



unl

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos

Naturales no Renovables

Maestría en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva

**Comparación de parámetros de flotación en la recuperación de
cobre del sector Valle del Quimi provincia de Zamora
Chinchipec.**

Trabajo de Titulación, previo a la
obtención del título de Magister en
Minas, Mención
Mineralurgia y Metalurgia Extractiva

AUTOR:

Luis Fernando Salazar Romero

DIRECTOR:

Ing. Carlos Danilo Ortega Vallejo MSc.

Loja – Ecuador

2025

Certificación

Loja, 05 de octubre de 2025

Ing. Carlos Danilo Ortega Vallejo MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Comparación de parámetros de flotación en la recuperación de cobre del sector Valle del Quimi provincia de Zamora Chinchipe**, previo a la obtención del título de **Magister en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva**, de la autoría del estudiante **Luis Fernando Salazar Romero, con cédula de identidad Nro.1104674781**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Ing. Carlos Danilo Ortega Vallejo MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Luis Fernando Salazar Romero**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual



Firma:

Cédula de identidad: 1104674781

Fecha: 05 de febrero del 2025

Correo electrónico: luis.f.salazar@unl.edu.ec

Teléfono: 0983601595

**Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total,
y/o publicación electrónica del texto completo del Trabajo de Titulación**

Yo, **Luis Fernando Salazar Romero**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Comparación de parámetros de flotación en la recuperación de cobre del sector Valle del Quimi provincia de Zamora Chinchipe**, como requisito para optar por el título de **Magister en Minas, Mención Mineralurgia y Metalurgia Extractiva**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional. Los usuarios pueden consultar el contenido de ese trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los cinco días del mes de febrero del dos mil veinticinco.



Firma:

Autor: Luis Fernando Salazar Romero

Cédula de identidad: 1104674781

Dirección: Loja, Ecuador

Correo electrónico: luis.f.salazar@unl.edu.ec

Teléfono: 0983601595

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director de Trabajo de Titulación: Ing. Carlos Danilo Ortega Vallejo MSc.

Dedicatoria

El presente trabajo va dedicado a Dios y mi Familia, que han sido un pilar fundamental en mi vida para poder tomar las mejores desiciones y que han sido un apoyo incondicional en todo momento.

A mi querida esposa Karen gracias por toda la paciencia que me tienes, por siempre estar presente en mi vida, por ayudarme en todo momento y sobre todo por cuidarme y amarme.

Finalmente dedico este presente trabajo a mi ángel, que no se encuentra físicamente con nosotros, pero sí espiritualmente, apoyándome siempre y llenándome de sabiduría en todo momento. Gracias por enseñarme siempre el valor de la vida y por hacer de mi el hijo que soy hoy en día, te quiero mucho papá y se que en el cielo vas a estar muy orgulloso de mi.

Luis Fernando Salazar Romero

Agradecimiento

Agradesco a todos los Ingenieros de la Universidad Nacional de Loja que han sabido compartir su sabiduría y enseñanza en todo momento.

A mi esposa Karen por todo su amor y cariño, por ser la compañera de vida perfecta y un pilar fundamental en mi vida, le agradezco por apoyarme siempre en todas las decisiones que tomo y por ayudarme a cumplir esta nueva meta.

Finalmente quiero agradecer a todas las instituciones que hicieron posible que este tema de tesis sea factible para poderlo realizar, mil gracias.

Luis Fernando Salazar Romero

Índice de contenido

Portada.....	ii
Certificación.....	ii
Autoría.....	iii
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice de contenido.....	vii
Índice de tablas:.....	ix
Índice de figuras:.....	x
Índice de anexos:.....	xi
1. Título.....	1
2. Resumen.....	2
Abstract.....	3
3. Introducción.....	4
4. Marco Teórico.....	7
4.1 Antecedentes.....	7
4.2 Marco Teorico.....	7
4.2.1 Flotación.....	7
4.2.2 Fundamentos de la flotación.....	8
4.2.3 Variables que influyen en el proceso de flotación.....	8
4.2.3.1 Tamaño de partícula.....	8
4.2.3.2 Reactivos de flotación.....	8
4.2.3.3 Densidad de pulpa.....	9
4.2.3.4 Tiempo de residencia.....	10
4.2.3.5 Aireación.....	10
4.2.3.6 Calidad de agua.....	10
4.3 Marco metodologico.....	10
4.3.1 Flotacion Rougher.....	11
4.3.2 Flotacion Cleaner.....	11
4.3.3 Flotacion Scavenger.....	12
5. Metodología.....	13
5.1.1 Área de estudio.....	13
5.1.2 Materiales y métodos.....	14
5.1.3 Procedimientos y técnicas.....	15
5.1.3.1 Preparación de la muestra.....	17
5.1.3.2 Pruebas de molienda.....	17

5.1.3.3 Pruebas de flotación	17
6. Resultados.....	22
6.1 Ensayos de molienda.....	22
6.2 Ensayos de pH.....	23
6.3 Ensayos de xantato isobutílico de sodio.....	24
6.4 Ensayos de espumante F-501	25
6.5 Ensayos de tiempo de residencia.....	26
7. Discusión.....	27
8. Conclusiones	31
9. Recomendaciones	32
10. Referencia bibliográfica.....	33
11. Anexos.....	35

Índice de tablas:

Tabla 1. Resultados del porcentaje de pasante de la malla 200 en los diferentes tiempos de molienda.....	22
Tabla 2. Resultados de las flotaciones con variación del pH.	23
Tabla 3. Resultados de flotaciones con variación de xantato.....	24
Tabla 4. Resultados de flotaciones con variación de F-501.....	25
Tabla 5. Resultados de flotaciones con variación del tiempo de residencia.	26
Tabla 6. Parámetros óptimos para la flotación Rougher y resultados finales	27

Índice de figuras:

Figura 1. Mapa de ubicación geográfica de las coordenadas $x=784902$ $y=9604211$	14
Figura 3. Circuito de flotacion Rougher con el que se realizó las flotaciones.....	18
Figura 4. Gráfica del D60 calculado.....	22
Figura 5. Esquema final de flotación Roguher.....	28

Índice de anexos:

Anexo #1. Recolección de la muestra.....	35
Anexo #2. Trituración de la muestra	35
Anexo #3. Muestra tras la trituración primaria.....	36
Anexo #4. Tamizaje de la muestra (malla de 4 mm).....	36
Anexo #5. Pesaje de las muestras para las pruebas de molienda y flotación.....	36
Anexo #6. Molino de bolas escala laboratorio	37
Anexo #7. Flotación (primer banco).....	38
Anexo #8. Flotación medio.....	38
Anexo #9. Espectrómetro de absorción atómica	39
Anexo #10. Esquema de flotacion y dosificaciones de cal aplicadas.....	39
Anexo #11. Esquema de flotacion y dosificaciones xantato.....	40
Anexo #12. Esquema de flotacion y dosificaciones F-501.....	40
Anexo #13. Esquema de flotacion y tiempo de residencia.	41
Anexo #14. Diagrama del sistema de equipos de beneficio fase I de la mina Mirador.....	42

1. Título

“Comparación de parámetros de flotación en la recuperación de cobre del sector Valle del Quimi provincia de Zamora Chinchipe”

2. Resumen

La presente investigación tuvo por objetivo la comparación de parámetros de flotación en la recuperación de cobre del sector Valle del Quimi provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador. Se realizaron ensayos a nivel de laboratorio en donde se evaluaron los factores principales del proceso de flotación; como la granulometría, el pH, la dosificación de reactivos (colector xantato isobutílico de sodio y espumante F-501) y el tiempo de residencia, con el fin de determinar cuales son los valores óptimos para maximizar la recuperación de cobre.

Se evaluó la eficiencia del proceso de flotación a partir de un mineral con una ley de cabeza de 0,62% de Cu. Los ensayos de molienda mostraron que un tiempo de molienda de 3.3 minutos libera el material hasta el tamaño adecuado para la flotación. Los ensayos de pH demostraron que el aumento del pH mejora la recuperación de cobre, alcanzando un máximo de 89.05% con un pH de 9.42. Los ensayos del reactivo colector xantato isobutílico de sodio revelaron que la dosis óptima es de 4 ml y alcanzó una recuperación de 92.78% y un relave con baja ley de cobre (0.0299% de Cu), lo que asegura una buena separación de sulfuros de la ganga. Los resultados de las pruebas del reactivo espumante F-501 mostraron que una dosis de 3 gotas maximiza la recuperación, con un valor de 92.78%, mientras que dosis mayores o menores redujeron la eficiencia del proceso. Finalmente, en los ensayos de tiempo de residencia, se observó que la recuperación de cobre aumentaba hasta los 13 minutos, pero comenzaba a disminuir a los 14 minutos, sugiriendo que un tiempo de flotación más largo puede perjudicar la calidad del concentrado.

La recuperación máxima alcanzada en los ensayos fue de 92,78 %, esto resalta la importancia de analizar y ajustar las variables del proceso y los valores de cada una para alcanzar la mayor recuperación y una alta calidad del concentrado. El presente estudio contribuye a comprender de mejor manera la flotación de minerales sulfurados de la región suroriente del Ecuador.

Palabras clave: flotación, cobre, reactivos, xantato, F-501, concentrado de cobre.

Abstract

The objective of this research was to compare flotation parameters in the recovery of copper in the “Valle del Quimi” sector, Zamora Chinchipe province, Ecuador. Laboratory tests were carried out in which the main factors of the flotation process were evaluated, such as: particle size, pH, reagent dosage (sodium isobutyl xanthate collector and F-501 foaming) and residence time, in order to determine the optimal values to maximize copper recovery.

The efficiency of the flotation process was evaluated from an ore with a head grade of 0.62% Cu. Grinding tests presented that a grinding time of 3.3 minutes frees the material to the appropriate size for flotation. pH tests demonstrated that increasing the pH improves copper recovery, reaching a maximum of 89.05% with a pH of 9.42. Tests of the sodium isobutyl xanthate collector reagent revealed that the optimal dose is 4 ml and it achieved a recovery of 92.78% and tailing with a low copper grade (0.0299% Cu), which ensures a good separation of sulfides from the gangue. The results of the F-501 foaming reagent tests showed that a dose of 3 drops maximizes recovery, with a value of 92.78%, while higher or lower doses reduced the process efficiency. Finally, in residence time tests, it was observed that copper recovery increased up to 13 minutes, but began to decrease at 14 minutes, suggesting that a longer flotation time may be detrimental to the quality of the concentrate.

The maximum recovery achieved in the tests was 92.78%, which highlights the importance of analyzing and adjusting the process variables and the values of each one to achieve the highest recovery and high quality of the concentrate. This study contributes to a better understanding of the flotation of sulfide minerals in the southeastern region of Ecuador.

Keywords: flotation, copper, reagents, xanthate, F-501, copper concentrate.

3. Introducción

Ecuador, a diferencia de países como Perú o Chile, no tiene una larga tradición minera. Durante muchos años, el país estuvo dominada por pequeñas y medianas empresas que se enfocaban principalmente en la extracción de oro. Sin embargo, en la última década, han surgido proyectos mineros a gran escala que están explorando y explotando otros minerales, como el cobre, en estos proyectos se encuentra principalmente en forma de minerales sulfurados (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2022).

