



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Optimización de la calidad del concentrado rougher
plomo-cobre en el circuito bulk de un mineral
polimetálico mediante el proceso de flotación en Huaral-
Lima**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTOR

Hugo Eduardo CARDENAS JAIMES

Williams Thaqueschi ERAZO SUAÑA

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Cardenas, H. & Erazo, W. (2025). *Optimización de la calidad del concentrado rougher plomo-cobre en el circuito bulk de un mineral polimetálico mediante el proceso de flotación en Huaral-Lima*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Hugo Eduardo Cardenas Jaimes
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	74719935
URL de ORCID	No aplica
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Williams Thaqeschi Erazo Suaña
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47497384
URL de ORCID	No aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7411-3866
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Daniel Florencio Lovera Davila
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Manuel Prudencio Caballero Rios

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09136425
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Luis Vidarte Merizalde
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07397539
Datos de investigación	
Línea de investigación	No Aplica
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Latitud: -12.058333 Longitud: -77.083333
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023-2025
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05 Química inorgánica, Química nuclear https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.04.02 Ingeniería de procesos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú - Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

«Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana»

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS MANCOMUNADA PARA OPTAR TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el viernes 17 del mes de octubre del 2025, siendo las 12:00 m, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Davila
Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios
Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde

(PRESIDENTE)
(MIEMBRO)
(MIEMBRO)



UNMSM

Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20140922282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 30.10.2025 16:20:08 -05:00

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA Titulada: «**OPTIMIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL CONCENTRADO ROUGHER PLOMO-COBRE EN EL CIRCUITO BULK DE UN MINERAL POLIMETÁLICO MEDIANTE EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN HUARAL-LIMA**» presentada por Don: WILLIAMS THAQUESCHI ERAZO SUAÑA, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....**SATISFACCIÓN**.....

Concluida la Sustentación de Tesis Mancomunada, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

.....**CATORCE (14) APROBADO**.....

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Williams Thaqueschi Erazo Suaña**.

Siendo las **13:10** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada.

Lima, 17 de octubre de 2025


Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente


Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RÍOS
Miembro


Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro


Dr. VIDAL SIXTO ARÁMBURU ROJAS
ASESOR DE TESIS



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú - Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

«Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana»

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS MANCOMUNADA PARA OPTAR TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el viernes 17 del mes de octubre del 2025, siendo las 12:00 m, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Davila
Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios
Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde

(PRESIDENTE)
(MIEMBRO)
(MIEMBRO)



UNMSM

Firmado digitalmente por ORIHUELA
SALAZAR Luis Alfredo FAU
20148092282 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 30.10.2025 16:19:38 -05:00

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA Titulada: «**OPTIMIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL CONCENTRADO ROUGHER PLOMO-COBRE EN EL CIRCUITO BULK DE UN MINERAL POLIMETÁLICO MEDIANTE EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN HUARAL-LIMA**» presentada por Don: HUGO EDUARDO CARDENAS JAIMES, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....**SATISFACCIÓN**.....

Concluida la Sustentación de Tesis Mancomunada, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

.....**CATORCE (14) APROBADO**.....

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Hugo Eduardo Cardenas Jaimes**.

Siendo las **13:10** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada.

Lima, 17 de octubre de 2025


Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente


Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RÍOS
Miembro


Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro


Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N.º000059-2024-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis mancomunada, cuyo título es “OPTIMIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL CONCENTRADO ROUGHER PLOMO-COBRE EN EL CIRCUITO BULK DE UN MINERAL POLIMETÁLICO MEDIANTE EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN HUARAL - LIMA” presentado por los bachilleres **HUGO EDUARDO Cardenas Jaimes y WILLIAMS THAQUESCHI Erazo Suaña** para optar el título profesional de Ingeniero Metalúrgico.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **10%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 23 de mayo de 2024

Firma del Asesor

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURU ROJAS

DNI: 08608364

DEDICATORIA

A mis padres que me han sabido educar y guiar a través de cada etapa de mi vida, siempre con valores, los cuales me han ayudado a seguir adelante ante cada obstáculo que se me presentó en el camino.

AGRADECIMIENTO

El mayor agradecimiento hacia Dios, que siempre ilumina mi camino y me permite cumplir cada una de mis metas.

A mis seres queridos por su comprensión, estímulo y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

Por último, a todas las personas que de una u otra manera colaboraron en la realización de esta investigación

Hugo Eduardo Cardenas Jaimes

DEDICATORIA

A mi madre, Doris Olga Suaña Hilaes

Perdóname por no haberte compartido mis alegrías a tiempo; sé que eso dejó un vacío que siempre sentiré. Gracias por tu amor sin límites, tu paciencia infinita y tu apoyo incondicional. Cada paso que doy y cada logro que alcanzo llevan tu esfuerzo y dedicación, y esta tesis no es solo mía: es también tu triunfo, tu amor y tu fuerza.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, cuyo amor incondicional y esfuerzo constante me han impulsado a alcanzar mis objetivos personales y académicos. Gracias a ellos aprendí a perseguir mis metas con perseverancia y determinación.

A mis hermanos, por su respaldo y cariño, que me motivan a seguir adelante frente a cualquier adversidad.

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por abrirme sus puertas y ser mi casa formadora durante tantos años, brindándome conocimiento y valores que marcaron mi vida.

Y, finalmente, a todas las personas que, a lo largo de mi vida universitaria y profesional, me han brindado su apoyo, su guía y su confianza.

Williams Thaqueschi Erazo Suaña

ÍNDICE GENERAL

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS; **Error! Marcador no definido.**

DEDICATORIA	1
DEDICATORIA	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1. Situación problemática	13
1.2. Formulación del problema	14
1.2.1. Problema general	14
1.2.2. Problemas específicos	14
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivo general	14
1.3.1. Objetivos específicos	15
1.4. Hipótesis y Variables	15
1.4.1. Hipótesis	15
1.4.2. Variables	16
1.5. Justificación	17
1.5.1. Teórica	17

1.5.2. Práctica	19
1.5.3. Metodológica.....	20
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	21
2.1. Antecedentes	21
2.1.1. Internacionales	21
2.1.2 Nacionales	22
2.2. Bases Teóricas.....	24
2.2.1. Geometalurgia y procesos de flotación	24
2.2.2. Química de superficies	38
2.2.3. Características del plomo y el cobre	40
2.4. Definiciones Conceptuales.....	50
CAPÍTULO III METODOLOGÍA	52
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	52
3.2. Unidad de análisis	52
3.3. Muestra de estudio	53
3.4. Tamaño de muestra	53
3.5. Selección de muestra.....	53
3.5.1. Criterio de inclusión	53
3.5.2. Criterio de exclusión	54
3.6. Técnicas de recolección de datos	54
3.7. Análisis e interpretación de la información.....	55
CAPÍTULO IV RESULTADOS	57
4.1. Selección de una muestra representativa del yacimiento mineral y análisis químico de la investigación	57
4.1.1. Selección de muestras con distribución de partículas mixtas	57

4.1.2. Análisis físico químico de la investigación.....	59
4.2. Resultados de las pruebas experimentales para evaluar la cinética de flotación.....	60
4.2.1. Pruebas de moliendabilidad y granulometría de la muestra.....	62
4.2.2. Determinación del Work Index de la muestra.....	64
4.2.3. Pruebas iniciales para obtener la calidad y recuperación.....	66
4.2.4. Recuperación de Cu y Pb: P01 y P02.....	71
4.2.4. Recuperación de Cu y Pb: P03 y P04.....	72
4.2.5. Recuperación de Cu y Pb: P05 y P06.....	74
4.2.6. Prueba de cinética de flotación Rougher Bulk.....	77
CAPÍTULO V DISCUSIÓN DE RESULTADOS	84
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
CONCLUSIONES	88
RECOMENDACIONES.....	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
ANEXOS	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Esquema General de Trabajo</i>	58
Tabla 2 <i>Resultados del análisis químico de cabeza</i>	59
Tabla 3 <i>Resultados del análisis químico - Barrido ICP</i>	59
Tabla 4 <i>Gravedad Específica – Muestra Cabeza</i>	60
Tabla 5 <i>Resumen de análisis granulométrico del p80 del producto de la molienda.</i>	62
Tabla 6 <i>Tiempo calculado de molienda en función a las curvas de moliendabilidad obtenidas.</i>	64
Tabla 7 <i>Método de F.C. Bond para estimar el Work Index.</i>	65
Tabla 8 <i>Determinación del Work Índice por el método de Bond para molino de bolas.</i>	65
Tabla 9 <i>Resultados de la prueba inicial de recuperación mediante Excel.</i>	68
Tabla 10 <i>Detalle del reactivo AP-3418 consumido con un grado de molienda de 45% -m200.</i>	69
Tabla 11 <i>Rendimiento metalúrgico obtenido para el cobre (Cu) y plomo (Pb).</i> .	69
Tabla 12 <i>Resultados de recuperación en la prueba inicial</i>	70
Tabla 13 <i>Condiciones operativas de P01y P02</i>	71
Tabla 14 <i>Porcentaje de leyes y recuperaciones de Cu y Pb: P01 y P02</i>	71
Tabla 15 <i>Condiciones operativas de P03 y P04</i>	73
Tabla 16 <i>Porcentaje de leyes y recuperaciones de Cu y Pb: P03 y P04</i>	73
Tabla 17 <i>Condiciones operativas de P05 y P06</i>	74
Tabla 18 <i>Porcentaje de recuperación de P05 y P06</i>	75
Tabla 19 <i>Condiciones de la prueba de flotación cinética Rougher Bulk</i>	77
Tabla 20 <i>Resultados de la flotación cinética Rougher Bulk</i>	78

Tabla 21 <i>Ajuste Klimper para Cu utilizando Solver</i>	81
Tabla 22 <i>Ajuste Klimper para Pb utilizando Solver</i>	82
Tabla 23 <i>Matriz de Consistencia</i>	94
Tabla 24	95
<i>Impacto Económico y Operativo del Proceso Optimizado</i>	95
Tabla 25	96
<i>Resultados de la Determinación del Tiempo de Molienda en Bolas</i>	96
Tabla 26 <i>Resultados de la Determinación del Work Index (F.C. Bond)</i>	97
Tabla 27 <i>Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P01 de recuperación mediante Excel</i>	98
Tabla 28 <i>Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P02 de recuperación mediante Excel</i>	99
Tabla 29 <i>Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P03 de recuperación mediante Excel</i>	100
Tabla 30 <i>Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P04 de recuperación mediante Excel</i>	101
Tabla 31 <i>Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P05 de recuperación mediante Excel</i>	102
Tabla 32 <i>Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P06 de recuperación mediante Excel</i>	103
Tabla 33 <i>Diseño Experimental para la Evaluación de la Recuperación de Cobre y Plomo en Función de la Molienda y Dosificación de AP-3418</i>	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Compuestos de la alternancia de espumas.	29
Figura 2 Pola naturaleza del agua: generación de dipolos.....	30
Figura 3 Pieza de galena	42
Figura 4 Pieza de Anglesita	43
Figura 5 Pieza de Cerusita	44
Figura 6 Pieza de Calcopirita.....	47
Figura 7 Pieza de Calcosina.....	48
Figura 8 Pieza de Bornita	49
Figura 9 <i>Esquema de flotación de Rougher / Scavenger</i>	61
Figura 10 <i>Curva de moliendabilidad P80 vs tiempo</i>	63
Figura 11 <i>Curva de % -m200 vs tiempo</i>	63
Figura 14 Ecuación – Modelo Matemático Klimper	79
Figura 15 Ley – Recuperación Cu vs Tiempo (Calculado y Ajustado con Klimper)	81
Figura 16 Ley – Recuperación Pb vs Tiempo (Calculado y Ajustado con Klimper)	82
Figura 17 Gráfico de Pareto de la Ley de Cobre según la Dosificación de AP- 3418 y el % de Molienda	104
Figura 18 Efectos principales de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Cobre	105
Figura 19 Gráfico de contorno de efectos de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Cobre	105
Figura 20 Gráfico de superficie de efectos de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Cobre	106

Figura 21 Gráfico de Pareto de la Recuperación de Cobre según la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda.....	106
Figura 22 Efectos principales de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Recuperación de Cobre	107
Figura 23 Gráfico de Pareto de la Ley de Plomo según la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda	107
Figura 24 Efectos principales de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Plomo	108
Figura 25 Gráfico de contorno de efectos de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Plomo	108
Figura 26 Gráfico de superficie de efectos de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Plomo	109
Figura 27 Gráfico de Pareto de la Recuperación de Plomo según la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda.....	109
Figura 28 Efectos principales de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Recuperación de Plomo.....	110
Figura 29 Fotografía de la Preparación Mecánica de Muestras	110
Figura 30 Fotografía de la Determinación de la Gravedad Específica (Picnómetro)	111
Figura 31 Fotografía de la Moliendabilidad en Bolas y Análisis Granulométrico	111
Figura 32 Fotografía de la Determinación del Work Index.....	112
Figura 33 Fotografía de la Flotación Rougher / Scavenger Bulk (P05)	112

RESUMEN

En la presente investigación se propuso como objetivo el optimizar la calidad del concentrado de cobre plomo en un mineral polimetálico sulfurado ubicado en la provincia de Huaral - Lima. Utilizando un diseño experimental que consideró las propiedades intrínsecas de la muestra, se aplicó una metodología que enfatizó la caracterización química. Los resultados se obtuvieron a través de pruebas de flotación preliminares y definitivas, donde se variaron la granulometría y el consumo del reactivo colector AP-3418. La combinación del Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk fue importante para maximizar la calidad y la recuperación de cobre en las distintas fases del proceso. En cuanto a la granulometría, se observaron variaciones significativas en los porcentajes de calidad y recuperación para Ag, Cu y Pb. La eficiente extracción de estos elementos resalta la importancia de la combinación mencionada para optimizar el proceso considerando la calidad y la recuperación. Las conclusiones generales indican que la granulometría y el consumo del reactivo colector desempeñan roles fundamentales en la calidad del concentrado. Sin embargo, la aplicación a nivel industrial requeriría consideraciones adicionales y pruebas a nivel pilotaje y escalar a nivel industrial para confirmar la viabilidad y eficacia. Los resultados obtenidos de la investigación de la presente tesis para la prueba 5 en calidad del concentrado de cobre es de 19.02%, y consecuentemente la recuperación de cobre es del 90.09% en la categoría combinada del Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk. Este incremento destaca la importancia de esta combinación para optimizar la recuperación de cobre.

ABSTRACT

In the present investigation, the objective of optimizing the quality of the copper lead concentrate in a sulfide polymetallic mineral located in the province of Huaral - Lima. Using an experimental design that considered the intrinsic properties of the raw material, a methodology was applied that emphasized chemical characterization. The results were obtained through preliminary and definitive flotation tests, where the granulometry and consumption of the AP-3418 collecting reagent were varied. The combination of Rougher Bulk concentrate plus Rougher Scavenger Bulk concentrate was important to maximize copper quality and recovery in the different phases of the process. Regarding granulometry, significant variations were observed in the quality and recovery percentages for Ag, Cu and Pb. The efficient extraction of these elements highlights the importance of the aforementioned combination to optimize the process considering quality and recovery. The general conclusions indicate that the granulometry and consumption of the collecting reagent play fundamental roles in the quality of the concentrate. However, industrial application would require additional considerations and pilot and scale-up testing to confirm feasibility and effectiveness. The results obtained from the research of this thesis for test 5 in quality of the copper concentrate is 19.02%. and consequently, the recovery of the copper is 90.09% in the combined category of Rougher Bulk Concentrate plus Scavenger Bulk Concentrate. This increase highlights the importance of this combination to optimize copper recovery.

Keywords: flotation, copper lead concentrate, granulometry, collecting reagent.

INTRODUCCIÓN

En nuestro país, que está bendecido con múltiples especies minerales, se lleva a cabo la actividad minera desde la época prehispánica. Actualmente, el sector minero es uno de los más desarrollados del país ubicándose entre los primeros a nivel mundial en producción de diversos metales como: cobre, plomo, oro, plata y zinc.

Evaluando la geología de un determinado yacimiento, se puede determinar el proceso más eficiente a seguir con el objetivo de maximizar la factibilidad del mineral en estudio. El producto obtenido en una planta de beneficio por flotación es el concentrado final, el cual será caracterizado químicamente con el objetivo de evaluar si llega a un grado comercial.

La flotación de minerales polimetálicos es una práctica muy común en plantas de beneficio de la pequeña minería en la sierra de Lima. En dichas plantas metalúrgicas se procesan minerales sulfurados polimetálicos con contenidos mayormente de calcopirita y galena, esfalerita y pirita.

El presente trabajo de investigación consiste en evaluar dos parámetros de flotación específicos, los cuales son: la granulometría y consumo del reactivo colector AP-3418 con el objetivo de mejorar el grado de Concentrado Rougher cobre plomo cuando se procesa un mineral polimetálico sin afectar notablemente la recuperación. El mineral para estudiar proviene de la provincia de Huaral.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación problemática

En dicha zona en particular, se trabajan con minerales polimetálicos sulfurados con alto grado de cobre, plomo y zinc. El proceso utilizado es el de flotación, el cual consiste en recuperar las principales menas de cobre, plomo y zinc, llegando a una recuperación de 89.91% Cu. El principal problema observado en el circuito bulk es el alto desplazamiento de minerales de hierro y zinc. La presente investigación surge de la necesidad de implementar proyectos de optimización que garanticen una mejora en la calidad del Concentrado Bulk. En este contexto, se llevó a cabo una evaluación de dos parámetros específicos, tales como, la granulometría y el consumo del reactivo colector AP-3418, utilizado en el proceso de flotación. La determinación de estos parámetros se realizó basándose en la experiencia operativa del proceso, considerando los rangos de trabajo usualmente aplicados en planta, los resultados obtenidos en campañas anteriores y la observación directa del comportamiento metalúrgico bajo diferentes condiciones de molienda y dosificación del colector. Esta experiencia permitió establecer condiciones de referencia realistas y representativas para evaluar su influencia en la recuperación y en la calidad del concentrado bulk.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

La obtención de concentrados de baja calidad en la planta de flotación representa un desafío. Es por ello que se considera prioritario optimizar el grado de los concentrados Rougher de cobre y plomo, sin afectar las recuperaciones globales. Este enfoque se justifica porque la etapa Rougher constituye la fase inicial y más determinante del proceso de flotación, donde se logra la mayor recuperación de las especies valiosas

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo y de qué manera interviene la granulometría, considerado uno de los principales parámetros operativos en flotación, en la calidad del Concentrado Rougher en el circuito Bulk?
- ¿De qué manera afecta la variación del consumo del reactivo colector AP-3418 en la calidad del Concentrado Rougher en el circuito Bulk cobre plomo?
- ¿Cómo aplicar los resultados obtenidos a nivel de laboratorio para optimizar el proceso a nivel industrial?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Optimizar la calidad del concentrado cobre plomo evaluando la granulometría y el consumo del reactivo colector AP-3418 en el circuito bulk de un mineral polimetálico sulfurado ubicado en la provincia de Huaral - Lima.

1.3.1. Objetivos específicos

- Evaluar la granulometría en el circuito bulk para mejorar la calidad del concentrado cobre plomo.
- Evaluar el consumo del reactivo colector AP-3418 en el circuito bulk para mejorar la calidad del concentrado cobre plomo.
- Sugerir ajustes a nivel industrial, orientados a mejorar la calidad de los concentrados de cobre y plomo.

Importancia y alcance de la investigación

La presente investigación busca eliminar la presencia de impurezas (como hierro y zinc) en el concentrado rougher de cobre y plomo en el circuito bulk, aumentando su pureza y valor en el mercado. Un concentrado de mayor calidad no solo obtiene mejor precio en el mercado, sino que también reduce los costos y dificultades en etapas posteriores de procesamiento.

El alcance del proyecto de investigación está determinado para implementarse en una planta metalúrgica.

1.4. Hipótesis y Variables

1.4.1. Hipótesis

Será posible optimizar la calidad del concentrado Rougher de cobre y plomo en el circuito bulk del mineral polimetálico, mediante la variación de la granulometría y del consumo del reactivo colector AP-3418, en las operaciones de flotación realizadas en la

provincia de Huaral, Lima, manteniendo la recuperación global de cobre y plomo dentro de rangos operativos aceptables.

Hipótesis Específica 1

Es posible que el ajuste de la granulometría a un P80 adecuado mejorará la liberación de minerales valiosos y aumentará la selectividad del proceso de flotación

Hipótesis específica 2

La dosificación óptima del reactivo colector AP-3418 permitirá optimizar la calidad de los concentrados cobre plomo en el proceso de flotación disminuyendo las activaciones de Hierro y Zinc en el circuito bulk.

Hipótesis específica 3

La aplicación de los resultados obtenidos a nivel laboratorio permitirá optimizar la calidad de concentrados a nivel industrial.

1.4.2. Variables

Se determinaron las variables independientes (a manipular, causa del efecto) y dependientes (resultado de la variable independiente) en el proceso de flotación de especies de minerales de cobre y plomo; siendo las siguientes:

Variables independientes

- Granulometría del mineral: Determinada mediante análisis granulométrico, cálculo del P80 y % malla -200, conforme a los procedimientos establecidos en el laboratorio metalúrgico

- Consumo del reactivo colector AP-3418: Determinado por dosificación controlada durante los ensayos de flotación en laboratorio, expresada en gramos por tonelada (g/t) de mineral alimentado.

