas granulometrías y temperaturas (Elaboración propia).....	75

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Las rocas extraídas por la industria minera están compuestas por especies mineralógicas valiosas, usualmente las menos abundantes, y otras de menor valor o sin valor relativo. La metalurgia extractiva es el conjunto de procesos que se llevan a cabo para separar selectivamente las especies de interés de las rocas que los contienen, mediante métodos físicos y/o químicos.

Los procesos más utilizados para la obtención de minerales metálicos son las denominadas vías pirometalúrgica e hidrometalúrgica, que permiten separar el metal de los minerales que lo contienen, y su uso depende de la procedencia del mineral. Si se trata de sulfuros de cobre preferentemente se utiliza la vía pirometalúrgica, mientras que para el caso de los óxidos de cobre se utiliza la vía hidrometalúrgica.

Las etapas del proceso de producción de cobre asociados a minerales oxidados son principalmente la lixiviación, purificación-concentración y precipitación. En el caso de los minerales sulfurado son la flotación, calcinación, tostación, fusión, electrólisis ígnea y por último la metalotermia. También existen otras tecnologías para la obtención de cobre a través de la biolixiviación, que es considerado un proceso limpio y reduce los costos productivos.

Actualmente en Chile la extracción de cobre a través de minerales oxidados, cuyas reservas se están agotando, por lo general es por vías hidrometalúrgicas, donde el mineral es apilado y regado con soluciones ácidas. A diferencia de la explotación de los minerales sulfurados de cobre donde predomina el proceso de flotación, del cual se obtienen concentrados que son tratados por vías pirometalurgias; es decir, el material es sometido a un proceso de fundición a altas temperaturas, necesitando grandes cantidades de energía para su procesamiento.

El problema del sistema utilizado para el tratamiento de minerales sulfurados es su elevado costo energético y la emisión de considerables cantidades de contaminantes a la atmósfera, donde un porcentaje de estos gases es capturado y enviado a plantas de

tratamiento para la producción de ácido sulfúrico. Sin embargo, los problemas de contaminación en el aire y generación de lluvia ácida han instado a gobiernos, alrededor del mundo, a intensificar la regulación en términos de emisiones de óxidos de azufre a la atmósfera.

La tostación es una operación mediante la cual un mineral sulfurado, al reaccionar con el oxígeno del aire, se transforma en un mineral oxidado, para posteriormente ser tratado través de la vía hidrometalúrgica, un proceso más rápido y de menor costo y con menos contaminantes. La tostación permitiría explotar las reservas de sulfuros que posee nuestro país, cuyo aprovechamiento se encuentra limitado por problemas medio ambientales y altos costos de operación.

La lixiviación consiste básicamente en la obtención de cobre que se encuentra en minerales oxidados mediante la aplicación de una disolución de ácido sulfúrico y agua. En el caso de los minerales sulfurados necesitan un tratamiento previo o técnicas alternativas como la tostación para aumentar la rapidez con que se pueden lixiviar estos minerales.

La finalidad de este estudio experimental es estudiar el comportamiento de oxidación del mineral sulfurado en un proceso de tostación que tiene un concentrado sulfurado específico de la Mina Chépica para su posterior uso en técnicas de lixiviación con el objetivo de recuperar cobre, proponer un diseño para dar un valor agregado a su mina y obtener beneficios debido a su limitada actividad minera.

## 1.1 Objetivo general

Estudiar el comportamiento de oxidación de un concentrado de cobre de la Mina Chépica, su dependencia con la temperatura y la distribución de tamaños de partícula en términos de la evolución del contenido de azufre.

## 1.2 Objetivos específicos

- Obtener el concentrado a través de pruebas de flotación *Rougher* y *Cleaner* a nivel de laboratorio.
- Caracterizar el concentrado en términos de su composición química.
- Obtener las distintas fracciones de tamaño del concentrado que serán utilizados para las pruebas de tostación.
- Realizar pruebas de tostación del concentrado a diferentes temperaturas.
- Caracterizar las calcinas en términos del azufre.
- Analizar los resultados para determinar el efecto que tuvo la temperatura y el tamaño de partículas en el grado de oxidación.

## 1.3 Alcances

- Se investigará el efecto de la temperatura y el tamaño de partículas manteniendo condiciones de oxidación presentes en el horno de mufla.
- No se estudiarán procesos posteriores a la tostación (lixiviación, refinación, entre otros.)
- No se controlará el potencial de oxígeno durante las pruebas de tostación.
- No se desarrollarán modelos cinéticos; se probarán modelos ya existentes en la literatura.



## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

Para una mayor comprensión del estudio experimental de la tostación de un mineral sulfurado de la mina Chépica se investigaron fundamentos teóricos que sustentan el trabajo de investigación.

### **2.1 Procesamiento pirometalúrgico del cobre**

La extracción de los metales a partir de los minerales se puede realizar mediante el proceso por vía seca o pirometalurgia, que consiste básicamente en recuperar un metal específico por medio de operaciones realizadas a altas temperaturas entre productos en estado sólido, líquido o gaseoso. Otras alternativas al proceso pirometalúrgico son los procesos por vía húmeda o hidrometalúrgica y electrometalúrgicos (Restrepo Baena, Bustamante Rúa, & Gaviria Cartagena, 2008).

En efecto, existen dos formas en que tradicionalmente se encuentra el cobre en la tierra; como un mineral oxidado, que se halla especialmente en capas de la corteza terrestre más cercanas a la atmósfera y es bastante soluble en soluciones ácidas, por lo que su adecuado tratamiento para este tipo de mineral es por la vía hidrometalúrgica como se observa en la Figura 2.1. En cambio, un mineral sulfurado, se halla en lugares profundos alejados del contacto con el oxígeno y es fácilmente oxidable a altas temperaturas, y su adecuado tratamiento para este tipo de mineral es por la vía pirometalurgia como se aprecia en la Figura 2.2.

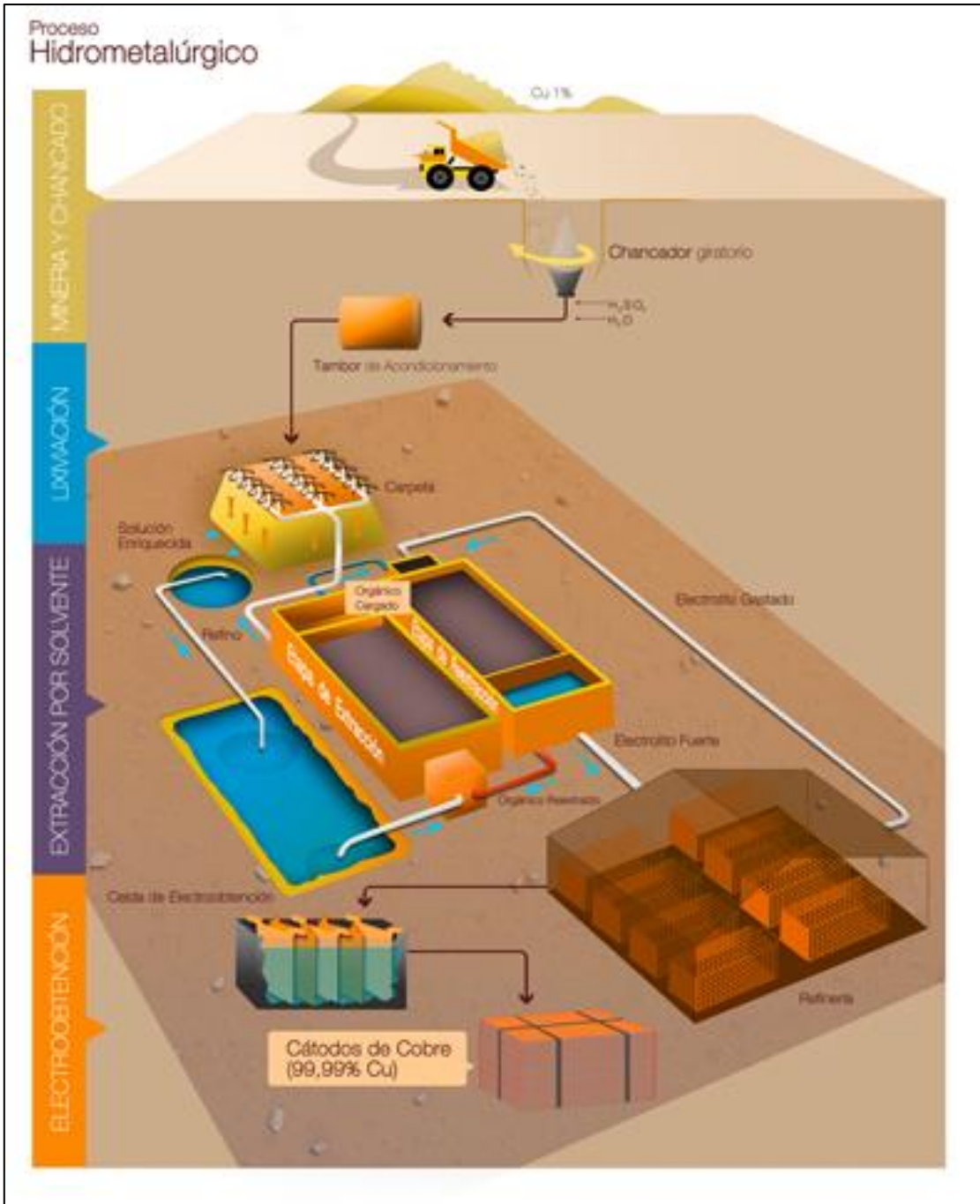


Figura 2.1: Diagrama proceso hidrometalúrgico del cobre (Biswas & Davenport, 1994).

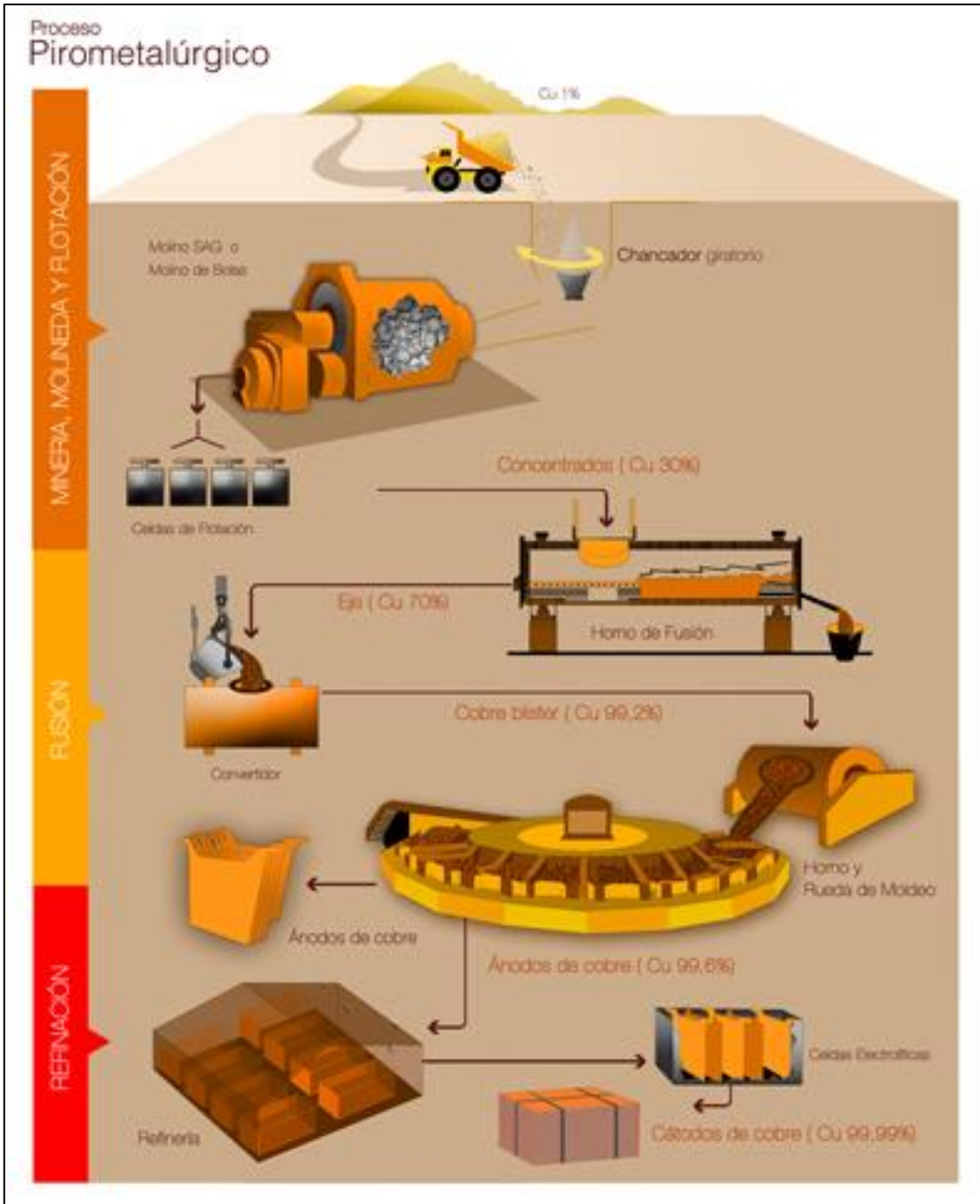


Figura 2.2: Diagrama proceso pirometalúrgico del cobre (Biswas & Davenport, 1994).

Las materias primas utilizadas en el procesamiento del cobre por pirometalurgia son frecuentemente mezclas de sulfuro de cobre y hierro, combinados con compuestos de otros elementos, principalmente silicio. Estos minerales contienen de 0,5-2 % de cobre y son sometidos a una secuencia de procesos de concentración y procesos pirometalúrgicos que se detallarán a continuación y que contienen diferentes etapas, tal como se muestra en la Figura 2.3.

### **2.1.1 Preparación de los minerales**

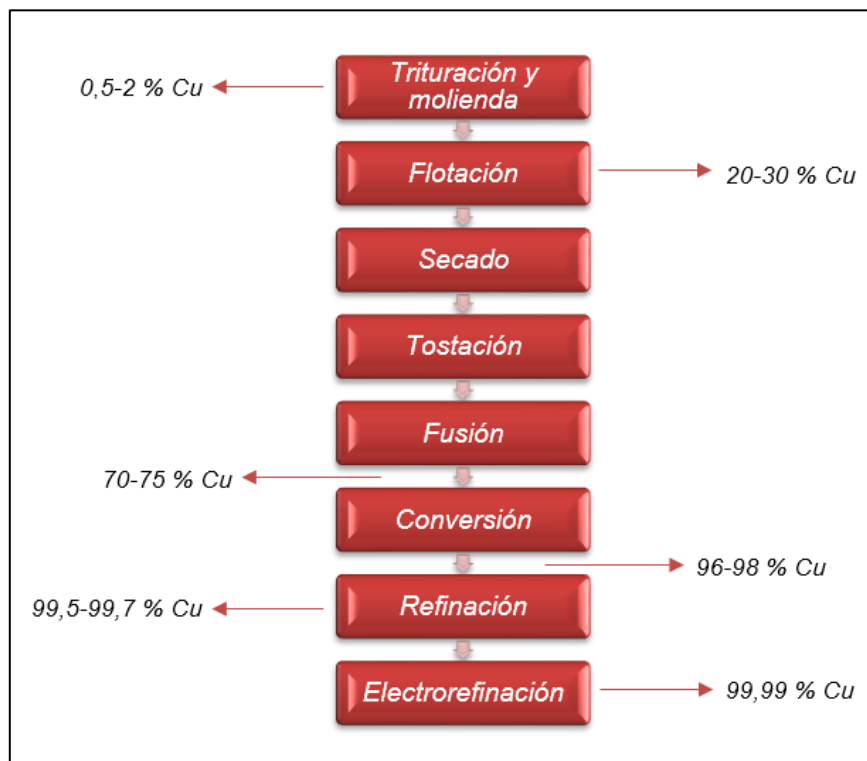
Los minerales sulfurados una vez extraídos se someten a operaciones de trituración y molienda para reducir su tamaño y posteriormente se someten a concentración mediante flotación. La flotación es un proceso físico-químico de tensión superficial que separa los minerales sulfurados del metal de otros minerales y especies que componen la mayor parte de la roca original. Para ello se inyecta aire a presión en celdas de flotación que contienen el mineral en suspensión (pulpa), de forma que unas partículas quedan en la superficie de la disolución. Los concentrados obtenidos tras la operación de flotación contienen 20-30 % de cobre (Muñoz Portero, 2016).

### **2.1.2 Extracción del cobre**

El cobre se extrae de los minerales de cobre mediante fundición. Este proceso consta de varias etapas consecutivas:

- Tostación: tiene por objetivo producir óxido de cobre, mediante la reacción que tiene un sulfuro de cobre con el oxígeno de aire.
- Fusión: tiene por objetivo concentrar el metal a recuperar, mediante una separación de fases de alta temperatura: una fase inferior sulfurada rica en el metal (mata de cobre) y otra fase superior oxidada o pobre en el metal (escoria). La fase rica en cobre contiene de 70-75 % de cobre.

- Conversión: tiene por objetivo eliminar el azufre y el hierro presentes en la fase sulfurada, mediante oxidaciones del baño fundido para obtener un cobre final con una concentración cercana al 99 % de cobre.
- Refino: tiene por objetivo eliminar impurezas y materiales como plata, oro, arsénico, antimonio, bismuto y hierro, mediante refinado en hornos anódicos, obteniéndose un cobre anódico con un contenido del 99,5-99,7 % de cobre (Muñoz Portero, 2016).



**Figura 2.3:** Diagrama de flujo del proceso pirometalúrgico del cobre (Elaboración propia).

### 2.1.3 Afino del cobre

El electrorefino del cobre tiene dos objetivos: eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre como separar las impurezas valiosas del cobre, las cuales pueden ser recuperadas después como subproductos metálicos. Para ello los ánodos de cobre se someten a electrólisis en una disolución de sulfato de cobre ácida, de forma que el cobre puro se deposita en los cátodos, obteniéndose una pureza

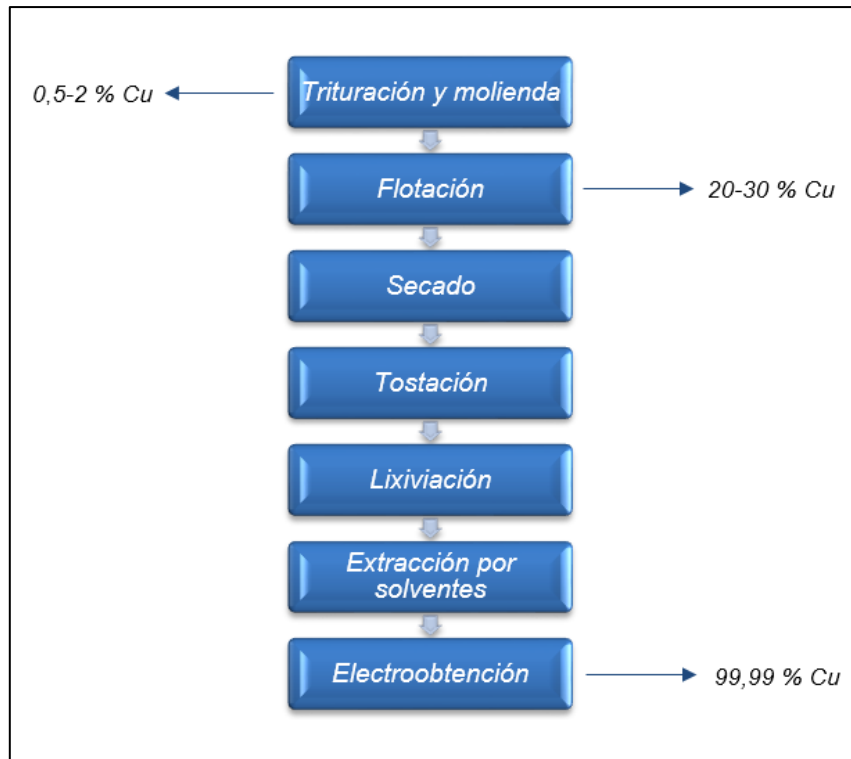
del 99,99 % de cobre. Las impurezas caen al fondo de la celda de electrólisis formando barras anódicas (Muñoz Portero, 2016).