Los minerales de fácil recuperación cada vez son menos, por lo tanto surge la necesidad de buscar mejores opciones para procesar este tipo de minerales, por tal motivo es que se presta mayor atención a las técnicas de flotación para tener mejores recuperaciones en menas que son de más difícil acceso, las técnicas de flotación han mejorando y tomado en cuenta diversos factores que tal vez antes no se los tomaba (Wills & Finch, 2016).

La flotación es una de las técnicas más importantes en la extracción de metales valiosos, como el cobre, particularmente en yacimientos complejos como los pórfidos cupríferos. Sin embargo, el éxito de este proceso está influenciado por múltiples factores, entre los que se incluyen la composición mineralógica del mineral, las condiciones operativas, y los tipos de reactivos que se utilizan (Wills & Finch, 2016).

La flotación se ve afectada principalmente por los siguientes factores: la mineralogía del mineral, el tamaño de las partículas, la química del agua, y los reactivos utilizados (Fuerstenaу et al., 2007). En los depósitos de pórfido cuprífero, la presencia de pirita puede complicar la separación debido a que sus propiedades superficiales son similares a las de los sulfuros de cobre (Bulatovic, 2007). Investigaciones han demostrado que si se optimiza el proceso de flotación mediante el ajuste de variables como el pH, la cantidad de reactivos y el tiempo de residencia, se puede mejorar considerablemente la recuperación de cobre (Trahar, 1981). Sin embargo, en la Cordillera del Cóndor debido a la variabilidad mineralógica y las condiciones geológicas únicas se requiere un enfoque de optimización que se adapte a estas características (Ríos et al., 2020).

En el presente son pocos los laboratorios que trabajan haciendo pruebas de flotación y realizando circuitos de flotación óptimos para tener una mejor recuperación de concentrado de cobre, con ayuda de este estudio vamos a poder determinar cuáles son los mejores parámetros

que podemos utilizar para tener la mejor recuperación de concentrado de cobre en minerales de tipo pórfidos. Gupta y Yan (2016) confirman la importancia de la optimización de parámetros en circuitos de flotación y cómo la escasez de laboratorios especializados afecta la capacidad de mejorar la recuperación de concentrado de cobre en minerales de difícil extracción.

La recuperación eficiente de minerales de cobre del Valle del Quimi, presenta grandes desafíos debido principalmente a la variabilidad mineralógica de estos yacimientos, caracterizados en su mayoría por minerales sulfurados complejos. Estos desafíos se complican debido a la falta de estudios detallados sobre los parámetros óptimos de flotación para estos casos específicos, lo que limita la capacidad de optimizar los procesos y alcanzar mejores tasas de recuperación. Además, la falta de laboratorios especializados en el país dificulta la realización de pruebas a escala piloto, retrasando la implementación de técnicas ajustadas a las características geológicas de la región. Con todo lo expuesto anteriormente podemos darnos cuenta la necesidad de estudios como este, un análisis comparativo de parámetros de flotación que permita establecer condiciones operativas óptimas, mejorando la eficiencia del proceso y contribuyendo al desarrollo sostenible de la minería en Ecuador.

Objetivos

Objetivo General

- Comparar parámetros de flotación en la recuperación de cobre del sector valle del Quimi provincia de Zamora Chinchipe, mediante la determinación de las variables críticas del proceso.

Objetivos Específicos

- Establecer el tiempo óptimo de molienda para lograr una correcta liberación del mineral en el pórfido cuprífero de la Cordillera del Cóndor.
- Determinar la dosificación de reactivos que maximiza la recuperación de cobre en el proceso de flotación de esta muestra.
- Definir las condiciones óptimas de pH y tiempos de residencia para realizar la flotación de la muestra de pórfido cuprífero y maximizar la recuperación de cobre.

Preguntas de Investigación

En base a la problemática planteada, surgen diversas interrogantes de investigación:

- ¿Cuál es la granulometría adecuada para el proceso de flotación Roguher?
- ¿Qué efecto tiene la dosificación de reactivos en la recuperación de concentrado de cobre?
- ¿De que manera afecta la variación del pH en la recuperación de concentrado de cobre?
- ¿Qué incidencia tiene el tiempo de residencia del mineral en las celdas de flotación?

4. Marco Teórico

4.1 Antecedentes

La minería es de gran importancia en el Ecuador, en especial en la provincia de Zamora Chinchipe, ya que en esta área existen abundantes recursos minerales, como por ejemplo los yacimientos de cobre. Sin embargo, estos yacimientos minerales presentan problemas al momento de realizar los procesos de beneficio o concentración de minerales por ser sulfurados y de baja ley, por lo que actualmente se están llevando a cabo estudios que buscan determinar las mejores técnicas para aplicar a estos minerales (Ríos et al., 2020).

Un estudio realizado por Alulima y Vega en 2021 busca ampliar el conocimiento sobre la mineralogía de la zona, además proponer un esquema para el procesamiento de estos minerales. En su estudio se tomaron muestras de litologías mineralizadas y utilizaron técnicas de rayos x y espectroscopia de absorción atómica para determinar la composición de las muestras. Ellos confirmaron la gran variabilidad mineralógica existente en la zona y la complejidad que esto conlleva para los posteriores procesos de concentración, esto nos señala la gran importancia que tiene el control y el estudio de los minerales a extraer. En su estudio Alulima y Vega encontraron que la mineralización de zonas muy cercanas entre sí es muy variada, lo que se observa al tener caídas repentinas y significativas en la ley del mineral.

Naula (2024), realizó un estudio sobre la cinética de flotación y el análisis de la variación de pH para minerales de la zona del Valle del Quimi. Naula determinó que las mejores condiciones para la flotación primaria de los minerales de la zona se dan con una concentración de sólidos del 30% y un pH de 10, mientras que los mejores resultados para una flotación secundaria requieren de un pH mayor de 12.3 a 12.4.

4.2 Marco Teorico

4.2.1 Flotación

En metalurgia la flotación se define como una técnica de separación, que se utiliza para concentrar minerales valiosos a partir de una mezcla de minerales, mediante la modificación de las propiedades superficiales de los minerales. Para lograr la separación se añaden reactivos químicos que modifican o alteran la capacidad de los minerales para adherirse a las burbujas de aire dentro de una celda de flotación. Los minerales que se adhieren a las burbujas suben a la superficie y forman una espuma que contiene los minerales valiosos, mientras que la ganga

(material no deseado) se queda en el fondo de la celda, de esta forma se logra separar el o los minerales de interés de los que no son valiosos (Wills & Napier-Munn, 2006).

4.2.2 Fundamentos de la flotación

El resultado de la flotación depende de varios factores, incluidos el tamaño de partícula, la mineralogía del material a procesar, la química del agua y los reactivos utilizados. Los reactivos que se suelen utilizar en la flotación son los colectores, espumantes, modificadores y depresores. Los colectores son aquellos reactivos que aumentan la hidrofobicidad de los minerales, es decir, su capacidad de repeler el agua; los espumantes son los que estabilizan la espuma formada, los reactivos modificadores son los que ajustan el pH de la pulpa y otras condiciones químicas, y los depresores son aquellos que impiden que ciertos minerales floten (Fuerstenau et al., 2007).

4.2.3 Variables que influyen en el proceso de flotación

4.2.3.1 Tamaño de partícula

Uno de los factores más importantes es el tamaño de partícula, este afecta directamente los resultados y la eficiencia de la flotación. Las partículas finas al tener una mayor superficie específica causan un incremento en el consumo de reactivos y pueden provocar que el proceso pierda selectividad. Al contrario con partículas gruesas se presentan problemas debido a su peso, estas no logran flotar y llegar a formar parte de la espuma (Trahar, 1981). Por lo tanto es fundamental encontrar el tamaño de partícula mediante la molienda que maximice la recuperación de cobre (Wills & Finch, 2016).

4.2.3.2 Reactivos de flotación

Los reactivos de flotación son otro de los factores mas cruciales para el éxito de la flotación. Los colectores sulfhídricos: xantatos y los ditiocarbamatos, son de los más utilizados debido a su capacidad para aumentar la hidrofobicidad de los minerales de sulfuro (Wills & Finch, 2016). Los reactivos espumantes, como el metil isobutil carbinol (MIBC) y el aceite de pino, generan estabilización de la espuma y facilitan la separación de los minerales de interés de la ganga. Los modificadores y depresores se utilizan para mejorar la selectividad del proceso, estos modifican las condiciones químicas y previenen la flotación de minerales no deseados (Fuerstenau et al., 2007).

- **Colectores:** Son sustancias químicas que se adsorben en la superficie de los minerales y modifican las propiedades superficiales de estos, para que así repelan el agua y se adhieran a las burbujas de aire en las celdas de flotación. Estos suelen ser reactivos orgánicos que favorecen la flotación de ciertos minerales al aumentar su hidrofobicidad, es decir, su capacidad para repeler el agua, permitiendo así que estos minerales se puedan separar del material no deseado (Wills & Napier-Munn, 2006). Los xantatos son de los colectores mas usados en el beneficio de minerales de cobre, son compuestos químicos orgánicos pueden ser de sodio o potasio. Su función es formar una capa hidrofóbica sobre la superficie del mineral de interés, lo que aumenta la capacidad del mineral para repeler el agua y así adherirse a las burbujas de aire y flotar hasta la superficie a formar parte de la espuma, de este modo se da la separación de los minerales valiosos de los que no lo són (Lynch & Rao, 2012).
- **Espumantes:** Son reactivos que estabilizan las burbujas y también la espuma en la celda de flotación, lo que facilita la separación de las partículas minerales flotantes. El espumante mas usado para minerales de sulfuros es el aceite de pino (Wills & Napier-Munn, 2006).
- **Modificadores:** Son reactivos químicos que se añaden a la pulpa para modificar o ajustar las condiciones químicas, y de esta forma mejorar la eficiencia del proceso de separación. Estos no producen la flotación por sí solos, sino que modifican el comportamiento de los minerales en la celda de flotación para mejorar el proceso. Los modificadores se pueden utilizar para ajustar el pH de la pulpa, inhibir o activar ciertos minerales, y para afectar la interacción entre los colectores y las partículas minerales (Liddell, 2011).
- **Depresores:** Estos reactivos se añaden a la pulpa para inhibir la flotación de ciertos minerales, evitando así que interfieran con el proceso de separación de los minerales de interés. Estos actúan en la superficie de los minerales no deseados, adheriéndose a la superficie y modificando sus propiedades superficiales para que no se adhieran a las burbujas de aire y no floten (Wills & Napier-Munn, 2006).

4.2.3.3 Densidad de pulpa

La densidad de la pulpa se mide como el porcentaje de sólidos (minerales) en peso, o como densidad relativa en unidades de kg/m^3 . Es la proporción de sólidos en relación a la cantidad de líquido (agua) en la celda. Esta es una variable de gran importancia ya que afecta a

la viscosidad de la pulpa, lo que se relaciona con la capacidad de separación de los minerales y también afecta a la agitación en la celda (Gaudin, 1939).