Variables dependientes

- Calidad del concentrado de cobre plomo: Determinada mediante análisis químico, expresada en porcentaje de cobre y plomo contenidos en el concentrado obtenido.
- Recuperación del concentrado de cobre plomo: Calculada a partir de los balances metalúrgicos de masa y ley, considerando la proporción del metal contenido en el concentrado respecto al metal total en la alimentación.

1.5. Justificación

1.5.1. Teórica

La investigación se sustenta teóricamente en la necesidad de mejorar la eficiencia del proceso de flotación para incrementar tanto la calidad como la recuperación de los minerales valiosos. Se fundamenta en los principios de la metalurgia extractiva y la teoría de flotación, que establecen que la rentabilidad de una operación minera depende directamente de la calidad del concentrado obtenido y de su contenido metálico. Un concentrado con mayor ley de cobre o plomo no solo incrementa el valor de venta, sino que además reduce los costos de tratamiento y penalizaciones por impurezas como hierro o zinc, las cuales afectan el valor neto pagado por las fundiciones. Según la literatura técnica (Wills, 1989; Fuerstenau, 2007; Alvarado & Plasencia, 2016), un incremento de 1 % en la ley de cobre en el concentrado

puede representar un aumento aproximado de 35 a 70 USD por tonelada de concentrado, dependiendo del contrato comercial y la pureza alcanzada.

Considerando una cotización promedio del cobre en la LME durante 2024 de 8 000 USD/t Cu, la mejora en la calidad del concentrado permite obtener un precio neto superior, ya que las fundiciones pagan primas por concentrados de mayor ley y descuentan penalizaciones por contaminantes. De este modo, la optimización metalúrgica contribuye directamente a la sostenibilidad económica de la operación, al maximizar la recuperación útil de los metales y minimizar las pérdidas en colas. Por lo tanto, teóricamente el estudio se justifica en la relación directa entre la calidad metalúrgica y la rentabilidad minera, demostrando que la mejora en la granulometría y el consumo adecuado del colector AP-3418 influye de manera determinante en la selectividad y eficiencia del proceso de flotación.

1.5.2. Práctica

Desde una perspectiva práctica, la investigación aborda los problemas operativos del circuito bulk rougher de la planta polimetálica ubicada en Huaral – Lima, donde se ha evidenciado una disminución en la calidad del concentrado cobre-plomo debido al arrastre y activación de minerales de hierro y zinc. El trabajo busca optimizar la granulometría de molienda y la dosificación del colector AP-3418, con el propósito de obtener un concentrado de mayor pureza sin comprometer la recuperación metalúrgica. Esta optimización tiene un efecto económico directo:

Un concentrado con 19 % de Cu puede alcanzar en el mercado un valor superior en 50 a 60 USD por tonelada respecto a uno con 17 % de Cu, gracias a bonificaciones aplicadas por las fundiciones internacionales. Además, evitar penalizaciones por exceso de hierro o zinc (que pueden llegar a 20–30 USD/t) representa un beneficio adicional. En conjunto, una mejora de dos puntos porcentuales en la ley del concentrado podría traducirse en un incremento neto de 70 a 90 USD por tonelada de concentrado. Para una planta que produce alrededor de 1 000 toneladas de concentrado al mes, esto equivaldría a un beneficio económico adicional de 70 000 a 90 000 USD mensuales, solo por optimización operativa sin necesidad de nuevas inversiones en infraestructura.

Los resultados de la investigación, por tanto, tienen una aplicación directa en la toma de decisiones operativas, ya que proporcionan parámetros óptimos de molienda y dosificación que pueden implementarse en la planta para aumentar el valor del producto final y mejorar la eficiencia global del proceso. De esta forma, el estudio contribuye tanto al avance técnico en flotación de minerales polimetálicos como al fortalecimiento económico y sostenible de la minería en la región de Huaral-Lima.

1.5.3. Metodológica

La metodología seleccionada para la investigación se justifica para abordar la problemática planteada. El enfoque en la optimización de la calidad del concentrado rougher implica la aplicación de técnicas de flotación y análisis de datos. La metodología se apoya en la recolección de datos representativos, la aplicación de pruebas metalúrgicas específicas y la utilización de herramientas analíticas para evaluar la eficacia de las modificaciones propuestas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

El estudio de Maldonado, C., & Farías, M. (2018), “Evaluación de la eficiencia de flotación en función de la granulometría y los colectores utilizados” analiza el impacto de la granulometría en la eficacia de la flotación de minerales, centrándose especialmente en los colectores empleados. Los investigadores analizan cómo distintos tamaños de partículas influyen en la absorción de reactivos colectores como el AP 3418, un reactivo común en la flotación de minerales sulfurados. El texto resalta que una granulometría más fina puede potenciar la flotación, aunque conlleva desafíos como un aumento en el consumo de reactivos. La investigación propone tácticas para potenciar la eficacia del procedimiento sin incurrir en costos operativos excesivos.

El estudio de Martínez, L. (2020) "Estudio de la influencia de la granulometría y reactivos en la flotación de concentrados bulk." Se examinó el impacto de la granulometría y la dosificación de los reactivos en la flotación de concentrados bulk, un proceso de flotación complejo que involucra diferentes tipos de minerales. La tesis se enfoca en cómo diferentes tamaños de partículas afectan la interacción entre los reactivos, especialmente los colectores como el AP 3418, y las partículas minerales. Además, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de la cinética de flotación, demostrando que la relación entre el tamaño de las partículas y los reactivos es crucial para mejorar la selectividad del proceso. Como resultado, se sugiere

optimizar tanto el tamaño de las partículas como la dosificación de los reactivos para lograr una mejor separación de los minerales valiosos y reducir los costos operativos.

En cuanto al estudio de Vásquez, J. (2021) "Optimización de la flotación de minerales de cobre: Efecto de la granulometría y colectores en el proceso." Se analizó cómo la variación en la granulometría de los minerales de cobre, combinada con la selección de colectores adecuados, puede mejorar el proceso de flotación. En este estudio, se exploran distintos tamaños de partículas y se analiza la respuesta del proceso ante la adición de diversos colectores, con el propósito de optimizar tanto la recuperación como la calidad del concentrado. Los resultados obtenidos revelan que las partículas de mayor tamaño requieren concentraciones más elevadas de colectores para lograr rendimientos satisfactorios, en contraste, para las partículas más pequeñas, se observa una mejora en la eficiencia de recuperación con una dosificación más precisa y ajustada del reactivo.

2.1.2 Nacionales

Torres, S. (2019) en su estudio titulado "Flotación de minerales: Optimización de la dosificación de colectores y variación de granulometría" se centra en mejorar el proceso de flotación de minerales de cobre, específicamente en la dosificación de colectores y la variación de la granulometría. Se examina cómo el tamaño de las partículas afecta la adsorción de colectores, como el xantato, y cómo ajustar la cantidad de reactivo para obtener mejores resultados en la flotación. Los resultados muestran que una granulometría más fina mejora la eficiencia de la flotación, pero también aumenta el consumo de reactivos. Como conclusión, se ofrecen recomendaciones prácticas para manejar la granulometría y la

dosificación de reactivos con el fin de optimizar la recuperación sin comprometer la selectividad del proceso.

Sacsi (2022) en su tesis de grado que lleva por nombre “evaluación del circuito de remolienda para la optimización de la flotación cleaner en la unidad minera Constancia” teniendo por objetivo el de evaluar y optimizar el procedimiento de remolienda en planta concentrado de la unidad de minería Constancia. Es por ello por lo que se planteó una metodología con concentración cuantitativa, de la clase aplicativa y tecnológica, contando con una evaluación de la planta específicamente de los concentrados Rougher, con análisis químico y microscópico. Se concluye que es posible optimizar la recuperación de cobre, con el uso del molino Isamill en el proceso de remolienda, así como se muestra en las fotografías micrográficas, donde se puede observar un tamaño menor de partícula y la poca presencia de material contaminante asociado al mineral de cobre. También en el resultado microscópico del P80 de remolienda se observa que el tamaño de partícula se encuentra en un rango de 30 a 55 micras, con un promedio de 33 micras.

El estudio de López, M. A (2020) se centra en el impacto de la variación en la granulometría de los minerales de cobre en la eficiencia del proceso de flotación, especialmente en lo que respecta a la recuperación de cobre. Se investigan diferentes tamaños de partículas y su influencia en la flotación de los minerales, al mismo tiempo que se evalúa la dosificación de colectores, como el xantato, y su función en la mejora de la recuperación. Los resultados sugieren que ajustar el tamaño de las partículas puede optimizar el rendimiento del proceso, pero debe ser equilibrado con la cantidad adecuada de reactivos

para evitar costos adicionales en el consumo de dichos reactivos, al tiempo que se mantiene una alta eficiencia.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Geometalurgia y procesos de flotación

Geometalurgia: Es una disciplina cuyo objetivo principal es caracterizar y modelar diferentes parámetros de los minerales, como la moliendabilidad, dureza (work index) y la recuperación (tomando en cuenta la forma, liberación y estructura del mineral), entre otros; además de la calidad de la pulpa o el concentrado mineral. La geometalurgia integra las características mineralógicas y fisicoquímicas de los materiales, con el fin de predecir el rendimiento metalúrgico de los mismos, y de esta manera, ayuda a reducir la incertidumbre, estimar el valor económico del yacimiento minero, planificar de forma óptima la extracción de las especies minerales valiosas y reducir el riesgo financiero del minado y procesamiento de minerales (Velarde & Osorio, 2009; Canchanya & Yancé, 2019).

El procesamiento geo metalúrgico de los minerales comprende varios métodos de concentración que se clasifican según las propiedades de los minerales a separar, y entre ellos, uno de los más importantes es el de flotación, el cual se describe a continuación.

Procesos de flotación de minerales: La alternancia de los minerales responde al método de división y concentración mineral (división de materias de diferentes fuentes) efectuadas a partir de sus acuosas pulpas, a través de burbujas gaseosas, de acuerdo con las diferencias entre las hidrofóbicas e hidrofílicas particularidades entre las partículas minerales y el agua (Azañero, 2015). En flotación, la propiedad que determina su concentración es la

superficie de partículas de diferentes minerales y sus características fisicoquímicas. La recuperación metalúrgica, al representar la cantidad de contenido metálico producido por unidad de contenido metálico alimentado, es el principal indicador de eficiencia en la flotación, impactando de forma directa a las ganancias de la compañía (Silvestre, 2007).

Una metodología completa para evaluar y optimizar los procesos de flotación dentro de la planta de procesamiento y acumulación mineral se puede resumir de la manera siguiente (Montes, 2015):

1. Seleccionar muestras representativas del yacimiento mineral, considerando la variabilidad geológica, mineralógica y metalúrgica.
2. Realizar análisis mineralógicos de las muestras seleccionadas, utilizando técnicas como microscopía óptica, difracción de rayos X, análisis químico o espectroscopía infrarroja.
3. Efectuar pruebas de conminución o moliendabilidad de las muestras, utilizando equipos como molinos de bolas, molinos de barras o trituradoras de mandíbulas, para determinar el work index de cada muestra, que es una medida de la resistencia del mineral a la molienda.
4. Realizar pruebas de cinética de flotación en laboratorio, utilizando diferentes estados de molienda, dosis reactivas, lapsos de flotación y pH, para determinar los parámetros cinéticos de flotación de cada muestra, como la recuperación máxima, la continua rapidez, el orden de las reacciones y el grado de liberación.
5. Establecer modelos matemáticos que relacionen los parámetros cinéticos de flotación con las características mineralógicas, granulométricas y de work index de las muestras, utilizando técnicas como regresión lineal, análisis de componentes principales o árboles de decisión.

6. Validar los modelos matemáticos con datos de planta o de pruebas piloto, comparando los resultados de recuperación y ley de concentrado.

7. Aplicar los modelos matemáticos para simular el comportamiento de la flotación en diferentes escenarios de operación, como cambios en el tonelaje, la granulometría, el work index, el pH o la dosis de reactivos.

8. Identificar las oportunidades de mejora y las limitaciones del proceso de flotación, así como los factores críticos que afectan su rendimiento.

9. Proponer estrategias de perfeccionamiento del procedimiento de alternancia, como ajustes en el circuito, la selección de reactivos, el control de calidad o la gestión ambiental.

Dentro del proceso de flotación existen varios elementos importantes, como la concentración de minerales, circuitos básicos de flotación, flotación colectiva, flotación selectiva, flotación por espumas, y las variables del proceso de flotación, los cuales se describen a continuación

Concentración de minerales: Los minerales y metales de importancia comercial están solos de manera poco frecuente en su natural condición de forma y magnitud de pureza que su utilización práctica demanda, ya que, excepcionalmente, crean combinaciones químicas o físicas o las dos al mismo tiempo, con las demás sustancias carentes de valoración. Es por ello que, tenemos que proceder a dividirlos de esas sustancias desprovistas de valoración, mediante técnicas físicas si se puede, pues, de no ser posible, se recurre a procedimientos de la química (Taggart, 1968).

Circuitos básicos de flotación: Los circuitos de alternancia mantienen un procedimiento constante, y los mismos están compuestos por celdas que se organizan en un banco formando una secuencia. La pulpa ingresa en el banco en su celda primera y desprende

unos de los minerales propios valiosos tal cual burbujas. De esta celdilla, el agua desbordada se mueve a la siguiente, eliminando la espuma mineral adicional, y así sucesivamente hasta llegar a la celdilla última en el banco.

La altitud de la columna espumante se ajusta controlando la puerta trasera, y la distinción de altitud dentro de esta puerta y la orilla del desborde determina la altitud de la espuma. En la primera celda, la presencia de muchas partículas minerales hidrofóbicas mantiene la columna de espuma alta. La última celda, conocida como celda scavenger, tiene una mineral espuma débil formada por partículas hidrofóbicas en forma débil.

Las celdillas Scavenger generalmente contienen una mezcla de partículas que se recirculan. A menudo, las celdillas scavenger poseen poca cantidad de minerales a fin de originar una alta espuma, lo que lleva a que las colas sobresalgan arriba de la orilla de la celdilla. Esto asegura que la materia suspendida se recupere y pueda lograrse el rescate máximo en la célula.

Es esencial evitar una carga excesiva incluso si el origen alimentador está diluido y es corto el lapso. Para un funcionamiento eficiente, se necesita un cuidado y control especial para conservar la acumulación a un nivel uniforme, especialmente cuando la ganga tiene flotabilidad y los niveles de cabeza varían.

Un enfoque preferido implica disolver las acumulaciones en el banco en las celdillas primeras, conocido como gruesa alternancia, y luego hacer que floten de nuevo en las celdillas para ser lavados (cleaner). Aquí, se mantienen bajos los desagües a fin de conservar un nivel de la espuma alto y generar acumulaciones de buena calidad.

En el método para limpiar de manera gruesa (rougher), cleaner y scavenger, la celdilla para limpiar recepciona más energía, mientras que la parte scavenger maneja el aire excesivo a fin de lograr un rescate máximo. La secuencia de la celdilla para lavado por lo general posee aerófilas partículas de minerales, las cuales, con frecuencia hacen recirculación a las gruesas celdillas (rougher) previo a su regreso al scavenger (Blazy, 1990).

Flotación colectiva: Conjunto de operaciones donde se producen la desunión en dos agrupaciones, de los que, uno, es el acumulado el cual contiene al menos dos o más productos de interés (Blazy, 1990).

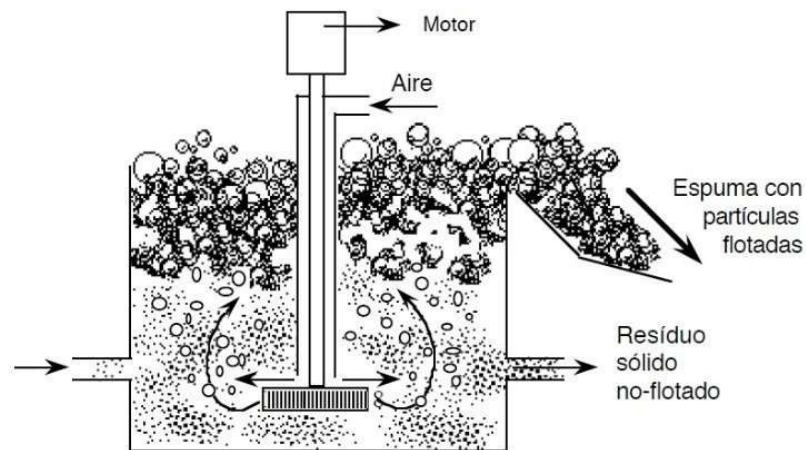
Flotación selectiva: En un proceso de flotación, el nombre sugiere que la selección de minerales ocurre por la selectiva acción de reactores. Esta acción permite que, en cada una de las fases, un único mineral flote. La máxima magnitud de partículas suspendidas es dependiente de la naturalidad de su densidad y de las mismas partículas. Es por ello que, al practicarlo, la máxima magnitud de partículas de sulfuro es 0,15 a 0,25 mm, para carbón de 1 a 2 mm y para nativo azufre es 0,5 a 1 mm. (Blazy, 1990).

Flotación por espumas: El procedimiento de alternancia está basado en hidrofóbicas e hidrofílicas particularidades de sólidos a ser separados, lo que se refiere a cómo interactúan estos sólidos con el agua, es decir, su capacidad para ser mojados. Algunos materiales, como metales naturales, sulfuros metálicos, grafito, carbón bituminoso y talco, muestran una baja afinidad por agua y se denominan minerales hidrofóbicos naturalmente. Por otro lado, los minerales tal como carbonatos, silicatos, sulfatos y óxidos son hidrofílicos, lo que indica que pueden ser mojados por el agua (Blazy, 1990).

Fases en la flotación por espumas: La alternancia de espuma responde a un procedimiento que no es uniforme. Es decir, se compone de una infinidad de etapas de gases (burbujas), líquidos (agua) y sólidos (minerales). Para entender este procedimiento se requiere analizar las fisicoquímicas propiedades de las minerales superficies, sus asociaciones de etapas sólidas, etapas líquidas y etapas gaseosas, además de sus interfaces. (Wills, 1989).

Figura 1

Compuestos de la alternancia de espumas.



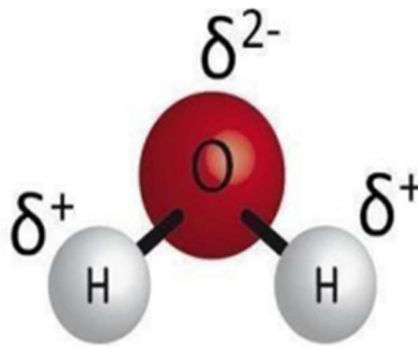
Nota: La figura representa los componentes presentes en la flotación por espumas. Tomado de (Ingeniería Metalúrgica) (p.55), por Wills, 1989, Editorial Barcelona.

a) Fase gaseosa: generalmente se compone de aire o posiblemente cualquier gas, el cual es introducido y dispersado en burbujas de menor tamaño.

b) Fase líquida: se compone de agua, que lleva reactores. El agua tiene el efecto de polarizar y provocar la superficial hidratación de algunos minerales presentes en la acuosa

solución. Esta fase también puede contener iones como Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , $\text{SO}_4^{=}$, entre otros, así como suciedad e impurificantes de la naturaleza.

Figura 2
Pola naturaleza del agua: generación de dipolos.



Nota: La representación gráfica muestra los fundamentales elementos involucrados en el procedimiento de alternancia por espuma. Extraído de (Ingeniería Metalúrgica) (p.57), por Wills, 1989, Editorial Barcelona.

El oxígeno tiene una alta electronegatividad, lo que lo lleva a atraer fuertemente los electrones en la molécula, causando una exposición de los protones (+) del hidrógeno. Esto resulta en la formación de un dipolo, con un borde de la molécula actuando como cátodo y el otro como ánodo.

En la etapa sólida, se encuentran fragmentos de minerales triturados de manera fina cuyas superficiales propiedades dependen de su composición y estructura. En esta etapa, factores como la creación de propiedades superficiales en la ruptura del sólido (fortaleza del enlace del residuo, clase de superficie,), naturales defectos en el entramado transparente (reemplazos de iones, vacantes, etc.), contaminación por sólidos, líquidos y gases (oxidación de la superficie, etc.) y oligoelementos presentes desempeñan un papel crucial. Estos oligoelementos pueden concentrarse en el exterior de los fragmentos, ejerciendo un impacto

mayormente significativo que su acumulación en el mismo mineral en su conjunto. (Wills 1989)

Variables del proceso de flotación: Las principales variantes que actúan dentro del procedimiento de alternancia se describen a continuación.

a) Reactivos de flotación: Los reactantes de alternancia son el elemento más crucial y decisivo en el procedimiento de alternancia, ya que este procedimiento no es posible realizarlo sin estos reactivos. Su función principal radica en la división de los valiosos minerales de la mezcla.

b) Colectores: Los recolectores por lo general, son orgánicos componentes heteropolares que crean una capa de hidrocarburo en los fragmentos minerales que están en la suspensión acuosa. Dado que solo los hidrocarburos pueden flotar, las propiedades de estos compuestos están estrechamente reguladas. Las interfaces sólido-líquido y líquido-gas desempeñan un papel crucial en la formación de estables contactos, y la tarea del recolector es influir en estas interfaces en el sentido que se desea.