## **2.2 Procesamiento hidrometalúrgico de sulfuros de cobre**

En metalurgia el tipo de mineral es la base para determinar el conjunto de procesos que se deben aplicar para la recuperación de las especies de interés. Los sulfuros primarios de cobre presentan características favorables a la flotación y tienen una tendencia selectiva de los distintos elementos a reaccionar a altas temperaturas con la presencia de oxígeno. Por lo anterior, el tratamiento tradicional que se les ha dado a los sulfuros de cobre es el procedimiento de la pirometalurgia.

No obstante, la finalidad de este estudio experimental es tratar un mineral sulfurado de cobre mediante la vía hidrometalúrgica (Figura 2.4) pero los compuestos sulfurados no pueden ser lixiviados directamente debido a su lenta cinética de disolución y por lo tanto el proceso es considerado ineficiente, es por ello que una tostación previa permite oxidar los contenidos de hierro y sulfatar los minerales de cobre. La sulfatación permite que los compuestos sean disueltos en la etapa de lixiviación y recuperados a través de los procesos de extracción por solventes. Los gases generados a través de la tostación corresponden principalmente a  $\text{SO}_2$  que son aprovechados para la generación de ácido sulfúrico y la lixiviación de calcinas sulfatadas se realiza a temperatura ambiente, sin necesidad de una planta de oxígeno (Villela Olavarría, Kutscher Monckeberg, Castillo Dintrans, & Cantallopts Araya, 2017).

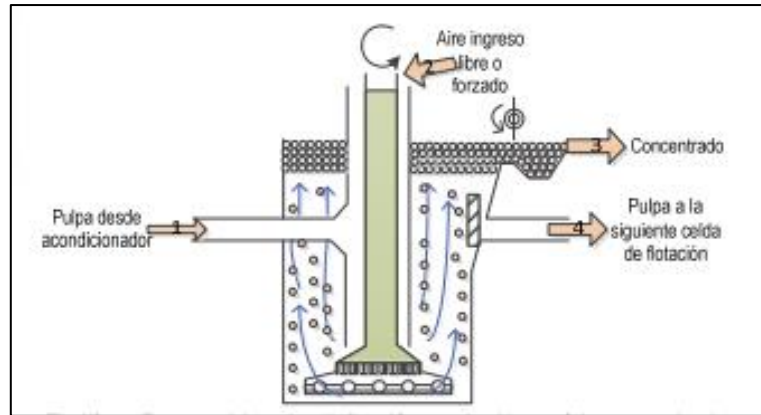
La tostación consiste en el cambio de la composición química de un mineral metálico a altas temperaturas, pero sin cambios de su estado sólido. La tostación es una operación que busca transformar la materia y sus efectos sobre la concentración metálica de la mena son escasos (Palacios de Liñán, 2011).



**Figura 2.4:** Diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico de sulfuros de cobre (Elaboración propia).

### 2.3 Proceso de flotación de espumas

La flotación de minerales en espumas es un proceso físico-químico que tiene como objetivo adherir selectivamente burbujas de aire a partículas minerales de interés, de manera tal de lograr la separación de éstas especies de la ganga (Uribe Vélez, 2017). Es un proceso de concentración de minerales ideal, la mena se divide en un concentrado enriquecido con el componente útil o valioso y una cola o relave con los minerales que componen la ganga. Por su parte, la estabilidad de la burbuja dependerá, entre otros factores, al espumante agregado al proceso de flotación que se llevará a cabo en una máquina denominada celda de flotación como se observa en la Figura 2.5 (Abarca Rodríguez, 2011).



**Figura 2.5:** Proceso de flotación dentro de una celda (Abarca Rodríguez, 2011).

### 2.3.1 Variables del proceso de flotación

En el proceso de flotación de espumas intervienen variables que se especificarán a continuación (Abarca Rodríguez, 2011):

Variables que dependen de los componentes químicos tales como:

- Colectores.
- Espumantes.
- Modificadores.
- Activadores.
- Depresores.
- Modificadores de pH.

Variables que dependen de los componentes de equipamiento tales como:

- Diseño de la celda convencional.
- Diseño de la celda columna.
- Agitación de la pulpa (rpm).
- Configuración del banco de celdas.
- Remoción de espuma.



Variables que dependen de los componentes de operación tales como:

- Velocidad de alimentación.
- Tiempo de retención.
- Mineralogía y ley de la mena.
- Tamaño de partículas (densidad y forma).
- Grado de liberación.
- Grado de oxidación.
- pH natural del mineral.
- Densidad de la pulpa (% de sólidos).
- Flujo de aire.
- Remoción de la espuma (natural o mecánica).

### **2.3.2 Fases del proceso de flotación**

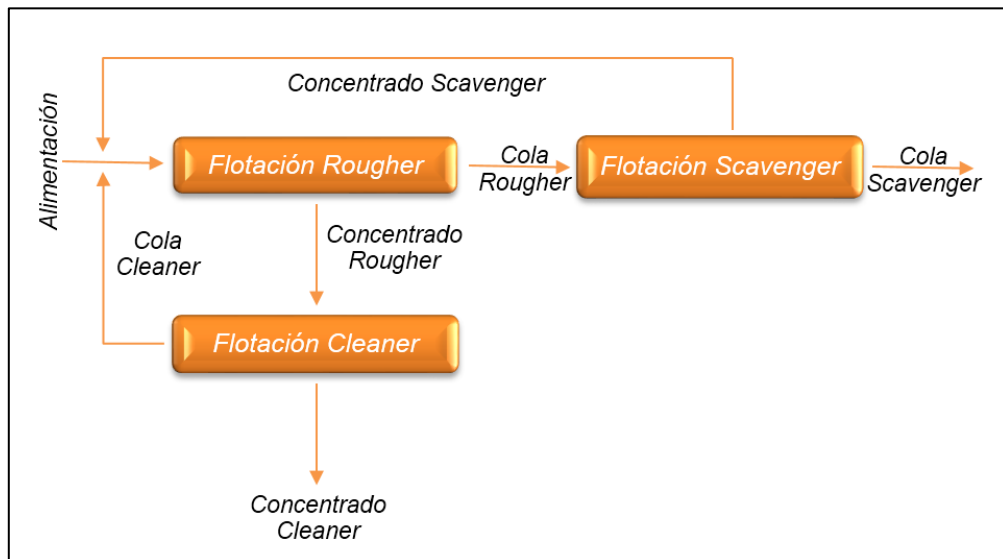
El proceso de flotación se desarrolla en un medio acuoso. Se detallarán a continuación cada fase que lo conforma:

- Fase sólida: representa los sólidos a separar (minerales) que tienen generalmente una composición química definida y una estructura cristalina formada por moléculas que constituyen la fase mineral.
- Fase líquida: representa el agua debido a sus propiedades específicas ideales para separar las especies de minerales de interés de la ganga. La contaminación natural del agua causada por sales de calcio, magnesio y sodio no solo cambian la naturaleza de la flotabilidad de ciertos minerales, sino también son causa de un considerable consumo de reactivos de flotación que forman sales solubles.
- Fase gaseosa: representa el aire que se inyecta en la pulpa de manera neumática o mecánica para formar las burbujas que son los centros sobre los cuales se adhieren las partículas sólidas (Abarca Rodríguez, 2011).

### 2.3.3 Etapas del proceso de flotación

Etapas de flotación que se adoptan dentro de los circuitos del proceso (Figura 2.6):

- La etapa de flotación *Rougher* tiene como finalidad recuperar una alta proporción de las partículas valiosas. El concentrado de ésta etapa no se considera un concentrado final y se debe someter a un proceso de limpieza.
- La etapa de flotación *Cleaner* tiene como finalidad obtener un concentrado de alta ley y de baja recuperación en algunos casos. Las colas de la etapa de flotación *Rougher* generalmente contienen una proporción recuperable del mineral valioso, por lo que a este flujo se le somete generalmente a un agotamiento.
- La etapa de flotación *Scavenger* tiene como finalidad recoger la última parte recuperable del mineral valioso, las colas de esta etapa son el relave final. Las colas de la etapa de flotación *Cleaner* y el concentrado de la etapa de flotación *Scavenger* son bombeados a la alimentación de la etapa de flotación *Rougher* (Abarca Rodríguez, 2011).



**Figura 2.6:** Diagrama de flujo de las etapas de flotación (Elaboración propia).

## 2.4 Proceso de tostación

La tostación es un proceso de pretratamiento metalúrgico en el cual un mineral concentrado u otra materia prima sólida es sometida a temperaturas elevadas bajo una atmósfera oxidante, donde ocurre una transformación química del concentrado con respecto a su estado inicial, sin producir la fusión haciéndolo susceptibles a tratamientos posteriores de extracción.

La tostación se caracteriza principalmente por ser un sistema sólido-gaseoso, a diferencia de procesos tales como la fusión y conversión en las que interviene una fase fundida. La tostación es un proceso totalmente químico, debido a que sólo busca un cambio químico del concentrado inicial, a diferencia de la fusión y conversión que son procesos físico-químicos. No obstante, durante el proceso de tostación pueden ocurrir inconvenientes como fenómenos de sinterización, precipitación de fases por equilibrios y decrepitación, debido a condiciones operacionales no óptimas donde es posible observar cambios físicos como los producidos por la sinterización, de manera que varias partículas quedan íntimamente ligadas por fenómenos superficiales generándose una nueva partícula de mayor tamaño y distinta geometría en comparación a la inicial. Así también, puede ocurrir el atrapamiento de burbujas de dióxido de azufre ( $\text{SO}_{2(g)}$ ) entre las cáscaras de sulfatos y óxidos producidos en la burbuja por sobre la partícula de sulfuro inicial, para posteriormente producir un quiebre en las cáscaras generando partículas de menor tamaño que son descargadas junto con las calcinas de tostación (Goñi Alarcón, 1999).

### 2.4.1 Variables del proceso de tostación

En el proceso de tostación intervienen variables termodinámicas que se enumerarán a continuación (García Opazo, 2017):

- Temperatura.
- Composición de los gases.

De igual manera, intervienen las siguientes variables cinéticas:

- Granulometría.
- Composición química de la alimentación.
- Porosidad.
- Transferencia de calor
- Tipo de horno utilizado.

## **2.5 Tipos de tostación**

La tostación es una preparación aplicable tanto a la extracción pirometalúrgica como hidrometalúrgica, debido a que depende de la naturaleza del mineral y del reactivo gaseoso utilizado, por lo que se distinguen tres tipos de tostación: oxidante, sulfatante y oxi-sulfatante, siendo la tostación oxidante la más característica realizada sobre sulfuros en presencia de aire (Palacios de Liñán, 2011).

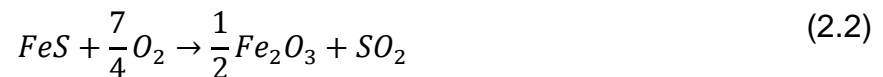
### **2.5.1 Tostación oxidante**

La tostación oxidante tiene como objetivo el intercambio por completo de aniones entre la fase gaseosa y la fase sólida a oxidar. Se aplica generalmente a concentrados de cobre sulfurados como pretratamiento para la extracción de metales, lo que representa un elevado contenido de azufre (> 26% peso) eliminado mediante el proceso de tostación con una temperatura por sobre los 780 °C a causa de la oxidación de la carga en la que actúa la fase gaseosa con altos potenciales de oxígeno. De esta manera, el oxígeno presente en la fase gaseosa se mezcla con el azufre contenido en la carga sólida para remover todo el azufre generando dióxido de azufre como gases de salida. El dióxido de azufre es recuperado para posteriores tratamientos en la extracción de metales, específicamente con el objetivo de obtener ácido sulfúrico.

Del proceso de tostación oxidante se obtiene una calcina oxidada que generalmente se compone de tenorita y hematita, debido a las condiciones altamente oxidantes (altos potenciales de oxígeno de la fase gaseosa) como también de la elevada temperatura operacional. No obstante, con una temperatura por sobre los 750 °C es posible que

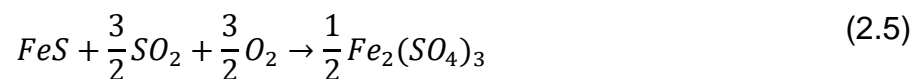
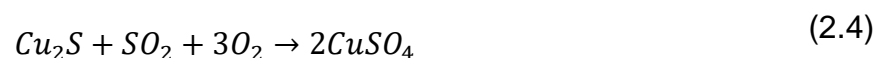
ocurra la reacción de difusión al estado sólido entre las nuevas partículas de tenorita y hematita, generando una ferrita cúprica altamente insoluble y termodinámicamente estable perjudicando la recuperación de cobre por la vía hidrometalúrgica.

En general el proceso de tostación oxidante se describe con las siguientes reacciones (Goñi Alarcón, 1999):



### 2.5.2 Tostación sulfatante

La tostación sulfatante tiene como objetivo transformar las cargas sulfuradas de cobre en calcinas sulfatadas para un subsecuente proceso de lixiviación que se obtiene tostando la carga sulfurada de cobre entre un rango de temperatura operacional de 550 °C a 680 °C para potenciales de oxígeno y dióxido de azufre entre 1% a 15% de volumen, generando una calcina compuesta de calcocianita ( $CuSO_4$ ) y sulfato férrico ( $Fe_2(SO_4)_3$ ) mediante las siguiente reacciones:



De esta manera, se aprovecha la alta solubilidad del sulfato de cobre en un proceso de lixiviación a pH ácidos. Se observa que la tostación sulfatante implica la remoción incompleta de azufre de la carga inicial con un aumento apreciable en peso.

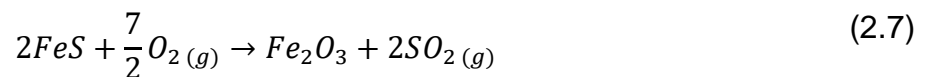
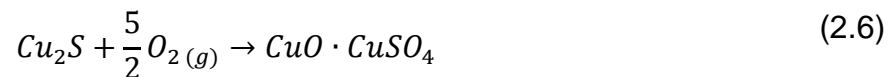
Por otra parte, si la tostación sulfatante se realiza a una temperatura un poco sobre los 647 °C es posible obtener calcinas de sulfato de cobre y hematita, considerándose una

tostación sulfatante parcial que se podría llevar a cabo entre una temperatura de 647 °C a 680 °C (Goñi Alarcón, 1999).

### 2.5.3 Tostación oxi-sulfatante

De manera similar a la tostación sulfatante, en este rango se obtiene oxi-sulfato de cobre para su subsecuente proceso de lixiviación. El rango de temperatura operacional es entre 680 °C a 720 °C, generando una calcina compuesta de dolerofanita ( $\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4$ ) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

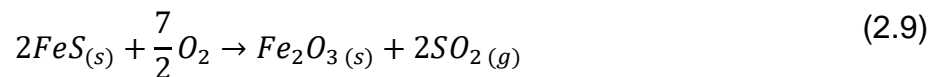
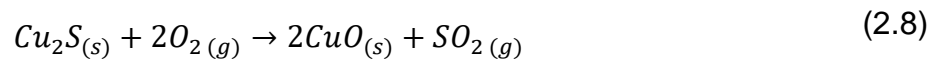
En general el proceso de tostación oxi-sulfatante se describe con las siguientes reacciones:



Aunque tanto el sulfato como el oxi-sulfato de cobre son solubles en agua existe una diferencia; el sulfato de cobre se puede disolver completamente en agua a temperatura ambiental, mientras que el oxi-sulfato sólo se disuelve un 25% en peso bajo las mismas condiciones (Goñi Alarcón, 1999).

## 2.6 Termodinámica de la tostación

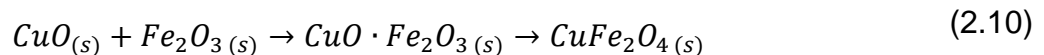
Las reacciones más importantes que ocurren en el proceso de tostación de un concentrado de cobre es la oxidación de los sulfuros metálicos a óxidos:



Para los sulfuros metálicos el equilibrio de las reacciones anteriores se encuentra desplazado hacia la derecha y la reacción es esencialmente irreversible para

temperaturas de tostación entre 500 °C a 1000 °C, considerándose reacciones altamente exotérmicas.

A temperaturas de tostación por sobre los 700 °C se presenta el inconveniente de la reacción en estado sólido entre la hematita y tenorita, formando ferrita cúprica ( $\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  (s)) considerado un compuesto muy estable termodinámicamente y posee una solubilidad muy baja en ácido. La formación de ferrita cúprica ocurre según la siguiente reacción (Aguilar Pacheco, 2001):



Los gases de tostación son necesariamente oxidantes por naturaleza. Si la tostación es realizada con oxígeno puro (estequiométrico o no) la fase gaseosa estará formada normalmente por  $\text{SO}_2$  y  $\text{O}_2$ , aunque puede contener cantidades menores de  $\text{SO}_3$  y  $\text{SO}_2$ . En cambio, si la tostación es realizada con aire (estequiométrico o no) la fase gaseosa resultante estará formada por una mezcla de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{N}_2$  pudiendo contener igualmente pequeñas concentraciones de  $\text{SO}_3$  y  $\text{SO}_2$ . Por otra parte, si la carga sólida o si el gas inyectado posee cierta cantidad de humedad o si la carga sólida presenta impurezas volátiles, tales como orgánicos y óxidos de metales ligeros (As, Pb, Sb, etc.) la fase gaseosa resultante contendrá  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{As}_3\text{O}_3$ ,  $\text{As}_3\text{O}_5$ ,  $\text{As}_{(g)}$ ,  $\text{Pb}_{(g)}$ ,  $\text{Sb}_{(g)}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{Cl}_{2(g)}$ , entre otros (Goñi Alarcón, 1999).

En la fase gaseosa puede ocurrir la siguiente reacción que merece una atención particular:



A una baja temperatura, inferior a 500 °C el equilibrio de la reacción 2.11 en atmósfera oxidante, tiene al  $\text{SO}_3$  como un elemento estable. La velocidad de reacción es muy baja a temperaturas inferiores a 500 °C, por lo que es necesario un catalizador para obtener cantidades apreciables de  $\text{SO}_3$  desde  $\text{SO}_2$  y  $\text{O}_2$ . A una mayor temperatura, superior a 700 °C el equilibrio de la reacción 2.11 se desplaza hacia la izquierda con un  $\text{SO}_2$  más estable pero cantidades finitas de  $\text{SO}_3$  seguirán presentes. La velocidad de reacción es

rápida a temperaturas superiores a 700 °C, especialmente en presencia de ciertos óxidos metálicos que son considerados catalizadores de la reacción, de tal forma que los gases del proceso de tostación contienen condiciones muy cercanas al equilibrio de SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>.

El gas inerte (N<sub>2</sub>) actúa como diluyente de la fase gaseosa de la reacción 2.11, debido a que involucra una variación en la cantidad de moles de gas, el sistema es considerado sensible a la presión. A una presión total alta o baja presencia de un gas inerte a presión constante tiene el efecto de cambiar el equilibrio de la reacción 2.11 hacia la derecha con una mayor cantidad de SO<sub>3</sub>.

Entre la fase sólida y la fase gaseosa ocurren las siguientes reacciones:



Los sulfatos metálicos son constituyentes comunes en las calcinas del proceso de tostación. El equilibrio entre las calcinas y el gas de tostación puede ser representado en cualquier de las formas antes descritas. La sulfatación es una reacción secundaria en la tostación oxidante y generalmente ocurre en la zona de enfriamiento de las calcinas.

Una correcta aplicación del análisis termodinámico involucra la solución simultánea de las reacciones 2.11, 2.12 y 2.13. Por otra parte, la presencia de un gas inerte afecta el grado de disociación de los sulfatos por su efecto en la reacción 2.11.

Muchos sulfatos se descomponen en dos o más etapas donde los sulfatos básicos son el producto intermedio. Dependiendo del proceso de tostación, el equilibrio para los sulfatos debe ser calculado para cada etapa de la siguiente forma:







La reacción 2.15 tiene una constante de equilibrio menor que la reacción 2.14, por lo cual el sulfato básico se descompondrá a mayor temperatura que el sulfato normal.