4.2.3.4 Tiempo de residencia

En flotación se le conoce como tiempo de residencia al período en el cual la pulpa permanece en la celda de flotación. Este tiempo es un factor crítico para permitir que las partículas minerales interactúen de forma adecuada con las burbujas de aire y sean separadas de la ganga. Un tiempo de residencia adecuado garantiza que las partículas puedan flotar y ser recuperadas, mientras que tiempos demasiado largos o demasiado cortos puede afectar la eficiencia del proceso, con poco tiempo los reactivos no logran actuar sobre los minerales y con tiempos largos podría verse afectada la selectividad del proceso al actuar sobre minerales no deseados (Sutherland & Wark, 1955).

4.2.3.5 Aireación

Es un aspecto fundamental del proceso de flotación que afecta la formación de burbujas y la recuperación de minerales. Ajustar y optimizar la aireación es esencial para maximizar la eficiencia del proceso y asegurar una separación eficaz de minerales valiosos. El aire que ingresa a una celda de flotación está estrictamente relacionado con el rotor y estator de la misma, si estos se encuentran en perfectas condiciones las burbujas esparcidas en la celda de flotación va hacer mas uniforme y por ende los reactivos utilizados van a funcionar de una mejor forma (Jameson, 1999).

4.2.3.6 Calidad de agua

Es una variable muy importante a tomar en cuenta ya que el agua que ingresa al proceso de flotación tiene que tener un Ph de 7 o casi similar para poder controlar de una mejor forma todas las demás variables que se requieren. Otros parámetros que incluyen son la dureza, contenido de sólidos disueltos, y concentración de contaminantes. Estos factores pueden afectar la interacción entre las partículas minerales y las burbujas de aire, así como la formación y estabilidad de la espuma (Ayala, 2013).

4.3 Marco metodológico

Dentro de la flotación se distinguen tres etapas principales que son; flotación Rougher, flotación Cleaner y flotación Scavenger.

4.3.1 Flotacion Rougher

La flotación Rougher es la primera etapa del proceso, la fase inicial, en esta se busca procesar la mayor cantidad de material recuperando la máxima cantidad posible de minerales valiosos. En este paso se emplean reactivos colectores (xantatos), espumantes (alcoholes o aceites orgánicos) y modificadores de pH (cal o ácido sulfúrico). Se lleva a cabo en celdas de gran tamaño con flujo de aire y agitación mecánica. De esta primera fase se obtiene un concentrado de baja ley, pero que contiene la mayor parte del cobre recuperable (Wills & Finch, 2016).

En esta primera etapa de la flotación generalmente se emplean pH bajos en comparación con las otras etapas (cleaner y scavenger), además se utiliza mayor cantidad de reactivos y tiempos de residencia más largos para asegurar que las partículas se recojan en una espuma estable, que los reactivos realicen correctamente su función y así se recolectará la mayor cantidad de concentrado, aunque este no será de alta calidad, es decir, la ley de este concentrado será baja (Gaudin, 1957).

En esta etapa los principales parámetros que la rigen son la granulometría del mineral, el pH y la dosificación de reactivos. La granulometría en este caso debe ser de tamaño medio, ya que las partículas muy finas y muy gruesas presentan dificultades para adherirse a las burbujas de aire. El pH influye directamente en la selectividad del proceso, se suelen emplear valores relativamente bajos ya se busca recolectar la mayor cantidad posible de partículas. La dosificación de reactivos es clave ya que al tratar grandes cantidades de material el requerimiento de colector y espumante es también alta (Wills & Finch, 2016).

La flotación Rougher se suelen usar en el procesamiento de minerales sulfurados de cobre, en esta etapa inicial el concentrado de cobre recuperado suele tener gran cantidad de impurezas, por lo que se suele seguir esta flotación Rougher con una de tipo Cleaner para limpiar o purificar este concentrado para mejorar su calidad. Esta etapa es de suma importancia ya que es en la que se reduce significativamente el volumen de material a tratar en las etapas siguientes (Wills & Finch, 2016).

4.3.2 Flotacion Cleaner

La flotación Cleaner o también llamada flotación de limpieza tiene como finalidad limpiar el concentrado proveniente de la Rougher para obtener un concentrado de mejor calidad,

es decir, con una ley mayor. Aquí se busca separar las partículas de impurezas (ganga) del concentrado, mejorando así la selectividad del proceso. En esta fase se suelen añadir depresores para ayudar a obtener un concentrado más limpio, además de cambiar la dosificación de reactivos para operar con una espuma más estable y limpia. Este proceso se suele llevar a cabo en celdas más pequeñas o en columnas para tener un mejor control y aumentar la selectividad de la flotación. Generalmente el concentrado que sale de esta etapa ya está listo para su comercialización o para etapas de refinación (Laskowski, 2018).

4.3.3 Flotación Scavenger

La flotación Scavenger es la que se procesan los relaves provenientes de las otras dos etapas (Rougher y Cleaner), con la finalidad de recuperar partículas valiosas que no pudieron ser recuperados en las fases iniciales, minimizando las pérdidas de minerales valiosos en los relaves. Esta etapa se lleva a cabo en celdas grandes para asegurar el contacto de las partículas con las burbujas, las dosis de colector y espumante varían en comparación con las otras etapas, aquí se suele añadir mayor cantidad de colector y menor cantidad de espumante ya que no se busca tener un exceso de espuma. El concentrado que se obtiene aquí es recirculado a la flotación Rougher o Cleaner, mientras que los relaves son sacados del proceso para su posterior tratamiento o almacenamiento. Gracias a esta flotación se pueden reducir al mínimo las pérdidas y aumentar la recuperación global del proceso (Herrera Urbina, 2003).

5. Metodología

5.1.1 Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en la provincia de Zamora Chinchipe, Cantón el Pangui, parroquia Tundayme, específicamente en el sector del Valle del Quimi que se encuentra dentro de la Cordillera del Cóndor, en donde encontramos una brecha mineralizada de pórfido ubicada en las coordenadas $x=784902$ $y=9604211$. Esta región es conocida por su rica geología y depósitos de pórfido cuprífero, lo que la convierte en un sitio ideal para estudios de optimización de flotación de minerales.

La zona presenta una topografía montañosa en la que se incluyen elevaciones de la Cordillera del Cóndor, además de los recursos minerales tiene una gran biodiversidad ya que forma parte de la amazonía Ecuatoriana (MAE, 2015).

El clima en la zona es de tipo húmedo tropical, con abundantes precipitaciones durante todo el año, la temperatura suele ser de 20°C a 24°C . Debido a estas condiciones se cuenta con una amplia vegetación y biodiversidad (INAMHI, 2020).

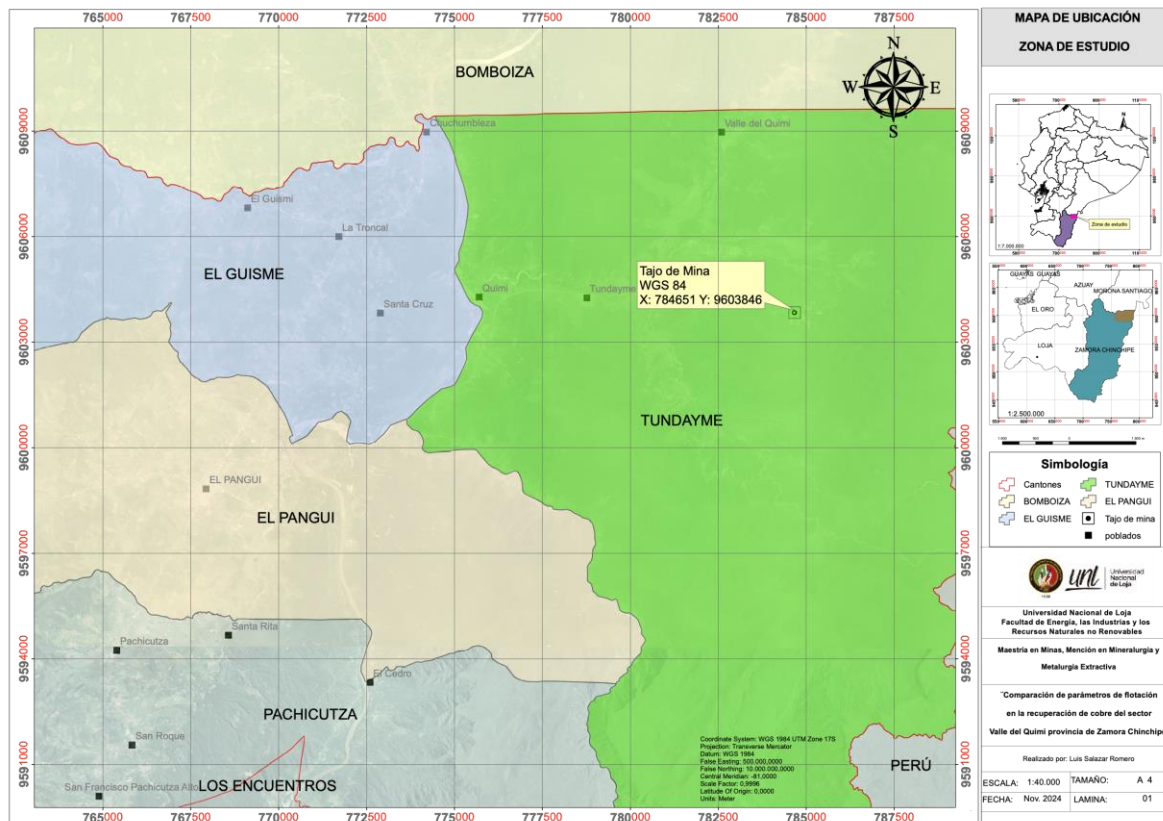


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica de las coordenadas $x=784902$ $y=9604211$.

Para la presente investigación se utilizó un enfoque cuantitativo, combinado con técnicas experimentales y analíticas para evaluar y optimizar los parámetros de flotación. El estudio fué de tipo experimental a nivel de laboratorio.

La población de estudio se constituyó por las muestras de mineral obtenidas de la brecha mineralizada. Se seleccionó muestras representativas de diferentes zonas del depósito para asegurar la heterogeneidad y representatividad de los datos (ver anexo 1).

5.1.2 Materiales y métodos

Los equipos y materiales utilizados para la investigación fueron los siguientes:

- Muestra obtenida en las coordenadas antes mencionadas.
- Chancador de mandíbula y de rodillos, los cuales nos ayudaran a simular un primer circuito de trituración.
- Molino de bolas para obtener el tamaño de partícula adecuado.
- Tamiz #200, el pasante de esta malla se utilizará para realizar los ensayos de flotación.

- Hornos para el secado de la muestra
- Celda de flotación con una capacidad de 1.5L en donde se realizará los ensayos de flotación.
- Reactivos "xantato de sodio como colector, F-501 como espumante y Cal como depresor".
- Medidor de pH
- Espectrómetro de absorción atómica para obtener la ley de concentrado de cobre.

5.1.3 Procedimientos y técnicas

Las principales actividades que se realizaron en el presente trabajo investigativo se resumen a continuación en la figura 2, en este flujograma se muestra el orden y las etapas que siguió la investigación.