La absorbencia de recolectores en el exterior del mineral, que implica en el sólido la concentración de solutos, puede verse posibilitada por el potencial bajo electromotor, lo cual disminuye significativamente la cubierta humedecida del mineral y su unión a las burbujas presentes con aire.

Los colectores se clasifican en dos grupos principales:

1. Colectores aniónicos o thiol: En estos colectores, los grupos polares contiene azufre bivalente y se utilizan a menudo para aglutinar sulfuros. Los más importantes de estos tipos de colectores son:

- **Xantatos:** El término Xantato se origina en el término griego "XANTOS", el cual quiere decir amarillo, y es utilizado tal cual reactante en el proceso de alternancia. Se trata de un colector altamente efectivo compuesto por disulfuro de carbono, un álcali (como potasio o soda cáustica) y un alcohol (como metanol, etanol, etc.). Estos productos se fabrican comercialmente a partir de alcoholes con cadenas de carbono que constan de 2 a 6 átomos en general. Los xantatos que contienen más de 6 átomos de carbono tienden a ser menos eficaces en comparación con aquellos derivados de alcoholes con cadenas de carbono más cortas. Bajo las condiciones adecuadas, el xantato se revela como un acelerador excelente para minerales de azufre en general.

2. Colectores catiónicos: Estos colectores generan hidrofobicidad al unirse a las secuencias de hidrocarburos, que a su vez se juntan con las agrupaciones polares con carga positiva. En general, están conformados por cuaternarias y primarias aminas a menudo se derivan de naturales grasas. A fin de optimizar que es soluble, estas aminas se presentan como acetatos o cloruros. La característica distintiva de estos colectores de cationes es el pentavalente nitrógeno presente. Se destacan dada su posibilidad tanto de desorción como de adsorción la cual depende de su acumulación en pulpa. Sin embargo, su selección es menor en comparación con los colectores de aniones.

Se utilizan principalmente en la alternancia de no metálicos minerales, tal como aluminosilicatos, silicatos, cuarzo y diversos tipos de óxidos. (Wills 1989).

- **Modificadores:** Reguladores, el propósito de este conjunto de reactivos, conocidos como modificadores de pH y dispersores, es regular la acidez o alcalinidad para contrarrestar los impactos de barras que no se desean, coloides y disueltas sales. Es crucial mantener monitoreo preciso del pH por estas razones. Entre los reactantes utilizados de manera común a fin de ajustar el pH se encuentran la cal y el carbonato de sodio para elevarlo, mientras que el hidróxido de carbonato, el dióxido de azufre, el ácido clorhídrico, el ácido sulfúrico y el amonio se utilizan para reducirlo. Además, la soda cáustica puede ser utilizada con el fin de elevar el pH. El silicato de sodio, por otro lado, es utilizado como un dispersante en el fluido laminar.
- **Activadores:** Los reactantes activadores se emplean en el procedimiento de alternancia de minerales que, debido a su composición o propiedades, resultan con dificultad o imposibilidad para suspenderse en el líquido solamente con usar espumantes y promotores. Una clásica ejemplificación de esta clase de reactantes es el sulfato de cobre, usado con el fin de estimular la flotación de minerales como los sulfuros de hierro, la esfalerita y, en ciertos hechos, la arsenopirita. Las demás ejemplificaciones integran el sulfuro de sodio y el ácido sulfhídrico, que se utilizan con el fin de recubrir con una sulfurosa película a los minerales compuestos por cobre y carbonato de plomo. Además, el acetato de plomo y el nitrato de plomo se emplean como activadores de la estibina y con la finalidad de

optimizar la alternancia de algunos no metálicos minerales mediante la utilización de promotores de tipo ácido graso.

- **Depresores:** Los reactivos depresores se emplean para la separación de minerales cuya flotabilidad es similar cuando están presentes uno o más promotores. Mientras tanto, los agentes espumantes son compuestos orgánicos insolubles en agua, los cuales facilitan la división de hidrófilas e hidrófobas fragmentos. La espuma que se genera mediante la introducción o la agitación de aire y demás gases posee una utilidad sumamente breve en aguas limpias (se aproxima a una centésima por cada segundo) y tiene la tendencia a reordenarse, lo cual garantiza en la espuma su equilibrio y previene la pérdida de partículas atrapadas que podrían caer de vuelta a la pulpa. Durante el proceso de recuperación, se incorporan compuestos efervescentes, como el aceite de pino y el creso, que actúan como agentes espumantes al generar ácido creso y alcoholes de cadena larga. (Wills 1989)

b) Granulometría de la mena: La metalurgia ha evidenciado que hay ciertos tamaños de grano que demuestran una mayor resistencia, y esta resistencia tiende a disminuir tanto en partículas más gruesas como en partículas más finas. Las partículas más pequeñas suelen carecer de la cinética energía suficiente con el fin de formar conglomerados de fragmentos o estables burbujas, lo cual resulta en un menor rescate por la lo difícil que es que las burbujas o fragmentos se adhieran entre sí. En otro sentido, un incremento en la rapidez en la sedimentación facilita el desagüe de los residuos y promueve la conducción de fragmentos pequeños en la espuma. (Manzaneda 2000).

c) Densidad de pulpa o porcentaje de sólidos: El contenido de sólidos en la pulpa, o la densidad de la pulpa, en el proceso de alternancia de minerales se establece en la fase de clasificación y del molido. Este aspecto es crítico, ya que la eficiencia de la flotación mineral depende en gran medida de que la pulpa tenga una distribución de sólidos adecuado. El espesor de la pulpa afecta el lapso de detenimiento del mineral en la etapa de alternancia rougher y, por ello, la suficiencia del tanque. Generalmente, la etapa de gruesa alternancia en una planta concentradora de cobre trabaja con un porcentaje de sólidos al 30%, mientras que la etapa de limpieza (recleaner y cleaner) opera con distribuciones de sólidos menos elevados alrededor del 17 al 45%.

d) Tiempo de residencia: es un factor crucial en el proceso de flotación, ya que está determinado por la mezcla de particularidades del material que flota y otros aspectos afectantes del procedimiento. En la optimización del ciclo de alternancia, se establece el lapso perfeccionado a cada una de las etapas mediante la aplicación de los criterios de Egas, los cuales se derivan de pruebas de cinética de flotación. Estas pruebas permiten determinar la mejor duración para cada etapa, garantizando una eficiencia máxima y resultados óptimos en la recuperación de minerales valiosos. (Egas 1985).

e) pH de la pulpa: se considera la variante de monitoreo primordial, ya que juega un papel esencial en el rescate, elección y verificación de minerales. La alternancia es sumamente frágil a las variaciones de pH, particularmente cuando se busca una selectiva alternancia. Los reactantes de alternancia, de manera principal los recolectores, son más eficaces en un grado de pH determinado. (Egas 1985)

f) Acondicionamiento de la pulpa: Es una etapa fundamental en el proceso de flotación, ya que provee el lapso requerido con el fin de que los reactantes de flotación actúen de manera efectiva. Algunos colectores y modificadores deben ser introducidos en el molino de bolas dada la lenta tasa de adsorción de minerales, entre tanto que los demás pueden ser añadidos a la pulpa directamente en la etapa de acondicionamiento. (Egas 1985).

g) Calidad del agua: Por la complejidad de las correlaciones en el proceso, es importante analizar la calidad del agua empleada. En plantas acumuladoras, es común que una porción significativa del agua empleada resulte agua de procedimiento, rescatada de las fases de la división líquido-sólido (Egas 1985).

h) Flujo de aire: se refiere a un relevante aspecto que incide en la eficiencia del proceso. Pruebas de flujo de aire realizadas en celdas de flotación industrial han demostrado que la magnitud media en las burbujas aumenta con el incremento de la corriente del aire, y que las corrientes de aire más altas poseen un reparto de magnitud de burbuja más grande que las corrientes del aire más bajas (Egas 1985).

i) Velocidad de agitación: juega un papel crucial en la flotación. Experimentos han demostrado que es baja en el momento en que se dispersa el aire en la celdilla, son esperadas grandes burbujas y con figuras elipsoidales. Además, la magnitud media de las burbujas disminuye con el incremento de la rapidez de movimiento (Egas 1985).

Optimización del proceso de flotación de minerales: Para optimizar el procedimiento de alternancia de minerales, se recomienda optimizar la granulometría de alimentación a la molienda, buscando el rango que maximice la recuperación del mineral valioso y minimice el consumo de energía (tiempo de molienda) y el uso de reactivos, como

el colector AP-1348.

También se sugiere ajustar la dosificación del reactivo colector AP-3418 según las características del mineral y las condiciones operacionales, para lograr una buena selectividad y evitar la sobre o sub-dosificación (Alvarado y Plasencia, 2016).

La granulometría óptima tiene dependencia de la clase de mineral y de las circunstancias del proceso, pero en general se recomienda que sea lo más uniforme posible y que no contenga partículas muy finas ni muy gruesas, ya que éstas pueden afectar la selectividad y el rescate de los minerales que nos interesan. Por otro lado, el consumo del reactivo colector debe ser el mínimo necesario para lograr una buena flotación, ya que un exceso puede causar problemas de estabilidad de la espuma, contaminación ambiental y aumento de los costos operativos

La calidad de concentrado se puede mejorar mediante el control de la ley y la recuperación del mineral valioso, así como la reducción de las impurezas y las pérdidas de material (Vargas, 2018).

Dosificación óptima del colector AP-3418: La dosificación óptima del reactivo AP-3418 tiene dependencia de la clase de mineral, el pH, la ley y la presencia de otros reactivos. Para determinarla, se debe realizar un estudio experimental en una celdilla de alternancia de laboratorio, empleando diferentes concentraciones de AP-3418 y midiendo el rescate de zinc y plomo. Luego, se debe aplicar un análisis de varianza para evaluar la influencia del colector sobre la recuperación de los metales y encontrar la combinación que maximice la eficiencia del proceso (Alvarado y Plasencia, 2016).

Según algunos estudios, como el de Alvarado y Plasencia (2016), la granulometría del

mineral influye en la dosificación óptima de los recolectores AP-3418 y AR-404, que son usados para mejorar la recuperación de minerales polimetálicos (cobre, plomo y zinc). En general, se ha encontrado que, a mayor granulometría, se requiere una mayor dosificación de los colectores, y viceversa. Esto se debe a que la granulometría afecta la superficie específica del mineral, la hidrofobicidad de las partículas, y la selectividad de la flotación.

2.2.2. Química de superficies

Tensión superficial: Se define como el trabajo necesario a fin de incrementar un espacio en una unidad de espacio, bajo condiciones específicas de presión, temperatura y masa. Esta magnitud presenta una relación de manera directa con la fuerza de interacciones intermoleculares, las cuales pueden clasificarse en distintos tipos de enlaces. Entre ellos se incluyen la fortaleza de London, la fortaleza de Van der Waals o fortaleza de esparcimiento, la interrelación dipolar inducida, la interacción dipolar, el vínculo de hidrógeno, el vínculo iónico, el vínculo covalente y el vínculo metálico, listados en orden ascendente de fuerza. (Blazy, 1990).

Toda fracción de una materia exhibe una fortaleza intermolecular que mantiene unidos a sus componentes de manera específica. En un líquido, las moléculas se encuentran circundadas de moléculas de igual naturaleza, y la atracción dentro de ellas se equilibra con la energía total. Las moléculas en la superficie del líquido poseen mayor energía en comparación con las moléculas en el interior. La magnitud de este desequilibrio energético, conocido como energía de superficie libre, tiene dependencia de la naturaleza de las interrelaciones moleculares. Incrementar la zona de específico volumen de líquido implica suministrar energía al sistema.

Adsorción: La formación de espuma está involucrada en el análisis de las particularidades de la superficie. La caracterización de una superficie puede lograrse a través de la medición de la absorbancia. La adsorción se describe como la acumulación de materias químicas, tales como moléculas y iones, en la interfaz. Esta concentración puede ser menor o mayor que la de las etapas que forman dicha interfaz. (Blazy, 1990).

Iones determinantes de potencial: son muy importantes en la creación inicial de la carga en la superficie de las partículas. Se llaman así porque tienen un gran impacto en este proceso. A veces, la cantidad de estos iones puede ser tan baja que la carga superficial es cero, como en el caso del AgI, donde los iones clave son Ag^+ e I^- . En el caso de los minerales de óxido, los iones importantes son H^+ y OH^- . Estos iones son considerados como los más relevantes en la determinación de la carga en la superficie de las partículas. (Blazy, 1990).

Iones determinantes de potencial: Se consideran el componente principal que contribuye a la carga superficial en una superficie sólida (Blazy, 1990).

Termodinámica de la flotación: La adhesión entre burbujas y partículas minerales solo ocurre si se cumplen condiciones tanto termodinámicas como hidrodinámicas. El primer paso es el contacto físico entre la partícula y la burbuja. Aunque las leyes de la termodinámica aplicadas a los minerales metálicos insolubles pueden ser útiles para entender la flotación de carbonatos, sulfatos y silicatos, la complejidad y finura de estos minerales pueden dificultar su análisis. Además, la solubilidad puede afectar la flotabilidad de estos minerales. (Blazy, 1990).

Cinética de la flotación: La dinámica de la flotación de la espuma se puede conceptualizar como la cantidad de minerales concentrados transportados por la espuma

extraída de la celda por unidad de tiempo. Este concepto se basa en una hipótesis fundamentada en la teoría de eventos o bien en observaciones empíricas de los mecanismos de flotación. (Blazy, 1990).

2.2.3. Características del plomo y el cobre

Características de plomo: La caracterización del plomo implica la descripción detallada de sus propiedades físicas, químicas y metalúrgicas. Aquí se proporciona una descripción general de estos aspectos:

1. **Propiedades Físicas:**

El plomo resulta un elemento metálico presentado en forma sólida a la temperatura del ambiente y se caracteriza por su color gris plateado. Tiene un bajo, de manera relativa, punto de fusión, más o menos de 327.5 °C (621.5 °F), y tiene una alta densidad de aproximadamente 11,34 gramos por centímetro cúbico. Estas propiedades son de gran importancia en ingeniería para el diseño y operación de procesos de fundición y refinación, así como para su uso en diversas aplicaciones industriales y comerciales.

2. **Propiedades Químicas:**

- **Reactividad:** El plomo es resistente a la corrosión atmosférica, pero puede corroerse en presencia de ácido acético o soluciones de sales.
- **Valencia:** El plomo es posible que exhiba estados múltiples de oxidación, donde es común +2 y +4.
- **Formación de Compuestos:** Forma diversos compuestos, como óxidos, sulfuros y sales, que pueden variar en sus propiedades.

3. **Propiedades Metalúrgicas:**

- **Extracción y Refinación:** La minería y procesamiento de minerales, como la galena (sulfuro de plomo), son fuentes primarias de plomo. El proceso de refinación, a menudo mediante la técnica de copelación, ayuda a purificar el metal.
- **Usos Comunes:** El plomo es utilizado en varias aplicaciones, tal como baterías, protección contra la radiación, soldaduras, pigmentos, entre otros.
- **Maleabilidad y Ductilidad:** El plomo es maleable y se puede estirar en láminas delgadas o hilos sin romperse.

4. **Toxicidad:**

- El plomo es tóxico para los seres humanos y puede tener efectos perjudiciales en el sistema nervioso y otros órganos. Por esta razón, su manipulación y exposición deben ser cuidadosamente controladas.

5. **Análisis y Caracterización Específica:**

- Para una caracterización más detallada, se pueden realizar análisis químicos, metalúrgicos y físicos específicos, como espectroscopía de absorción atómica, difracción de rayos X, microscopía electrónica, entre otros, dependiendo del contexto y los objetivos de la caracterización.

La caracterización del plomo es esencial tanto en el ámbito industrial como en investigaciones científicas, garantizando un uso adecuado y seguro de este metal (Baker, 2022).

Minerales sulfurados de plomo: Los minerales sulfurados de plomo son minerales que contienen plomo combinado con azufre en su composición. Uno de los minerales sulfurados de plomo más comunes es la galena (PbS) (Elizondo et al. 2022). Aquí hay información sobre la galena y otros minerales sulfurados de plomo:

1. Galena (PbS):

- La galena es el mineral de plomo más abundante y significativo. Consiste principalmente en plomo y azufre.
- Se presenta en cristales cúbicos o masivo, con un brillo metálico y un color que puede variar entre gris y plateado.
- Es la principal fuente de extracción de plomo y ha sido históricamente importante en la minería de plomo.

Figura 3
Pieza de galena



Fuente: Gaucin, et al., (2024).

2. Anglesita (PbSO_4):

- La anglesita es un mineral de plomo que contiene azufre y oxígeno en su composición.
- Su apariencia puede variar desde cristales prismáticos hasta masivos. Puede ser incolora, pero también se presenta en tonos blancos, grises o amarillentos.
- Aunque menos común que la galena, la anglesita es otra fuente de plomo.

Figura 4
Pieza de Anglesita



Fuente: Elizondo et al., (2021).

3. Cerusita (PbCO_3):

- La cerusita es un mineral de plomo que contiene carbono, oxígeno y azufre en su composición.
- Se presenta en cristales y puede variar en color desde blanco hasta gris o incoloro.
- A menudo se encuentra asociada con minerales de zinc.

Figura 5
Pieza de Cerusita



Fuente: De Souza et al., (2020).

Estos minerales sulfurados de plomo son importantes en la minería del plomo. La extracción y procesamiento de estos minerales son pasos clave para obtener plomo metálico, y el procesamiento a menudo implica la separación y concentración de los minerales sulfurados antes de la fundición. Además, la presencia de azufre en estos minerales es

relevante en términos de control ambiental y tratamiento de emisiones, ya que, durante la fundición, el azufre puede convertirse en compuestos gaseosos indeseados como el dióxido de azufre (SO₂).

Características de cobre: Seguidamente se detalla la caracterización del cobre, que implica la descripción detallada de sus propiedades físicas, químicas y metalúrgicas:

1. Propiedades Físicas:

- **Estado Físico:** El cobre es un metal que se encuentra en estado sólido a temperatura ambiente.
- **Color:** Su color característico es rojizo-anaranjado, pero puede cambiar a tonalidades verdes o azules debido a la formación de pátina.
- **Punto de Fusión:** Tiene un punto de fusión relativamente alto, alrededor de 1,083 grados Celsius (1,982 grados Fahrenheit).
- **Densidad:** Es un metal pesado con una densidad de aproximadamente 8.96 gramos por centímetro cúbico.

2. Propiedades Químicas:

- **Reactividad:** Aunque el cobre es resistente a la corrosión atmosférica, forma una capa de óxido superficial, conocida como pátina, que lo protege de una mayor oxidación.
- **Valencia:** El cobre puede existir en diferentes estados de oxidación, siendo los más comunes +1 y +2.

- **Conductividad:** Es conocido por su alta conductividad eléctrica y térmica, lo que lo hace valioso en aplicaciones eléctricas y térmicas.

3. **Propiedades Metalúrgicas:**

- **Extracción y Refinación:** El cobre se obtiene principalmente a través de la minería de minerales como la calcopirita. El proceso incluye trituración, molienda, flotación y fundición.
- **Usos Comunes:** Se utiliza en una variedad de aplicaciones, como conductores eléctricos, tuberías, aleaciones, monedas, y componentes electrónicos, entre otros.
- **Maleabilidad y Ductilidad:** El cobre es maleable y dúctil, lo que facilita su conformado en láminas delgadas o hilos.

4. **Análisis y Caracterización Específica:**

- Para una caracterización más detallada, se pueden realizar análisis químicos específicos, como espectroscopía de absorción atómica, así como análisis metalúrgicos, como microscopía electrónica de barrido y análisis de difracción de rayos X.

5. **Toxicidad:**

- A diferencia de algunos metales, el cobre es esencial para la salud humana en cantidades adecuadas. Sin embargo, en exceso, puede ser tóxico.

Minerales sulfurados de cobre: Los minerales sulfurados de cobre son minerales que contienen cobre combinado con azufre en su composición. Los principales minerales de sulfuro de cobre son calcopirita (CuFeS_2), calcosina (Cu_2S), covelita (CuS), bornita (Cu_5FeS_4), tetraedrita ($((\text{Cu},\text{Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13})$) y enargita (Cu_3AsS_4). A continuación, se presenta información acerca de los principales minerales sulfurados de cobre:

1. Calcopirita (CuFeS_2):

- La calcopirita es un mineral y mena de cobre. Su composición química es CuFeS_2 , es decir, contiene cobre (Cu), hierro (Fe), y azufre (S).
- La calcopirita es uno de los minerales de cobre más importantes y se encuentra ampliamente distribuido en diversos ambientes geológicos. A menudo se encuentra asociado con otros minerales sulfurados.

Figura 6

Pieza de Calcopirita



Fuente: Dana, Hurlbut. Manual de mineralogía.

2. Calcosina (Cu_2S):

- La calcosina es un mineral sulfurado y mena de cobre. Su composición química es Cu_2S , es decir, contiene cobre (Cu) y azufre (S).
- La calcosina es uno de los minerales de cobre más comunes y se encuentra en las zonas de enriquecimiento supergénico, por lo que presentan un mayor contenido de cobre.

Figura 7

Pieza de Calcosina



Fuente: Dana, Hurlbult. Manual de mineralogía.