Las condiciones necesarias para la formación de un producto del proceso de tostación pueden ser ilustradas por las relaciones de equilibrio en el sistema ternario Cu-S-O. Según la regla de las fases de Gibbs con temperatura y presión como variables independientes se tiene:

$$v = c + 2 - f \quad (2.16)$$

Donde,

v: varianza del sistema o grados de libertad.

c: número de constituyentes independientes del sistema.

f: número de fases presentes en el sistema.

Para un sistema ternario ( $c = 3$ ) a temperatura constante ( $v = c+1-f$ ) con una fase condensada en equilibrio con la fase gaseosa ( $f = 2$ ) la regla de fases da un valor de dos grados de libertad. De esta forma, la relación de fases puede ser descrita en un diagrama bi-dimensional de estabilidad de fases de Kellogg-Basú usando presiones parciales de oxígeno y anhídrido sulfuroso (Aguilar Pacheco, 2001).

## 2.7 Diagrama ternario de estabilidad de fases del sistema Cu-S-O

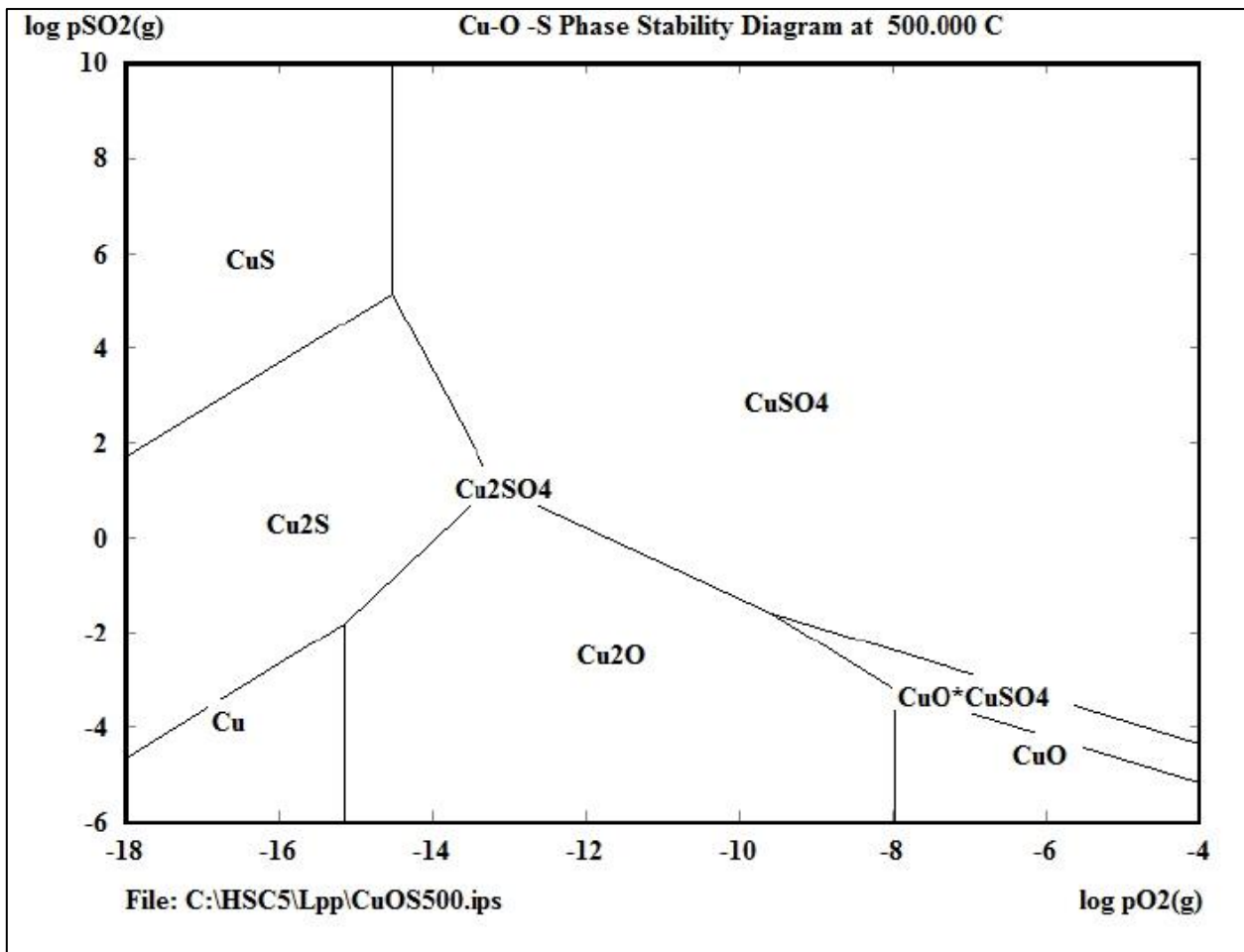
El diagrama ternario de estabilidad de fases también es conocido como diagrama de predominancia de áreas, diagrama de Kellogg o diagrama de equilibrio sólido-gas. Los diagramas fueron estudiados por H.H. Kellogg y S.K. Basú y son una forma muy útil de presentar gráficamente la información termodinámica disponible de los compuestos en un sistema considerado. Generalmente, existen varias versiones de los diagramas de estabilidad de fases de acuerdo al uso que de ellos se requiera y dependiendo del sistema y potenciales considerados.

El diagrama de estabilidad de fases consiste básicamente en una representación coordinada bidimensional, en donde los logaritmos de los potenciales de la fase gaseosa son graficados. El diagrama es considerado isotérmico y sus áreas indican las fases predominantes entre los rangos delimitados de presiones de la fase gaseosa a la temperatura en estudio (Goñi Alarcón, 1999).

En el presente trabajo experimental fue estudiado el diagrama ternario Cu-S-O para un rango de temperatura entre 500 °C a 600 °C. Los diagramas de estabilidad de Kellogg fueron construidos mediante el programa HSC Chemistry 5 y no sólo determinan el producto el cual se obtiene a condiciones fijas de temperatura,  $P_{O_2}$  y  $P_{SO_2}$ , sino que también permite explicar los resultados trazando posibles mecanismos cinéticos que puede ocurrir en el proceso de tostación (Aguilar Pacheco, 2001).

### **2.7.1 Diagrama ternario Cu-S-O para tostación oxidante a 500 °C**

Para el sistema ternario Cu-S-O la fase sólida está compuesta por las siguientes especies: Cu, CuO, Cu<sub>2</sub>O, CuSO<sub>4</sub>, CuO•CuSO<sub>4</sub>, CuS, Cu<sub>2</sub>S y la fase gaseosa está compuesta por: SO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. En la Figura 2.7 se muestra el diagrama ternario a una temperatura de 500 °C para el sistema Cu-S-O:

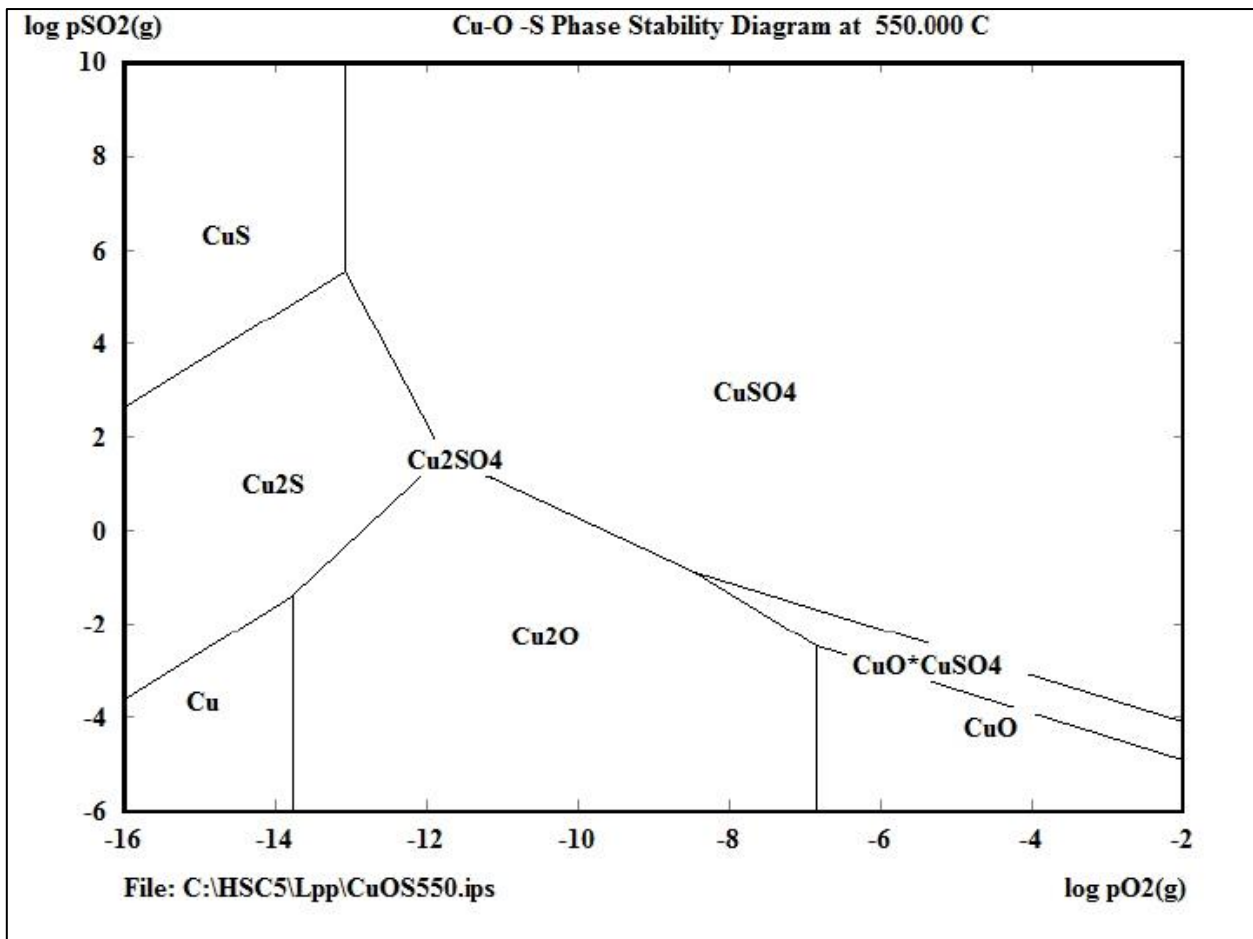


**Figura 2.7:** Diagrama ternario Cu-S-O a 500 °C (Elaboración propia).

En el diagrama ternario Cu-S-O a 500 °C se distingue que según el rango de presiones de O<sub>2</sub> y SO<sub>2(g)</sub>, en el área de operación industrial se obtendrá mayoritariamente oxisulfato de cobre.

### 2.7.2 Diagrama ternario Cu-S-O para tostación oxidante a 550 °C

Para el sistema ternario Cu-S-O la fase sólida está compuesta por las siguientes especies: Cu, CuO, Cu<sub>2</sub>O, CuSO<sub>4</sub>, CuO•CuSO<sub>4</sub>, CuS, Cu<sub>2</sub>S y la fase gaseosa está compuesta por: SO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. En la Figura 2.8 se muestra el diagrama ternario a una temperatura de 550 °C para el sistema Cu-S-O:

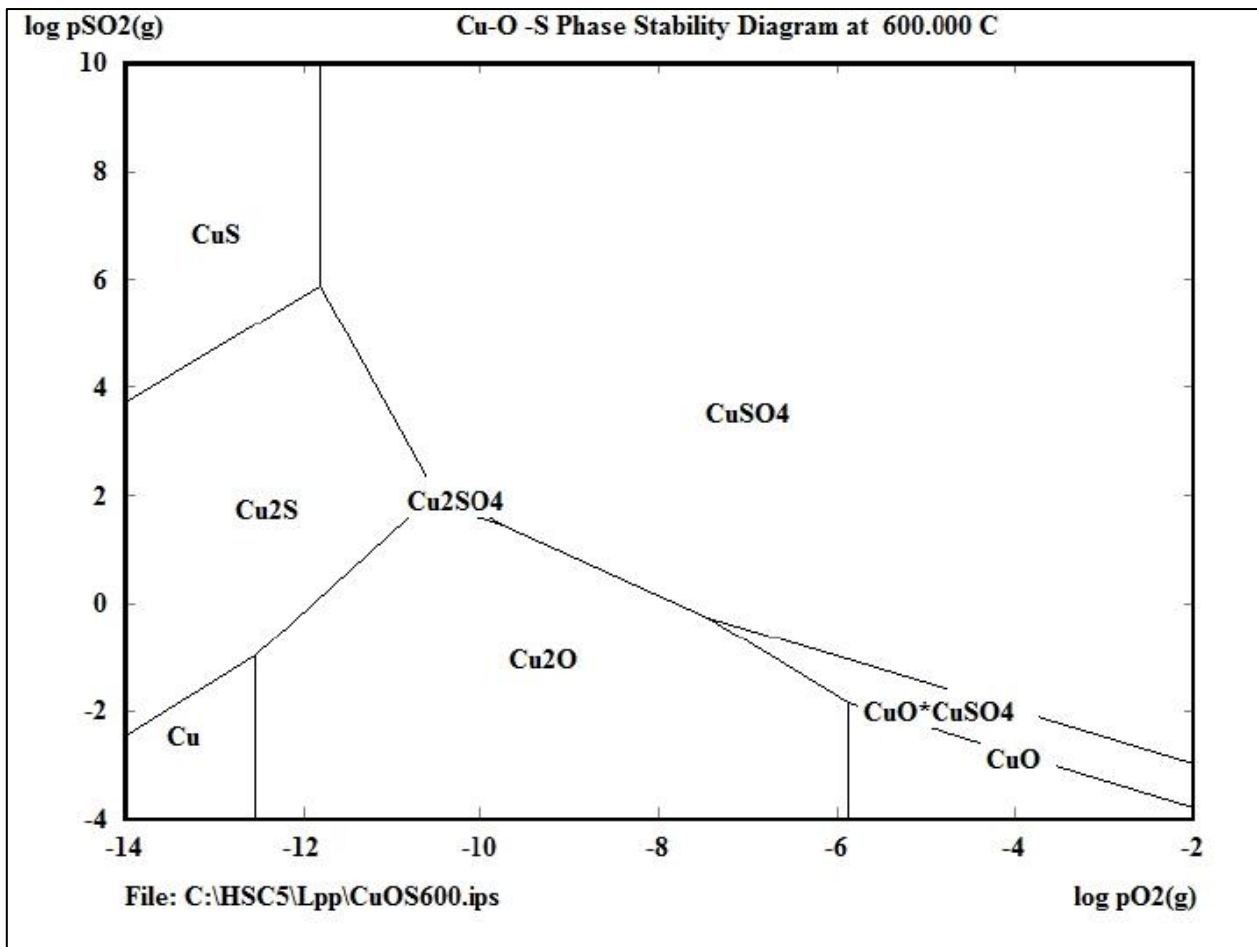


**Figura 2.8:** Diagrama ternario Cu-S-O a 550 °C (Elaboración propia).

En el diagrama ternario Cu-S-O a 550 °C se percibe que según el rango de presiones de O<sub>2</sub> y SO<sub>2(g)</sub>, en el área de operación industrial se obtendrá mayoritariamente oxisulfato de cobre al igual que en el diagrama anterior. Las calcinas obtenidas a una temperatura de 550 °C deberían ser menos lixiviables que las calcinas obtenidas a 500 °C pero con menor contenido de azufre.

### 2.7.3 Diagrama ternario Cu-S-O para tostación oxidante a 600 °C

Para el sistema ternario Cu-S-O la fase sólida está compuesta por las siguientes especies: Cu, CuO, Cu<sub>2</sub>O, CuSO<sub>4</sub>, CuO•CuSO<sub>4</sub>, CuS, Cu<sub>2</sub>S y la fase gaseosa está compuesta por: SO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. En la Figura 2.9 se muestra el diagrama ternario a una temperatura de 600 °C para el sistema Cu-S-O:



*Figura 2.9: Diagrama ternario Cu-S-O a 600 °C (Elaboración propia).*

En el diagrama ternario Cu-S-O a 600 °C se aprecia que según el rango de presiones de O<sub>2</sub> y SO<sub>2(g)</sub>, el área de operación industrial se encuentra más próxima al área de estabilidad de la tenorita que los diagramas anteriores.

## 2.8 Cinética de la tostación

El método convencional de estudiar los sistemas metalúrgicos, en términos de balance de masa y calor, es sólo el primer paso en un análisis efectivo del sistema, el que además debe considerar los parámetros cinéticos. Mientras que la termodinámica permite calcular las relaciones entre las fases, cálculos de equilibrio, balances de masa y energía, y en general un tratamiento de los datos necesarios para la descripción

macroscópica del sistema; la cinética debe proporcionar un estudio de los mecanismos de reacción, etapas controlantes del proceso, tipos de fenómenos y en general un tratamiento de variables como la velocidad de aproximación al equilibrio (tiempo de residencia), volumen del reactor, flujos másicos y volumétricos, energías de activación, constantes de velocidad, etc. De modo que el estudio de la cinética de tostación de sulfuros metálicos se inserta en sistemas multi-particulados de tipo sólido-gas en los que pueden existir mecanismos de varias etapas para el intercambio de aniones entre la carga sólida sulfurada y el medio gaseoso oxidante.

Todo proceso en el que ocurran reacciones sólido-gas involucra una serie de etapas intermedias que se clasifican de la siguiente manera:

1. Transferencia de masa gaseosa de reactantes entre el seno del gas y la superficie o volumen de reacción de la partícula sólida.
2. Difusión de los reactantes gaseosos a través de los poros del producto sólido formado o parcialmente reaccionado.
3. Adsorción de los reactantes gaseosos sobre la superficie sólida (o desorción de los productos gaseosos desde la superficie).
4. Reacción química propiamente tal entre el gas adsorbido y el sólido reactante (Goñi Alarcón, 1999).

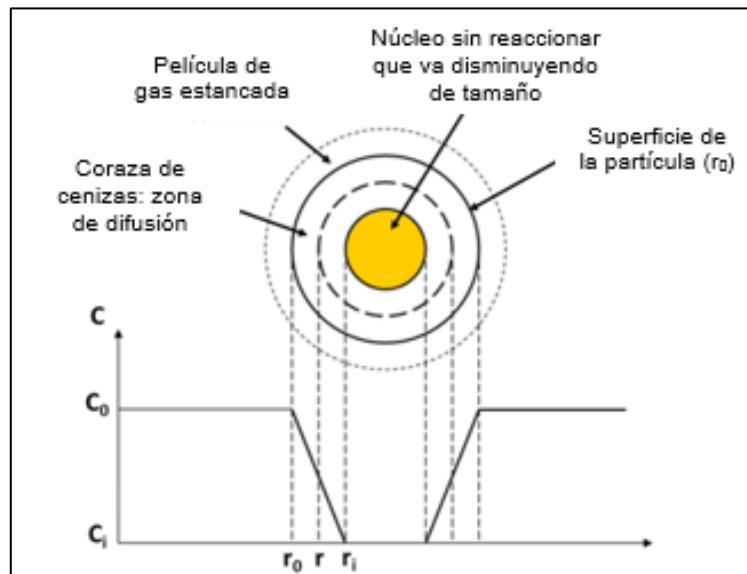
## **2.9 Modelo de núcleo recesivo**

La cinética de tostación de sulfuros metálicos puede ser modelada matemáticamente mediante el modelo de núcleo recesivo o modelo de núcleo sin reaccionar, puesto que bastantes pruebas comprueban que el modelo reproduce con cierta aproximación el fenómeno físico de la tostación.

El modelo de núcleo recesivo se encuentra representado esquemáticamente en la Figura 2.10 y considera lo siguiente:

- Una película gaseosa (gas de tostación) rodea un sólido de forma esférica (sulfuro metálico)

- La partícula tiene una superficie  $r_a$  a través de la cual el gas se difunde.
- La porosidad de la capa de ceniza que se forma sobre dicho sólido es lo suficientemente alta como para asumir que no existe resistencia adicional al transporte de materia en los poros.
- El flujo es conservativo (constante o estacionario).