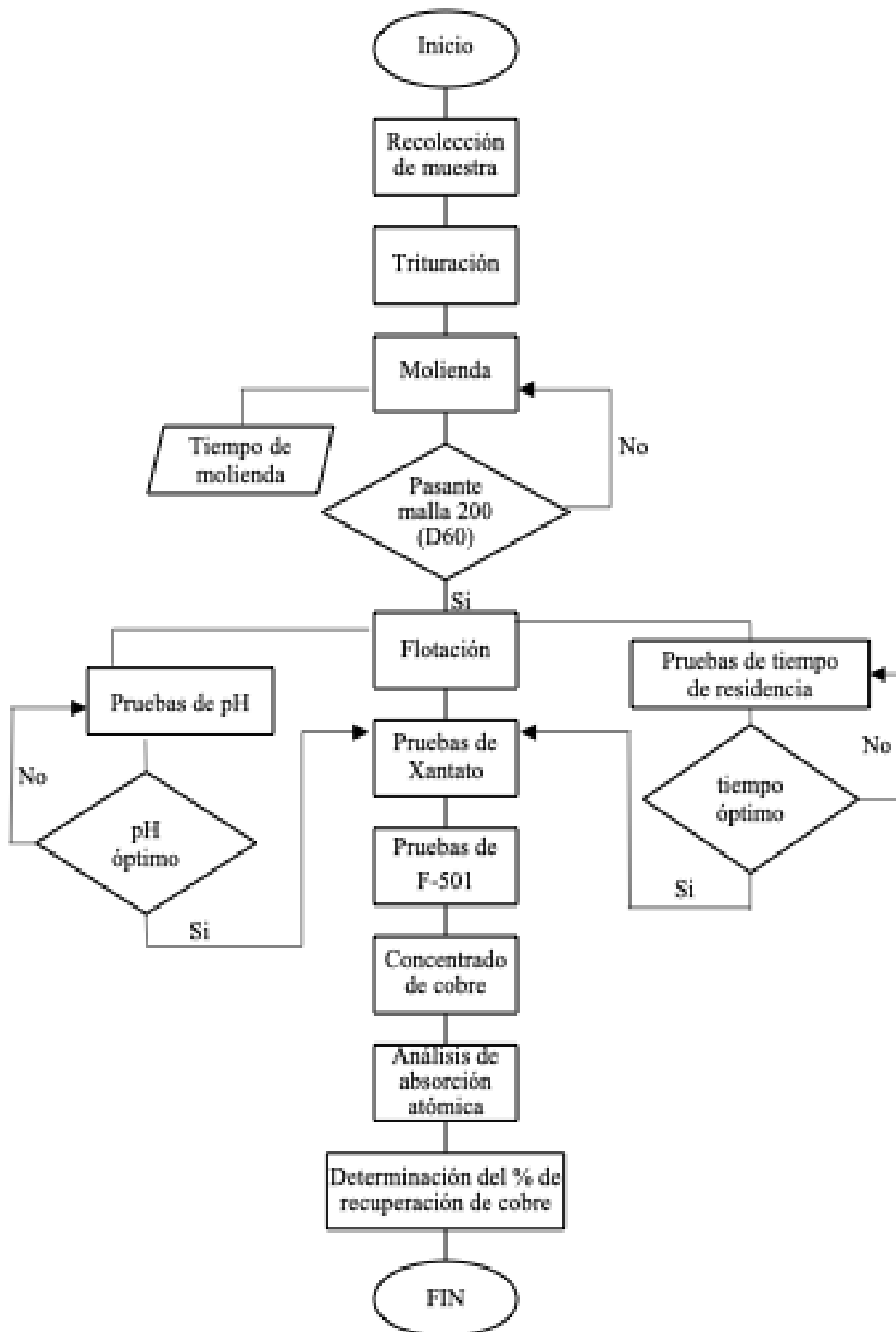


Figura 2. Flujoograma de la metodología de investigación.

5.1.3.1 Preparación de la muestra

- Una vez obtenida la muestra el primer paso consistió en la preparación de la muestra, para esto se procedió a secar la misma por 24 horas.
- Se trituró la muestra en un chancador de mandíbulas y luego pasó a un chancador de rodillos, de este modo se logra obtener un tamaño mas pequeño y homogéneo para los siguientes pasos (ver anexo 2 y 3).
- El material se pasó por una malla con una abertura de 4 mm, el material con mayor tamaño fue triturado nuevamente hasta alcanzar el tamaño deseado (ver anexo 4).

5.1.3.2 Pruebas de molienda

- Se pesó 500 g de muestra y se realizó una molienda húmeda en un molino de bolas de capacidad de 1 kilo, con un porcentaje de sólidos de 70%. Se hizo 3 moliendas en diferentes tiempos para determinar en cual de ellos se obtiene un D60 en malla 200. Los tiempos evaluados fueron 2, 4 y 6 minutos (ver anexo 5 y 6).
- Tras la molienda las muestras pasaron por la malla 20 para evitar que partículas gruesas pasen a los pasos siguientes y perjudiquen los equipos, y luego pasaron a un filtro que actúa mediante un bomba de vacío para secarlas, posteriormente se las secó en un horno por aproximadamente 5 horas, de este modo obtenemos el peso de la cantidad real que se molió y cuánto fueron las pérdidas.
- Se realizó un tamizaje húmedo de las muestras en la malla 200 para determinar la cantidad de material que pasa por esta, a partir de estos resultados se determinó el D60 de nuestro proceso.
- Se graficó los resultados en una gráfica de tiempo de molienda vs porcentaje de material pasante de la malla 200, a partir de la curva dibujada se estableció el tiempo necesario para obtener el D60. Se trabajó con el D60 debido a que la siguiente fase se centra en un circuito de flotación Rougher.

5.1.3.3 Pruebas de flotación

- Previo a las pruebas de flotación se molió las muestras con el tiempo determinado en el paso anterior.

- Se estableció el esquema de flotación que replica las condiciones de la planta de beneficio y las variables a evaluar.

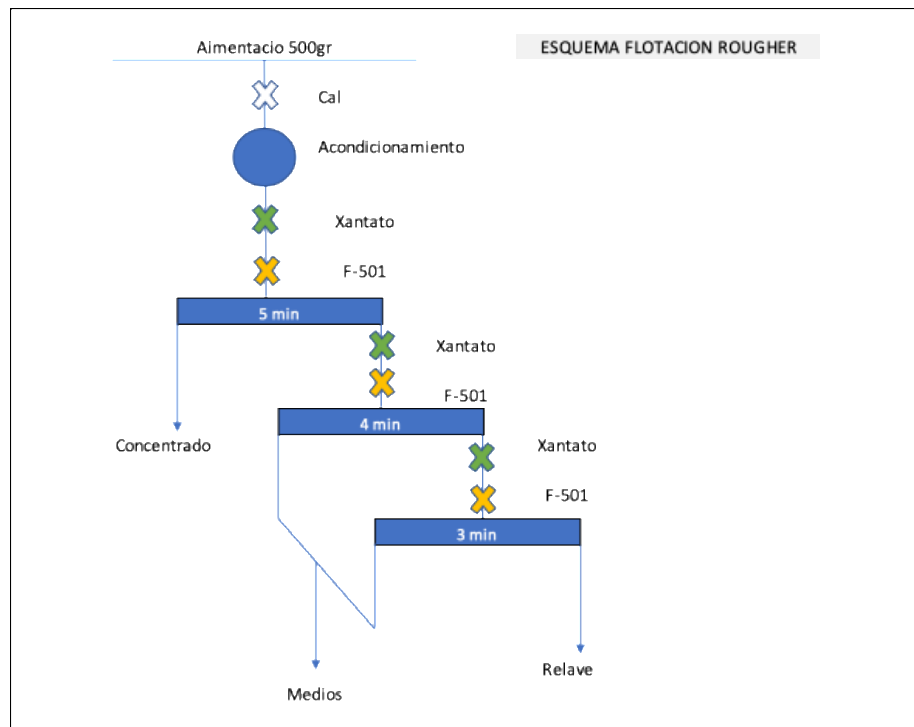


Figura 3. Circuito de flotación Rougher con el que se realizó las flotaciones.

- El circuito de flotación de la figura 3 es una representación a escala de laboratorio del proceso utilizado por la empresa Ecuacorriente S.A, dicho circuito está configurado por tres bancos catalogados como primario, secundario y terciario. La descripción de este circuito a escala de laboratorio está representado por una primera flotación de 5 minutos y por dos medios de 4 y 3 minutos en donde la característica principal es tratar de recuperar la mayor cantidad de concentrado de cobre (ver anexo 7 y 8).
- Se evaluó la recuperación de cobre a diferentes condiciones de pH, para esto se preparó pulpas con diferentes dosis de cal para elevar el pH. Se probó con dosis de 0 (sin cal), 0.20, 0.30 y 0.40 g de cal y se midió el pH a cada una de las muestras previo a la flotación para evaluar como varió la recuperación de cobre en función del pH.
- Se realizó ensayos de flotación con las pulpas de diferentes pH, para evaluar únicamente la influencia de este factor en la recuperación de cobre se mantuvieron constantes la dosificación del colector (3 ml de xantato isobutílico

de sodio), del espumante (2 gotas de F-501) y el tiempo de residencia (12 minutos).

- La flotación inició con el acondicionamiento de la pulpa en la celda de flotación durante 3 minutos para su homogenización, tras esto se añade el reactivo colector (xantato) y se dejó durante 2 minutos para que se mezcle con la pulpa e inicie su acción, posteriormente se añadió el reactivo espumante (F-501) y se lo dejó acondicionar por 1 minuto.
- Una vez que se adicionó todos los reactivos a la celda se inició la primera flotación que duró 5 minutos, de esta etapa se obtuvo el concentrado de cobre. Transcurrido este tiempo se acondicionó nuevamente la pulpa con 1 ml de xantato y una gota de F-501 en los mismos tiempos antes descritos. Esto se repitió 2 veces ya que de este modo se simuló los distintos bancos que tiene la flotación Rougher de la planta, esto nos sirve para recuperar la mayor cantidad de cobre y minimizar las pérdidas en los relaves. Este proceso simuló la flotación Rougher de la planta en donde hay tres bancos o grupos de celdas.
- De la unión del material flotado de estas etapas obtuvimos dos productos medios, estos medios en conjunto con el concentrado de la primera flotación forman el concentrado Rougher, es decir, el concentrado final que se obtiene de la flotación Rougher. Esto se realizó por separado para conocer la eficiencia de cada uno de los bancos de flotación. Los productos obtenidos de cada ensayo se secaron, pulverizaron y analizaron mediante espectroscopía de absorción atómica (ver anexo 9 y 10).
- Tras los ensayos de pH, se continuó con la evaluación de la dosificación de reactivos, primero se evaluó el efecto del reactivo colector (xantato isobutílico de sodio) se inició con dosis bajas y se incrementó levemente estas dosis con la finalidad de encontrar el punto de equilibrio que nos garantice la mejor recuperación.
- Las dosis con las que se trabajó fueron 2, 3 y 4 ml para el primer banco de la flotación, los siguientes bancos (secundario y terciario) se mantuvieron con las mismas condiciones de los ensayos previos. Para estas pruebas el resto de variables se mantuvieron constantes: pH 9.4, 3 gotas de espumante F-501 y 12 minutos de duración del proceso. De estos ensayos al igual que en los anteriores,

se obtuvo concentrado, medio y relave; y a estos se los analizó con el mismo método de espectroscopía de absorción atómica (ver anexo 11).