3. Bornita (CuFeS_2):

- La calcopirita es un mineral y mena de cobre. Su composición química es Cu_5FeS_4 , es decir, contiene cobre (Cu), hierro (Fe), y azufre (S).
- La bornita es uno de los minerales de cobre más importantes y se encuentra ampliamente distribuido en diversos ambientes geológicos, generalmente acompañando a la calcopirita

Figura 8

Pieza de Bornita



Fuente: Dana, Hurlbult. Manual de mineralogía.

2.4. Definiciones Conceptuales

Absorción: Proceso en el cual una sustancia se incorpora a otra para formar una solución o un compuesto nuevo, o para saturarse con esa sustancia.

Concentración: Un proceso que busca separar económicamente materiales de poco interés, con el propósito de reducir la cantidad de minerales que se procesan. Esta separación puede basarse en propiedades físicas (como la diferencia de densidad o la atracción de campos magnéticos y eléctricos) o en propiedades fisicoquímicas.

Concentrado: Producto final de la separación o concentración de minerales valiosos de los minerales de mena, listo para su procesamiento posterior.

Flotación a granel (bulk): Proceso en el cual se liberan todas las especies valiosas, como oro, plomo, plata, zinc, cobre, etc., en un solo producto.

Ley: Contenido de metales preciosos presentes en el mineral, generalmente expresado como un porcentaje o gramos de metal por tonelada de mineral.

Mena: Mineral del cual se pueden extraer elementos o metales de manera económica, como la calcopirita para el cobre o la magnetita para el hierro.

Mineral: Sustancias con propiedades físicas y químicas distintivas, se definen en base a su capacidad para ser diferenciados y reconocidos, incluyendo sus características

ópticas, tales como brillo, color y comportamiento de la luz.

Minerales secundarios: son aquellos que han sufrido cambios o ajustes en sus configuraciones originales, generalmente transformándose en óxidos y sales, como por ejemplo sulfatos y nitratos.

pH: Indicador utilizado para designar la acidez o basicidad de materiales en general.

Reactivo: Sustancia líquida capaz de interactuar con otra sustancia, permitiendo la detección de la presencia de esta última mediante la separación, disolución o precipitación.

Recuperación: En el contexto de la minería, es la proporción del peso de los minerales valiosos en el concentrado final, en relación con el peso de los mismos minerales en la carga inicial, típicamente expresada en porcentaje. Esta métrica es fundamental en la evaluación de la eficacia de los procesos de concentración de minerales.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

El diseño experimental empleado se seleccionó en consideración a las propiedades de la materia prima que compone el mineral. En el contexto de la caracterización mineralógica, se enfatiza la importancia de realizar estudios detallados utilizando el microscopio óptico de luz. Este enfoque, incluso en su fase exploratoria, proporciona una visión pragmática del comportamiento de los constituyentes frente al procesamiento, independientemente de si se trata de minerales valiosos o de aquellos que constituyen la ganga. La metodología adoptada se centra en la identificación de las propiedades ópticas clave de los minerales a través de análisis realizados con un microscopio óptico polarizador.

Adicionalmente, es pertinente señalar que la investigación sigue una orientación aplicada, ya que su objetivo es abordar de manera práctica la temática en cuestión. Se cuantifican los datos obtenidos con el propósito de establecer valores óptimos para la recuperación de la asociación de plomo y cobre.

3.2. Unidad de análisis

La unidad de análisis es una planta polimetálica en Huaral, la cual está ubicada al norte de la ciudad de Lima. Está ubicada a una altitud de 150 msnm y presenta un clima templado con poca presencia de lluvias siendo la temperatura promedio anual de 15°C. Huaral posee yacimientos de cobre, zinc y plomo.

3.3. Muestra de estudio

La población de la tesis es la parte del mineral de cabeza, el cual es proveniente de la provincia de Huaral, departamento de Lima. Se tomaron 260 Kg. De muestra de geología, las cuales se cuartearon en submuestras representativas de 1 Kg en base seca para las pruebas de flotación respectivas.

3.4. Tamaño de muestra

Las muestras que fueron seleccionadas para ser evaluadas en el laboratorio han sido extraídas de la zona minera de Huaral provincia de Lima.

La cantidad de muestra es de aproximadamente 100 kg por cada tajo en extracción; para así poder evaluar la mineralogía de cada muestra para su procesamiento en laboratorio (Ramos y Orihuela, 2017).

3.5. Selección de muestra

3.5.1. Criterio de inclusión

Es necesario tomar muestras que sean un reflejo representativo de la totalidad del depósito mineral. Esto implica muestrear cada componente antes de su ingreso a la planta concentradora, garantizando así una evaluación precisa del contenido mineral a través de análisis posteriores.

3.5.2. Criterio de exclusión

Se procedió a preparar el producto resultante del chancado en el laboratorio, utilizando una chancadora de quijada hasta obtener un producto con tamaño de partícula inferior a 10 mallas (1.7mm.). Posteriormente, este producto fue sometido a un proceso de molienda en condiciones húmedas con el objetivo de llevar a cabo la caracterización mineralógica y realizar diversas pruebas metalúrgicas. Estas pruebas incluyeron la determinación del pH de la pulpa y la dosificación de reactivos, aspectos cruciales en el marco de la investigación realizada.

3.6. Técnicas de recolección de datos

- Búsqueda de información bibliográfica referente al incremento de calidad en concentrado de cobre plomo a partir de minerales polimetálicos.
- Coordinar con el área de Geología a fin de obtener una muestra representativa del mineral a investigar.
- Realizar procesos de conminución (chancado y molienda), con el fin de obtener el mineral a la granulometría deseada para iniciar las pruebas de flotación.
- Envío de 100 gr de muestra de cabeza a 90%-m200 Ty a laboratorio químico para su ensaye por leyes por los siguientes elementos: Ag, Cu, Pb, Zn, Fe y barrido ICP.
- Elaboración del diseño experimental para desarrollo de pruebas metalúrgicas mediante el uso de Excel.

- Desarrollo de pruebas preliminares de flotación con el objetivo de verificar distintos parámetros de flotación estándar.
- Desarrollo de pruebas exploratorias de flotación variando la granulometría para evaluar la calidad del concentrado cobre y plomo.
- Desarrollo de pruebas de flotación definitivas variando el consumo del reactivo colector AP-3418.
- Elaborar el balance metalúrgico y realizar la evaluación del concentrado cobre plomo con el fin de generar las mejores calidades.

3.7. Análisis e interpretación de la información

Se recolectó información mediante un proceso de muestreo sistemático siguiendo las normativas del laboratorio. Las muestras fueron clasificadas y codificadas según sus características específicas antes de ser enviadas al laboratorio para realizar los ensayos correspondientes. Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación analítica de los resultados de los ensayos utilizando el programa de análisis y control estadístico de procesos de Excel.

Las normativas del laboratorio mencionadas abarcan desde la recepción de muestras, chancado controlado, homogenizado y cuarteo, caracterización física y química, hasta el análisis de los resultados, con énfasis en la calidad, trazabilidad, seguridad y precisión de los datos.

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Instrumento de Medición	Escala de Medición
Granulometría del mineral (Variable independiente)	Distribución del tamaño de partículas del mineral obtenido tras el proceso de molienda.	Se mide mediante análisis granulométrico de las muestras procesadas en el molino.	Tamaño de partículas (%-m200)	Análisis de granulometría en laboratorio	Intervalo
Consumo del reactivo colector AP-3418 (Variable independiente)	Cantidad del reactivo colector AP-3418 utilizado en el proceso de flotación para mejorar la recuperación de cobre y plomo.	Se mide en gramos o mililitros por tonelada de mineral tratado.	Cantidad de reactivo utilizado (g/t)	Registro de dosificación de reactivos	Intervalo
Calidad del concentrado de cobre-plomo (Variable dependiente)	Nivel de pureza del concentrado obtenido en la flotación del circuito bulk.	Se mide en porcentaje de cobre y plomo en el concentrado final.	% de Cu y Pb en el concentrado	Análisis químico por ICP	Razón
Recuperación del concentrado de cobre-plomo (Variable dependiente)	Proporción del metal valioso recuperado con respecto a su contenido en la mena original.	Se mide en porcentaje de recuperación metalúrgica.	% de recuperación de Cu y Pb	Cálculo metalúrgico basado en ensayos de cabeza y concentrado	Razón

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Selección de una muestra representativa del yacimiento mineral y análisis químico de la investigación

4.1.1. Selección de muestras con distribución de partículas mixtas

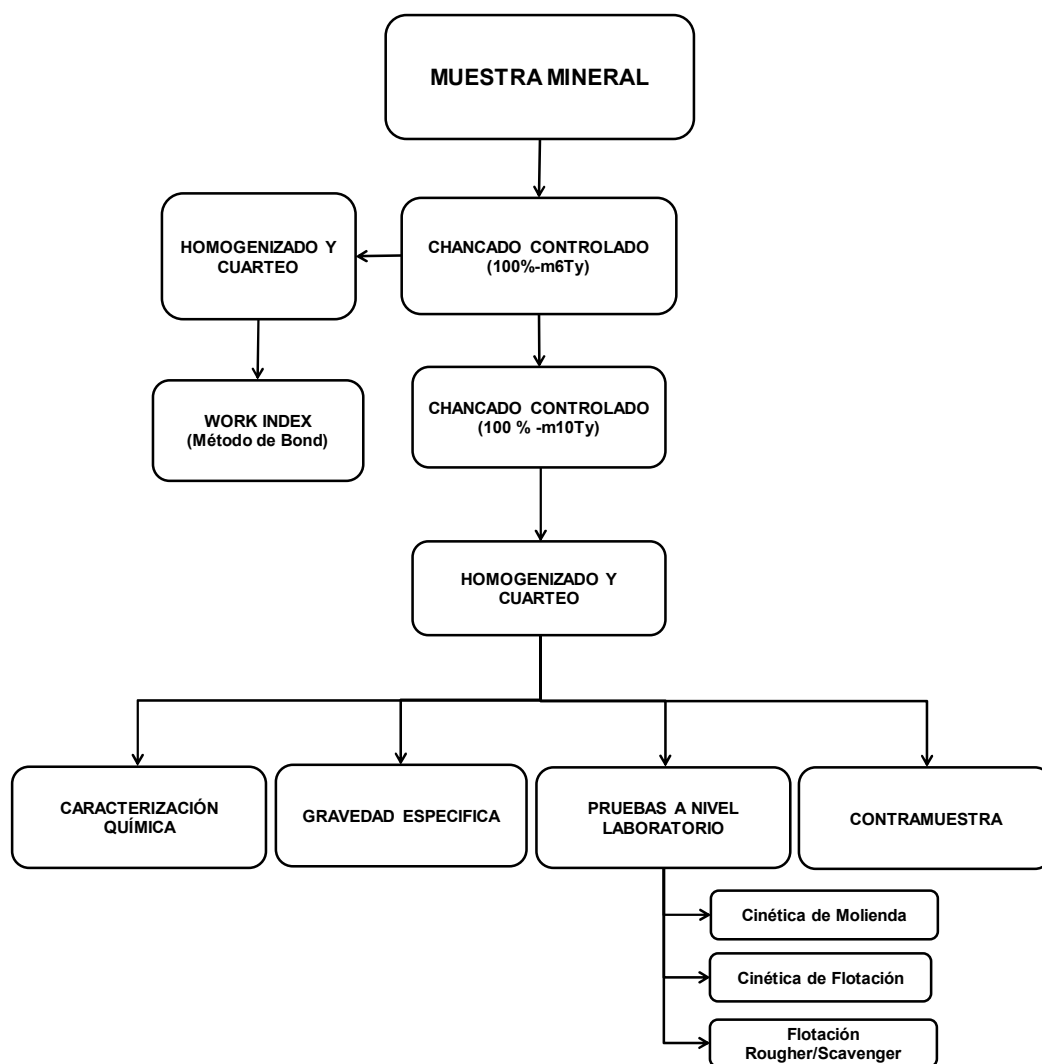
Las muestras que fueron seleccionadas para ser evaluadas en el laboratorio han sido extraídas de la zona minera de Huaral provincia de Lima, parte del mineral de cabeza. Como resultaba necesario tomar muestras que fueran un reflejo representativo de la totalidad del depósito mineral, implicó muestrear cada componente antes de su ingreso a la planta concentradora, garantizando así una evaluación precisa del contenido mineral a través de análisis posteriores.

La cantidad de muestra tomada era de aproximadamente 80 a 90 kg por cada tajo en extracción, de un total de 3 tajos, para así poder evaluar la mineralogía de cada muestra para su procesamiento en laboratorio. Se tomaron en total 260 Kg de muestra, posteriormente se realizó un chancado controlado a 100%-m6Ty con el objetivo de tomar una muestra representativa para realizar pruebas de Work Index. Posteriormente, se realizó un chancado controlado hasta obtener una granulometría de 100%-m10Ty, las cuales se cuartearon en submuestras representativas de 1 Kg en base seca para realizar pruebas de caracterización, moliendabilidad y flotación.

En la siguiente tabla se puede observar el esquema de trabajo realizado en el presente estudio.

Tabla 1

Esquema General de Trabajo



4.1.2. Análisis físico químico de la investigación

A continuación, se presenta el resumen de las caracterizaciones realizadas, que incluyen tanto análisis químicos como de gravedad específica.

4.1.2.1. Análisis químico de la muestra

Los análisis mineralógicos evidenciaron la concentración o ley de cada uno de los componentes minerales, los cuales se detallan en la Tabla 2 a continuación.

Tabla 2

Resultados del análisis químico de cabeza

Código de Muestra	Ley				
	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
	g/t	%	%	%	%
Cabeza	59.10	1.47	0.72	10.53	25.98

Nota: Elaboración propia.

También se realizó en análisis ICP por 35 elementos, el resultado se presenta en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3

Resultados del análisis químico - Barrido ICP

Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co
ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm
59.20	1.87	348.00	309.00	<0.5	<5	0.76	663.00	22.00
Cr	Cu	Fe	Ga	K	La	Mg	Mn	Mo
ppm	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	ppm
305.00	>10000	>15	<10	0.45	<0.5	0.31	409.00	16.00
Na	Nb	Ni	P	Pb	S	Sb	Sc	Sn
%	ppm	ppm	%	ppm	%	ppm	ppm	ppm
0.32	<1	17.00	0.03	7193.0	>10	170.00	6.20	<10
Sr	Ti	Tl	V	W	Y	Zn	Zr	
ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
40.60	0.08	<2	63.00	50	2.90	>10000	8.20	

Nota: Elaboración propia.

Los análisis por ICP detectaron bajos contenidos de As, Sb y Mn.

4.2.1.2. Determinación de la gravedad específica de la muestra

Se realizó la determinación de la gravedad específica a una muestra de cabeza empleando el método del picnómetro, los resultados se muestran en la Tabla 4 a continuación.

Tabla 4

Gravedad Específica – Muestra Cabeza

Código de muestra	Gravedad específica g/ml
Cabeza	4.15

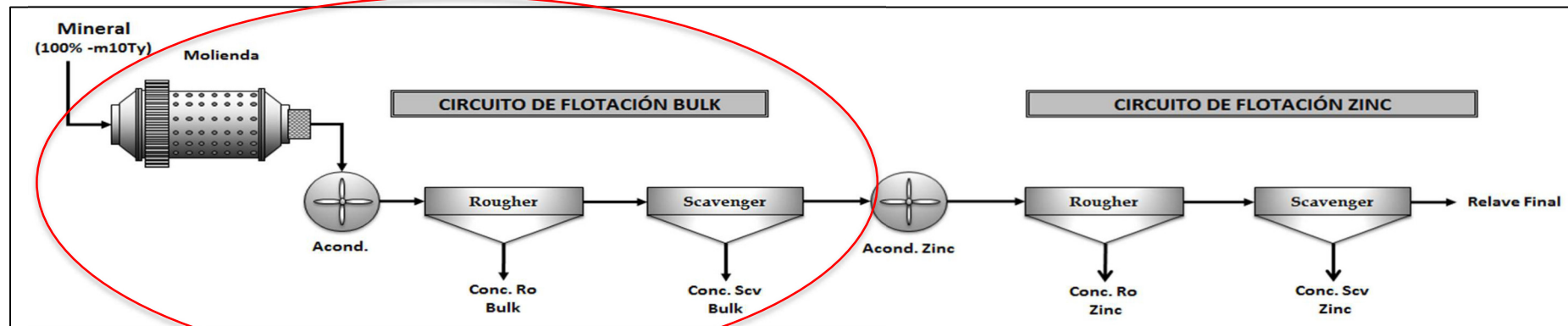
Nota: Elaboración propia.

4.2. Resultados de las pruebas experimentales para evaluar la cinética de flotación

Las pruebas de cinética de flotación en laboratorio se realizan utilizando diferentes condiciones operativas de molienda, dosificación de reactivos, tiempo de flotación y pH, para determinar los parámetros cinéticos de flotación de cada muestra, como la calidad y la recuperación, el orden de reacción y el grado de liberación de los especímenes minerales. El esquema de flotación de Rougher y Scavenger se detalla a continuación en la Figura 9.

Figura 9

Esquema de flotación de Rougher / Scavenger



Fuente: Elaboración propia.

4.2.1. Pruebas de moliendabilidad y granulometría de la muestra

Las pruebas de moliendabilidad se efectúan para determinar el tiempo de molienda de las muestras. Se realizaron 4 moliendas a diferentes tiempos, los productos obtenidos fueron analizados granulométricamente para la elaboración de la curva de moliendabilidad. Así mismo, al producto de la molienda de la muestra se le efectúa un análisis granulométrico.

Las pruebas de molienda se efectuaron en un molino de bolas estándar de laboratorio de 6.5" x 9" a un porcentaje de sólidos de 66.67 %.

Las condiciones de operación fueron las siguientes:

- 1 kg de muestra
- 0.5 litros de agua
- Tiempo de molienda: 10, 15, 20 y 25 minutos
- 11.08 Kg de bolas (68% de 1" Ø y 32% de 1.5" Ø)

El resumen de los resultados del análisis granulométrico del P80 del producto de la molienda se presentan en la Tabla 5 a continuación.

Tabla 5

Resumen de análisis granulométrico del p80 del producto de la molienda.

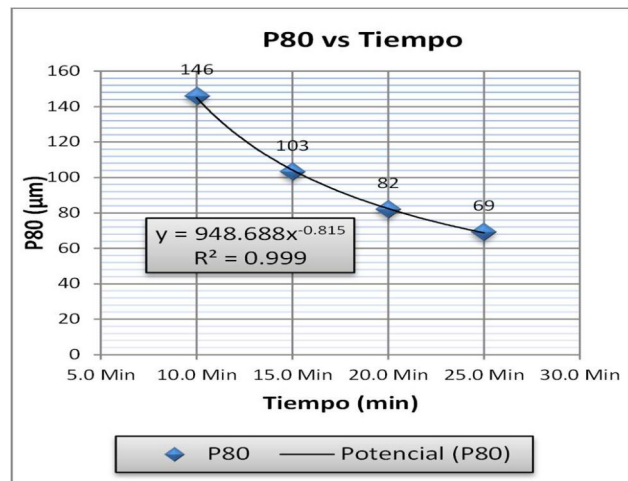
Tiempo	% -m100	%-m200	%-m400	P80
minutos	150 µm	75 µm	38 µm	(µm)
10 Min	81.5	47.3	25.6	146
15 Min	94.5	63.2	34.1	103
20 Min	98.5	76.3	43.3	82
25 Min	99.5	84.6	51.4	69

Nota: Elaboración propia.

Empleando los valores de la tabla anterior se elaboran las curvas de moliendabilidad, en base a la cual se determina el tiempo de molienda necesario. Las curvas de moliendabilidad P80 vs tiempo y de % -m200 vs tiempo se muestran a continuación en las Figuras 10 y 11.

Figura 10

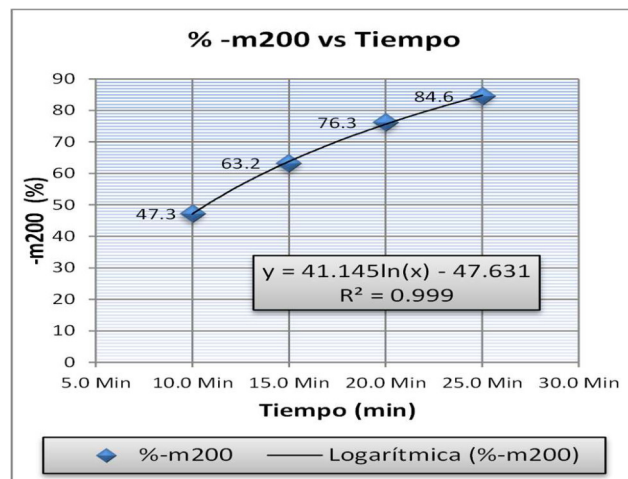
Curva de moliendabilidad P80 vs tiempo



Nota: Elaboración propia.

Figura 11

Curva de % -m200 vs tiempo



Nota: Elaboración propia.

El resumen del tiempo de molienda calculado en función al % -m200 se presentan en la Tabla 6 a continuación.

Tabla 6

Tiempo calculado de molienda en función a las curvas de moliendabilidad obtenidas.

Tiempo, f(%-m200)		
% -m200	Tiempo (min)	P80 (µm)
50.0	10.73	137
55.0	12.11	124
60.0	13.68	113
65.0	15.45	102

Nota: Elaboración propia.

Estos resultados permiten afirmar que para obtener un grado de molienda de 55% de -m 200, se requiere moler el mineral durante 12.11 minutos, a las condiciones arriba mencionadas, mientras que para lograr un grado de molienda de 65% -m 200, se requiere moler el mineral durante 15.45 minutos, a las condiciones arriba mencionadas.