**Figura 2.10:** Modelo de núcleo recesivo de una partícula (Parra Sánchez, 2018).

El modelo de núcleo recesivo presenta como ecuación general de transformación de una partícula esférica en la que se forma una capa densa de producto, la siguiente expresión (Goñi Alarcón, 1999):

$$\frac{1}{b} * f + \frac{R_0}{6 * D_{ef}} * f^2 * (3 - 2 * f) = \frac{C_0 - C^*}{q * R_0} * t \quad (2.17)$$

$$f = 1 - \frac{R_i}{R_0} \quad (2.18)$$

Donde,

b: coeficiente de estequiometría de la reacción química de tostación.

f: función de penetración relativa.

$R_0$ : radio inicial de la partícula.

$R_i$ : radio final de la partícula.

$D_{ef}$ : coeficiente efectivo de difusión en la capa de producto sólido.

$C_0$ : concentración del gas reactivo en el seno del fluido.

$C^*$ : concentración de equilibrio del gas reactivo.

$q$ : densidad del reactivo.

$t$ : tiempo de reacción.

## **2.10 Técnicas analíticas de minerales**

Actualmente existen diversas técnicas analíticas que se emplean en investigaciones mineralógicas y se definen principalmente como la caracterización de minerales. Las técnicas analíticas de minerales son métodos de observación y determinación que permiten obtener la información objetiva y precisa de la composición química, estructura cristalina y diferentes propiedades de los minerales.

El empleo de una técnica analítica adecuada y eficiente se debe fundamentalmente al conocimiento de las características analíticas, especialmente a los mecanismos de excitación y a la respuesta del sistema de detección. Muchas de las técnicas de investigación de los minerales emplean una amplia variedad de fenómenos físicos y se basan en principios diferentes, pero tienen como objetivo común producir una señal que permita medir y entregue información de la concentración de sus constituyentes (Mineralog, 2011).

A continuación se describirán las tres principales técnicas analíticas de minerales empleadas en el trabajo investigativo:

### **2.10.1 Fluorescencia de rayos X**

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que emplea la emisión fluorescente de radiación X. La existencia de esta técnica se debe a la emisión de fotones producto de un exceso energético provocado por la transición de electrones desde capas más externas hacia las más internas debido a una radiación X incidente que expulsa a los electrones de las capas interiores dejando lugares vacíos.



La fluorescencia de rayos X comprende el análisis químico tanto cualitativo como cuantitativo de muestras en estado sólido y líquido abarcando químicamente desde el flúor hasta el uranio y desde productos orgánicos hasta rocas volcánicas (Universidad de Oviedo, 2020).

### **2.10.2 Espectrometría infrarroja**

La espectrometría infrarroja (IR) es un método de medida de la absorción de la radiación en un rango de longitudes de onda cuando ésta pasa a través de una capa delgada de sustancia. Igualmente a las distintas técnicas analíticas espectroscópicas tiene como objetivo identificar un compuesto o investigar la composición de una muestra.

La espectrometría infrarroja consiste en que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencia de vibración específica que corresponden a los niveles de energía de la molécula. Estas frecuencias dependen de la forma de la superficie de la energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y posiblemente el acoplamiento vibracional.

La espectrometría infrarroja funciona casi exclusivamente en enlaces covalentes y se emplea mucho en química orgánica. Se pueden generar gráficos bien resueltos con muestras de una sola sustancia de gran pureza y habitualmente se emplea para la identificación de mezclas complejas (Pérez, 2020).

### **2.10.3 Espectroscopia de absorción atómica**

La espectroscopia de absorción atómica (AAS) es un método instrumental que permite determinar la concentración de un elemento en una muestra. Esta técnica analítica consiste principalmente en que un átomo solo es capaz de absorber aquellas radiaciones electromagnéticas que el mismo átomo es capaz de emitir.

La espectroscopia de absorción atómica es una técnica capaz de detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos químicos, por lo que su campo de aplicación son diversos. Esta técnica analítica es posible aplicarla para la determinación

de ciertos metales como: antimonio, cadmio, calcio, cesio, cromo, cobalto, oro, plomo, níquel, entre otros (Universidad de las Américas Puebla, 2008).

## **CAPÍTULO 3: Metodología experimental**

El trabajo experimental tiene como finalidad estudiar el efecto de la temperatura y el tamaño de partículas en el proceso de tostación de un mineral sulfurado de cobre. A continuación, se describen los equipos utilizados y las técnicas experimentales empleadas durante la experiencia desarrollada.

### **3.1 Equipos utilizados**

Las pruebas de flotación y tostación realizadas en este estudio experimental requirieron de los siguientes equipos de laboratorio para evaluar la temperatura y el tamaño de partículas en términos de la evolución del contenido de azufre:

#### **3.1.1 Analizador portátil de fluorescencia de rayos X**

La caracterización del mineral para conocer el contenido de cobre fue realizada utilizando el analizador portátil de fluorescencia de rayos X Thermo Scientific<sup>TM</sup> Niton XL3t (Figura 3.1). El analizador portátil XRF determina la composición química de una muestra de mineral midiendo el espectro de los rayos X característicos emitidos por los diversos elementos encontrados en la muestra cuando es iluminado por los rayos X. Los resultados son proporcionados en tiempo real y disminuye los retardos asociados al análisis tradicional en los laboratorios.



**Figura 3.1:** Analizador portátil de fluorescencia de rayos X (ThermoFisher, 2018).

### **3.1.2 Balanza analítica semi-micro Boeco® BXX 22**

El pesaje de los reactivos utilizados en las pruebas de flotación se realizaron en la balanza analítica semi-micro Boeco® BXX 22 característica por contener una calibración interna motorizada automática.

### **3.1.3 Celda de flotación EDEMET®**

Las pruebas de flotación *Rougher* y *Cleaner* se realizaron en la celda de flotación EDEMET® (Figura 3.2). Es una celda mecánica de aireación forzada y está diseñada para minimizar las diferencias de resultados al repetir pruebas bajo las mismas condiciones de operación. Cuenta con un variador de frecuencia que controla de forma constante la velocidad de rotación del impulsor y dispone de un suministro interno e independiente de aire que asegura un flujo constante y evita el ingreso de impurezas presentes en una red de aire.



**Figura 3.2:** Celda de flotación EDEMET (Elaboración propia).

#### **3.1.4 Filtro de presión EDEMET®**

El secado del concentrado de cobre se realizó en el filtro de presión EDEMET® (Figura 3.3). Es un filtro diseñado para secar parcialmente concentrados y relaves provenientes de una prueba de flotación y así disminuir el tiempo de secado de muestras para su posterior análisis.



*Figura 3.3: Filtro de presión EDEMET® (EDEMET, 2018).*

### **3.1.5 Horno de secado BellHor®**

El secado del concentrado de cobre se realizó en el horno de secado BellHorSecAireForzV-225B (Figura 3.4). Es un horno que posee un sistema de resistencias eléctricas que proporcionan irradiación térmica hacia el interior de la cámara y que cuenta con una cerradura hermética.



*Figura 3.4: Horno de secado BellHor® (COTECNO, 2020).*

### 3.1.6 Tamizadora Ro-Tap® RX-29-10

La obtención de las distintas fracciones de tamaño del concentrado de cobre para el análisis granulométrico se consiguió a través de la Tamizadora Ro-Tap® RX-29-10 (Figura 3.5). Es una tamizadora que reproduce un movimiento circular y de golpeo mediante una acción mecánica uniforme, garantizando así ensayos fiables y comparables.



*Figura 3.5: Tamizadora Ro-Tap® (MATEX, 2020).*

### 3.1.7 Horno de Mufla Biobase

La eliminación de azufre del concentrado de cobre se obtuvo mediante el proceso de tostación que se realizó en un horno mufla Biobase MC2.5-12 (Figura 3.6). Es un horno de mufla de fibra cerámica profesional de alta densidad con un aislamiento térmico en su interior que garantiza que la temperatura pueda alcanzar 1200 °C.



*Figura 3.6: Horno Mufla Biobase MC2.5-12 (HR Representaciones, 2020).*

### 3.2 Materiales reactivos

En este estudio experimental se emplearon reactivos químicos dependiendo del proceso a desarrollar.

En las pruebas de flotación a nivel de laboratorio fueron necesarios reactivos tanto para la flotación *Rougher* como para la flotación *Cleaner* (Tabla 3.1). Estos reactivos fueron respaldados por la literatura de la cinética de flotación. (Cytec, 2010)

*Tabla 3.1: Reactivos específicos para pruebas de flotación (Elaboración propia).*

	<b>Flotación <i>Rougher</i></b>	<b>Flotación <i>Cleaner</i></b>
<b>Colector</b>	Isobutil Xantato	Ditiofosfato AERO 7249
<b>Espumante</b>	MIBC	MIBC
<b>Modificador de pH</b>	Cal	Cal



### 3.3 Procedimiento experimental

El mineral tratado proveniente de la Mina Chépica contiene calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) con impurezas tales como pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). La Mina Chépica es un yacimiento que explota y produce concentrados de oro, plata y cobre, ubicado en la Región del Maule a 20 kilómetros hacia la costa de la ciudad de Talca y en las cercanías de la localidad de Pencahue (Figura 3.7). Produce actualmente 2.500 ton/mes de mineral y espera aumentar su producción a 5.000 ton/mes en los próximos meses. El concentrado de oro, plata y cobre es posteriormente vendido a la fundición ventanas de ENAMI.



*Figura 3.7: Imagen satelital Mina Chépica (GoogleEarth, 2020).*

El estudio experimental está restringido al comportamiento de oxidación de un concentrado sulfurado específico de la Mina Chépica en pruebas de tostación y su dependencia con la temperatura y la distribución de tamaños de partículas en términos de la evolución del contenido de azufre.

Las experiencias desarrolladas durante el siguiente estudio experimental constaron de una serie de procedimientos para el cumplimiento de los objetivos planteados que se detallan en la Figura 3.8:



**Figura 3.8:** Diagrama de flujo de operaciones (Elaboración propia).

### 3.3.1 Análisis del mineral

Se caracterizó el mineral de cabeza mediante la técnica analítica de fluorescencia de rayos X para conocer el contenido de cobre (Cu) con el que se comenzó a trabajar. Las fases mineralógicas presentes en el mineral sulfurado se determinaron mediante la observación directa y asociando el contenido químico con las fases minerales observadas. Se analizó en la muestra un concentrado sulfurado de muy baja ley con un 2,65% de Cu, debido a que fue producido en la Mina Chépica como un concentrado de oro.

### 3.3.2 Preparación de muestras del mineral

Una vez analizado el contenido de cobre presente en el mineral, se procedió a la preparación de las muestras para efectuar las pruebas de flotación *Rougher* y flotación *Cleaner*. Se determinó la cantidad de mineral y agua necesaria para iniciar las pruebas de flotación mediante el siguiente procedimiento:

Se calculó la densidad de la pulpa según la ecuación 3.1, para esto se debió calcular la densidad de la muestra del mineral mediante el método de la probeta con 30 gr de muestra de mineral y 50 ml de agua ( $V_1$ ), obteniendo un volumen total de la pulpa de 61 ml ( $V_2$ ).

$$\rho_{pulpa} = \frac{m_{muestra}}{(V_2 - V_1)} \quad (3.1)$$

Con una densidad de la pulpa de 2,73 gr/cm<sup>3</sup> y considerando un 30% de sólidos en una celda de flotación con 5.000 cm<sup>3</sup> de capacidad, se obtienen 1.500 gr de mineral necesario bajo éstas condiciones. Posteriormente, se calculó el volumen de agua necesaria según la ecuación 3.2, obteniendo 4.450 cm<sup>3</sup> de agua para realizar las pruebas de flotación *Rougher*.

$$V_{agua} = V_{celda} - V_{mineral} \quad (3.2)$$

$$V_{agua} = V_{celda} - \frac{m_{mineral}}{\rho_{pulpa}}$$

Con la misma densidad de pulpa de 2,73 gr/cm<sup>3</sup> y considerando un 25% de sólidos en una celda de flotación con 1.500 cm<sup>3</sup> de capacidad, se obtienen 375 gr de mineral necesario bajo éstas condiciones. Posteriormente, se calculó el volumen de agua necesaria según la ecuación 3.2, obteniendo 1.362,5 cm<sup>3</sup> de agua para realizar las pruebas de flotación *Cleaner*.

Por lo tanto, se dividió el mineral obtenido de la Mina Chépica en lotes de 1.500 gr para las pruebas de flotación *Rougher* (Figura 3.9) y 375 gr de concentrado de cobre obtenidos de la flotación *Rougher* para las pruebas de flotación *Cleaner*.



**Figura 3.9:** Preparación de las muestras del mineral para flotación *Rougher* (Elaboración propia).

### 3.3.3 Proceso de flotación *Rougher*

Preparado el mineral, se desarrolló una prueba de cinética de flotación *Rougher* a nivel de laboratorio (Figura 3.10) que consiste básicamente en fraccionar el concentrado en función del tiempo de flotación. Se recolectó el concentrado de cobre a tiempos parciales de 0-1 minutos, 1-2 minutos, 2-4 minutos, 4-8 minutos y de 8-16 minutos. Posteriormente se filtró en un filtro a presión EDEMET® y se secó en un horno de secado BellHor® para analizar mediante fluorescencia de rayos X cada uno de los concentrados, con la finalidad de determinar el tiempo de flotación y obtener una mayor recuperación de cobre.



**Figura 3.10:** Cinética de Flotación Rougher en celdas EDEMET® (Elaboración propia).

Las pruebas de flotación *Rougher* se realizaron en celdas de flotación EDEMET® con una capacidad de 5 litros y un tiempo de 16 minutos bajo las siguientes condiciones (Tabla 3.2):

**Tabla 3.2:** Condiciones para flotación *Rougher* (Elaboración propia).

<b>Flotación <i>Rougher</i></b>	
Modificador de Ph	CaO
pH	10 - 11
Colector	Isobutil Xantato (20 g/t)
Espumante	MIBC (15 g/t)
Tiempo de acondicionamiento	5 minutos
Tiempo de flotación	16 minutos
Velocidad impulsor acondicionamiento	700 rpm
Velocidad impulsor flotación	1200 rpm
Intervalo paleteo	10 segundos
Porcentaje de sólidos pulpa	30%
Flujo de aire	20 (L/min)

Se filtró y secó el concentrado sulfurado obtenido de la celda de flotación para posteriormente volver a caracterizarlo mediante la técnica de fluorescencia de rayos X.

### 3.3.4 Proceso de flotación Cleaner

Se realizó una segunda prueba de flotación con la finalidad de obtener una mayor recuperación del concentrado sulfurado obtenido en la flotación *Rougher*. Las pruebas de cinética de flotación *Cleaner* a nivel de laboratorio (Figura 3.11) se realizaron en celdas de flotación EDEMET®. Se recolectó el concentrado de cobre a tiempos parciales de 0-1 minutos, 1-2 minutos, 2-4 minutos, 4-8 minutos y de 8-16 minutos. Posteriormente se filtró en un filtro a presión EDEMET® y se secó en un horno de secado BellHor® para analizar mediante fluorescencia de rayos X cada uno de los concentrados, con la finalidad de determinar el tiempo de flotación y obtener una mayor recuperación de cobre.



**Figura 3.11:** Cinética de Flotación Cleaner en celdas EDEMET® (Elaboración propia).

Las pruebas de flotación *Cleaner* se realizaron en celdas de flotación EDEMET® con una capacidad de 1,5 litros y un tiempo de 2 minutos bajo las siguientes condiciones (Tabla 3.3):

**Tabla 3.3:** Condiciones para flotación Cleaner (Elaboración propia).

<b>Flotación Cleaner</b>	
Modificador de Ph	CaO
pH	10 - 11
Colector	Ditiofosfato (20 g/t)
Espumante	MIBC (15 g/t)
Tiempo de acondicionamiento	5 minutos
Tiempo de flotación	2 minutos
Velocidad impulsor acondicionamiento	700 rpm
Velocidad impulsor flotación	700 rpm
Intervalo paleteo	10 segundos
Porcentaje de sólidos pulpa	30%
Flujo de aire	10 (L/min)

Se filtró y secó el concentrado sulfurado obtenido de la celda de flotación para posteriormente volver a caracterizarlo mediante la técnica de fluorescencia de rayos X.

### 3.3.5 Obtención fracciones de tamaño

Una vez obtenido el concentrado de cobre de las pruebas de flotación, se separaron las distintas fracciones de tamaños por tamizado en seco en la tamizadora Ro-Tap® RX-29-10 con un tiempo de 15 minutos, para así estudiar el efecto del tamaño de partícula en las pruebas de tostación.

Las fracciones de tamaño del concentrado sulfurado se encuentran entre las siguientes mallas de tamizaje (Tabla 3.4):

**Tabla 3.4:** Tamaños de partículas para pruebas de tostación (Elaboración propia).

<b>Tamaños</b>	<b>Malla</b>	<b>Abertura</b>
Muy pequeñas	< 270	< 53 $\mu\text{m}$
Intermedias	270 a 200	53 $\mu\text{m}$ a 75 $\mu\text{m}$
Muy grandes	> 200	> 75 $\mu\text{m}$

Posteriormente, se obtuvieron muestras de 10 gr del concentrado de cobre por cada tamaño de partícula para el análisis químico previo de los elementos representativos contenidos en el mineral. El análisis químico se determinó mediante los métodos de espectrofotometría infrarroja (IR) para obtener el contenido de azufre en la muestra y espectroscopia de absorción atómica (AAS) para obtener el contenido de cobre, hierro, zinc y silicio en la muestra.

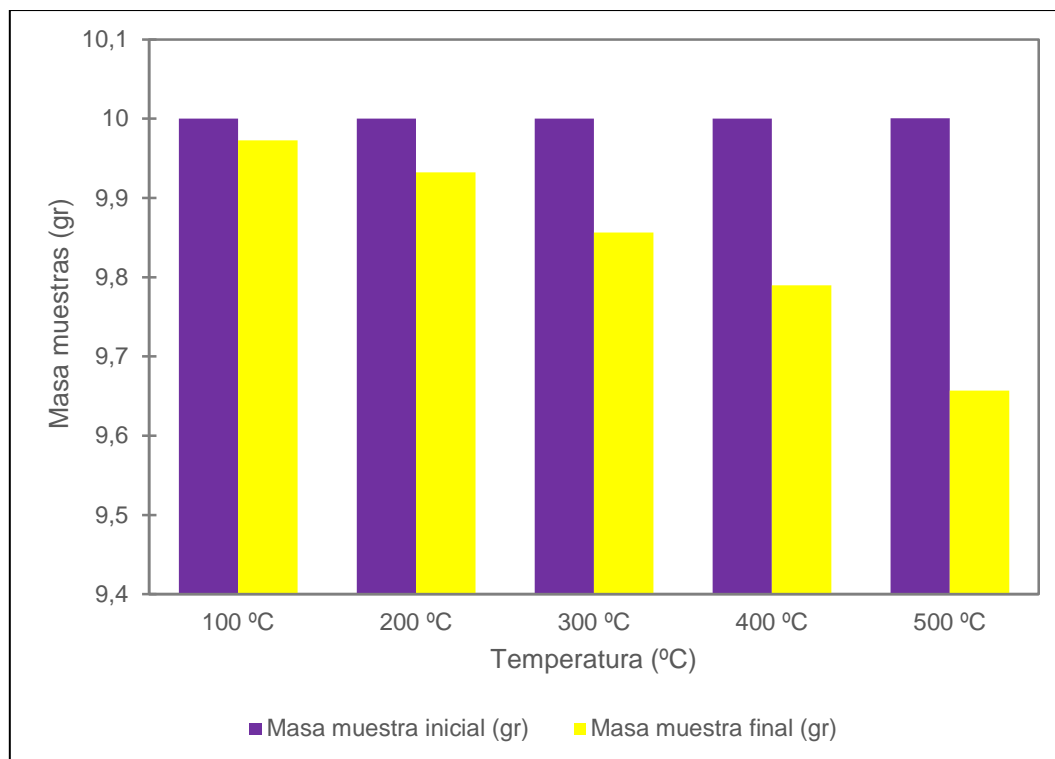
### **3.3.6 Prueba experimental previa de tostación**

Inicialmente se efectuó una prueba experimental de tostación que constó de dos fases con la finalidad de comprobar la temperatura en la que se debía encontrar el horno de mufla al momento de retirar los crisoles. Se procedió a pesar cada uno de los crisoles para conocer la masa inicial de cada muestra. Para este caso se emplearon muestras con una granulometría de 53  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$ , puesto que existe una mayor cantidad de mineral con este tamaño de partícula.