- Luego se evaluó la influencia del reactivo espumante F-501, las dosis que se utilizó fueron 1, 2 y 4 gotas, aplicadas en el primer banco de flotación, el resto de bancos se mantuvieron como en los ensayos anteriores. Para estas pruebas se trabajó con un pH de 9.4, 4 ml de xantato y 12 minutos de tiempo de residencia. El concentrado, medio y relave se secó, pulverizó y analizó mediante un equipo de absorción atómica (ver anexo 12).
- Posteriormente se evaluó el tiempo de flotación, se probó con 11, 13 y 14 minutos, y el resto de condiciones fueron: pH 9.4, 4 ml de xantato y 3 gotas de F-501. El análisis del concentrado, medio y relave obtenidos fue igual que en los ensayos anteriores (ver anexo 13). Todo esto se realizó con el fin de simular la planta de beneficio donde se procesa el mineral de estudio (ver anexo 14).
- Además del análisis de espectroscopía de absorción atómica para conocer la ley de cobre, se realizó análisis del porcentaje de azufre en las muestras de los ensayos de xantato, esto se lo realizó mediante ensayos de volumetría.
- El análisis mediante espectroscopía de absorción atómica consistió en pesar las muestras, digestarlas con ácidos para lograr disolverlas en un medio líquido, aforarlas en un volumen conocido y llevarlas a leer en el equipo de absorción atómica. Mientras que el análisis de la ley de azufre consistió en pesar las muestras, someterlas a altas temperaturas (mas de 1200 °C) para su fundición, los gases emanados van a recipientes en donde pasan a una fase líquida, se titula con una solución básica (hidroxido de sodio) y a partir del volumen consumido se determina el porcentaje de azufre de las muestras, esta técnica se conoce como volumetría.
- A partir de los datos obtenidos de la ley de cobre y de azufre se determinó la recuperación para cada uno de estos elementos, la fórmula utilizada fue:

$$\%R = \frac{C * tc}{A * ta} * 100$$

Donde:

%R = porcentaje de recuperación
C = peso del concentrado de cobre
tc = ley del concentrado
A = peso de la alimentación
ta = ley de la alimentación

- Esta fórmula nos indica el porcentaje de mineral valioso que se logró recuperar desde la alimentación. Se basa en el balance metalúrgico de masas y leyes.
- Finalmente se realizó un análisis e interpretación profunda de los resultados obtenidos, para identificar las tendencias y evaluar los parámetros estudiados en este trabajo y como estos influyen en la recuperación del cobre.

6. Resultados

La ley de cabeza de la muestra la cual representa el porcentaje de cobre presente en el mineral fue de 0.62%, partiendo de este valor se evaluó la eficiencia del proceso de flotación.

6.1 Ensayos de molienda

Los resultados de los ensayos de molienda se muestran en la tabla 1, desde el tiempo 0, es decir, la muestra tal como salió del proceso de trituración, hasta los 6 minutos.

Tabla 1. Resultados del porcentaje de pasante de la malla 200 en los diferentes tiempos de molienda.

Tiempo (minutos)	Pasante de la malla 200 (%)
0	21,10
2	42,90
4	68,02
6	83,47

La muestra inicial previo a la molienda presenta un material pasante de la malla 200 del 21.1%, mientras se va incrementando el tiempo de molienda se incrementa el porcentaje de material pasante, es decir, el material es cada vez más fino alcanzando un 83.47% de pasante por la malla 200 en 6 minutos. Estos resultados evidencian que existe una relación directa entre el tamaño de partícula y el tiempo de molienda.

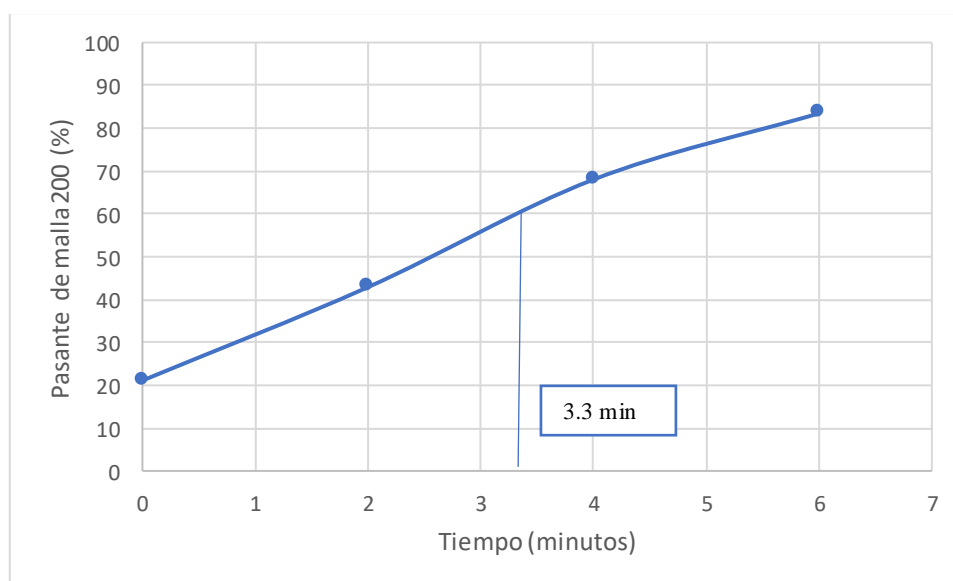


Figura 4. Gráfica del D60 calculado.

A partir de la gráfica del % de material que pasa la malla 200 vs el tiempo se determinó que el tiempo necesario para alcanzar el D60 es de 3.3 minutos. Se estableció el D60 como la granulometría adecuada para los ensayos ya que esta es la que se utiliza en la planta de beneficio que estamos simulando.

6.2 Ensayos de pH

Los resultados de los ensayos de pH se muestran en la tabla 2. Se probó con 4 dosis diferentes de cal, mientras que los reactivos fueron 3 ml de xantato y 2 gotas de F-501 para todas las pruebas, con una duración de 12 minutos.

Tabla 2. Resultados de las flotaciones con variación del pH.

Cal (g)	pH	Muestra	Cantidad (g)	Ley de Cu (%)	Recuperación (%)
0	7,33	Concentrado	53,49	4,9510	86,59
		Medio	20,3	0,7859	
		Relave	419,5	0,0512	
0,20	8,96	Concentrado	50,87	5,3150	87,65
		Medio	21,58	0,6537	
		Relave	425,11	0,0385	
0,30	9,24	Concentrado	50,81	5,0340	88,43
		Medio	25,9	0,5362	
		Relave	420,29	0,0358	
0,40	9,42	Concentrado	53,84	4,9220	89,05
		Medio	22,27	0,5399	
		Relave	414,16	0,0354	

En la tabla 2 se describe como afecta el pH al proceso de flotación. En la primera flotación no se añadió reactivo modificador (cal), por lo tanto esta prueba fue realizada con un pH neutro que es el normal del agua. Al no agregar cal podemos evidenciar el efecto que esta tiene en la recuperación de cobre y en el relave. En este caso se obtuvo la recuperación mas baja de los 4 ensayos, además del relave con la mayor cantidad de cobre, lo cual se traduce en pérdidas. La recuperación va aumentando conforme se incrementa el pH, alcanzando la máxima recuperación (89,05%) con un pH de 9,42; en esta prueba también se obtuvo el relave con menor cantidad de cobre (0,0354) que es lo deseado en el proceso de flotación.

6.3 Ensayos de xantato isobutílico de sodio

La tabla 3 muestra los resultados de los ensayos de dosificación de xantato. Para estas pruebas se trabajó con un pH de 9,42; que fue con el que obtuvimos la mejor recuperación en los ensayos anteriores, además se añadió 3 gotas de espumante F-501 y se flotó durante 12 minutos.

Tabla 3. Resultados de flotaciones con variación de xantato.

Xantato (ml)	Muestra	Cantidad (g)	Ley de S (%)	Ley de Cu (%)	Recuperación Cu (%)
2	Concentrado	52,93	22,86	4,6720	92,66
	Medio	11,19	6,51	0,5024	
	Relave	422,17	0,19	0,0331	
3	Concentrado	51,85	24,44	4,9277	92,24
	Medio	20,5	3,28	0,3748	
	Relave	417,11	0,16	0,0331	
4	Concentrado	51,21	23,96	4,8171	92,78
	Medio	16,48	2,68	0,4103	
	Relave	416	0,17	0,0299	

Los resultados de las flotaciones con diferentes dosis de xantato nos arrojaron recuperaciones muy favorables y de valores similares. Sin embargo, la dosis con mayor recuperación es la de 4 ml, en este caso se obtiene también un relave más limpio, es decir, con la ley mas baja de cobre, además de que se tiene un buen equilibrio entre la cantidad de concentrado y la ley de cobre, por esto se seleccionó este ensayo como el de los mejores resultados.

En cuanto al azufre se obtuvieron leyes parecidas en los 3 ensayos, conocer la ley de este elemento nos sirve para confirmar que se esta realizando una buena separación de los sulfuros de la ganga, es decir, la flotación esta cumpliendo con su cometido. Los valores obtenidos estan dentro del rango para la ley de azufre con el que se trabaja en la planta de beneficio, en donde el concentrado de la flotación Rougher debe tener de 20 a 25 de % de azufre. La cantidad de azufre en el concentrado es importante ya que una cantidad alta en el producto final causa que este tienda a autocalentarse y puede llegar a la autoinflamación (encenderse fuego), mientras que una cantidad baja de azufre causa que el concentrado se endurezca rápidamente lo que dificulta su manejo y transporte.

6.4 Ensayos de espumante F-501

En la tabla 4 se describen los resultados de las pruebas realizadas con 1, 2 y 4 gotas del reactivo espumante F-501. Para estas pruebas se trabajó con un pH de 9,42; 4 ml de xantato y se flotó durante 12 minutos. El ensayo con una dosis de 3 gotas de espumante ya fue realizado en la etapa anterior en las pruebas de xantato.

Tabla 4. Resultados de flotaciones con variación de F-501.

F-501 (gotas)	Muestra	Cantidad (g)	Ley de Cu (%)	Recuperación Cu (%)
1	Concentrado	44,12	5,9054	
	Medio	18,05	1,2312	87,14
	Relave	419,62	0,0376	
2	Concentrado	46,72	5,7067	
	Medio	18,87	1,0087	89,06
	Relave	417,24	0,0329	
4	Concentrado	57,78	4,57	
	Medio	19,68	0,6678	88,25
	Relave	405,12	0,0391	

Las dosis evaluadas arrojaron valores de recuperación inferiores a la alcanzada en la prueba con 3 gotas (92,78%). Estos resultados muestran como con una dosis baja de espumante se obtiene una menor cantidad de concentrado de cobre (44,12 g) en comparación con los otros ensayos, y a pesar de que la ley de este concentrado es la más alta (5,9054%) la recuperación es la más baja con 87,14%, ya que la recuperación depende no solo de la ley sino también de la cantidad recuperada. Con dos gotas la recuperación sube hasta 89,06%; ya que aunque la ley de cobre baja, se obtiene una mayor cantidad (46,72 g). En el caso de 4 gotas la recuperación cae a 88,25%; ya que se obtiene una buena cantidad de concentrado pero la ley ha disminuido significativamente. Mientras se incrementa la dosis de F-501 desde 1 hasta 3 gotas la recuperación va en aumento, hasta llegar a las 4 gotas en donde se observa una disminución de la recuperación de 92,78% hasta 88,25%.