4.2.2. Determinación del Work Índice de la muestra

Luego de determinar la moliendabilidad y la granulometría de la muestra, se determina el Work Índice de esta, que es una medida de la resistencia del mineral a la molienda, y trata de cuantificar la posibilidad de liberación de los especímenes minerales. Para la determinación del Work Índice para molino de bolas, se empleó el método experimental de F. C. Bond, que se muestra en la Tabla 7:

Tabla 7

Método de F.C. Bond para estimar el Work Index.

$$Wi = \frac{44.5}{P_i^{0.23} Gbp^{0.82}} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)^{-1} \dots \dots \dots \left(\frac{Kw - h}{TC} \right)$$

Nota: Elaboración propia.

La malla de corte utilizada para la determinación del Work Índice por el método de F.C. Bond fue la malla 65 (212 µm).

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8 a continuación

Tabla 8

Determinación del Work Índice por el método de Bond para molino de bolas.

Código de Muestra	Alimento F(80)	Producto P (80)	Abertura (Malla Corte)	GBP	Wi
	(µm)	(µm)	(µm)	(g/rev)	(Kw-h/Tc)
Cabeza	2109	180	212	4.3	7.44
Cabeza Dup.	2082	175	212	4.1	7.59

Nota: Elaboración propia.

El *Work Índice* de la muestra de cabeza a malla 100 % -m6 Ty, determinado por el procedimiento estándar de F.C. Bond, fue de 7.44 kw-h/TC, que representa una baja resistencia a la moliendabilidad (frágil).

4.2.3. Pruebas iniciales para obtener la calidad y recuperación

Antes de obtener los resultados finales, se llevó a cabo una prueba inicial de calidad y recuperación. Para establecer las mejores condiciones de flotación a nivel laboratorio, se recomienda realizar una o varias de pruebas iniciales para obtener la calidad y recuperación, que consisten en simular el circuito de flotación con varias iteraciones, usando las mismas condiciones de pH, dosificación de reactivos, tiempo de flotación, etc. Estas pruebas permiten evaluar el rendimiento metalúrgico del proceso, así como la estabilidad y reproducibilidad de los resultados.

Algunos de los parámetros y condiciones que se deben controlar y optimizar en las pruebas son:

- La granulometría de la alimentación, que influye en la liberación y la recuperación de los minerales valiosos.
- El tipo y la cantidad de reactivos, que determinan la hidrofobicidad y la selectividad de las partículas.
- El volumen y la calidad del aire, que afectan la formación y el tamaño de las burbujas.
- La velocidad y la dirección del flujo de la pulpa, que inciden en el contacto y la adherencia entre las partículas y las burbujas.
- La densidad y el nivel de la pulpa, que regulan la capacidad y la eficiencia de las celdas de flotación.

Una vez obtenidas las mejores condiciones de flotación a nivel laboratorio, se pueden extrapolar a nivel industrial, considerando los factores de escala y las posibles variaciones en la calidad y la composición del mineral.

Las pruebas Rougher/Scavenger se llevan a cabo principalmente para evaluar parámetros de flotación, así como la flotabilidad de la muestra.

A continuación, en la Tabla 9 se muestran los resultados de la prueba inicial.

Tabla 9

Resultados de la prueba inicial de recuperación mediante Excel.

Peso Alimento (g):	1000	Vol. Celda (cc):	3000
% Sólidos Molienda:	66.7	% Sólidos Flot.:	33
Grado de Molienda:	45% -m200	P ₈₀ (µm):	151

Etapa	Tiempo (min)	pH	RPM	Presión Aire (psi)	Flujo aire (L/min)	REACTIVOS ADICIONADOS (g/t)							
						Ca.Ind	NaCN	ZnSO4	AP-3418	Z-11	Z-6	CuSO4	MBC
Molienda	15.5		-	-	-	-	50.0	500.0	-	-	-	-	-
Acond. Ro Bulk	5.0	7.5	770.0	-	-	100.0	-	-	15.0	-	-	-	30.0
Flot. Ro Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-	-	-	-	-	-
Acond. Scv- Bulk	3.0	7.5	770.0	-	-	-	-	-	5.0	-	-	-	-
Flot. Scv-Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-	-	-	-	-	-
Acond. Ro Zn	10.0	11.0	750.0	-	-	600.0	-	-	-	30.0	-	350.0	25.0
Flot. Ro Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-	-	-	-	-	-
Acond. Scv- Zn	3.0	11.0	750.0	-	-	-	-	-	-	-	15.0	-	5.0
Flot. Scv-Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	44.5	-	-	-	-	700.0	50.0	500.0	20.0	30.0	15.0	350.0	60.0

Condiciones de Flotación

PRODUCTO	Peso	Ley					Recuperación (%)				
		g/t	(%)								
	(%)	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
Conc.Ro Bulk	6.65	605.00	17.50	10.98	6.09	25.50	65.02	73.99	89.28	3.89	6.78
Conc.Scv-Bulk	1.90	333.20	13.20	1.42	12.00	28.00	10.22	15.92	3.29	2.19	2.12
Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	8.55	544.67	16.55	8.86	7.40	26.05	75.24	89.91	92.57	6.08	8.90
Conc.Ro Zn	13.48	20.00	0.40	0.06	55.00	10.03	4.36	3.43	0.99	71.28	5.41
Conc.Scv-Zn	24.36	12.20	0.10	0.04	6.98	40.22	4.80	1.55	1.19	16.35	39.18
Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	37.84	14.98	0.21	0.05	24.08	29.47	9.16	4.98	2.18	87.63	44.59
Relave	53.61	18.00	0.15	0.08	1.22	21.69	15.60	5.11	5.24	6.29	46.51
Cabeza Calc.	100.00	61.87	1.57	0.82	10.40	25.01	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cab. Ensayada		59.10	1.47	0.72	10.53	25.98					

Balance Metalúrgico

Nota: Elaboración propia.

El detalle del reactivo colector AP-3418 consumido en gramos por unidad de tiempo (g/t), con un pH de 10.0, RPM de 770, a diferentes tiempos (5.0 y 3.0 minutos respectivamente) y con un grado de molienda de 45% -m200, se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10

Detalle del reactivo AP-3418 consumido con un grado de molienda de 45% -m200.

Etapa	Tiempo	pH	RPM	Reactivos Adicionados
	(min)			(g/t)
				AP-3418
Acond. Ro Bulk	5	10	770	15
Acond. Scv- Bulk	3	10	770	5
TOTAL	8	-	-	20

Nota: Elaboración propia.

El detalle el rendimiento metalúrgico para el cobre (Cu) y plomo (Pb), que se reflejan en la ley (%) y peso (g) obtenido, se muestra a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11

Rendimiento metalúrgico obtenido para el cobre (Cu) y plomo (Pb).

PRODUCTO	Peso	Ley	
		(%)	
	(%)	Cu	Pb
Conc.Ro Bulk	6.65	17.50	10.98
Conc.Scv-Bulk	1.90	13.20	1.42
Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	8.55	16.55	8.86
Conc.Ro Zn	13.48	0.40	0.06
Conc.Scv-Zn	24.36	0.10	0.04
Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	37.84	0.21	0.05
Relave	53.61	0.15	0.08
Cabeza Calc.	100.00	1.57	0.82

Nota: Elaboración propia.

Los resultados de recuperación se presentan en la Tabla 12, y los mismos reflejan la eficacia de la recuperación de diferentes elementos en distintos productos y fracciones de la muestra durante

esta fase preliminar de evaluación. En particular, se ha destacado la combinación del Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk por su relevancia en el proceso de recuperación de elementos específicos como plata (Ag), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn) y hierro (Fe).

Tabla 12

Resultados de recuperación en la prueba inicial

PRODUCTO	Recuperación (%)				
	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
Conc.Ro Bulk	65.02	73.99	89.28	3.89	6.78
Conc.Scv-Bulk	10.22	15.92	3.29	2.19	2.12
Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	75.24	89.91	92.57	6.08	8.90
Conc.Ro Zn	4.36	3.43	0.99	71.28	5.41
Conc.Scv-Zn	4.80	1.55	1.19	16.35	39.18
Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	9.16	4.98	2.18	87.63	44.59
Relave	15.60	5.11	5.24	6.29	46.51
Cabeza Calc.	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Nota: Elaboración propia.

Los resultados de recuperación (%) para distintos elementos (Ag, Cu, Pb, Zn, Fe) en diversos productos y fracciones de la muestra revelan variaciones significativas. En particular, se destaca la combinación del Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk por su impacto en la eficacia de la recuperación de los elementos.

En dicha categoría, los porcentajes de recuperación son los siguientes:

- Plata (Ag): 75.24%
- Cobre (Cu): 89.91%
- Plomo (Pb): 92.57%
- Zinc (Zn): 6.08%
- Hierro (Fe): 8.90%

Estos resultados específicos resaltan la relevancia de la combinación del Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk en el proceso de recuperación, destacando la eficacia diferencial en la extracción de elementos particulares.

4.2.4. Recuperación de Cu y Pb: P01 y P02

En este grupo de pruebas se evaluó la granulometría a una dosificación de AP 3418 menor, en la siguiente tabla resumen se muestran las condiciones de cada prueba:

Tabla 13

Condiciones operativas de P01y P02

Código de Prueba	Grado de Molienda		Etapa	Tiempo (min)	pH de Flot.	Dosificación de Reactivos (g/t)						
	%-m200	P80 (µm)				Ca.Ind	NaCN	ZnSO4	AP-3418	Z-11	CuSO4	F-70
P01	50	137	Molienda	10.7	-	-	50.0	500.0	-	-	-	-
			Flot. Ro-Scv Bulk	4.0	7.5	90.0	-	-	30.0	-	-	30.0
			Flot. Ro-Scv Zinc	4.0	11.0	568.0	-	-	-	30.0	350.0	30.0
P02	60	112	Molienda	12.1	-	-	50.0	500.0	-	-	-	-
			Flot. Ro-Scv Bulk	4.0	7.5	100.0	-	-	30.0	-	-	30.0
			Flot. Ro-Scv Zinc	4.0	11.0	602.0	-	-	-	30.0	350.0	30.0

La tabla resumen de los resultados de porcentaje de recuperación final para los productos de las pruebas P01 y P02 de los elementos cobre (Cu) y plomo (Pb) en distintos productos y fases se muestran a continuación.

Tabla 14

Porcentaje de leyes y recuperaciones de Cu y Pb: P01 y P02

Prueba	Producto	Ley (%)		Recuperación (%)	
		Cu	Pb	Cu	Pb
P01	Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	18.77	9.99	84.08	91.61
	Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	0.38	0.07	12.11	4.56
	Relave	0.12	0.06	3.81	3.83
P02	Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	18.81	10.13	87.33	92.90
	Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	0.34	0.06	9.31	3.40
	Relave	0.10	0.05	3.36	3.70

Nota: Elaboración propia.

La tabla de recuperación (%) para los elementos cobre (Cu) y plomo (Pb) en distintos productos y fases del proceso revela patrones significativos. Enfocándonos en la categoría de "la combinación del Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk", se destacan los siguientes resultados:

- **P01:** La recuperación en el Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk es del 84.08% Cu y 91.61% Pb. Estos resultados sugieren una mejora sustancial en la eficiencia de recuperación. Adicionalmente, se observan leyes de Cu de 18.77% y Pb de 9.99%.
- **P02:** La recuperación en el Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk es del 87.33% Cu y 92.90% Pb. Estos incrementos destacan la importancia de esta combinación en la optimización del proceso. También se observan leyes de Cu de 18.81 y Pb de 10.13%, las cuales son las mayores entre las pruebas realizadas.

La categoría combinada del "Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk" emerge como crucial para maximizar la recuperación y leyes de cobre y plomo en el sistema evaluado, evidenciando una eficiencia superior en comparación con otras etapas del proceso.

4.2.4. Recuperación de Cu y Pb: P03 y P04

En este grupo de pruebas se evaluó la granulometría a una dosificación de AP 3418 mayor, en la siguiente tabla resumen se muestran las condiciones de cada prueba:

Tabla 15*Condiciones operativas de P03 y P04*

Código de Prueba	Grado de Molienda		Etapa	Tiempo (min)	pH de Flot.	Dosificación de Reactivos (g/t)						
	%-m200	P80 (µm)				Ca.Ind	NaCN	ZnSO4	AP-3418	Z-11	CuSO4	F-70
P03	50	137	Molienda	13.7	-	-	50.0	500.0	-	-	-	-
			Flot. Ro-Scv Bulk	4.0	7.5	120.0	-	-	40.0	-	-	30.0
			Flot. Ro-Scv Zinc	4.0	11.0	632.0	-	-	-	30.0	350.0	30.0
P04	60	112	Molienda	12.1	-	-	50.0	500.0	-	-	-	-
			Flot. Ro-Scv Bulk	4.0	7.5	94.0	-	-	40.0	-	-	30.0
			Flot. Ro-Scv Zinc	4.0	11.0	570.0	-	-	-	30.0	350.0	30.0

La tabla resumen de los resultados de porcentaje de recuperación final para los productos de las pruebas P03 y P04 de los elementos cobre (Cu) y plomo (Pb) en distintos productos y fases se muestran a continuación.

Tabla 16*Porcentaje de leyes y recuperaciones de Cu y Pb: P03 y P04*

Prueba	Producto	Ley (%)		Recuperación (%)	
		Cu	Pb	Cu	Pb
P03	Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	17.68	9.66	85.89	91.54
	Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	0.33	0.07	9.34	3.95
	Relave	0.13	0.06	4.77	4.51
P04	Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	18.80	9.62	88.63	93.70
	Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	0.34	0.06	8.40	3.16
	Relave	0.09	0.04	2.97	3.14

Nota: Elaboración propia.

La tabla de recuperación (%) para los elementos cobre (Cu) y plomo (Pb) en distintos productos y fases del proceso revela patrones significativos. Enfocándonos en la categoría de "la combinación del Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk", se destacan los siguientes resultados:

- **P03:** La recuperación en el Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk es del 85.89% Cu y 91.54% Pb. También se observan leyes de Cu de 17.68% y Pb de 9.66%. Esto indica una tendencia a disminuir la recuperación y leyes.
- **P04:** La recuperación en el Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk es del 88.63% Cu y 93.70% Pb. Estos resultados sugieren una mejora sustancial en la eficiencia de recuperación. Adicionalmente, se observan leyes de Cu de 18.80% y Pb de 9.62%.

La categoría combinada del "Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk" emerge como crucial para maximizar la recuperación y leyes de cobre y plomo en el sistema evaluado, evidenciando una eficiencia superior en comparación con otras etapas del proceso.

4.2.5. Recuperación de Cu y Pb: P05 y P06

En este grupo de pruebas, como parte siguiente del diseño experimental, se evaluó la granulometría y dosificación del reactivo colector AP 3418 a un promedio de las 2 etapas anteriores, en la siguiente tabla resumen se muestran las condiciones de cada prueba:

Tabla 17

Condiciones operativas de P05 y P06

Código de Prueba	Grado de Molienda		Etapas	Tiempo (min)	pH de Flot.	Dosificación de Reactivos (g/t)						
	%-m200	P80 (µm)				Ca.Ind	NaCN	ZnSO4	AP-3418	Z-11	CuSO4	F-70
P05	55	124	Molienda	12.1	-	-	50.0	500.0	-	-	-	-
			Flot. Ro-Scv Bulk	4.0	7.5	105.0	-	-	35.0	-	-	30.0
			Flot. Ro-Scv Zinc	4.0	11.0	598.0	-	-	-	30.0	350.0	30.0
P06	55	124	Molienda	12.1	-	-	50.0	500.0	-	-	-	-
			Flot. Ro-Scv Bulk	4.0	7.5	102.0	-	-	35.0	-	-	30.0
			Flot. Ro-Scv Zinc	4.0	11.0	591.0	-	-	-	30.0	350.0	30.0

La tabla resumen de los resultados de porcentaje de recuperación para los productos de las pruebas P05 y P06 de los elementos cobre (Cu) y plomo (Pb) en distintos productos y fases se muestra a continuación.

Tabla 18

Porcentaje de recuperación de P05 y P06

Prueba	Producto	Ley (%)		Recuperación (%)	
		Cu	Pb	Cu	Pb
P05	Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	19.02	10.19	90.09	93.91
	Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	0.35	0.07	8.38	3.11
	Relave	0.05	0.05	1.53	2.98
P06	Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	18.98	10.18	90.24	93.86
	Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	0.34	0.07	8.21	3.13
	Relave	0.05	0.05	1.55	3.01

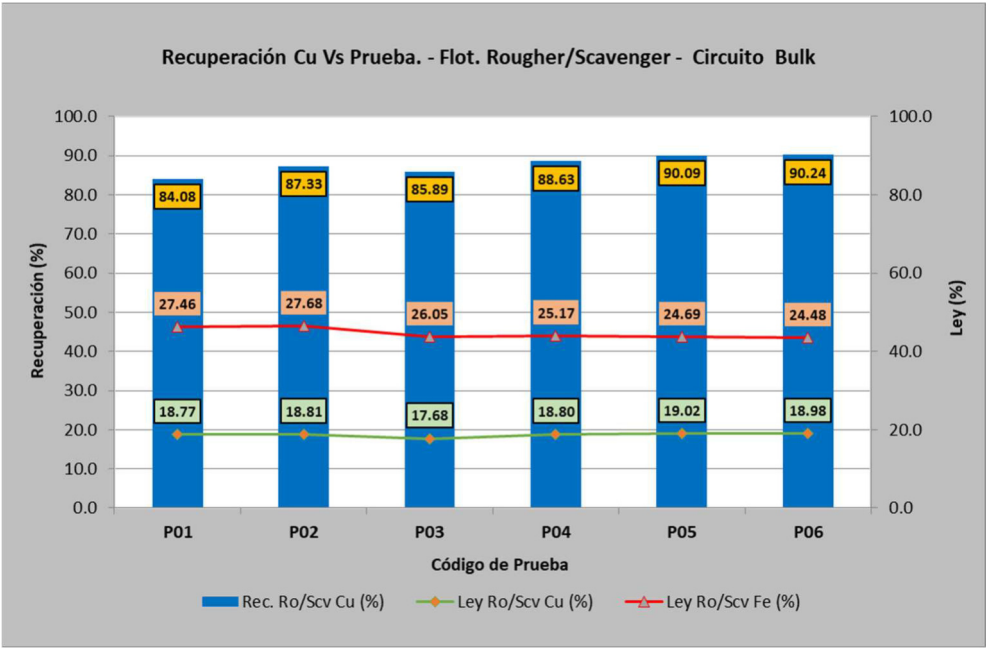
Nota: Elaboración propia.

Las tablas de recuperación (%) para los elementos cobre (Cu) y plomo (Pb) en los productos de las pruebas P05 y P06 ofrece insights valiosos sobre la eficiencia del proceso. Enfocándonos especialmente en la categoría combinada del Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk, se destacan los resultados:

- **P05:** La recuperación en el Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk es del 90.09% Cu y 93.91% Pb. Estos incrementos destacan la importancia de esta combinación en la optimización del proceso. También se observan leyes de Cu de 19.02% y Pb de 10.19%, las cuales son las mayores entre las pruebas realizadas.
- **P06:** La recuperación en el Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk es del 90.24% Cu y 93.86% Pb. También se observan leyes de Cu de 18.98% y Pb de 10.18%. Esto indica una consistencia en los resultados obtenidos, ya que ambas pruebas se realizaron a las mismas condiciones.

Figura 12

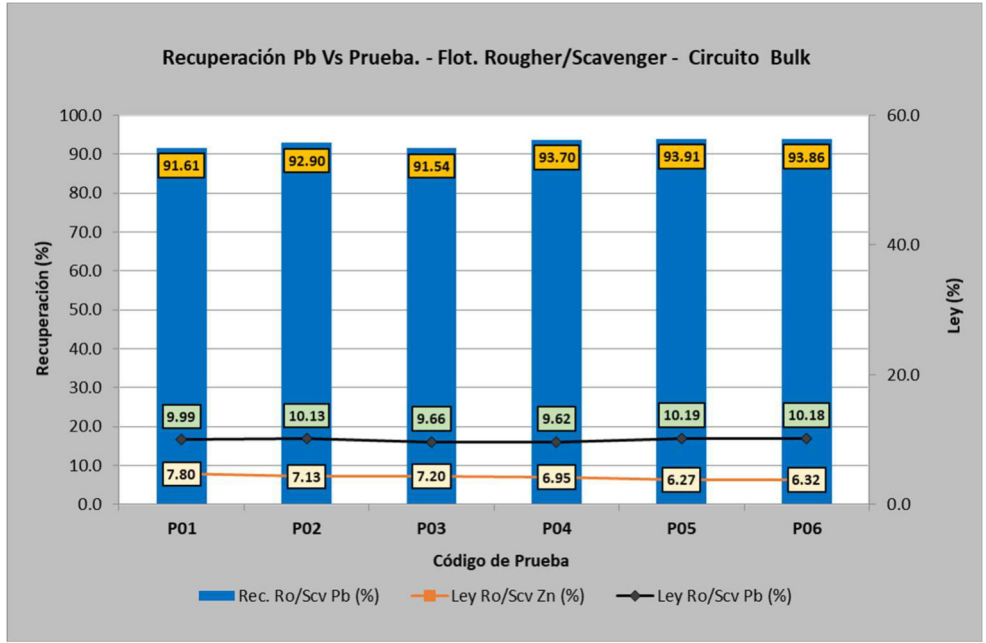
Porcentaje de recuperación de Cu



Nota: Elaboración propia.