En la fase inicial se introdujeron cinco crisoles con 10 gr de muestra cada uno a la temperatura ambiente de 19  $^{\circ}\text{C}$ . Se efectuó el retiro del primer crisol a los 100  $^{\circ}\text{C}$ , el segundo crisol se retiró cuando el horno de mufla aumentó su temperatura en 100  $^{\circ}\text{C}$  consecutivamente hasta completar el retiro del quinto crisol a los 500  $^{\circ}\text{C}$ .

Se procedió a pesar cada uno de los crisoles al ser retirados para conocer la masa final de cada muestra como se observa en la Figura 3.12, donde se presenta una clara variación entre la masa inicial y la masa final de las muestras sucedido a causa del proceso de tostación.

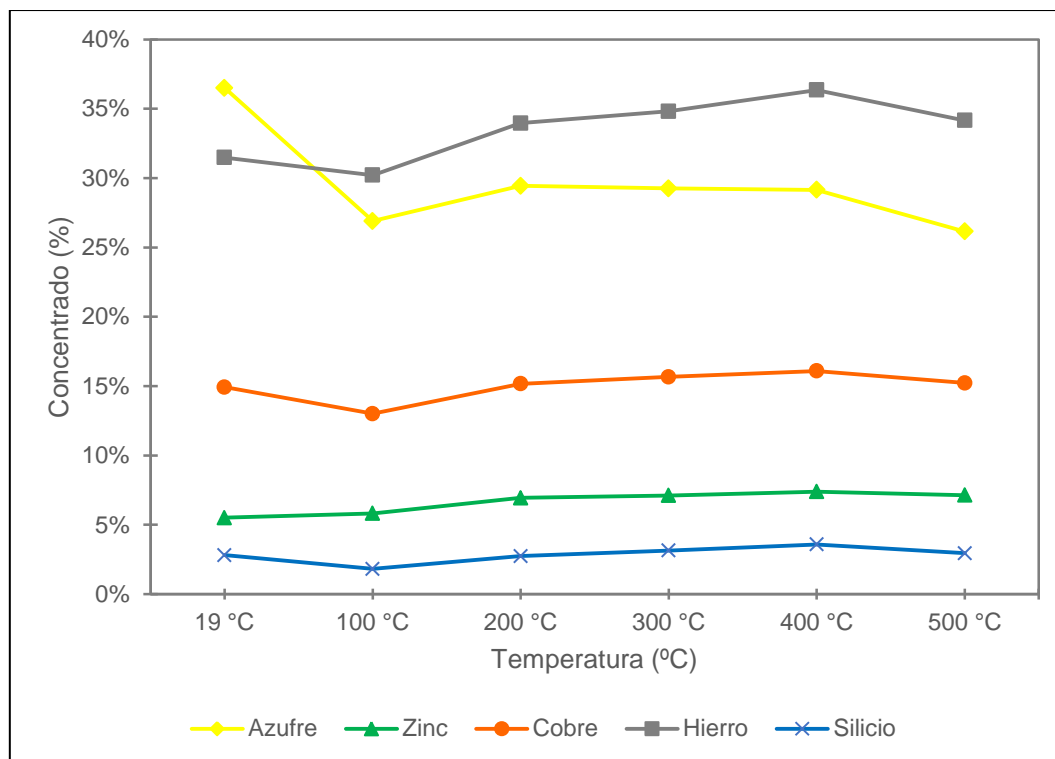




**Figura 3.12:** Variación de masas en muestras de la prueba experimental inicial de tostación (Elaboración propia).

Según la Figura 3.12 el fenómeno se debe al aumento de temperatura del proceso de tostación puesto que los minerales sulfurados tienen una mayor transferencia de calor con el oxígeno generando mayor cantidad de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) disminuyendo la concentración de sulfuros en las calcinas de cobre. De esta manera el cobre aumenta su concentración en el proceso de tostación para aumentar su extracción en el siguiente proceso de lixiviación.

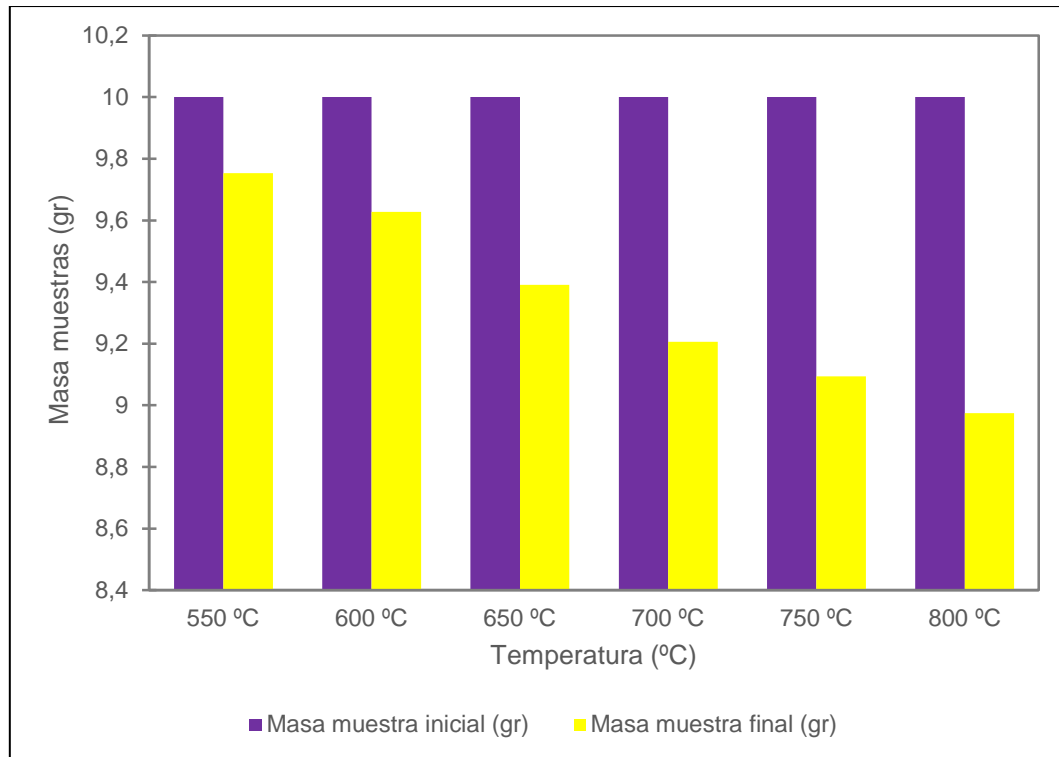
En la siguiente Figura 3.13 se aprecia el resultado del análisis químico bajo el método analítico de fluorescencia rayos X de los elementos representativos de las calcinas obtenidas en la prueba experimental inicial de tostación.



**Figura 3.13:** Concentración de elementos representativos de la prueba experimental inicial de tostación (Elaboración propia).

Los resultados obtenidos en el análisis químico realizado a las calcinas de cobre de la fase inicial conforme a la Figura 3.13 manifiestan una disminución de todos los elementos a excepción del zinc en los primeros 100 °C del proceso de tostación. También existe una clara disminución en el contenido de azufre al alcanzar los 500 °C en el horno de mufla.

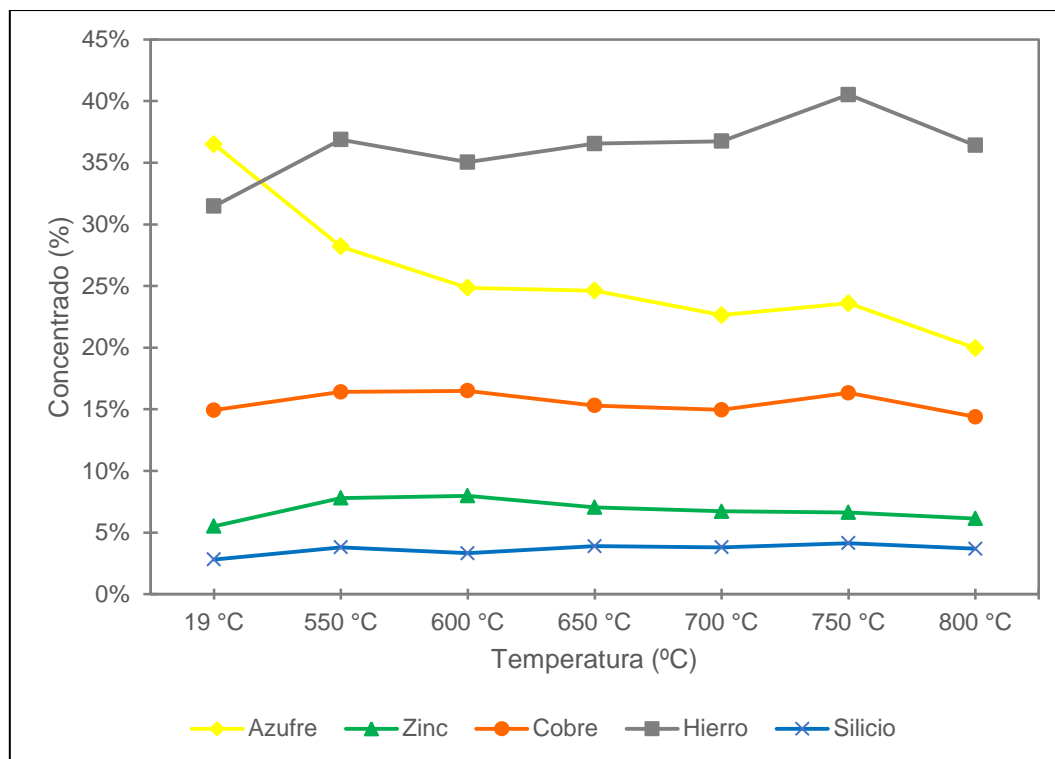
Inmediatamente en la fase final se introdujo el primer crisol con 10 gr de muestra a la temperatura de retirar el último crisol de la fase inicial de 500 °C para ser retirado cuando el horno de mufla aumentó su temperatura en 50 °C alcanzando los 550 °C. A la temperatura de 550 °C se introdujo el segundo crisol para ser retirado cuando el horno de mufla aumentó su temperatura a 50 °C consecutivamente hasta completar el retiro del sexto crisol a los 800 °C. Se procedió a pesar cada uno de los crisoles al ser retirados para conocer la masa final de cada muestra como se observa en la Figura 3.14, donde se presenta una clara variación entre la masa inicial y la masa final de las muestras sucedido ocurrido a causa del proceso de tostación.



**Figura 3.14:** Variación de masas en muestras de la prueba experimental final de tostación (Elaboración propia).

Según la Figura 3.14 se observa un mayor aumento en la variación de las masas de la muestra inicial con respecto a las masas de la muestra final. El fenómeno se debe en este caso a un mayor aumento de la temperatura en comparación a la prueba experimental inicial de tostación (Figura 3.12) puesto que el oxígeno del aire aumenta generando una cantidad relevante de dióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) disminuyendo considerablemente la concentración de sulfuros en las calcinas de cobre.

En la siguiente Figura 3.15 se aprecia el resultado del análisis químico bajo el método analítico de fluorescencia rayos X de los elementos representativos de las calcinas obtenidas en la prueba experimental final de tostación.



**Figura 3.15:** Concentración de elementos representativos de la prueba experimental final de tostación (Elaboración propia).

Los resultados obtenidos en el análisis químico realizado a las calcinas de cobre de la fase final conforme a la Figura 3.15 manifiestan un aumento de todos los elementos a excepción del azufre al ingresar la muestra a los 500 °C para retirarlo a los 550 °C. También existe una constante disminución en el contenido de azufre hasta alcanzar los 800 °C del horno de mufla.

### 3.3.7 Proceso de tostación del concentrado sulfurado

Se realizaron las pruebas de tostación en un horno de mufla Biobase MC2.5-12 para estudiar el comportamiento de oxidación del concentrado de cobre a distintas temperaturas y tamaños de partículas en términos de la evolución del contenido de azufre. Las temperaturas definidas para estas pruebas de tostación son las entregas en la Tabla 3.5:

**Tabla 3.5:** *Temperaturas para pruebas de tostación (Elaboración propia).*

	<b>Temperaturas</b>
Baja	500 °C
Media	550 °C
Alta	600 °C

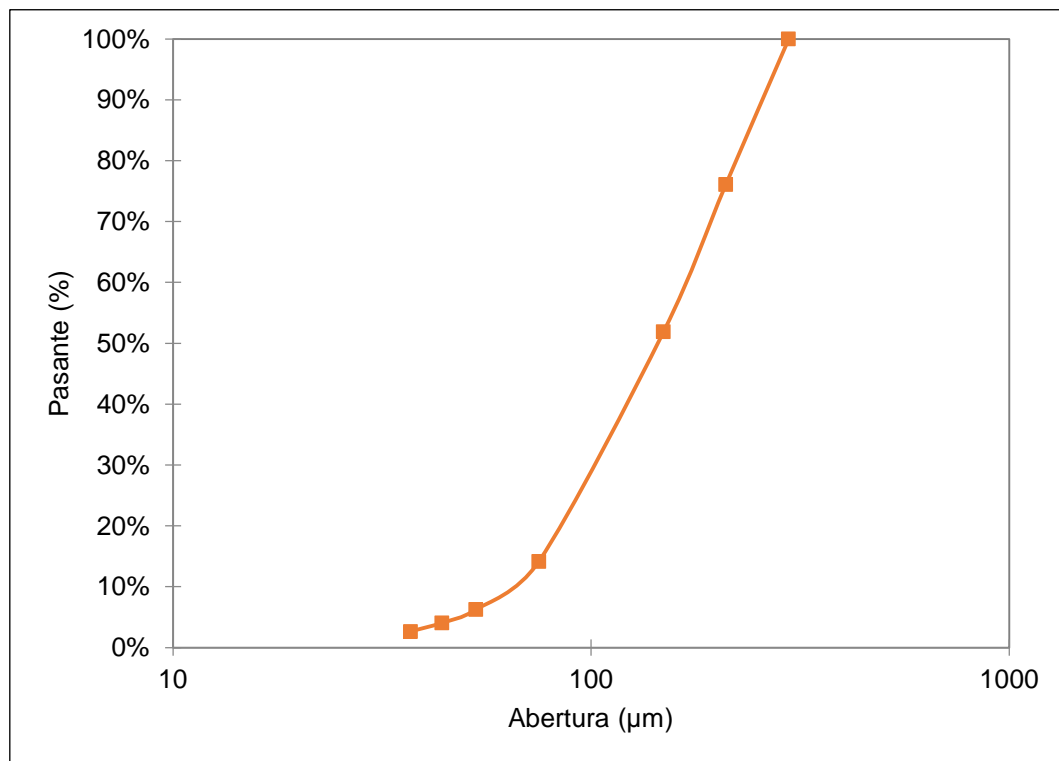
Finalmente, el comportamiento de oxidación se determinó mediante el grado de oxidación a través del contenido de azufre a distintas temperaturas y bajo las mismas condiciones mediante la técnica mineralógica de fluorescencia de rayos X. El contenido de los otros elementos representativos de la calcina de cobre a distintas temperaturas se determinó mediante la misma técnica de fluorescencia de rayos X.

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADO

### 4.1 Caracterización del mineral

La caracterización del mineral se efectuó para conocer principalmente el contenido de cobre (Cu) con el que se comenzó a trabajar y los parámetros físicos. Se empleó el método analítico de fluorescencia de rayos X y se encontró un mineral de muy baja ley con un  $2,65\% \pm 0,005\%$  de Cu, debido a que este mineral fue producido en la Mina Chépica como un concentrado de oro. Contiene una mayor cantidad de sulfuros y su mineralogía principal es la calcopirita con impurezas principales tales como pirita, cuarzo y arcillas.

Según (Lobos Salinas, 2019) el mineral sulfurado de cobre contiene una humedad de 21,4% y su caracterización granulométrica realizada mediante el ensayo de tamizaje arrojó que el 50% del mineral presentó un tamaño de partícula mayor a 75  $\mu\text{m}$  conforme a la Figura 4.1.



**Figura 4.1:** Análisis granulométrico del material de mineral sulfurado de cobre (Lobos Salinas, 2019).

## 4.2 Pruebas de flotación

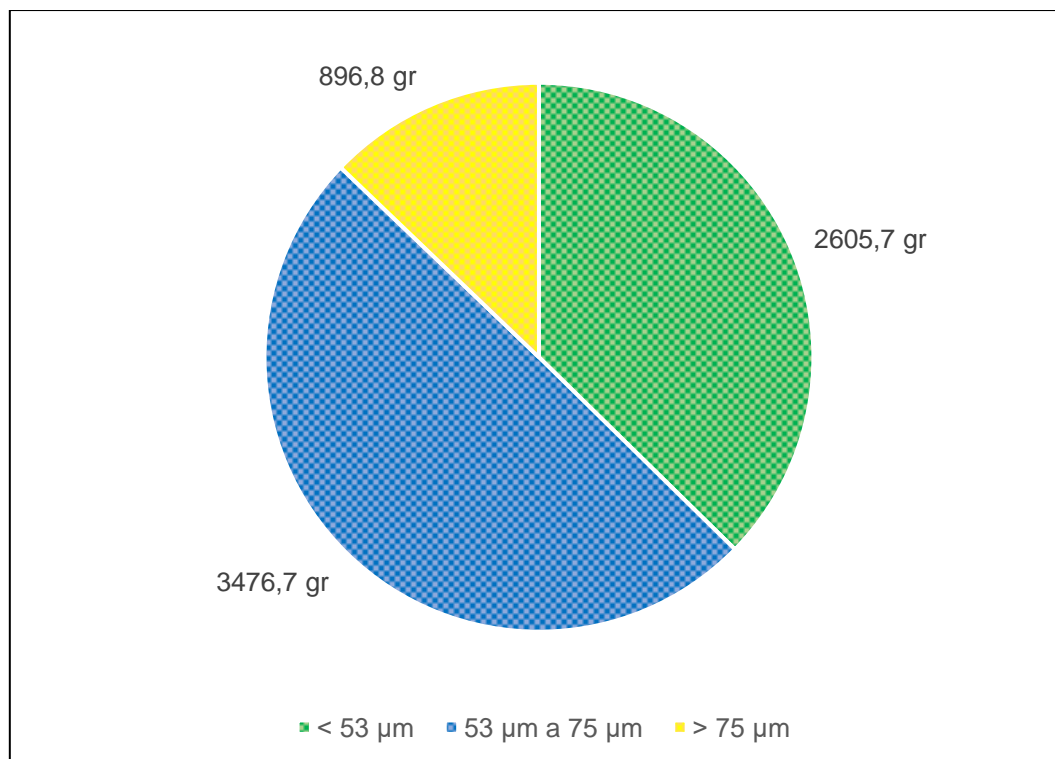
Una vez analizado el contenido de cobre presente en el mineral de cabeza se efectuaron las pruebas de flotación *Rougher* y flotación *Cleaner* para aumentar la ley de mineral sulfurado con la finalidad de continuar el estudio experimental en pruebas de lixiviación.

En el caso de la flotación *Rougher* se obtuvo un concentrado de cobre del orden del  $7,4\% \pm 0,05\%$  de Cu y para el caso de la flotación *Cleaner* se obtuvo un concentrado de cobre del orden del  $13,4\% \pm 0,05\%$  de Cu. Se caracterizó ambos concentrados de cobre bajo el método analítico de fluorescencia de rayos X.

### 4.2.1 Caracterización granulométrica del concentrado

La caracterización granulométrica del concentrado obtenido en las pruebas de flotación es un proceso relevante para estudiar el efecto del tamaño de partículas en las pruebas de tostación.