En cuanto a los relaves en todos los ensayos se obtienen cantidades similares y las leyes son muy bajas lo que indica que el proceso. Tiene una muy buena selectividad. Con estos resultados podemos notar la importancia de evaluar la cantidad de reactivo espumante, ya que la recuperación aumenta con mayor cantidad del reactivo hasta que alcanza un punto en donde vuelve a bajar, esto significa que un exceso de reactivos no siempre es favorable.

6.5 Ensayos de tiempo de residencia

Los resultados de las pruebas con tiempos de residencia de 11, 13 y 14 minutos se describen en la tabla 5. Para estas pruebas se trabajó con un pH de 9,42; 4 ml de xantato y 3 gotas de F.501. El ensayo de 12 minutos ya fue realizado en la etapa anterior en las pruebas de espumante.

Tabla 5. Resultados de flotaciones con variación del tiempo de residencia.

tiempo (minutos)	Muestra	Cantidad (g)	Ley de Cu (%)	Recuperación Cu (%)
11	Concentrado	49,76	4,6511	
	Medio	17,02	0,5607	87,67
	Relave	423,98	0,0436	
13	Concentrado	53,11	4,4333	
	Medio	15,79	0,451	89,19
	Relave	411,5	0,0354	
14	Concentrado	56,89	4,0987	
	Medio	15,23	0,5777	88,32
	Relave	400,33	0,0395	

La recuperación de cobre aumenta conforme el tiempo de residencia, desde los 11 hasta los 13 minutos, a partir de este tiempo con 14 minutos la recuperación disminuye hasta 88,32%. En cuanto a la ley mientras aumenta el tiempo la ley disminuye gradualmente, lo que sugiere que conforme avanza el tiempo más partículas de ganga se adhieren a las burbujas y son llevadas hasta el concentrado. En lo que respecta la cantidad de concentrado obtenido este va aumentando progresivamente conforme el tiempo, esto se debe a que con un lapso mayor se flota una mayor cantidad de material aunque este puede contener partículas de ganga.

7. Discusión

Tras comparar y analizar los ensayos realizados se determinó que los parámetros en los cuales se obtiene la mayor recuperación son los descritos en la tabla 6.

Tabla 6. Parámetros óptimos para la flotación Rougher y resultados finales

pH	xantato (ml)	F-501 (gotas)	tiempo (minutos)	Cantidad de concentrado (g)	Ley de Cu (%)	Recuperación (%)
9,42	4	3	12	51,21	4,8171	92,78

Luego de realizar un análisis comparativo de los diferentes parámetros evaluados en la presente investigación, se identificó los valores de pH, xantato, F-501 y tiempo de residencia que se mencionan en la tabla 6 son los más eficientes para obtener una mejor recuperación. Bajo estas condiciones se obtuvo un buen equilibrio entre la cantidad de concentrado y la ley del mismo, lo que se refleja en una recuperación alta (92,78%).

Se determinó que la granulometría adecuada para los ensayos corresponde al D60 en malla 200, es decir, que el 60% del material tiene un tamaño inferior a 74 μm . este tamaño corresponde al empleado en la planta de beneficio que se está simulando, en el cual para llegar a esta granulometría se emplea un molino Sag y un molino de bolas, este circuito de conminución es el diseñado para procesar el mineral de la zona de estudio. En comparación con otras plantas de beneficio de cobre como Chuquicamata en la cual podemos ver que tiene circuitos diferentes de molienda, trabajando incluso con 6 molinos de bolas para obtener la granulometría adecuada en su caso D80, y un único circuito de flotación rougher en paralelo (Jiménez, 2007). Además se pudo corroborar que esta granulometría es apropiada para los ensayos ya que se obtuvo valores altos de recuperación, en esta etapa de flotación primaria o Rougher un tamaño de partícula demasiado fino causa que se produzcan lamas, mientras que un tamaño de partícula más grande causa que las burbujas no puedan llevarlas a flote y perjudicar el proceso.

Los resultados muestran como varía la recuperación y la calidad del concentrado en función de las variables estudiadas, hay un valor para cada una de estas variables en el cual se alcanza la máxima recuperación. También se observa como a diferencia de lo que se puede creer, que un exceso de reactivo o de tiempo de residencia provocaría una mejor recuperación o un concentrado de alta calidad, los ensayos evidencian que esto no es cierto, que tanto

cantidades bajas como altas de los parámetros de flotación perjudican los resultados, por lo tanto, se debe buscar el equilibrio de estos parámetros para volver lo más eficiente posible al proceso.

Los resultados muestran la importancia de evaluar cada una de las variables que intervienen en el proceso, ya que esto permite garantizar una óptima recuperación lo que se traduce en procesos eficientes y rentables. Los ensayos demuestran que cada una de las variables analizadas son claves para el proceso, ninguna de ellas puede ser optimizada de forma individual y maximizar la recuperación por si sola, es un conjunto de variables que deben ser evaluadas y optimizadas.

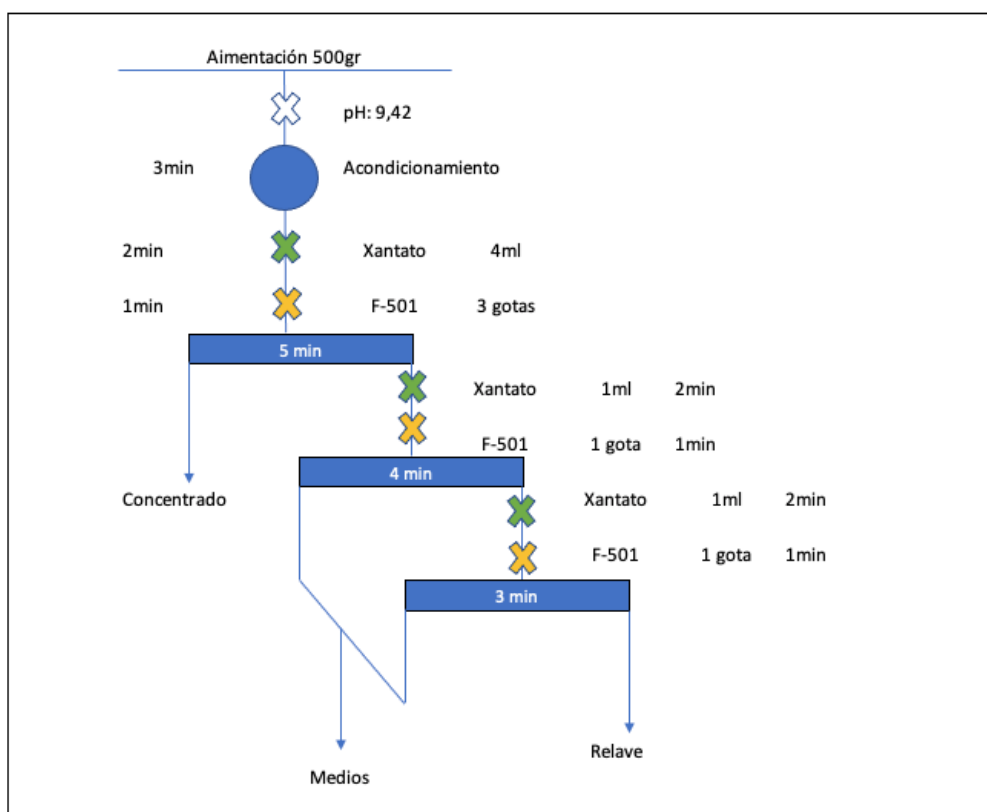


Figura 5. Esquema final de flotación Roguher.

En la figura 5 se muestra el esquema final con los mejores parámetros para obtener la máxima recuperación en la flotación Rougher de la muestra de estudio. Los parámetros son: pH igual a 9,42; 4 ml de xantato isobutílico de sodio, 3 gotas de espumante F501 y 12 minutos de tiempo de residencia. El pH es un parámetro clave para incrementar la recuperación, con valores inferiores a 9,42 la recuperación disminuye debido a que el aumento del pH favorece la acción de los reactivos (xantato y F-501) aumentando así la recuperación.

La dosificación de xantato óptima fue de 4 ml, a pesar de que todos los ensayos de este reactivo tuvieron buenos resultados, ya que la variación entre las dosis fue muy pequeña de apenas 1 ml, sin embargo, con 4 ml se obtuvo la mejor recuperación así como un buen equilibrio entre cantidad de concentrado y calidad del mismo. A pesar de la poca variación que hay entre las dosis de xantato se observa que con una dosis más baja de colector la flotación pierde eficiencia ya que se recupera mayor cantidad de concentrado pero la ley es baja, es decir, se evidencia como con poco colector la selectividad del proceso disminuye. Mientras que un exceso de este reactivo podría ocasionar que el proceso se vuelva más selectivo pero también disminuir la cantidad de concentrado recuperado y por lo tanto también podría reducir la recuperación.

En cuanto al espumante al dosis que maximiza la recuperación fue de 3 gotas, con dosis menores se recupera menor cantidad de concentrado de cobre aunque con una ley levemente más alta, es decir, con dosis inferiores a 3 gotas la espuma no es lo suficientemente estable para llevar a flote los minerales de interés por lo que se recupera poca cantidad pero el proceso es más selectivo. Como lo que se busca en la flotación Rougher es maximizar la cantidad de concentrado de cobre recuperado pero en equilibrio con una buena ley, añadir menos espumante no es lo ideal. Mientras que con una dosis más alta de este reactivo se recupera mayor cantidad de concentrado, pero en este caso la espuma se vuelve tan estable que arrastra gran cantidad de impurezas, por lo que la ley del concentrado cae desde 89.06% a 88.25%, aquí se pierde el equilibrio entre cantidad y calidad por lo que se demuestra que un exceso de espumante tampoco beneficia la flotación Roguher.

El tiempo de residencia también es un factor clave, los resultados demuestran que un lapso de tiempo muy corto no permite que los reactivos cumplan su función por lo que no se recupera una buena cantidad de concentrado, mientras que un lapso muy largo tampoco beneficia al proceso, ya que en un inicio el material flotado será más limpio, mientras pasa más tiempo el material que se lleva a la superficie tenderá a ser mineral de ganga. Por lo tanto el tiempo óptimo en este caso fue de 12 minutos.

La combinación de todos estos parámetros nos sirven para alcanzar la mayor recuperación en la flotación Rougher del mineral de estudio, lo que aplicado y adaptado a la operación de la planta contribuye y facilita la operación, lo que significa un mejor aprovechamiento de los recursos, menos pérdidas y mejores resultados.

Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Alulima y Vega (2021) en su estudio de minerales de cobre-molibdeno de la Mina Mirador, en donde alcanzaron una recuperación máxima de 91,70% para un mineral de cabeza con ley de 0,89% de Cu, con dosis de 3 ml de xantato y 2 gotas de F-501 en un tiempo de 10 minutos. Estos valores son similares a los del presente estudio, aunque es normal que difieran ligeramente debido a que el mineral de estudio no es el mismo.