Figura 13

Porcentaje de recuperación de Pb



Nota: Elaboración propia.

La categoría combinada del Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk demuestra ser crucial para maximizar la ley y recuperación de cobre y plomo en los productos de las pruebas P05 y P06, evidenciando una eficiencia superior en comparación con otras etapas del proceso. Estos resultados respaldan la importancia de esta combinación en la optimización global de las recuperaciones y leyes de cobre y plomo.

4.2.6. Prueba de cinética de flotación Rougher Bulk

La tabla resumen de las condiciones y resultados obtenidos en la prueba de flotación cinética Rougher Bulk se muestra a continuación:

Tabla 19

Condiciones de la prueba de flotación cinética Rougher Bulk

Peso Alimento (g):	1000	Vol. Celda (cc):	3000
% Sólidos Molienda:	66.7	% Sólidos Flot.:	33
Grado de Molienda:	55% -m200	P ₈₀ (μm):	124

Etapa	Tiempo (min)	pH	RPM	Presión Aire (psi)	Flujo aire (L/min)	REACTIVOS ADICIONADOS (g/t)				
						Ca.Ind	NaCN	ZnSO4	AP-3418	MIBC
Molienda	12.1		-	-	-	-	50.0	500.0	-	-
Acond. Ro Bulk	5.0	7.5	770.0	-	-	94.0	-	-	35.0	30.0
Flot. Ro Bulk-0.5 min	0.5	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-	-	-
Flot. Ro Bulk-1 min	1.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-	-	-
Flot. Ro Bulk-2 min	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-	-	-
Flot. Ro Bulk-4 min	4.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-	-	-
Flot. Ro Bulk-8 min	8.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-	-	-
Flot. Ro Bulk-16 min	16.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-	-	-
TOTAL	48.6	-	-	-	-	94.0	50.0	500.0	35.0	30.0

Tabla 20*Resultados de la flotación cinética Rougher Bulk*

Productos	PESO	LEY					RECUPERACIÓN (%)				
		(g/t)	(%)				(g/t)	(%)			
	(%)	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
Conc.Ro 0.5 min	2.96	698.00	24.22	12.20	5.05	25.65	33.72	45.74	43.94	1.43	2.81
Conc.Ro 1min	1.64	702.00	19.93	11.00	5.77	26.31	18.79	20.86	21.95	0.91	1.60
Conc.Ro 2min	2.09	564.00	17.49	9.55	8.71	27.60	19.24	23.32	24.29	1.75	2.13
Conc.Ro 4min	1.14	324.00	5.03	2.48	13.35	28.86	6.03	3.66	3.44	1.46	1.22
Conc.Ro 8min	1.18	168.00	3.26	0.93	15.07	28.11	3.24	2.45	1.33	1.71	1.23
Conc.Ro 16min	1.03	118.00	1.67	0.53	16.41	25.38	1.98	1.10	0.66	1.62	0.97
Conc. Ro Bulk Total	10.05	506.50	15.16	7.83	9.21	26.79	82.99	97.13	95.63	8.88	9.95
Relave Final	89.95	11.60	0.05	0.04	10.56	27.08	17.01	2.87	4.37	91.12	90.05
Cab. Calculada	100.00	61.33	1.57	0.82	10.42	27.05	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cabeza Ensayada		59.10	1.47	0.72	10.53	25.98					

Nota: Elaboración propia.

Los resultados de la Flotación Cinética Rougher Bulk, observados en diferentes intervalos de tiempo de concentración (Concentrado Rougher), revelan variaciones notables en la ley de los elementos Ag, Cu, Pb, Zn y Fe, tanto en términos de gramos por tonelada (g/t) como porcentajes (%). A continuación, se presenta un análisis detallado:

En el intervalo de 0.5 minutos, la concentración de plata (Ag) alcanza los 698.00 g/t, mientras que el cobre (Cu) representa el 24.22%. Además, se observan porcentajes significativos para plomo (Pb), zinc (Zn) y hierro (Fe), con valores del 12.20%, 5.05% y 25.65%, respectivamente.

A medida que aumenta el tiempo de concentración, los valores experimentan cambios notables. A los 2 minutos, la concentración de Ag disminuye a 564.00 g/t, y la proporción de Cu baja al 17.49%. Sin embargo, se observa un aumento en los porcentajes de Pb, Zn y Fe, alcanzando 9.55%, 8.71% y 27.60%, respectivamente.

En el intervalo de 8 minutos, se aprecia una disminución significativa en las concentraciones de Ag y Cu, llegando a 168.00 g/t y 3.26%, respectivamente. Al mismo tiempo, los porcentajes de Pb, Zn y Fe continúan fluctuando, con valores del 0.93%, 15.07% y 28.11%, respectivamente.

El Concentrado Rougher Bulk total, a los 16 minutos, exhibe una ley intermedia, con concentraciones de 506.50 g/t para Ag y porcentajes de 15.16% para Cu, 7.83% para Pb, 9.21% para Zn y 26.79% para Fe.

El relave muestra concentraciones bajas, destacando porcentajes mínimos para Cu (0.05%) y Pb (0.04%), mientras que Zn alcanza un 10.56% y Fe un 27.08%.

La cabeza calculada y ensayada ofrecen datos de referencia, con la cabeza calculada presentando concentraciones de 61.33 g/t para Ag y porcentajes de 1.57% para Cu, 0.83% para Pb, 10.42% para Zn y 27.05% para Fe.

Aplicando los datos obtenidos en la cinética de flotación, se aplicó el modelo matemático de Klimper para obtener el tiempo óptimo de flotación tanto para recuperaciones de Cu y Pb.

En la siguiente figura se muestra la fórmula con la que podemos obtener el tiempo óptimo de flotación, según Klimper.

Figura 14
Ecuación – Modelo Matemático Klimper

Modelo Cinetico

$$Rt = Rinf.* \left(1 - \frac{1}{k * t} * (1 - \exp^{-K*t})\right)$$

Donde:

Rt: Recuperación en un tiempo específico

Rinf: Recuperación máxima o a un tiempo infinito

K: Constante cinética de flotación

T: Tiempo de flotación

En las siguientes tablas y figuras se muestran los valores obtenidos aplicando Solver con el objetivo de hallar la recuperación máxima, constante cinética y el tiempo óptimo de flotación tanto para Cu como para Pb.

Tabla 21

Ajuste Klimper para Cu utilizando Solver

Ajuste Klimper	
Cu	
e(t)	(E-e(t))2
0	0
48	3
68	2
84	35
93	1
97	2
100	6
94	48.85

Roo =	101.79
K =	2.85
T optimo	4.79
d(Rt)/dt	0.0003

Figura 15

Ley – Recuperación Cu vs Tiempo (Calculado y Ajustado con Klimper)

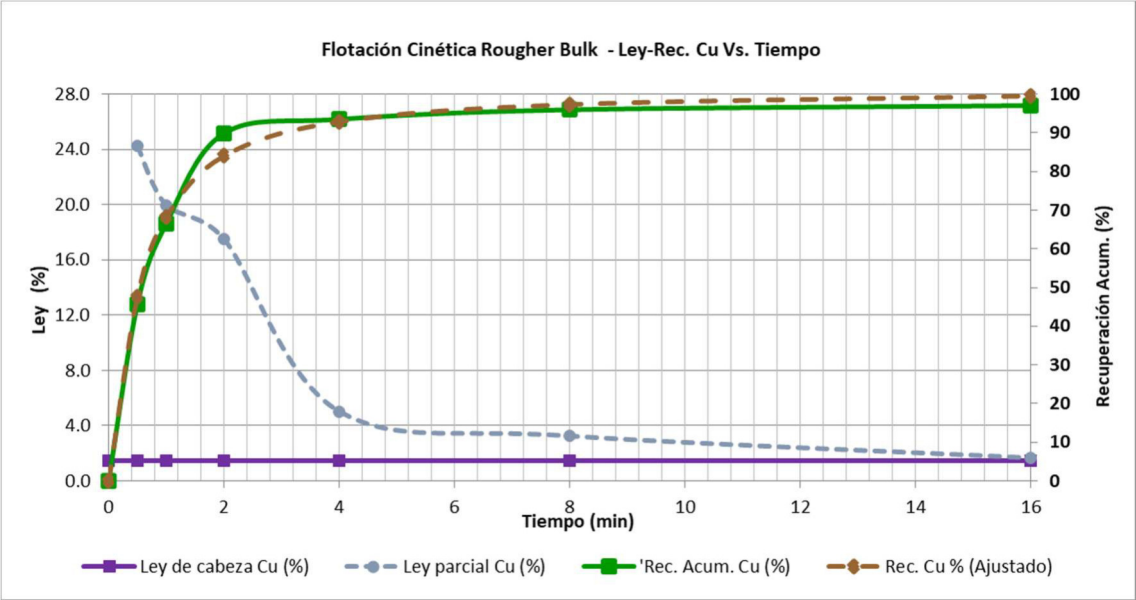


Tabla 22

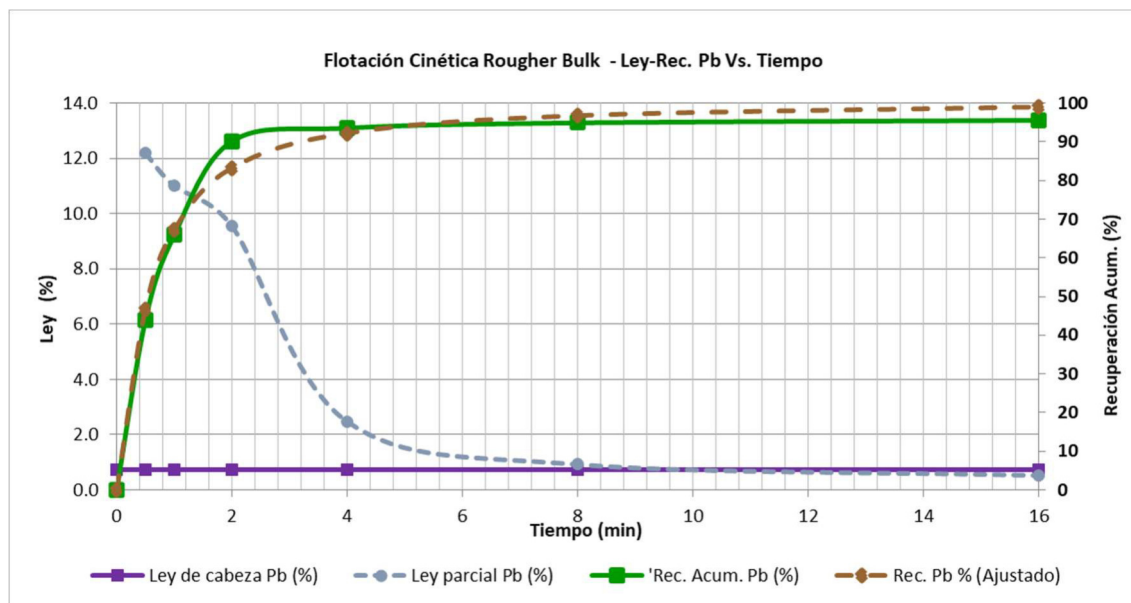
Ajuste Klimper para Pb utilizando Solver

Ajuste Klimper	
Pb	
e(t)	(E-e(t)) ²
0	0
47	8
67	2
83	49
92	2
97	3
99	11
94	74.63

Roo =	101.19
K =	2.80
T optimo	4.80
d(Rt)/dt	0.0004

Figura 16

Ley – Recuperación Pb vs Tiempo (Calculado y Ajustado con Klimper)



Estos resultados detallados proporcionan una visión integral de las variaciones en la ley de los elementos a lo largo del proceso de Cinética de Flotación Rougher Bulk, destacando las tendencias significativas en cada intervalo de tiempo de concentración.

Incluso, aplicando Klimper se obtuvieron tiempos óptimos de flotación muy similares de 4.79 minutos para Cu y 4.80 minutos para Pb con constantes cinéticas de 2.85 y 2.80 respectivamente, consideradas muy buenas en la recuperación de dichas partículas valiosas.

Dado que este proceso ya ha mostrado una alta recuperación de metales valiosos y secundarios, y tiene un rendimiento eficiente en las primeras etapas, los costos operacionales pueden mantenerse dentro de un rango razonable. La optimización continua del proceso (ajustando reactivos y tiempos de flotación) permitirá reducir costos y aumentar la eficiencia, contribuyendo a la rentabilidad del proyecto.

CAPÍTULO V DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el presente estudio respaldan la hipótesis general planteada, la cual sugiere que la evaluación de la granulometría y el consumo del reactivo colector AP-3418 puede optimizar la calidad de un concentrado de cobre y plomo, al tiempo que reduce la activación de especies de hierro y zinc. Los porcentajes de recuperación para elementos como plata (Ag), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn) y hierro (Fe) muestran variaciones significativas en distintos productos y fracciones de la muestra, destacándose especialmente la categoría del Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk por su impacto positivo en la eficiencia de la recuperación.

En la presente investigación, las pruebas de moliendabilidad y granulometría de las muestras revelaron que para obtener un grado de molienda de 55% -m 200, se requiere moler el mineral durante 12.11 minutos, mientras que para lograr un grado de molienda de 65% -m 200, se requiere moler el mineral durante 15.45 minutos. Así mismo, se obtuvo que el consumo del reactivo AP-3418 para la prueba realizada a un grado de molienda de 65% -m200, un pH de 10.0, un RPM de 770 y un tiempo de 5 minutos fue de 15.0 g/t mientras que para un tiempo de 3.0 minutos fue de 5.0 g/t.

En la comparación con los hallazgos de López, M. A., et al. (2020), cuyo enfoque está en la optimización de minerales de cobre mediante variación de la granulometría y dosificación de reactivos, se evidencia que esta investigación se centra en la optimización de la calidad del concentrado de cobre y plomo. Mientras Salvo (2022) obtiene resultados modestos en la eliminación de sulfatos, la presente investigación destaca la eficacia de la combinación del Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk en la recuperación de elementos específicos.

Asillo (2022) destaca la influencia de la granulometría, pH y reactivos en la recuperación de plomo y zinc. Los resultados actuales respaldan esta conclusión al mostrar que la combinación

"Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk" es crucial para maximizar las recuperaciones y leyes de cobre y plomo en diferentes productos (P04, P05 y P06).

En lo que respecta a la Flotación Cinética Rougher Bulk, los datos detallados en las tablas 19 y 20, proporcionan una visión integral de la variación en la ley y recuperación de elementos a lo largo del proceso. Estos resultados confirman la influencia significativa de la granulometría y el tiempo en la eficiencia del proceso, respaldando así la hipótesis general planteada.

Los resultados obtenidos en este estudio respaldan la hipótesis general y demuestran la eficacia de la evaluación de la granulometría y el consumo del reactivo colector para optimizar la calidad del concentrado de cobre y plomo, reduciendo la activación de especies de hierro y zinc. La combinación "Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk" emerge como un factor crucial en este proceso.

La primera hipótesis plantea que la granulometría idónea permitirá optimizar la calidad de los concentrados cobre plomo mediante el proceso de flotación. Los resultados obtenidos respaldan esta hipótesis, ya que la combinación "Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk" muestra una mejora sustancial en la eficiencia de recuperación de elementos específicos, especialmente el cobre y plomo. La granulometría juega un papel crucial, ya que la recuperación de cobre y plomo aumenta significativamente en comparación con otras etapas del proceso. Este hallazgo concuerda con la investigación de Asillo (2022), quien también destaca la importancia de la granulometría en la recuperación de plomo y zinc.

Al comparar con los resultados de Asillo (2022), donde se destaca la importancia de la granulometría en la recuperación de plomo y zinc, se ratifica la relevancia de este factor en los hallazgos actuales. Además, Asillo (2022) logra una recuperación total del 85% de Pb y 82.5% de

Zn, lo cual respalda la eficiencia del proceso, especialmente en la combinación "Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk"

Asillo (2022) destaca la importancia de la granulometría en la recuperación de plomo y zinc. Nuestros resultados respaldan este hallazgo al mostrar mejoras significativas en la recuperación de estos elementos, especialmente en la combinación del "Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk".

La segunda hipótesis sugiere que el correcto consumo del reactivo colector AP-3418 permitirá optimizar la calidad de los concentrados cobre plomo en el proceso de flotación. Nuestros resultados respaldan esta afirmación, ya que la combinación del "Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk" demuestra ser esencial para maximizar la recuperación de elementos como plata, cobre, plomo, zinc y hierro. Este hallazgo respalda la importancia del consumo adecuado del reactivo colector AP-3418, coincidiendo con la investigación de Salvo (2022), aunque con objetivos diferentes. Salvo se centra en la eliminación de iones de las aguas, pero nuestros resultados muestran que la combinación mencionada es crucial para la recuperación de elementos específicos.

Aunque Salvo (2022) se centra en la eliminación de iones de las aguas, nuestros resultados muestran la eficacia de la combinación del "Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk" en la recuperación de elementos específicos. Esto resalta la importancia de procesos selectivos para mejorar la calidad del concentrado.

La tercera hipótesis plantea que la aplicación de los resultados obtenidos a nivel laboratorio permitirá optimizar la calidad de concentrados a nivel industrial. Los resultados presentados respaldan esta hipótesis, ya que la combinación del "Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk" emerge como crucial para maximizar la recuperación de cobre en el sistema evaluado. Estos

hallazgos sugieren que la eficiencia superior de esta combinación en comparación con otras etapas del proceso podría traducirse positivamente a nivel industrial.

Comparando estos resultados con la investigación de Calle (2023), que también se centra en la flotación selectiva, se observa que nuestra combinación del "Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk" demuestra eficacia en la recuperación de cobre a lo largo del tiempo, destacando la consistencia en la mejora de la recuperación en diversas fases del proceso. Esto sugiere que la aplicación a nivel industrial podría proporcionar resultados positivos y consistentes en términos de recuperación de cobre, respaldando así la hipótesis específica 3.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos a través de pruebas de flotación Rougher y la aplicación de parámetros específicos han permitido identificar las condiciones óptimas para mejorar la calidad del concentrado de cobre y plomo, desde leyes iniciales de 16.55% Cu y 8.86% Pb a leyes finales de 19.02% Cu y 10.19% Pb, el cual es el objetivo general de la presente investigación.
- En relación con la primera hipótesis de conocer como interviene la granulometría en la calidad del concentrado Rougher en el circuito bulk, se pudo observar que una menor granulometría favorece en la liberación de las partículas valiosas, ayudando a disminuir la presencia de Fe y Zn en el concentrado rougher del circuito bulk.
- La segunda hipótesis sugiere conocer el efecto en la adición del reactivo colector AP-3418 en el circuito bulk, mostrándose que con una dosificación mayor a la inicial se obtiene una mayor ley de Cu y Pb, manteniéndose estable su respectiva recuperación.
- La tercera hipótesis, centrada en establecer las mejores condiciones de flotación a nivel laboratorio para optimizar la calidad del concentrado a nivel industrial, ha sido abordado con éxito, obteniendo una ley de 19.02% Cu y 10.19% Pb, principalmente disminuyendo las activaciones de hierro y zinc en el circuito bulk. Los hallazgos, especialmente la eficacia de la combinación del "Concentrado Rougher Bulk más el Concentrado Scavenger Bulk", respaldan la viabilidad de aplicar estos resultados a una escala industrial para mejorar la recuperación de cobre y plomo.

RECOMENDACIONES

1. Optimización Continua de Parámetros Operativos:

Consideramos que sería importante realizar un monitoreo constante de los parámetros operativos durante el proceso de flotación. La optimización continua de factores como la granulometría y el consumo de reactivo colector AP-3418 contribuirá a mantener y mejorar la eficiencia del proceso.

2. Investigación Adicional a Nivel Industrial:

Dada la relevancia de los resultados a nivel laboratorio, recomendaríamos llevar a cabo investigaciones adicionales a escala de planta piloto. Estudios a mayor escala permitirán validar la aplicabilidad y eficacia de las condiciones y estrategias de flotación identificadas en este trabajo.