En la Figura 4.2 se presenta la distribución de los tamaños de partículas del concentrado de cobre obtenidos mediante el tamizaje en seco. Las que expresadas en porcentaje arrojan que un 49,8% del concentrado presentó un tamaño de partícula entre  $53\ \mu\text{m}$  a  $75\ \mu\text{m}$ . Un 37,3% del concentrado presentó un tamaño de partícula menor a  $53\ \mu\text{m}$  y finalmente un 12,8% del total del concentrado presentó un tamaño de partículas muy grandes mayor a  $75\ \mu\text{m}$ .



**Figura 4.2:** Cantidad de concentrado por tamaño de partícula (Elaboración propia).

#### 4.2.2 Caracterización química del concentrado

La caracterización química de los tamaños de partículas es un proceso donde se permite identificar la concentración de elementos representativos presentes en las muestras. Se efectuó un análisis químico bajo los métodos de espectrofotometría infrarroja (IR) y espectroscopia de absorción atómica (AAS).

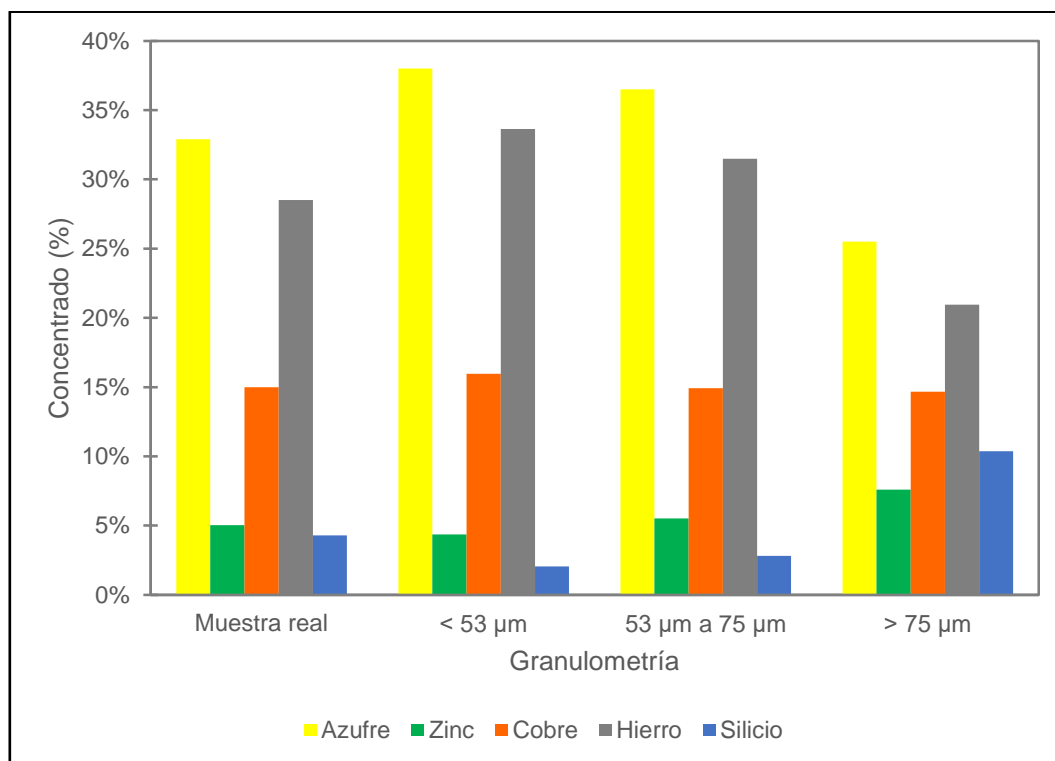
Los resultados obtenidos en el análisis químico realizado a las muestras por tamaño de partículas según la Tabla 4.1 afirman que está compuesta de un mineral de cobre con alto contenido de azufre y cantidad importante de hierro, zinc y silicio.

**Tabla 4.1:** Concentración de cada elemento por tamaño de partícula (Elaboración propia).

Tamaños	Azufre	Zinc	Cobre	Hierro	Silicio
Muestra real	33%	5%	15%	29%	4%
< 53 μm	38%	4%	15%	34%	2%
53 μm a 75 μm	37%	6%	16%	31%	3%
> 75 μm	26%	8%	15%	21%	10%



Para mayor claridad a los datos mencionados anteriormente se graficaron en la Figura 4.3:



**Figura 4.3:** Concentración de cada elemento por tamaño de partícula (Elaboración propia).

Los resultados obtenidos en el análisis químico realizado al concentrado de cobre de los distintos tamaños de partículas conforme a la Figura 4.3 manifiestan que algunos elementos se concentran más en algunas fracciones de tamaño en comparación a otras, este fenómeno se debe a la molienda del mineral.

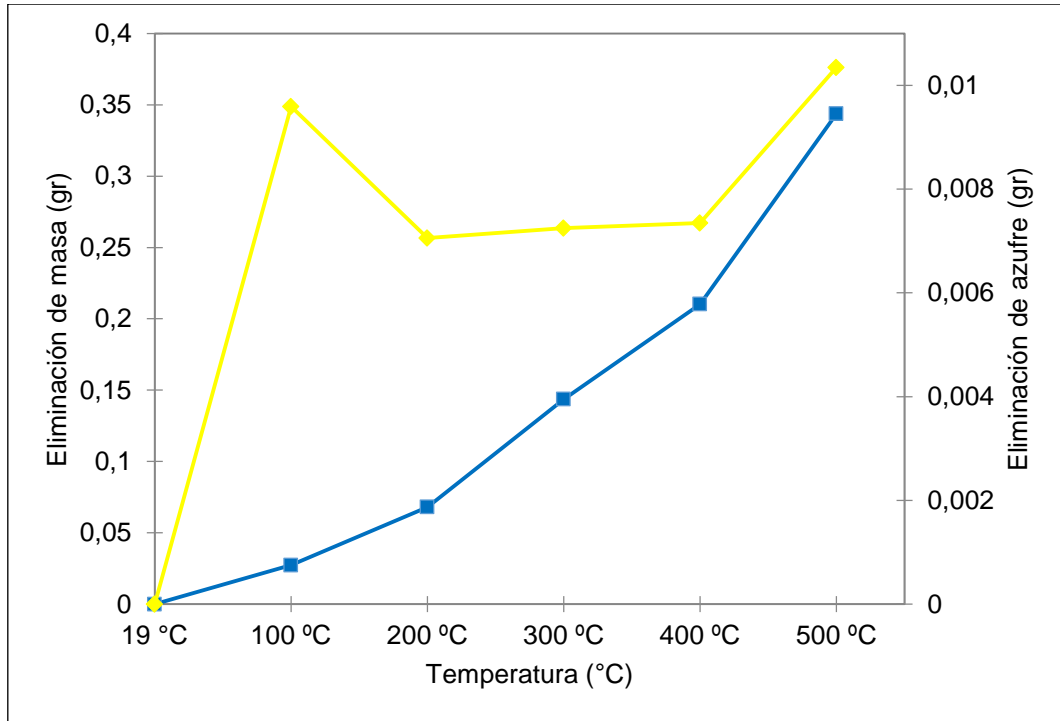
Se conoce que el mineral de cabeza del trabajo investigativo es calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) con impurezas principales tales como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ). La calcopirita es más blanda que la pirita, causando que en el proceso de la molienda se obtengan partículas finas de calcopirita. Por consiguiente, las partículas de tamaño muy pequeñas contienen una mayor cantidad de calcopirita (asociada al azufre, hierro y cobre) que las partículas de tamaño intermedia y muy grande.

El cuarzo tiene una mayor dureza que la calcopirita y pirita, causando que en el proceso de molienda se obtengan partículas gruesas de cuarzo. De modo que, las partículas de tamaño muy grande contienen una mayor cantidad de cuarzo (asociado al sílice) que las partículas de tamaño intermedia y muy pequeñas.

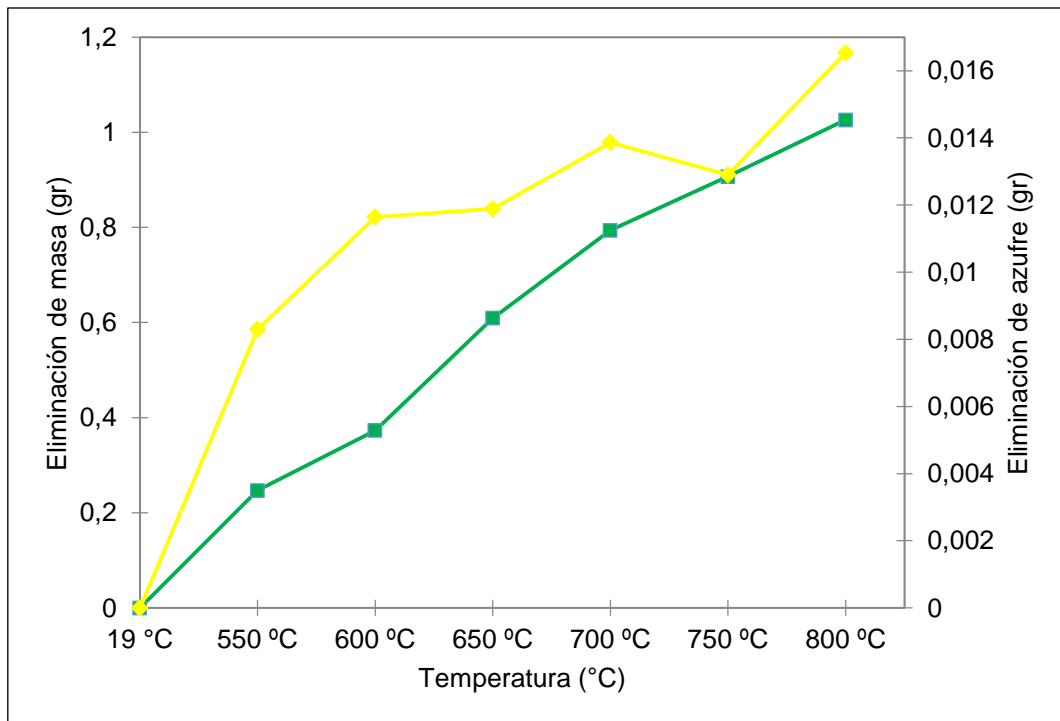
### **4.3 Prueba experimental previa de tostación**

A continuación se presentan los análisis de los resultados obtenidos en la prueba experimental previa de tostación efectuados en un horno de mufla. Consta de una fase inicial y una fase final donde se evaluó en cada una la temperatura ideal para realizar las pruebas de tostación.

Una vez que se efectuó completamente la prueba experimental previa de tostación se evidenció que la mayor pérdida de masa de la muestra fue a los 800 °C conforme a la Figura 4.5, alcanzando un máximo de un  $1,03 \pm 0,005$  menos de concentración en las calcinas de cobre; donde un  $0,02 \pm 0,005$  menos corresponde a la eliminación de azufre en forma de gas de la muestra total. Sin embargo, la temperatura ideal en la que se debía encontrar el horno de mufla es bajo los 700 °C debido a que según (Aguilar Pacheco, 2001) a una mayor temperatura se forman las ferritas de cobre que son altamente insolubles y termodinámicamente estable perjudicando la recuperación de cobre por la vía hidrometalúrgica. En concreto el límite de temperatura ideal para realizar la prueba de tostación es entre 500 °C y 600 °C debido a que se demostró en la prueba experimental inicial que a los 500 °C de acuerdo a la Figura 4.4 una relevante pérdida de masa de la muestra, alcanzando un  $0,3 \pm 0,05$  menos de concentración en las calcinas de cobre; donde un  $0,01 \pm 0,005$  menos corresponde a la eliminación de azufre en forma de gas de la muestra total. El límite máximo a 600 °C de la temperatura ideal del proceso de tostación se escogió debido a que se evidenció en la Figura 4.5 una mínima eliminación de azufre en forma de gas posterior a los 600 °C hasta alcanzar los 650 °C donde nuevamente aumenta la eliminación de azufre debido a la formación de nuevos productos que no son beneficiarios para este estudio experimental.



**Figura 4.4:** Eliminación de masa y azufre de la muestra del proceso experimental previo de tostación en fase inicial (Elaboración propia).



**Figura 4.5:** Eliminación de masa y azufre de la muestra del proceso experimental previo de tostación en fase final (Elaboración propia).

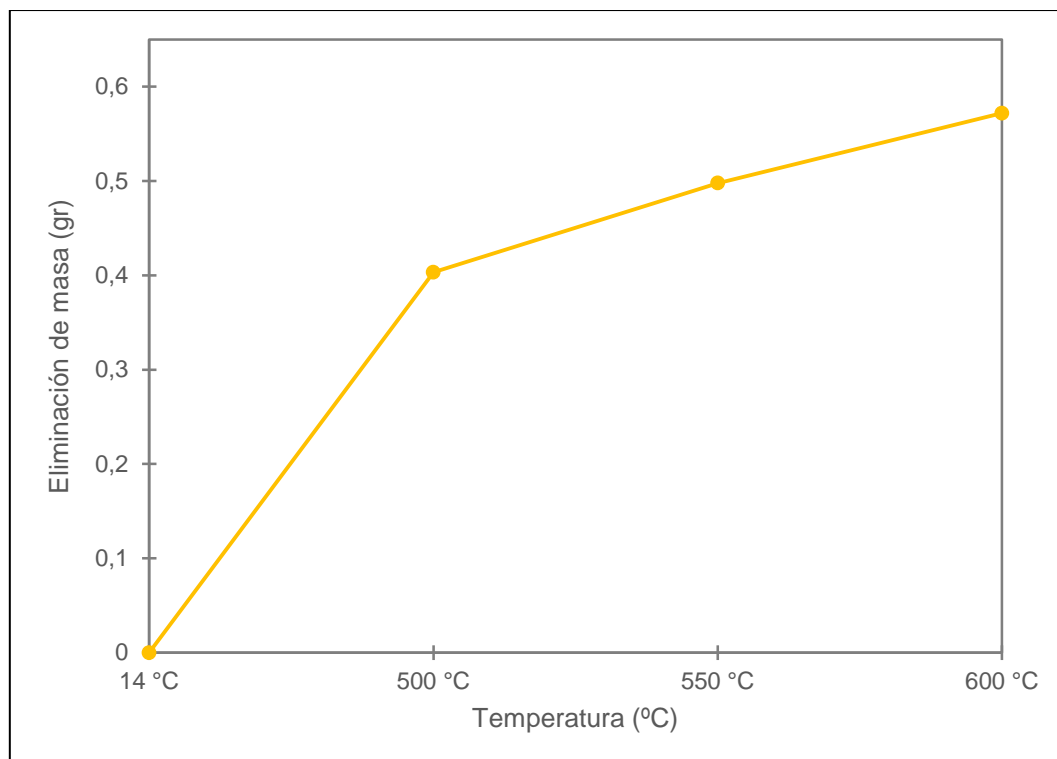
Luego se decidió que la fase correcta de tostación fue la fase inicial donde se ingresan todos los crisoles con muestras de 10 gr cada uno a temperatura ambiente en la que se evidenció una mayor pérdida de masa de la muestra a 500 °C en comparación al crisol con 10 gr de muestra que ingresaron a 550 °C en la fase final donde de acuerdo a la Figura 4.4 y a la Figura 4.5 un  $0,01 \pm 0,005$  gr menos de azufre corresponden a la temperatura de 500 °C y un  $0,008 \pm 0,0005$  gr menos de azufre corresponden a la temperatura de 550 °C respectivamente. Este fenómeno ocurre producto de que al ingresar las muestras a una temperatura de 550 °C según la fase final de la prueba experimental previa de tostación las partículas se cristalizan impidiendo la liberación del azufre contenido hasta reventarse.

#### **4.4 Pruebas de tostación de partículas muy pequeñas, intermedias y muy grandes**

A continuación se presentan los resultados experimentales de las pruebas de tostación de un concentrado sulfurado de cobre donde se evaluaron tres diferentes temperaturas a 500 °C, 550 °C y 600 °C en función de los tamaños de partícula de muestra menores a 53  $\mu\text{m}$ , de 53  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$  y mayores a 75  $\mu\text{m}$ . Se analizó mediante gráficas los resultados obtenidos de la variación de masa de las calcinas en el proceso de tostación y el análisis químico de los elementos correspondientes a cada prueba.

##### **4.4.1 Prueba de tostación con partículas muy pequeñas**

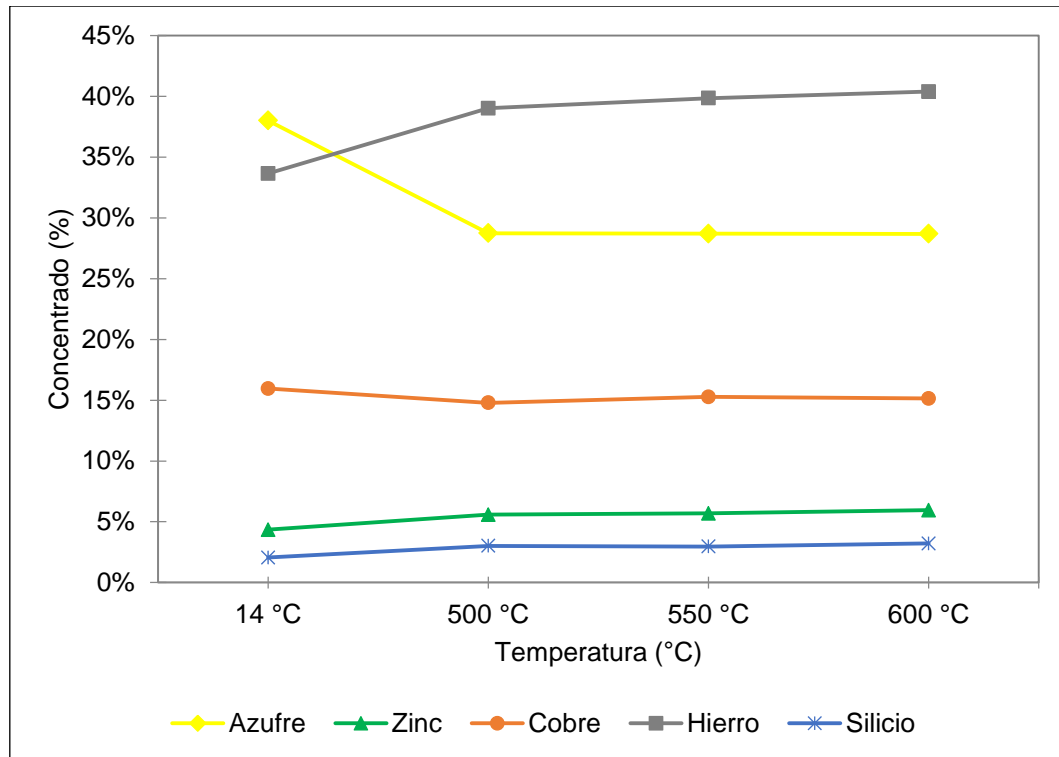
Se realizaron pruebas de tostación a tres crisoles con una muestra de partículas menor a 53  $\mu\text{m}$  ingresados a una temperatura de 14 °C en el horno de mufla en donde se distingue la variación entre la masa inicial y la masa final de las muestras como se observa en la Figura 4.6.



**Figura 4.6:** Variación de masas en muestras de la prueba de tostación en partículas muy pequeñas (Elaboración propia).

A partir de los 14 °C hasta los 500 °C que se retiró el primer crisol con su muestra se evidenció una pérdida de masa de  $0,4 \pm 0,05$  gr en las calcinas de cobre alcanzando a los 600 °C el máximo de un  $0,5 \pm 0,05$  menos de masa de la muestra para el caso de partículas menores a 53  $\mu\text{m}$ .

En la siguiente Figura 4.7 se aprecia el resultado del análisis químico bajo el método analítico de fluorescencia rayos X de los elementos representativos de las calcinas obtenidas en la prueba de tostación en partículas muy pequeñas.