Naula (2024) en su estudio "Análisis de la cinética de flotación de minerales arcillosos variando la cantidad de colectores y pH implementados en el proceso de flotación perteneciente a la zona de estudio", reporta una recuperación de 93,12% con una ley de 2,1% de Cu, esto con 3 ml de xantato y 2 gotas de espumante, con un tiempo de residencia de 10 minutos, igual que Alulima y Vega (2021) en su estudio "Análisis comparativo de parámetros de flotación en la recuperación de cobre", los valores reportados son muy similares al tiempo de residencia del presente estudio, el cual se fijó en 12 minutos, cabe mencionar que los estudios mencionados no se centraron en optimizar el proceso de flotación, sino de evaluarlo.

8. Conclusiones

- Se comparó los principales parámetros que intervienen en el proceso de flotación en la recuperación de cobre del sector Valle del Quimi, provincia de Zamora Chinchipe, mediante ensayos a nivel de laboratorio, los cuáles son: tiempo de molienda, ph, dosis de reactivo colector xantato isobutílico de sodio, dosis de reactivo espumante F-501 y tiempo de residencia.
- Una vez realizados todos los ensayos de flotación se pudo comparar como influyen los diferentes parámetros, los cuales pueden ser controlados durante el proceso, de este modo se evidenció como los valores de estos pueden variar significativamente los resultados de la flotación.
- El tiempo de molienda juega un papel fundamental, así como la dosificación correcta de reactivos, el pH de operación y el tiempo de residencia, la combinación de todos estos factores garantizan una adecuada recuperación, en este caso logrando un 92,78%.
- Se definió que el tiempo de molienda para una flotación Rougher es de 3,3 minutos para el mineral de este estudio, este tiempo nos garantiza la adecuada liberación de la partícula tomando en cuenta que un material demasiado molido produce lamas y un material muy grueso produce pérdidas en el relave.
- Se estableció que, para una correcta recuperación, la dosificación de los reactivos en una flotación Rouger es de 4 ml de xantato isobutilico de sodio y 3 gotas de F-501. Con esta dosificación de reactivos garantizamos una gran cantidad de concentrado de cobre de buena ley.
- Se pudo definir un pH óptimo de 9,42 para una correcta limpieza del concentrado de cobre y un tiempo de residencia adecuado de 12 minutos tomando en cuenta que un mayor tiempo de residencia se obtiene mayor cantidad de concentrado de cobre, pero con ley baja y un menor tiempo en cambio aumenta la ley de los relaves.

9. Recomendaciones

- Realizar una caracterización mineralógica del área de estudio, además de más pruebas de flotación con diferentes reactivos para evaluar la recuperación de cobre con otros colectores y espumantes.
- Evaluar la implementación de otros circuitos de flotación con el fin de reducir costos de producción, pero manteniendo una alta recuperación.
- Estudiar la influencia de operar en una flotación Rougher con una granulometría D80, es decir, que el 80% del material pase por la malla 200, para conocer como varían los resultados con un tamaño de partícula más fino.
- Implementar procesos de automatización que nos permitan controlar y medir los parámetros de la flotación para mejorar los resultados.

10. Referencia bibliográfica

- Ayala, M. D. (2013). Water Quality in the Mineral Processing Industry: Effects and Control Measures. In *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* (pp. 125-138). Elsevier.
- Bulatovic, S. M. (2007). *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores*. Elsevier.
- Fuerstenau, M. C., Jameson, G. J., & Yoon, R.-H. (2007). *Froth Flotation: A Century of Innovation*. SME.
- Gaudin, A.M. (1939). *Principles of Mineral Dressing*. McGraw-Hill.
- Gaudin, A. M. (1957). *Flotation*. McGraw-Hill.
- Gupta, Y. K., & Yan, D. S. (2006). *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. Elsevier.
- Herrera Urbina, R. (2003). Flotation: Theory, reagents, and practices. *Journal of Mining and Metallurgy*, 39(3), 99-117.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). (2020). *Reporte climatológico regional: Amazonía ecuatoriana*. Quito, Ecuador.
- Jameson, G. J. (1999). Hydrodynamic design of flotation machines. In *Froth Flotation: A Century of Innovation* (pp. 475-499). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Jimenez, O. (2007). *Análisis y diseño de un sistema de monitoreo de costos operacionales en línea de procesos mineros*. Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Laskowski, J. S. (2018). *Advances in flotation technology*. CRC Press.
- Liddell, J. M. C. (2011). *Flotation: A Practical Guide to Theory and Practice*. Springer.
- Lynch, A. J., & Rao, S. R. (2012). *Principles of Mineral Flotation*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2022, febrero 18). Ecuador alcanzó el nivel de exportación minera mensual más alto en su historia en enero de 2022 con USD 271,85 millones. Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. <https://www.recursosyenergia.gob.ec/ecuador-alcanzo-el-nivel-de-exportacion-minera-mensual-mas-alto-en-su-historia-en-enero-de-2022-con-usd-27185-millones/>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). (2015). *Estrategia Nacional para la Conservación de la Biodiversidad 2015-2030*. Quito, Ecuador.
- Luna Méndez, E. A., & Naula Ruilova, N. A. (2024). *Análisis de la cinética de flotación de minerales arcillosos variando la cantidad de colectores y pH implementados en el*

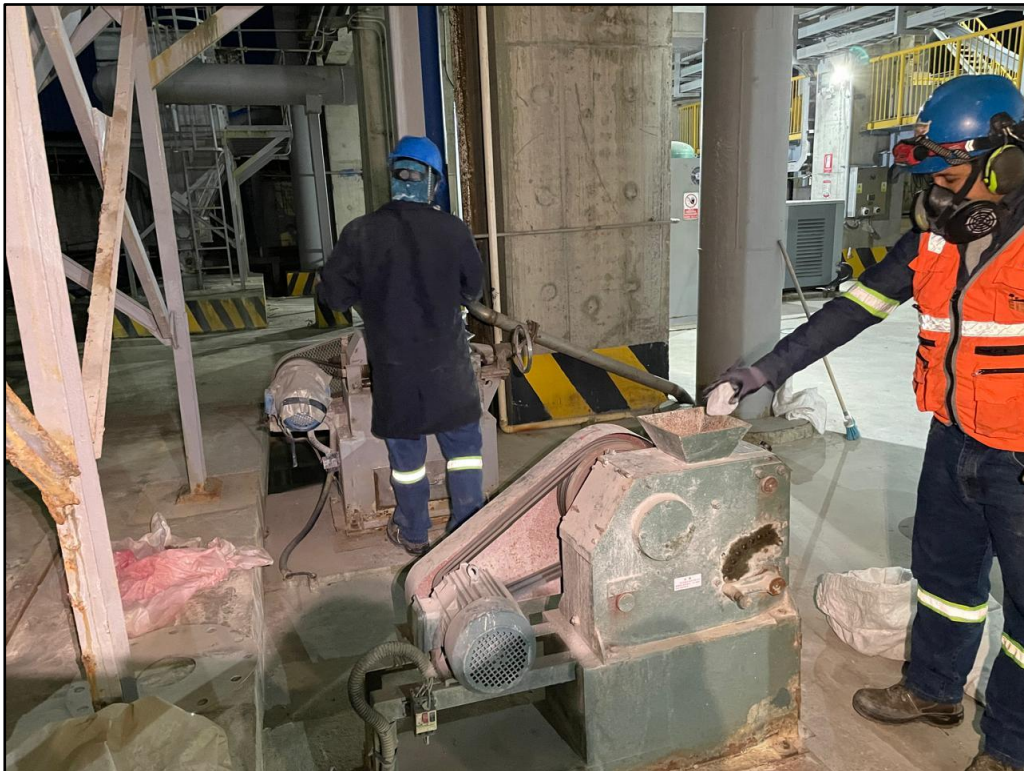
- proceso de flotación perteneciente a la zona de estudio. Tesis de maestría, Universidad del Azuay. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/15100>
- Ríos, S., Martínez, J., & Pérez, L. (2020). Caracterización y procesamiento de minerales complejos en la Cordillera del Cóndor. *Revista de Metalurgia y Minería*, 56(4), 123-135.
- Sutherland, K. L., & Wark, I. W. (1955). *Principles of Flotation*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Trahar, W. J. (1981). A Rational Interpretation of the Role of Particle Size in Flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 8(4), 289-327.
- Vega Alulima, J. F. (2021). Análisis comparativo de parámetros de flotación en la recuperación de cobre. Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). <https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/54133/T-70637%20Vega-Alulima.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Wills, B. A., & Napier-Munn, T. J. (2006). *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (7^a ed.). Butterworth-Heinemann.

11. Anexos

Anexo #1. Recolección de la muestra



Anexo #2. Trituración de la muestra



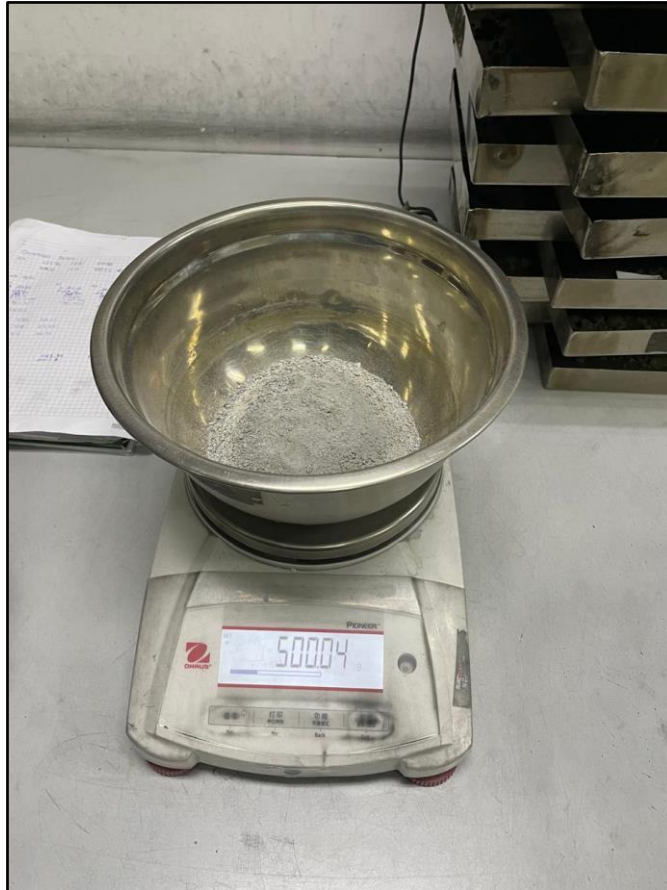
Anexo #3. Muestra tras la trituración primaria



Anexo #4. Tamizaje de la muestra (malla de 4 mm)



Anexo #5. Pesaje de las muestras para las pruebas de molienda y flotación.