3. Capacitación y Desarrollo del Personal:

Dada la complejidad del proceso de flotación y la importancia de la toma de decisiones basada en datos, se sugiere invertir en la capacitación y desarrollo del personal involucrado en el manejo y supervisión de las operaciones. Un equipo capacitado contribuirá significativamente a la optimización continua y la resolución efectiva de desafíos operativos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, C. y Plasencia, O. (2016). Influencia de la dosificación de los colectores AP-3418 y AR-404 sobre la recuperación de plomo y zinc por flotación selectiva de un mineral polimetálico de la empresa Minera Occidental 2 de Cajamarca S.R.L. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/9952>
- Asillo, C. (2022). Evaluación de un circuito de recuperación de plomo y zinc mediante gravimetría y flotación. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/624e736f-dfa2-4b2e-9b3a-070a13f4a7a8/content>
- Azañero. (2015). Concentración y Flotación de Minerales. Lima: Editorial Colecciones Jóvic.
- Baker, A. (2022). Las características de corrosión y el tratamiento de conservación electroquímica de un osario de plomo arqueológico de Jordania. Ge-conservación, (22), 154-161. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8867705>
- (Bonilla, et al, 2019).
- <https://www.redalyc.org/journal/4263/426360705002/html/>
- Calle, A. (2023). Obtención de sulfuros de zinc de una mena polimetálica mediante flotación selectiva en la mina Cristian David, Pasaje - El Oro. <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/13267/1/18794.pdf>
- Canaza, D. (2019). Estudio experimental en la planta concentradora Sacracancha, tratamiento de blending de minerales sulfurados y oxidados para la concentración de plomo cobre y zinc a nivel experimental. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/3415>

- De Souza, N., Vicakas, O., Aniceto, A., & Negrão, G. (2020). Potencial fitorremediador da *Syngonium podophyllum* sob os efeitos de Chumbo no solo. https://www.researchgate.net/profile/Glaucio-Negrao/publication/328643433_Potencial_fitorremediador_da_Syngonium_podophyllum_sob_os_efeitos_de_Chumbo_no_solo/links/5bda23d84585150b2b945a38/Potencial-fitorremediador-da-Syngonium-podophyllum-sob-os-efeitos-de-Chumbo-no-solo.pdf
- Egas, Á. (1985), "Evaluación de Plantas Concentradoras" 1º Edición, Lima – Perú.
- Elizondo, M., Uribe, A., Bello, S., & Alonso O. (2021). Flotation behavior and interaction mechanisms between anglesite and hydroxamates. *Epistemos (Sonora)*, 15(31), 22-30.
- Elizondo, M., Uribe, A., Nava, F., (2022) Flotation studies of galena (PbS), cerussite (PbCO₃) and anglesite (PbSO₄) with hydroxamic acids as collectors. *Minerals Engineering*, 2020, 155, 106456. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106456>
- Gaucin, S, Rojas, J., Zazueta, D., Delgado, E., Vázquez, P., Medrano, H., & Reyes, D. (2024). Exploration of In Vitro Voltage Production by a Consortium of Chemolithotrophic Microorganisms Using Galena (PbS) as a Sulphur Source. *Clean Technologies*, 6(1), 62-76. <https://www.mdpi.com/2571-8797/6/1/5>
- Lesly, G. (2023). Tratamiento de mineral sulfurado para la recuperación de concentrados de cobre, plomo, zinc en la Empresa Administradora Cerro S.A.C.-Pasco. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6528756?show=full>
- López, M. A., et al. (2020). Optimización de la flotación de minerales de cobre mediante la variación de granulometría y dosificación de reactivos. *Revista de Metalurgia*, 56(3), 155-168. <https://www.redalyc.org/journal/816/81665362002/>

- Manzaneda, J. (2014). *Trabajos Internos Volcan Compañía Minera SAA*. Lima: Volcan SAA.
<https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Mine-21.pdf>
- (Montes, 2015). (<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/135130>):
- Maldonado, C., & Farías, M. (2018). Evaluación de la eficiencia de flotación en función de la granulometría y los colectores utilizados. *Journal of Mining and Metallurgy*, 54(1), 15-23.
- Martínez, L. (2020). Estudio de la influencia de la granulometría y reactivos en la flotación de concentrados bulk. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
<https://oa.upm.es/816/81665362002/>
- Peña, J. (2023). Recuperación de oro libre y asociado a la piritita de los relaves de la minera El Roble por el método de flotación.
https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/35762/2/HenaoJuan_2023_RecuperacionOroRelaves.pdf
- Pierre, B. (1990). *Ingeniería Metalúrgica*. 1ra. Edición. Editorial UNCO.
- Sacsi, S. (2022). Evaluación del circuito de remolienda para la optimización de la flotación cleaner en la unidad minera Constancia. Tesis de grado.
<https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/ea47ff8e-d3f8-4307-a58a-82d5150e285a/content>
- Salvo, J. (2022). Rendimiento de nanofiltración para el tratamiento de aguas de cubetas de tranques de relaves de minería de cobre en Chile.
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/192487/Rendimiento-de-nanofiltracion-para-el-tratamiento-de-aguas-de-cubetas-de-tranques-de-relaves-de-mineria-de-cobre-en-Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

(Silvestre, 2007).

Solvay, I. (2002). "Mining Chemicals Handbook". Solvay S.A., Belgium.

Sutulov Alexander, (1963), "Flotación de Minerales". Universidad de Concepción - Instituto de Investigación, Chile.

Taggarl. A. (1968). Elementos de preparación de minerales, New york.

(Vargas, 2018). Flotación de Minerales: Teoría y Práctica

Torres, S. (2019). Flotación de minerales: Optimización de la dosificación de colectores y variación de granulometría. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín, Perú.

Vásquez, J. (2021). Optimización de la flotación de minerales de cobre: Efecto de la granulometría y colectores en el proceso. Tesis de maestría, Universidad de Chile.

Villalta, V. (2022). Análisis de la optimización de los parámetros y factores que afectan la flotación de la molibdenita en la planta de molibdeno en la concentradora Cuajone.
<https://repositorio.unsa.edu.pe/bitstreams/4e27a631-823d-4a18-bdb5-7815eb862a3c/download>

Wills. (1989) Ingeniería Metalúrgica. 2da Edición, Editorial Barcelona – España.

ANEXOS

Tabla 23

Matriz de Consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Técnica
Problema general ¿Cómo optimizar la calidad del concentrado cobre-plomo en el circuito bulk de un mineral polimetálico, sin afectar la recuperación global?	Objetivo general Optimizar la calidad del concentrado cobre-plomo evaluando la granulometría y el consumo del reactivo AP-3418.	Hipótesis general La evaluación de la granulometría y consumo del reactivo AP-3418 permitirá optimizar la calidad de un concentrado de cobre y plomo.	Granulometría (Variable independiente)	Se reportan en términos porcentuales de los resultados de los ensayos químicos.
Problema específico 1 ¿Cómo influye la granulometría en la calidad del concentrado Cu-Pb?	Objetivo específico 1 Evaluar la granulometría en el circuito bulk para mejorar la calidad del concentrado Cu-Pb.	Hipótesis específica 1 El ajuste de la granulometría adecuada mejora la liberación de minerales valiosos	Consumo del reactivo colector AP-3418 (Variable independiente)	Realizar pruebas de molienda y posteriores de flotación para optimizar la granulometría
Problema específico 2 ¿Qué efecto tiene la variación del consumo de AP-3418 en la calidad del concentrado?	Objetivo específico 2 Evaluar el consumo del reactivo colector AP-3418 en el circuito bulk	Hipótesis específica 2 La dosificación óptima de AP-3418 incrementa la hidrofobicidad de los sulfuros de cobre y plomo	Calidad del concentrado (Variable dependiente)	Realizar pruebas de flotación con el objetivo de evaluar el consumo del AP-3418
Problema específico 3 ¿Cómo aplicar los resultados obtenidos en laboratorio para optimizar el proceso a nivel industrial?	Objetivo específico 3 Proponer ajustes a nivel industrial orientados a mejorar la calidad de los concentrados.	Hipótesis específica 3 La aplicación de los resultados obtenidos a nivel laboratorio permitirá optimizar a nivel industrial.	Recuperación metalúrgica (Variable dependiente)	Escalamiento y aplicación de resultados a nivel laboratorio a escala industrial.

Tabla 24*Impacto Económico y Operativo del Proceso Optimizado*

Concepto	Antes de la Optimización	Después de la Optimización	Variación / Efecto	Argumento Técnico
Ley de Cobre (%)	16.55	19.02	+2.47	Mayor liberación de Cu y Pb por control de granulometría.
Recuperación de Cobre (%)	89.91	90.09	+0.18	Dosificación óptima de AP-3418 mejora la adherencia del Cu a las burbujas.
Toneladas de Concentrado (t/mes)	1,000	1,150	+150	Incremento de recuperación sin ampliar capacidad instalada.
Cobre contenido (t Cu/mes)	145.0	169.0	+24	Más metal vendible gracias a la mejora en eficiencia metalúrgica.
Precio referencial Cu (USD/t Cu)	8,000	8,000	—	Precio de mercado constante.
Ingresos por ventas (USD/mes)	1,160,000	1,352,000	+192,000	Incremento de ingresos directos por metal recuperado.
Costo adicional por reactivo y molienda (USD/mes)	—	20,000	–20,000	Mayor consumo de AP-3418 por optimización.
Beneficio neto mensual (USD)	—	—	+172,000	Aumento de rentabilidad neta con baja inversión.
Beneficio anual estimado (USD)	—	—	+2,064,000	Impacto económico directo y sostenible para la planta.

Tabla 25

Resultados de la Determinación del Tiempo de Molienda en Bolas

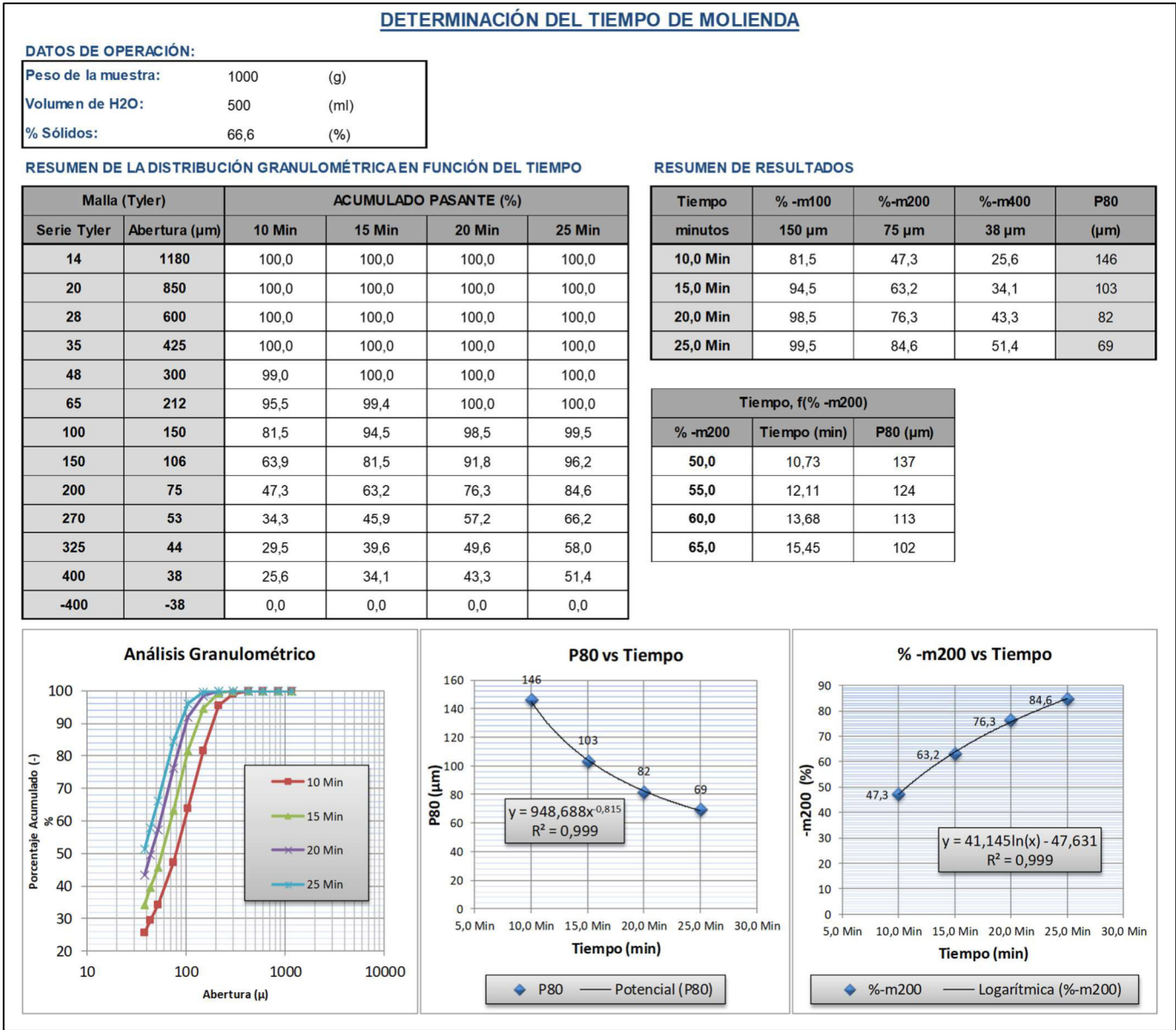


Tabla 26

Resultados de la Determinación del Work Index (F.C. Bond)

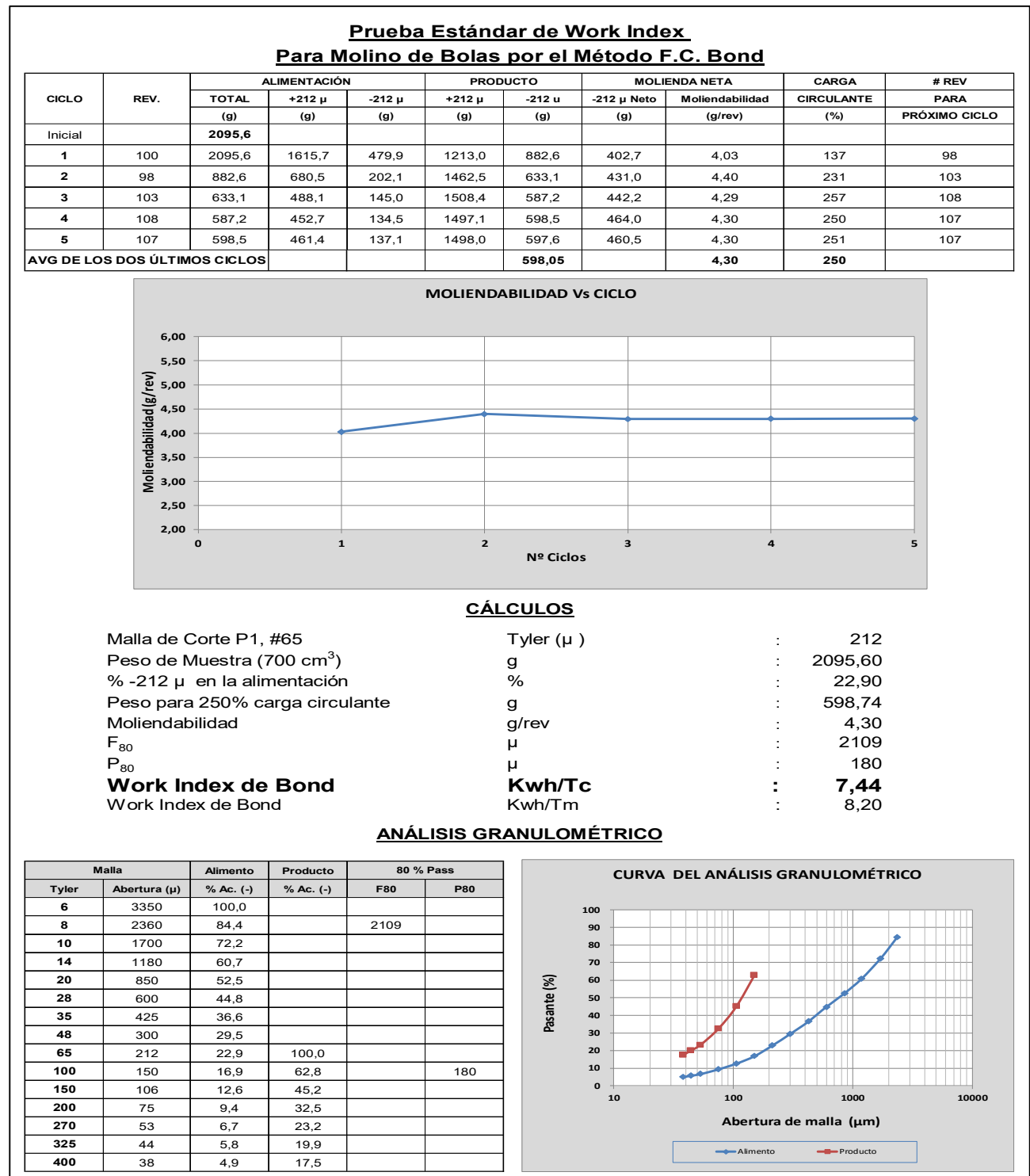


Tabla 27

Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P01 de recuperación mediante Excel.

Peso Alimento (g):	1000	Vol. Celda (cc):	3000											
% Sólidos Molienda:	66.7	% Sólidos Flot.:	33											
Grado de Molienda:	50% -m200	P ₈₀ (µm):	137											
Etapa	Tiempo (min)	pH	RPM	Presión Aire (psi)	Flujo aire (L/min)	REACTIVOS ADICIONADOS (g/t)								
						Ca.Ind	NaCN	ZnSO4		AP-3418	Z-11	Z-6	CuSO4	MIBC
Molienda	10.7		-	-	-	-	50.0	500.0		-	-	-	-	-
Acond. Ro Bulk	5.0	7.5	770.0	-	-	90.0	-	-		20.0	-	-	-	30.0
Flot. Ro Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Bulk	3.0	7.5	770.0	-	-	-	-	-		5.0	-	-	-	-
Flot. Scv-Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Remolienda	5.0	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Ro Zn	10.0	11.0	750.0	-	-	568.0	-	-		-	30.0	-	350.0	25.0
Flot. Ro Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Zn	3.0	11.0	750.0	-	-	-	-	-		-	-	15.0	-	5.0
Flot. Scv-Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
TOTAL	44.7	-	-	-	-	658.0	50.0	500.0		25.0	30.0	15.0	350.0	60.0

Condiciones de Flotación

PRODUCTO	Peso	Ley					Recuperación (%)				
		g/t	g/t				g/t				
	(%)	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
Conc.Ro Bulk	5.06	727.00	20.34	12.51	5.95	26.70	62.55	69.46	87.43	2.72	5.09
Conc.Scv-Bulk	1.58	391.00	13.75	1.92	13.72	29.92	10.48	14.63	4.18	1.96	1.78
Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	6.63	647.19	18.77	9.99	7.80	27.46	73.03	84.08	91.61	4.68	6.87
Conc.Ro Zn	19.58	26.70	0.60	0.09	41.06	20.14	8.90	7.97	2.46	72.75	14.88
Conc.Scv-Zn	27.59	14.40	0.22	0.06	6.98	41.83	6.76	4.14	2.10	17.43	43.55
Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	47.18	19.51	0.38	0.07	21.13	32.83	15.66	12.11	4.56	90.18	58.43
Relave	46.19	14.40	0.12	0.06	1.23	19.91	11.32	3.81	3.83	5.14	34.70
Cabeza Calc.	100.00	58.78	1.48	0.72	11.05	26.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cab. Ensayada		59.10	1.47	0.72	10.53	25.98					

Balance Metalúrgico

Nota: Elaboración propia.

Tabla 28

Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P02 de recuperación mediante Excel.

Peso Alimento (g):	1000	Vol. Celda (cc):	3000											
% Sólidos Molienda:	66.7	% Sólidos Flot.:	33											
Grado de Molienda:	60% -m200	P ₈₀ (µm):	112											
Etapa	Tiempo (min)	pH	RPM	Presión Aire (psi)	Flujo aire (L/min)	REACTIVOS ADICIONADOS (g/t)								
						Ca.Ind	NaCN	ZnSO4		AP-3418	Z-11	Z-6	CuSO4	MIBC
Molienda	10.7		-	-	-	-	50.0	500.0		-	-	-	-	-
Acond. Ro Bulk	5.0	7.5	770.0	-	-	90.0	-	-		20.0	-	-	-	30.0
Flot. Ro Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Bulk	3.0	7.5	770.0	-	-	-	-	-		5.0	-	-	-	-
Flot. Scv-Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Remolienda	5.0	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Ro Zn	10.0	11.0	750.0	-	-	568.0	-	-		-	30.0	-	350.0	25.0
Flot. Ro Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Zn	3.0	11.0	750.0	-	-	-	-	-		-	-	15.0	-	5.0
Flot. Scv-Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
TOTAL	44.7	-	-	-	-	658.0	50.0	500.0		25.0	30.0	15.0	350.0	60.0

Condiciones de Flotación

PRODUCTO	Peso	Ley					Recuperación (%)				
		g/t	g/t				g/t				
	(%)	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
Conc.Ro Bulk	5.17	727.00	20.51	12.80	6.05	25.99	64.12	71.49	88.14	3.01	5.04
Conc.Scv-Bulk	1.72	469.00	13.69	2.08	10.37	32.75	13.73	15.84	4.76	1.71	2.11
Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	6.88	662.69	18.81	10.13	7.13	27.68	77.85	87.33	92.90	4.72	7.15
Conc.Ro Zn	14.57	28.20	0.59	0.08	50.81	5.96	7.01	5.79	1.55	71.16	3.26
Conc.Scv-Zn	26.10	15.30	0.20	0.05	7.23	36.16	6.81	3.52	1.84	18.14	35.43
Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	40.67	19.92	0.34	0.06	22.84	25.34	13.83	9.31	3.40	89.30	38.69
Relave	52.44	9.30	0.10	0.05	1.19	27.51	8.32	3.36	3.70	5.98	54.16
Cabeza Calc.	100.00	58.60	1.48	0.75	10.40	26.64	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cab. Ensayada		59.10	1.47	0.72	10.53	25.98					

Balance Metalúrgico

Nota: Elaboración propia.

Tabla 29

Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P03 de recuperación mediante Excel.