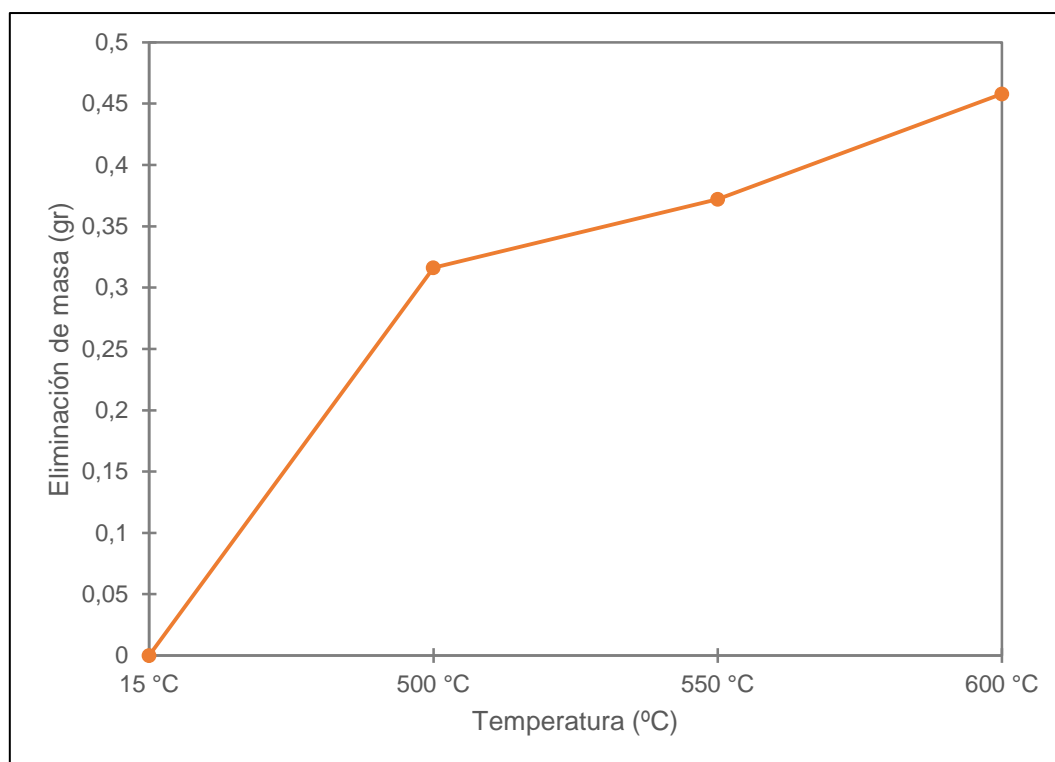


**Figura 4.7:** Concentración de elementos representativos de la prueba de tostación en partículas muy pequeñas (Elaboración propia).

Los resultados obtenidos en el análisis químico realizado a las calcinas de partículas de cobre menores a 53  $\mu\text{m}$  conforme a la Figura 4.7 evidencia una disminución en los primeros 500 °C de un  $9,0 \pm 0,5$  % menos de concentración de azufre en la muestra. A partir de los 500 °C el contenido de azufre se mantiene sin mayor variación. El fenómeno se debe a que al realizar la prueba de tostación en partículas muy pequeñas ocurre el proceso de coalescencia por el aumento de la temperatura en el horno de mufla, causando que el oxígeno no pueda entrar en contacto con el azufre que se encuentra contenido en el mineral. Al conformar una partícula mayor a 53  $\mu\text{m}$  disminuye el área de reacción de éstas debido a que una partícula grande tiene menor superficie de reacción que una partícula pequeña. Asimismo, las partículas muy pequeñas contienen más calcopirita que es considerada poco reactiva en comparación a las partículas intermedias y muy grandes.

#### 4.4.2 Prueba de tostación con partículas intermedias

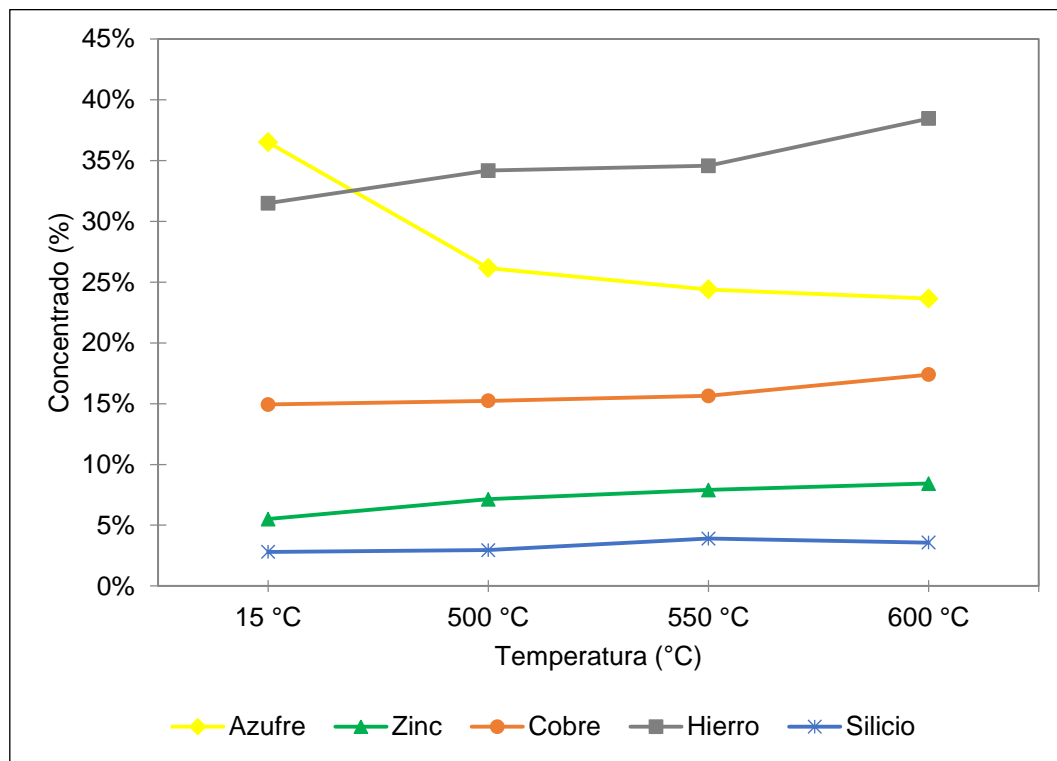
Se realizaron pruebas de tostación a tres crisoles con una muestra de partículas de 53  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$  ingresados a una temperatura de 15  $^{\circ}\text{C}$  en el horno de mufla en donde se distingue la variación entre la masa inicial y la masa final de las muestras como se observa en la Figura 4.8.



**Figura 4.8:** Variación de masas en muestras de la prueba de tostación en partículas intermedias (Elaboración propia).

A partir de los 15  $^{\circ}\text{C}$  hasta los 500  $^{\circ}\text{C}$  que se retiró el primer crisol con su muestra se evidenció una pérdida de masa de  $0,3 \pm 0,05$  gr en las calcinas de cobre alcanzando a los 600  $^{\circ}\text{C}$  el máximo de un  $0,5 \pm 0,05$  menos de masa de la muestra para el caso de partículas de 53  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$ .

En la siguiente Figura 4.9 se aprecia el resultado del análisis químico bajo el método analítico de fluorescencia rayos X de los elementos representativos de las calcinas obtenidas en la prueba de tostación en partículas intermedias.



**Figura 4.9:** Concentración de elementos representativos de la prueba de tostación en partículas intermedias (Elaboración propia).

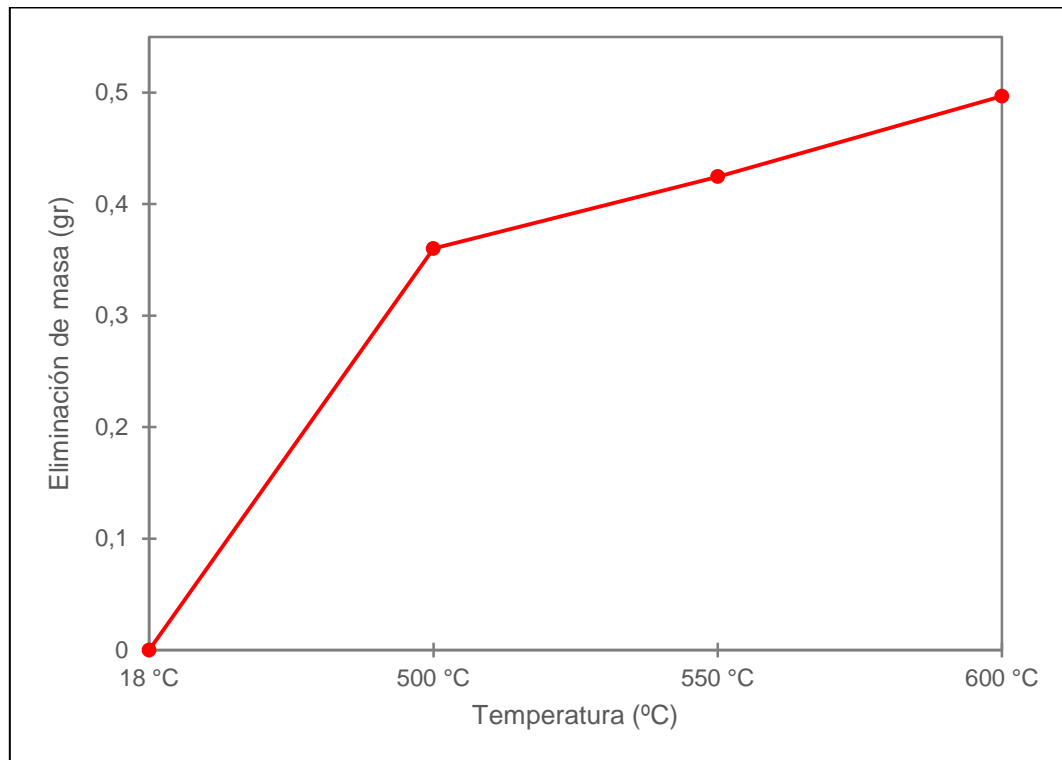
Los resultados obtenidos en el análisis químico realizado a las calcinas de partículas de cobre entre 53  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$  conforme a la Figura 4.9 evidencia una disminución en los primeros 500 °C de un  $10,0 \pm 0,5$  % menos de concentración de azufre en la muestra. A partir de los 500 °C el contenido de azufre disminuye de manera uniforme.

#### 4.4.3 Prueba de tostación con partículas muy grandes

Se realizaron pruebas de tostación a tres crisoles con una muestra de partículas muy grandes ingresadas a una temperatura de 18 °C en el horno de mufla en donde se



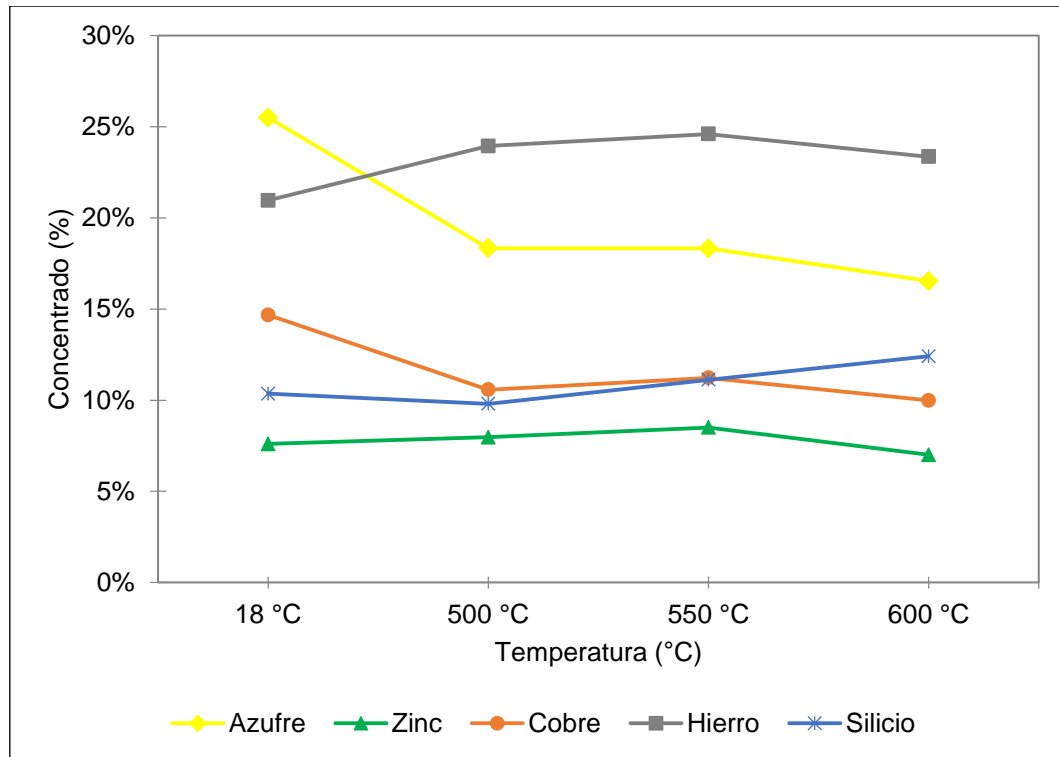
distingue una pequeña variación entre la masa inicial y la masa final de las muestras como se observa en la Figura 4.10.



**Figura 4.10:** Variación de masas en muestras de la prueba de tostación en partículas muy grandes (Elaboración propia).

A partir de los 18 °C hasta los 500 °C que se retiró el primer crisol con su muestra se evidenció una pérdida de masa de  $0,3 \pm 0,05$  gr en las calcinas de cobre alcanzando a los 600 °C el máximo de un  $0,5 \pm 0,05$  menos de masa de la muestra para el caso de partículas mayores a 75  $\mu\text{m}$ .

En la siguiente Figura 4.11 se aprecia el resultado del análisis químico bajo el método analítico de fluorescencia rayos X de los elementos representativos de las calcinas obtenidas en la prueba de tostación en partículas muy grandes.

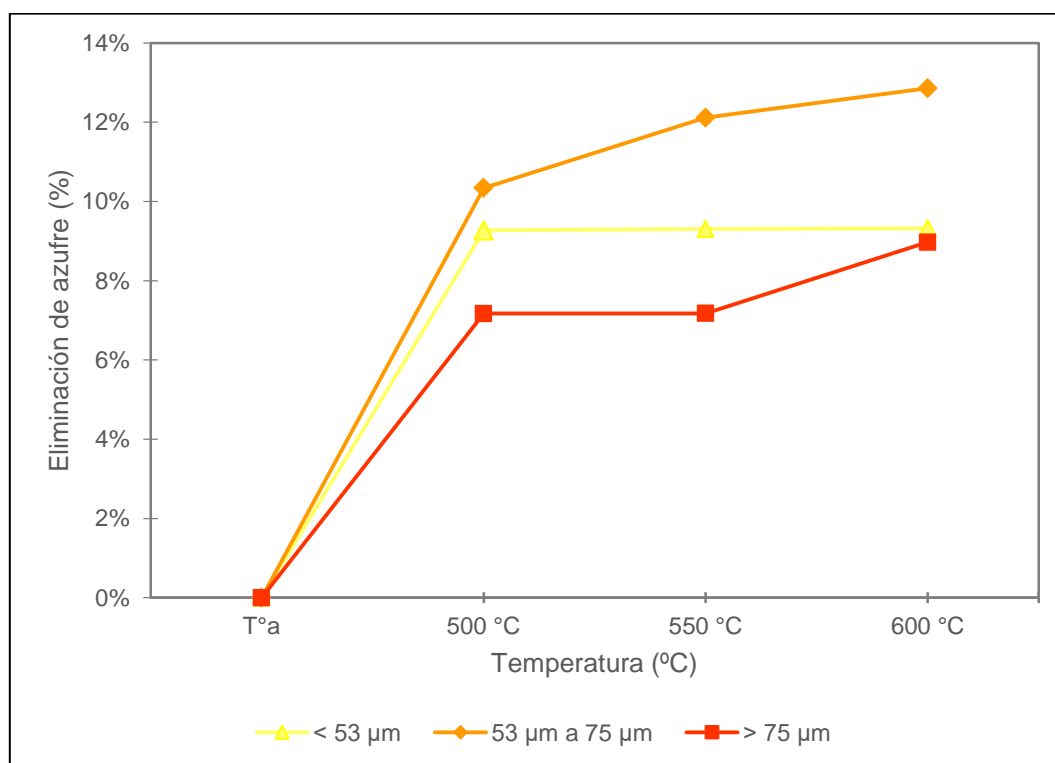


**Figura 4.11:** Concentración de elementos representativos de la prueba de tostación en partículas muy grandes (Elaboración propia).

Los resultados obtenidos en el análisis químico realizado a las calcinas de partículas de cobre mayores a 75  $\mu\text{m}$  conforme a la Figura 4.11 evidencian una disminución en los primeros 500 °C de un  $7,0 \pm 0,5$  % menos de concentración de azufre en la muestra. A partir de los 500 °C el contenido de azufre disminuye gradualmente alcanzando a los 600 °C su máxima pérdida de  $9,0 \pm 0,5$  % de azufre. Según (Piñeiro González, 2019) el fenómeno se debe a que al realizar la prueba de tostación en partículas muy grandes tienden a mantener o reducir su tamaño debido a la fragmentación de las partículas. Los fragmentos producen un polvo al interior del horno de mufla y se originan a partir de partículas más oxidadas disminuyendo así el contenido de azufre.

## 4.5 Comportamiento de oxidación de las calcinas de cobre

El comportamiento de oxidación de las calcinas de cobre se determinó en términos de la evolución del contenido de azufre de cada muestra obtenido de la prueba de tostación a través de un análisis químico. Se estudió la conducta que tuvo la temperatura a 500 °C, 550 °C y 600 °C y la distribución del tamaño de partícula menores a 53  $\mu\text{m}$ , de 53  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$  y mayores a 75  $\mu\text{m}$  en el grado de oxidación como se puede apreciar en la Figura 4.12.



**Figura 4.12:** Comportamiento del contenido de azufre a distintas temperaturas y tamaños de partículas (Elaboración propia).

La distribución del tamaño de partícula es una variable con alta incidencia en el comportamiento de oxidación de una muestra en el proceso de tostación puesto que las partículas pueden presentar un tamaño inferior al del ingresado o de lo contrario se pueden expandir dependiendo del tamaño de partícula.

Con respecto a las partículas intermedias con una granulometría de 53  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$  se observó la mayor eliminación de azufre en forma de gas aumentando el grado de oxidación de las calcinas de cobre. En este caso la reacción tiene lugar primero en la superficie exterior de la partícula sólida, seguidamente la zona de reacción se desplaza hacia el interior del sólido donde se encuentra el núcleo de la partícula sin reaccionar que irá disminuyendo a medida que transcurre la reacción. De esta manera, el comportamiento de oxidación de las partículas con granulometría intermedia en la prueba de tostación se aproxima al modelo de núcleo recesivo.

En el caso de las partículas pequeñas con una granulometría menor a 53  $\mu\text{m}$  se apreció una menor eliminación de azufre en forma de gas con respecto a las partículas intermedias y su grado de oxidación es menor de las calcinas de cobre. La disminución es producto de la coalescencia de las partículas ocurrido en el proceso de tostación impidiendo que el oxígeno pueda entrar en contacto con el azufre que se encuentra contenido en el mineral. Es por esto que la reacción tarda en desplazarse al interior del sólido donde se encuentra el núcleo de la partícula sin reaccionar.