Anexo #6. Molino de bolas escala laboratorio



Anexo #7. Flotación (primer banco)



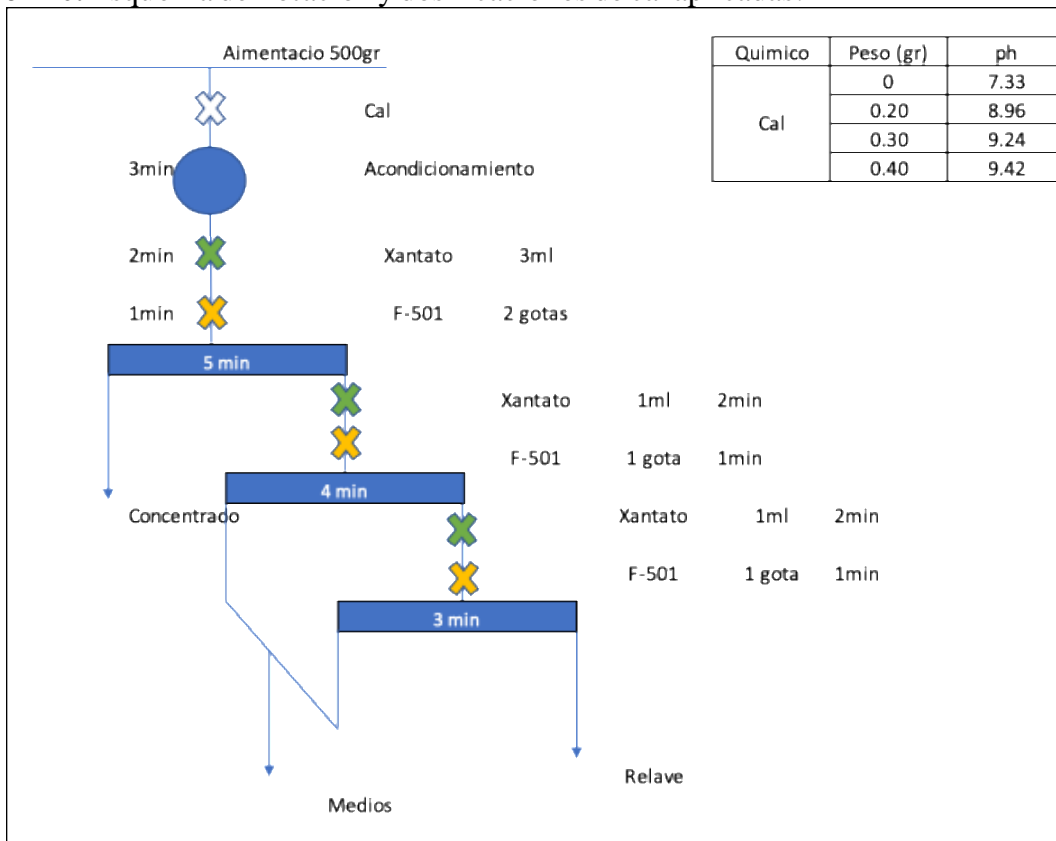
Anexo #8. Flotación medio



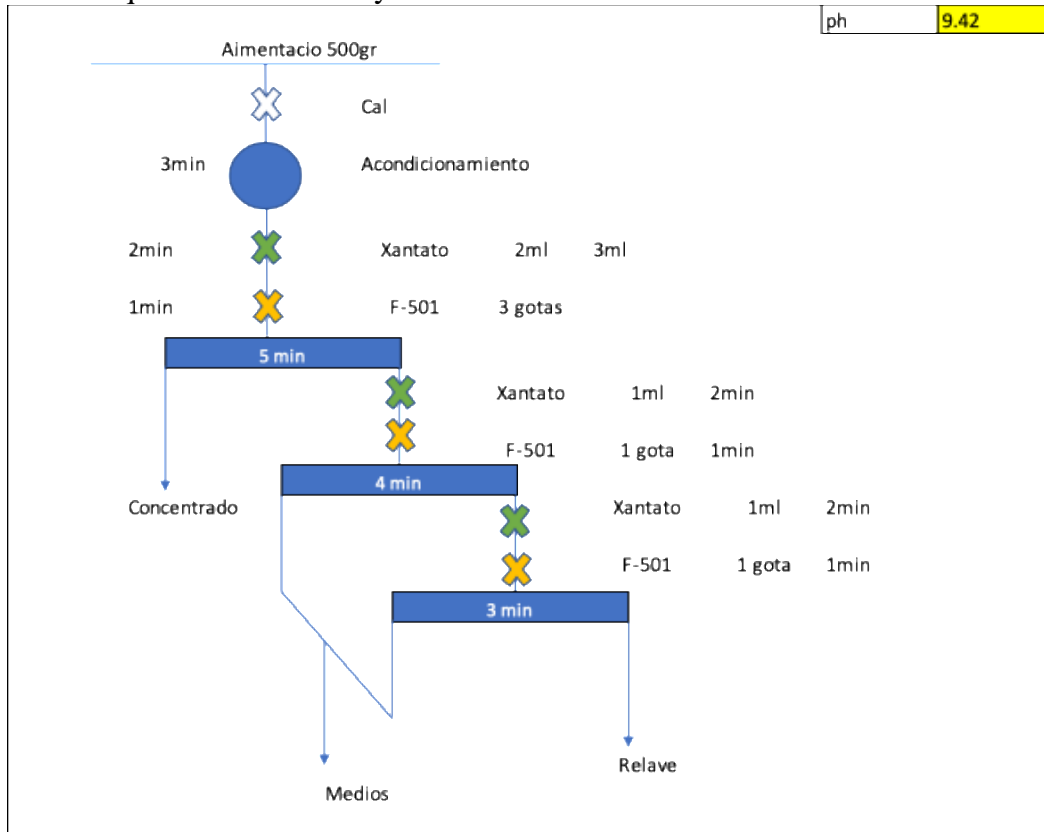
Anexo #9. Espectrómetro de absorción atómica



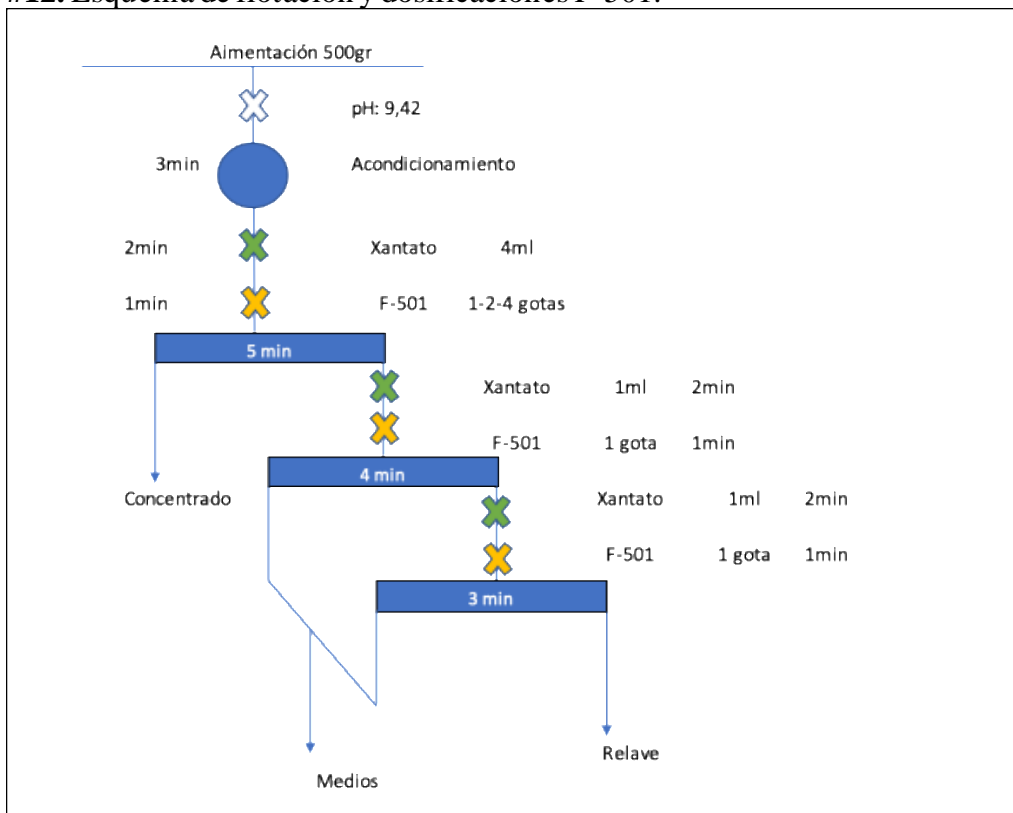
Anexo #10. Esquema de flotacion y dosificaciones de cal aplicadas.



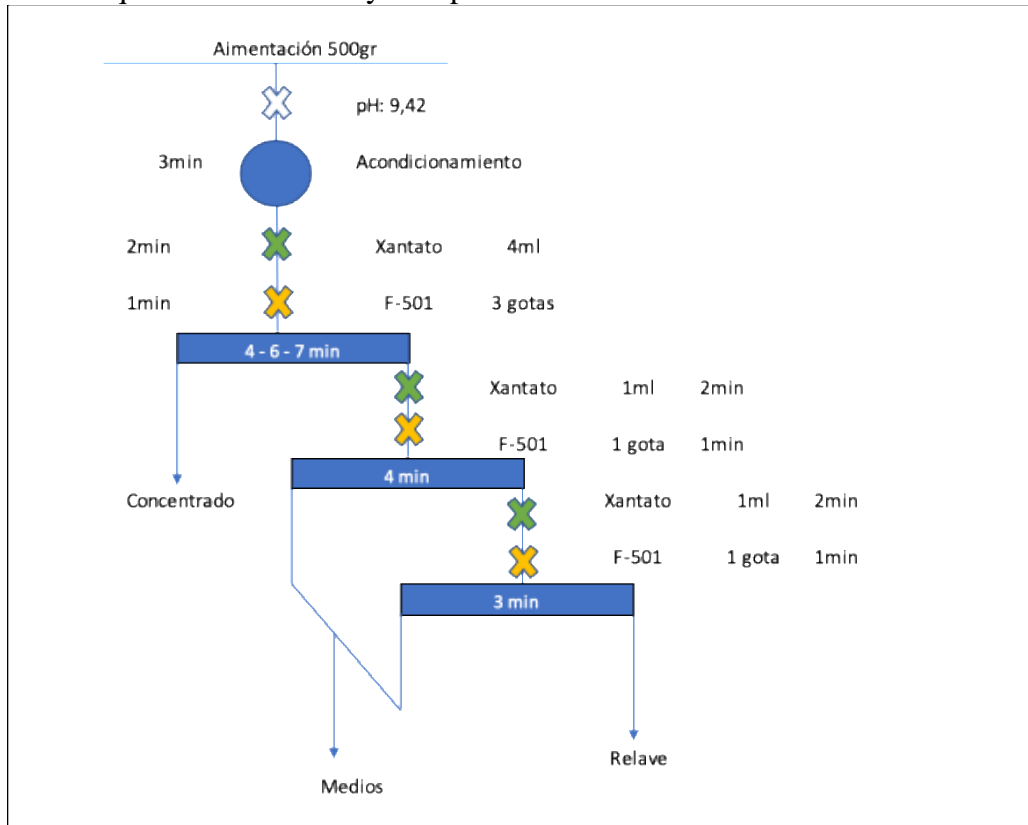
Anexo #11. Esquema de flotacion y dosificaciones xantato.



Anexo #12. Esquema de flotacion y dosificaciones F-501.



Anexo #13. Esquema de flotacion y tiempo de residencia.



Anexo #14. Diagrama del sistema de equipos de beneficio fase I de la mina Mirador

DIAGRAMA DEL SISTEMA DE EQUIPOS DE BENEFICIO FASE I DE MINA MIRADOR 米拉多铜矿一期选矿厂设备联系图