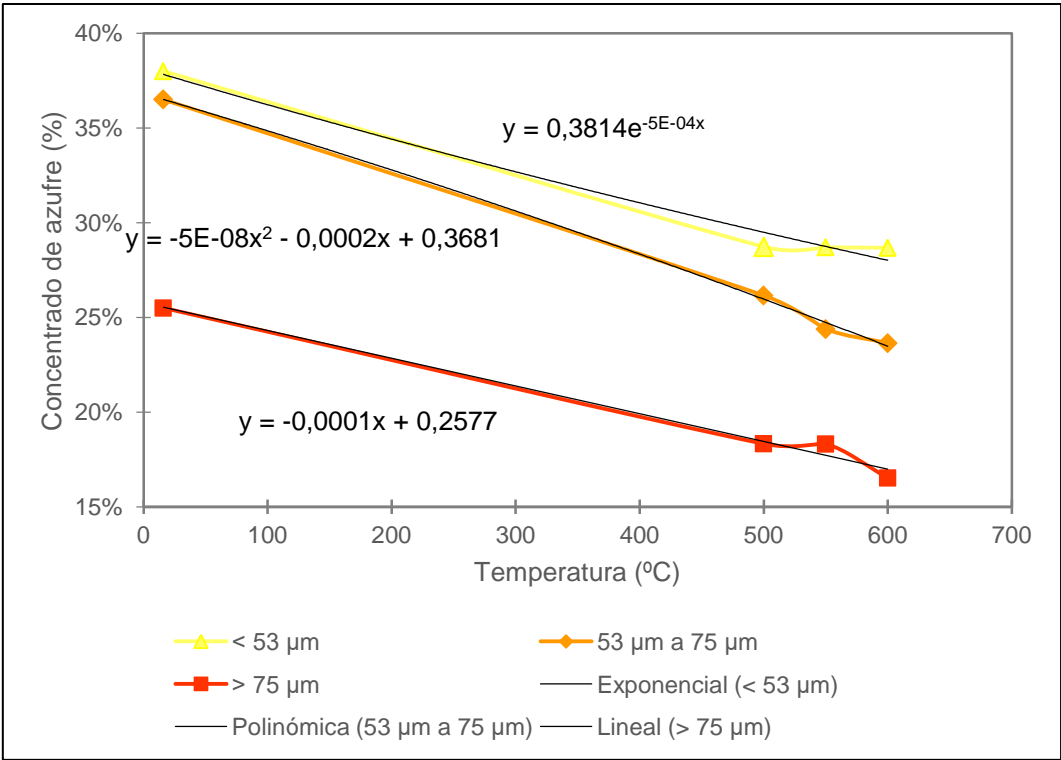
Por último en las partículas muy grandes con una granulometría mayor a 75  $\mu\text{m}$  se observa la menor eliminación de azufre en forma de gas disminuyendo aún más el grado de oxidación de las calcinas con respecto a las partículas muy pequeñas y las partículas intermedias. La disminución es producto de fragmentación de las partículas en el proceso de tostación impidiendo que se efectúe el desplazamiento de la reacción hacia el interior del sólido donde se encuentra el núcleo de la partícula sin reaccionar. Por ende se requiere de un tamaño de partícula menor a 75  $\mu\text{m}$  para que el comportamiento de oxidación de las calcinas de cobre aumente.

En relación a la temperatura que se debe encontrar el horno de mufla es considerada también una variable con alta repercusión en el comportamiento de oxidación de una muestra en el proceso de tostación puesto que a bajas temperaturas impide un buen grado de oxidación en las calcinas de cobre y a altas temperaturas ( $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) forman productos que perjudican la recuperación de cobre por la vía hidrometalúrgica.

Con respecto a la temperatura de 600 °C se observó conforme a la Figura 4.12 la mayor eliminación de azufre en forma de gas aumentando el grado de oxidación de las calcinas de cobre. En este caso el mineral sulfurado tiene una mayor transferencia de calor con el oxígeno generando dióxido de azufre desechado en forma de gas al ambiente. A la temperatura de 500 °C y 550 °C se aprecia una menor eliminación de azufre disminuyendo el grado de oxidación de las calcinas de cobre en comparación a la temperatura de 600 °C.

### 4.6 Velocidad de reacción de las calcinas de cobre

La velocidad de reacción de las calcinas de cobre se determinó en función de la temperatura de las pruebas de tostación por cada tamaño de partícula. Se obtuvo la ecuación de la velocidad de reacción de partículas menores a 53 µm, partículas desde 53 µm a 75 µm y partículas mayores a 75 µm como se puede apreciar en la Figura 4.13.



**Figura 4.13:** Ecuaciones de las velocidades de reacción en función de la temperatura por tamaños de partículas (Elaboración propia).

Cuando a las calcinas de cobre de partículas muy pequeñas con una granulometría menor a 53  $\mu\text{m}$  comienzan la prueba de tostación a una temperatura de 14  $^{\circ}\text{C}$  hasta alcanzar los 600  $^{\circ}\text{C}$  tiende a una velocidad de reacción exponencial presentado en la ecuación 4.1.

$$y = 0,3814e^{-5E-4x} \quad (4.1)$$

Por otra parte, cuando a las calcinas de cobre de partículas intermedias con una granulometría de 53  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$  comienzan la prueba de tostación a una temperatura de 15  $^{\circ}\text{C}$  hasta alcanzar los 600  $^{\circ}\text{C}$  tiende a una velocidad de reacción polinómica presentado en la ecuación 4.2.

$$y = -5E - 8x^2 - 0,0002x + 0,3681 \quad (4.2)$$

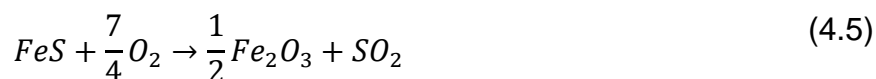
Finalmente, cuando a las calcinas de cobre de partículas muy grandes con una granulometría mayor a 75  $\mu\text{m}$  comienzan la prueba de tostación a una temperatura de 18  $^{\circ}\text{C}$  hasta alcanzar los 600  $^{\circ}\text{C}$  tiende a una velocidad de reacción lineal presentado en la ecuación 4.3.

$$y = -0,0001x + 0,2577 \quad (4.3)$$

## 4.7 Termodinámica de la prueba de tostación

El estudio experimental se focalizó en la termodinámica de tostación de eje de cobre con un sistema Cu-Fe-S-O estudiado en un rango de temperatura de 500  $^{\circ}\text{C}$  a 600  $^{\circ}\text{C}$ . A continuación se evaluó por medio de un balance estequiométrico si la cantidad de gas desprendido del mineral sulfurado es acorde a la cantidad desprendida en las pruebas de tostación del estudio experimental.

Las reacciones consideradas relevantes en el proceso de tostación de un concentrado de cobre es la oxidación de los sulfuros metálicos a óxidos y se pueden expresar en las siguientes ecuaciones:



Se realizó el balance estequiométrico de la reacción 4.4 y de la reacción 4.5 por cada 10 gr de muestra de las calcinas de cobre de la prueba de tostación donde se calculó conforme a la Tabla 4.2 que un  $1,44 \pm 0,005$  gr de azufre se esperaba desprender en forma de gas al ambiente en la reacción 4.4. Mientras que según la Tabla 4.3 un  $1,11 \pm 0,005$  gr de azufre se esperaba desprender en forma de gas al ambiente en la reacción 4.5.

**Tabla 4.2:** Balance estequiométrico de la reacción 4.4 (Elaboración propia).

	<b>Reactivos</b>	<b>Productos</b>
Compuestos	Cu <sub>2</sub> S + 2O <sub>2</sub>	2CuO + SO <sub>2</sub>
Masa de los compuestos (gr)	159,16 gr Cu <sub>2</sub> S + 63,99 gr O <sub>2</sub>	159,09 gr CuO + 64,06 gr SO <sub>2</sub>
Masa de los compuestos por 10 gr de muestra (gr)	7,13 gr Cu <sub>2</sub> S + 2,87 gr O <sub>2</sub>	7,13 gr CuO + 2,87 gr SO <sub>2</sub>
Masa de los elementos por 10 gr de muestra (gr)	(5,69 gr Cu <sub>2</sub> + 1,44 gr S) + 2*(1,43 gr O <sub>2</sub> )	2*(2,85 gr Cu + 0,72 gr O) + (1,44 gr S + 1,43 gr O <sub>2</sub> )

**Tabla 4.3:** Balance estequiométrico de la reacción 4.5 (Elaboración propia).

	<b>Reactivos</b>	<b>Productos</b>
Compuestos	2FeS + 3,5O <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2SO <sub>2</sub>
Masa de los compuestos (gr)	175,82 gr FeS + 111,99 gr O <sub>2</sub>	159,69 gr Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 128,13 gr SO <sub>2</sub>
Masa de los compuestos por 10 gr de muestra (gr)	6,11 gr FeS + 3,89 gr O <sub>2</sub>	5,55 gr Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 4,45 gr de SO <sub>2</sub>
Masa de los elementos por 10 gr de muestra (gr)	2*(1,94 gr Fe + 1,11 gr S) + 3,5*(1,11 gr O <sub>2</sub> )	(3,88 gr Fe <sub>2</sub> + 1,67 gr O <sub>3</sub> ) + 2*(1,11 gr S + 1,11 gr O <sub>2</sub> )

En la prueba de tostación se eliminó un máximo de  $1,29 \pm 0,005$  gr de azufre considerado una cantidad inferior a la esperada según el balance estequiométrico de la reacción 4.4 y la reacción 4.5, debido a que se formaron nuevos compuestos de sulfatos de cobre bajo la reacción 4.6, donde el azufre no se desprendió de la muestra en forma de gas.



Se realizó el balance estequiométrico de la reacción 4.6 por cada 10 gr de muestra de las calcinas de cobre de la prueba de tostación donde se calculó conforme a la Tabla 4.4 que  $1,01 \pm 0,05$  gr de azufre se esperaba que reaccionara con el sulfuro de cobre para producir sulfato de cobre en la muestra.

**Tabla 4.4:** Balance estequiométrico de la reacción 4.6 (Elaboración propia).

	<b>Reactivos</b>	<b>Productos</b>
Compuestos	$Cu_2S + SO_2 + 3O_2$	$2CuSO_4$
Masa de los compuestos (gr)	159,16 gr $Cu_2S$ + 64,06 gr $SO_2$ + 95,99 gr $O_2$	319,21 gr $CuSO_4$
Masa de los compuestos por 10 gr de muestra (gr)	4,99 gr $Cu_2S$ + 2,01 gr $SO_2$ + 3 gr $O_2$	10 gr $CuSO_4$
Masa de los elementos por 10 gr de muestra (gr)	$(3,98 \text{ gr de } Cu_2 + 1,01 \text{ gr S}) + 2*(1,01 \text{ gr S} + 1 \text{ gr de } O_2) + 3*(1 \text{ gr } O_2)$	$2*(1,98 \text{ gr Cu} + 1,01 \text{ gr S} + 2,01 \text{ gr O}_4)$

Entonces los  $1,26 \pm 0,005$  gr de azufre faltantes por eliminar en la prueba de tostación según el balance estequiométrico de la reacción 4.4 y la reacción 4.5 reaccionaron con el sulfuro de cobre de la muestra para formar sulfato de cobre.



## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

En el presente estudio de investigación se realizaron pruebas de tostación con la finalidad de observar el comportamiento de oxidación de un concentrado de cobre de la Mina Chépica, variando la temperatura y los tamaños de partículas en términos de la evolución del contenido de azufre.

Se observaron similares variaciones entre la masa inicial y masa final de las muestras con distintas granulometrías de partículas, suceso que ocurrió a causa de que los principales factores involucrados en las pruebas de tostación como el potencial de oxígeno y la temperatura fueron las mismas para cada caso.

De acuerdo al desarrollo del estudio experimental de tostación se manifestaron que las variables con más incidencia en el comportamiento de la oxidación de un mineral sulfurado de cobre son la temperatura, el tamaño de partícula y su composición química. De modo que el concentrado de cobre fue clasificado en tres fracciones de tamaños distintos observando que la composición química variaba dependiendo del tamaño de las partículas teniendo un impacto considerable en el comportamiento de oxidación de las calcinas de cobre.

Se evidenció que el mayor grado de oxidación se obtuvo en la prueba de tostación de partículas intermedias la que se aproxima al modelo de núcleo recesivo en la cual la reacción se desplaza hacia el interior del sólido donde se encuentra el núcleo de la partícula sin reaccionar disminuyendo a medida que transcurre la reacción. En relación a la temperatura a los 600 °C se observó la mayor eliminación de azufre en forma de gas por un aumento en la transferencia de calor entre el mineral sulfurado y el oxígeno.

Con respecto a la velocidad de reacción de las calcinas de cobre en las pruebas de tostación se determinó que las partículas intermedias presentan la mejor velocidad de reacción con tendencia polinómica debido a que la pendiente de la curva tiene un mayor delta de la eliminación de azufre en el primer rango de temperatura en comparación a las partículas muy pequeñas que presentan una velocidad de reacción

exponencial y a las partículas muy grandes que presentan una velocidad de reacción lineal.

Finalmente, la termodinámica de la prueba de tostación evidenció que según el balance estequiométrico realizado fue eliminado una menor cantidad de azufre de la esperada teóricamente debido a que el azufre que se debía desprender de la muestra reaccionó junto al sulfuro de cobre formando el compuesto de sulfato de cobre. Aunque según la prueba de tostación se eliminó una mayor cantidad de azufre con respecto a la eliminación de masa de la muestra final producto de que el oxígeno encontrado en el horno de mufla era menor al que debía ingresar según el balance estequiométrico, por lo que se agotó durante la prueba de tostación. Entonces al momento de retirar los crisoles con las calcinas de cobre el azufre que aún se encontraba en las muestras siguió reaccionando con el oxígeno del ambiente. Además es relevante señalar que para estas pruebas de tostación no se formaron ferritas de cobre debido a que en el rango de temperatura en el que ocurre ésta reacción es mayor a la que se trabajó.

## **CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES**

En consecuencia a los resultados obtenidos en el presente estudio experimental se identificaron las siguientes recomendaciones u oportunidades de investigación:

Realizar un análisis mineralógico a las especies generadas en las pruebas de tostación mediante la técnica de difracción de rayos X o mineralogía automatizada qemscan.

Estudiar el efecto de la variación del potencial de oxígeno ingresado en el horno de mufla para evaluar su eficiencia en el grado de oxidación de las calcinas en las pruebas de tostación.

Evaluar el tiempo de reacción de la cinética de tostación presentado en el modelo de núcleo recesivo y la función de penetración relativa.

Desarrollar un proceso de lixiviación de las calcinas de cobre obtenidas en este estudio experimental para evaluar la influencia del grado de oxidación.

Estimar los problemas operacionales y daños medioambientales por la fuga de los polvos y gases contaminantes generados en el proceso de tostación, muy perjudiciales para la salud de la población cercana a las plantas de tostación y en este caso a personas encontradas en el laboratorio

## CAPITULO 7: REFERENCIAS

- Abarca Rodríguez, J. J. (2011). Antecedentes de la flotación. En *Flotación de Minerales* (págs. 4-11). Huacho, Huaura, Perú: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.
- Aguilar Pacheco, M. A. (2001). *Extracción de cobre por tostación-lixiviación de metal blanco. Tesis para optar al grado de licenciatura*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- Biswas, A., & Davenport, W. (1994). *Extractive Metallurgy of Copper*. Pergamon: Third Edition.
- COTECNO. (2020). *Equipos de Laboratorio. Horno de secado de aire forzado*. Recuperado el 10 de Marzo de 2020, de <<https://www.cotecno.cl/nuestros-productos/horno-de-secado-de-aire-forzado>>
- Cytec. (2010). Flotation of sulfide ores. En A. Day (Ed.), *In: Mining Chemicals Handbook* (págs. 103-151). West Paterson, Nueva Jersey, Estados Unidos: Cyanamid.
- EDEMET. (2018). *Laboratorio metalúrgico. Filtro de presión*. Recuperado el 10 de Marzo de 2020, de <<https://www.edemet.cl/index.php?pag=2&o=c&id=4>>
- García Opazo, V. I. (2017). *Estudio preliminar de laboratorio para el tratamiento de un concentrado de cobre alto en arsénico mediante tostación sulfatante. Tesis para optar al grado de licenciatura*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalurgia.
- Goñi Alarcón, C. A. (1999). *Estudio del efecto de la temperatura en la tostación-lixiviación del eje de cobre. Tesis para optar al grado de licenciatura*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalurgia.
- GoogleEarth. (2020). Imágen satelital de la Mina Chépica, Penciahue. Talca, Chile.

HR Representaciones. (2020). *Horno de mufla de fibra cerámica*. Recuperado el 10 de Marzo de 2020, de <[https://www.hrrepresentaciones.com/tienda/92787/horno\\_mufla\\_72\\_litros\\_bioba\\_se.php?idsp=0](https://www.hrrepresentaciones.com/tienda/92787/horno_mufla_72_litros_bioba_se.php?idsp=0)>

Lobos Salinas, C. I. (2019). *Caracterización química y mineralógica de relave fresco de la Mina Chépica para la fabricación de espuma de vidrio. Tesis para optar al grado de licenciatura*. Curicó, Chile: Universidad de Talca, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil de Minas.

MATEX. (2020). *Tamices de laboratorio. Modelo Ro-Tap*. Recuperado el 10 de Marzo de 2020, de <<http://www.matexsa.com.mx/equipos-agitadores-de-tamices.html>>

Mineralog. (2011). *Técnicas analíticas en la investigación de minerales*. Recuperado el 10 de Agosto de 2020, de <<http://www.mineralog.net/wp-content/uploads/2011/09/FM9Tecnicasanaliticas.pdf>>

Muñoz Portero, M. J. (2016). *Extracción de metales por pirometalurgia: Procesamiento de hierro, acero, cobre y aluminio*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, Departamento Ingeniería Química y Nuclear.

Palacios de Liñán, J. M. (Octubre de 2011). *La tostación en pirometalurgia*. Recuperado el 10 de Marzo de 2020, de <<https://es.slideshare.net/JosePalacios11/la-tostacin-en-pirometalurgia>>

Parra Sánchez, V. R. (2018). *Apuntes del curso Pirometalurgia*. Curicó, Chile: Universidad de Talca, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil de Minas.

Pérez, G. (2020). *Espectrometría infrarroja*. Recuperado el Agosto de 10 de 2020, de <[https://www.espectrometria.com/espectrometra\\_infrarroja](https://www.espectrometria.com/espectrometra_infrarroja)>

- Piñeiro González, D. I. (2019). *Estudio de la distribución de especies mineralógicas durante la oxidación de partículas de concentrado de cobre en un horno a nivel de laboratorio. Tesis para optar al grado de licenciatura*. Curicó, Chile: Universidad de Talca, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil de Minas.
- Pullas, J. A. (2020). *Cinética de la tostación sulfatante de calcopirita*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería Química.
- Restrepo Baena, O. J., Bustamante Rúa, M. O., & Gaviria Cartagena, A. C. (2008). *Apuntes del curso Pirometalurgia*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de Minas y Metalurgia.
- ThermoFisher. (1 de Septiembre de 2018). *Espectroscopía. Analizador portátil de fluorescencia de rayos X*. Recuperado el 10 de Marzo de 2020, de <<https://www.thermofisher.com>>
- Universidad de las Américas Puebla. (2008). *Espectrofotometría de Absorción Atómica*. Recuperado el 10 de Marzo de 2020, de <[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leia/choussy\\_c\\_d/apendiceC.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/choussy_c_d/apendiceC.pdf)>
- Universidad de Oviedo. (2020). *Fluorescencia y Microsonda Electrónica. Servicios Científico Técnicos*. Recuperado el 10 de Agosto de 2020, de <<http://www.sct.uniovi.es/unidades/analisis-estructural/fluorescencia/prestaciones>>
- Uribe Vélez, L. M. (2017). *Apuntes del Laboratorio de Fundamentos de Metalurgia*. Curicó, Chile: Universidad de Talca, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil de Minas.

Villela Olavarría, D., Kutscher Monckeberg, C., Castillo Dintrans, E., & Cantallopts Araya, J. (2017). *Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades*. Comisión Chilena del Cobre. Santiago: Dirección de Estudios y Políticas Públicas.

## CAPITULO 8: APÉNDICE Y ANEXOS

**Tabla 8.1:** Datos del comportamiento del azufre para las distintas granulometrías y temperaturas (Elaboración propia).

Código	Granulometría	Cantidad de azufre previo a la tostación (gr)	Temperatura	Cantidad de azufre posterior a la tostación (gr)	Eliminación de azufre (gr)
GP/TB		3,80	500 °C	2,87276	0,92724
GP/TM	< 53 µm	3,80	550 °C	2,86977	0,93023
GP/TA		3,80	600 °C	2,8675	0,9325
GI/TB		3,65	500 °C	2,61576	1,03424
GI/TM	53 µm a 75 µm	3,65	550 °C	2,43853	1,21147
GI/TA		3,65	600 °C	2,36432	1,28568
GG/TB		2,55	500 °C	1,83271	0,71729
GG/TM	> 75 µm	2,55	550 °C	1,83244	0,71756
GG/TA		2,55	600 °C	1,65292	0,89708