Peso Alimento (g):	1000	Vol. Celda (cc):	3000											
% Sólidos Molienda:	66.7	% Sólidos Flot.:	33											
Grado de Molienda:	50% -m200	P ₈₀ (µm):	137											
Etapa	Tiempo (min)	pH	RPM	Presión Aire (psi)	Flujo aire (L/min)	REACTIVOS ADICIONADOS (g/t)								
						Ca.Ind	NaCN	ZnSO4		AP-3418	Z-11	Z-6	CuSO4	MIBC
Molienda	10.7		-	-	-	-	50.0	500.0		-	-	-	-	-
Acond. Ro Bulk	5.0	7.5	770.0	-	-	90.0	-	-		35.0	-	-	-	30.0
Flot. Ro Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Bulk	3.0	7.5	770.0	-	-	-	-	-		5.0	-	-	-	-
Flot. Scv-Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Remolienda	5.0	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Ro Zn	10.0	11.0	750.0	-	-	568.0	-	-		-	30.0	-	350.0	25.0
Flot. Ro Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Zn	3.0	11.0	750.0	-	-	-	-	-		-	-	15.0	-	5.0
Flot. Scv-Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
TOTAL	44.7	-	-	-	-	658.0	50.0	500.0		40.0	30.0	15.0	350.0	60.0

Condiciones de Flotación

PRODUCTO	Peso	Ley					Recuperación (%)				
		g/t	(%)								
	(%)	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
Conc.Ro Bulk	5.53	689.00	20.00	11.52	5.87	25.10	66.33	76.38	85.79	3.16	5.52
Conc.Scv-Bulk	1.50	364.00	9.14	2.84	12.07	29.54	9.54	9.50	5.75	1.77	1.77
Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	7.03	619.46	17.68	9.66	7.20	26.05	75.88	85.89	91.54	4.92	7.29
Conc.Ro Zn	14.61	30.80	0.56	0.11	51.46	10.03	7.84	5.65	2.13	73.11	5.83
Conc.Scv-Zn	26.06	11.80	0.21	0.05	6.57	40.22	5.36	3.69	1.83	16.66	41.72
Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	40.67	18.62	0.33	0.07	22.69	29.38	13.19	9.34	3.95	89.77	47.55
Relave	52.30	12.00	0.13	0.06	1.04	21.69	10.93	4.77	4.51	5.31	45.16
Cabeza Calc.	100.00	57.41	1.45	0.74	10.28	25.12	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cab. Ensayada		59.10	1.47	0.72	10.53	25.98					

Balance Metalúrgico

Nota: Elaboración propia.

Tabla 30

Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P04 de recuperación mediante Excel.

Peso Alimento (g):	1000	Vol. Celda (cc):	3000											
% Sólidos Molienda:	66.7	% Sólidos Flot.:	33											
Grado de Molienda:	60% -m200	P ₈₀ (µm):	112											
Etapa	Tiempo (min)	pH	RPM	Presión Aire (psi)	Flujo aire (L/min)	REACTIVOS ADICIONADOS (g/t)								
						Ca.Ind	NaCN	ZnSO4		AP-3418	Z-11	Z-6	CuSO4	MIBC
Molienda	10.7		-	-	-	-	50.0	500.0		-	-	-	-	-
Acond. Ro Bulk	5.0	7.5	770.0	-	-	90.0	-	-		35.0	-	-	-	30.0
Flot. Ro Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Bulk	3.0	7.5	770.0	-	-	-	-	-		5.0	-	-	-	-
Flot. Scv-Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Remolienda	5.0	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Ro Zn	10.0	11.0	750.0	-	-	568.0	-	-		-	30.0	-	350.0	25.0
Flot. Ro Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Zn	3.0	11.0	750.0	-	-	-	-	-		-	-	15.0	-	5.0
Flot. Scv-Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
TOTAL	44.7	-	-	-	-	658.0	50.0	500.0		40.0	30.0	15.0	350.0	60.0

Condiciones de Flotación

PRODUCTO	Peso	Ley					Recuperación (%)				
		g/t	g/t				g/t				
	(%)	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
Conc.Ro Bulk	5.40	657.00	20.91	12.38	5.77	24.06	62.78	72.63	88.88	3.02	4.76
Conc.Scv-Bulk	1.93	360.00	12.89	1.88	10.27	28.29	12.29	16.00	4.82	1.92	2.00
Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	7.33	578.80	18.80	9.62	6.95	25.17	75.07	88.63	93.70	4.93	6.76
Conc.Ro Zn	14.21	33.60	0.55	0.08	55.14	8.33	8.45	5.05	1.42	75.86	4.33
Conc.Scv-Zn	24.71	17.90	0.21	0.05	7.40	37.59	7.83	3.35	1.74	17.70	34.01
Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	38.93	23.63	0.34	0.06	24.83	26.91	16.28	8.40	3.16	93.55	38.35
Relave	53.74	9.10	0.09	0.04	0.29	27.90	8.65	2.97	3.14	1.51	54.90
Cabeza Calc.	100.00	56.52	1.56	0.75	10.33	27.31	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cab. Ensayada		59.10	1.47	0.72	10.53	25.98					

Balance Metalúrgico

Nota: Elaboración propia.

Tabla 31

Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P05 de recuperación mediante Excel.

Peso Alimento (g):	1000	Vol. Celda (cc):	3000
% Sólidos Molienda:	66.7	% Sólidos Flot.:	33
Grado de Molienda:	55% -m200	P ₉₀ (µm):	124

Etapa	Tiempo (min)	pH	RPM	Presión Aire (psi)	Flujo aire (L/min)	REACTIVOS ADICIONADOS (g/t)								
						Ca.Ind	NaCN	ZnSO4		AP-3418	Z-11	Z-6	CuSO4	MIBC
Molienda	10.7		-	-	-	-	50.0	500.0		-	-	-	-	-
Acond. Ro Bulk	5.0	7.5	770.0	-	-	90.0	-	-		30.0	-	-	-	30.0
Flot. Ro Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Bulk	3.0	7.5	770.0	-	-	-	-	-		5.0	-	-	-	-
Flot. Scv-Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Remolienda	5.0	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Ro Zn	10.0	11.0	750.0	-	-	568.0	-	-		-	30.0	-	350.0	25.0
Flot. Ro Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Zn	3.0	11.0	750.0	-	-	-	-	-		-	-	15.0	-	5.0
Flot. Scv-Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
TOTAL	44.7	-	-	-	-	658.0	50.0	500.0		35.0	30.0	15.0	350.0	60.0

Condiciones de Flotación

PRODUCTO	Peso	Ley					Recuperación (%)				
		g/t	g/t				g/t				
	(%)	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
Conc.Ro Bulk	5.66	688.00	21.50	13.08	4.20	24.31	68.62	75.25	89.04	2.28	5.04
Conc.Scv-Bulk	2.00	270.00	12.00	2.02	12.12	25.76	9.52	14.84	4.87	2.33	1.89
Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	7.66	578.86	19.02	10.19	6.27	24.69	78.14	90.09	93.91	4.61	6.93
Conc.Ro Zn	14.16	33.00	0.51	0.08	56.68	15.79	8.23	4.47	1.36	77.03	8.19
Conc.Scv-Zn	24.28	12.10	0.26	0.06	7.29	38.86	5.18	3.90	1.75	16.97	34.54
Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	38.44	19.80	0.35	0.07	25.49	30.36	13.41	8.38	3.11	94.01	42.72
Relave	53.90	8.90	0.05	0.05	0.27	25.52	8.45	1.53	2.98	1.39	50.35
Cabeza Calc.	100.00	56.76	1.62	0.83	10.42	27.32	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cab. Ensayada		59.10	1.47	0.72	10.53	25.98					

Balance Metalúrgico

Nota: Elaboración propia.

Tabla 32

Resultados de la Prueba de Flotación Rougher P06 de recuperación mediante Excel.

Peso Alimento (g):	1000	Vol. Celda (cc):	3000											
% Sólidos Molienda:	66.7	% Sólidos Flot.:	33											
Grado de Molienda:	55% -m200	P ₈₀ (µm):	124											
Etapa	Tiempo (min)	pH	RPM	Presión Aire (psi)	Flujo aire (L/min)	REACTIVOS ADICIONADOS (g/t)								
						Ca.Ind	NaCN	ZnSO4		AP-3418	Z-11	Z-6	CuSO4	MIBC
Molienda	10.7		-	-	-	-	50.0	500.0		-	-	-	-	-
Acond. Ro Bulk	5.0	7.5	770.0	-	-	90.0	-	-		30.0	-	-	-	30.0
Flot. Ro Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Bulk	3.0	7.5	770.0	-	-	-	-	-		5.0	-	-	-	-
Flot. Scv-Bulk	2.0	7.5	770.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Remolienda	5.0	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Ro Zn	10.0	11.0	750.0	-	-	568.0	-	-		-	30.0	-	350.0	25.0
Flot. Ro Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
Acond. Scv- Zn	3.0	11.0	750.0	-	-	-	-	-		-	-	15.0	-	5.0
Flot. Scv-Zn	2.0	11.0	750.0	12.0	10.0	-	-	-		-	-	-	-	-
TOTAL	44.7	-	-	-	-	658.0	50.0	500.0		35.0	30.0	15.0	350.0	60.0

Condiciones de Flotación

PRODUCTO	Peso	Ley					Recuperación (%)				
		g/t	g/t				g/t				
	(%)	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe	Ag	Cu	Pb	Zn	Fe
Conc.Ro Bulk	5.60	687.80	21.48	13.10	4.18	24.13	68.35	75.11	88.86	2.25	4.96
Conc.Scv-Bulk	2.01	269.50	12.03	2.05	12.27	25.44	9.63	15.13	5.00	2.37	1.88
Cc.Ro Bulk+ Cc.Scv.Bulk	7.61	577.17	18.98	10.18	6.32	24.48	77.98	90.24	93.86	4.62	6.84
Conc.Ro Zn	14.14	33.13	0.57	0.08	56.58	15.65	8.32	5.03	1.37	76.91	8.13
Conc.Scv-Zn	24.20	12.04	0.21	0.06	7.35	38.94	5.17	3.17	1.76	17.09	34.59
Cc.Ro Zn+ Cc.Scv.Zn	38.34	19.82	0.34	0.07	25.51	30.35	13.49	8.21	3.13	94.00	42.72
Relave	54.05	8.90	0.05	0.05	0.26	25.42	8.54	1.55	3.01	1.37	50.44
Cabeza Calc.	100.00	56.34	1.60	0.83	10.40	27.24	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cab. Ensayada		59.10	1.47	0.72	10.53	25.98					

Balance Metalúrgico

Nota: Elaboración propia.

Tabla 33

Diseño Experimental para la Evaluación de la Recuperación de Cobre y Plomo en Función de la Molienda y Dosificación de AP-3418

Diseño Experimental									
Factores:	2	Diseño base:	2; 4						
Corridas:	6	Réplicas:	1						
Bloques:	1	Puntos central:	2						
OrdenEst	OrdenCorrida	PuntoCentral	Bloques	Molienda %-m200	Dosificación AP-3418	Ley de Cu	%Recuperación Cu	Ley de Pb	%Recuperación Pb
1	1	1	1	50	30	18.77	84.08	9.99	91.61
2	2	1	1	60	30	18.81	87.33	10.13	92.90
3	3	1	1	50	40	17.68	85.89	9.66	91.54
4	4	1	1	60	40	18.80	88.63	9.62	93.70
5	5	0	1	55	35	19.02	90.09	10.19	93.91
6	6	0	1	55	35	18.98	90.24	10.18	93.86

Nota: Elaboración propia.

Figura 17

Gráfico de Pareto de la Ley de Cobre según la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda

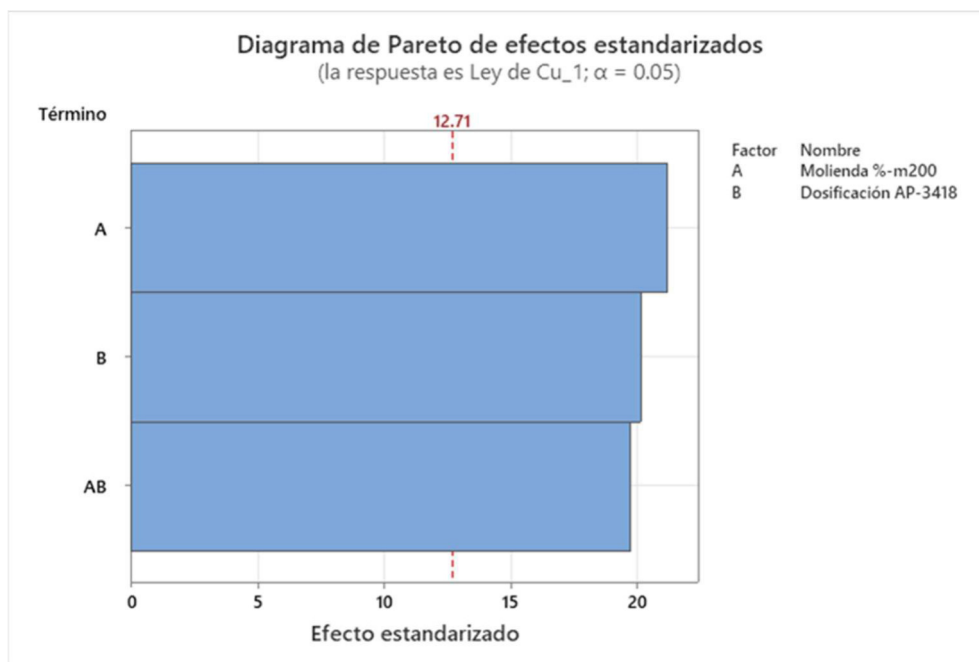


Figura 18

Efectos principales de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Cobre

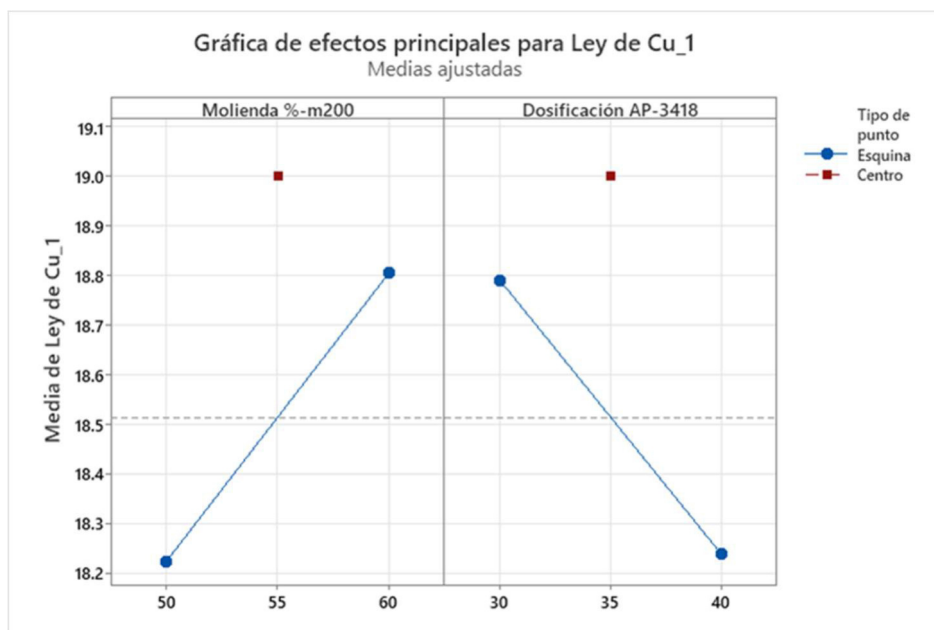


Figura 19

Gráfico de contorno de efectos de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Cobre

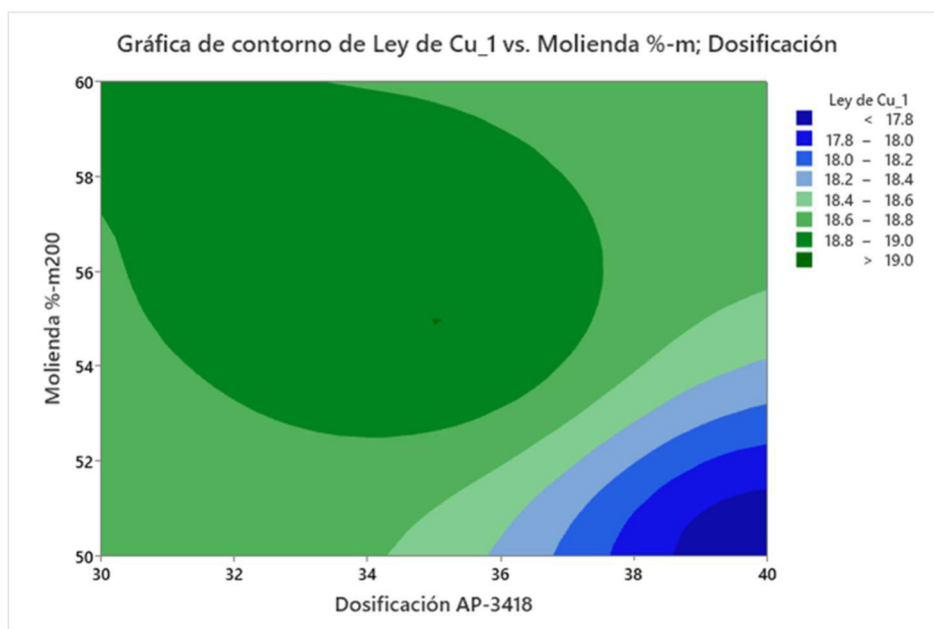


Figura 20

Gráfico de superficie de efectos de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Cobre

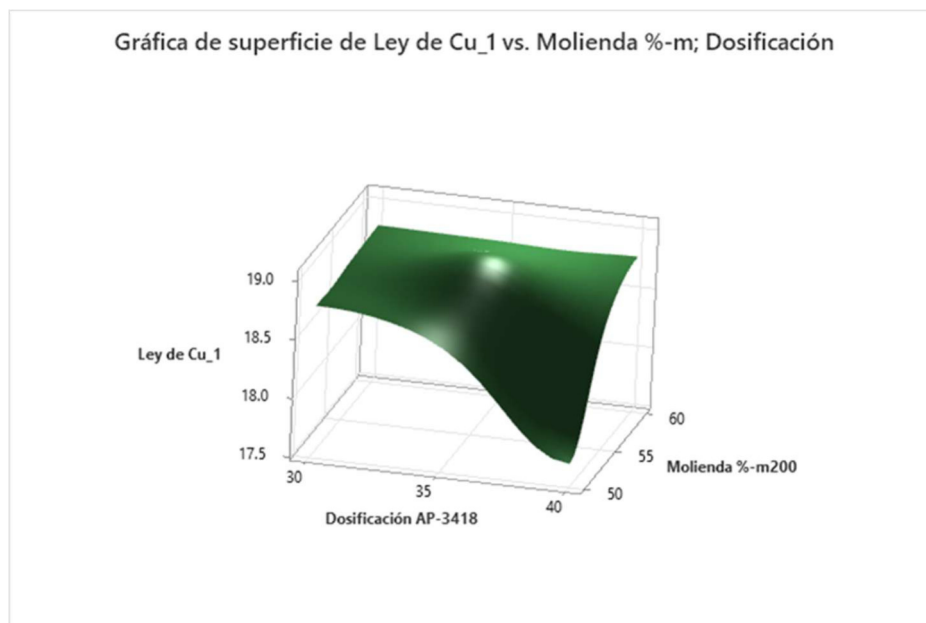


Figura 21

Gráfico de Pareto de la Recuperación de Cobre según la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda

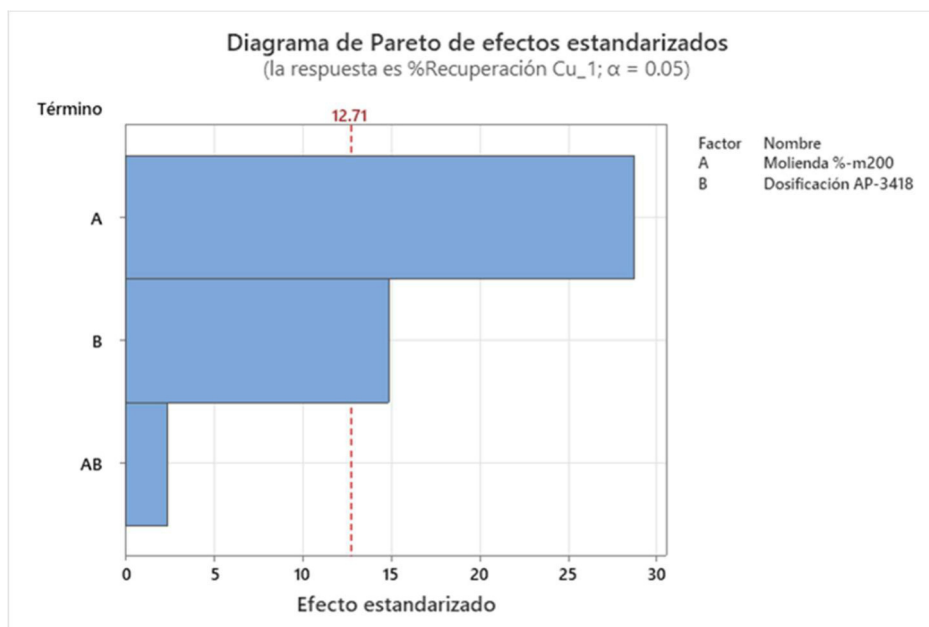


Figura 22

Efectos principales de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Recuperación de Cobre

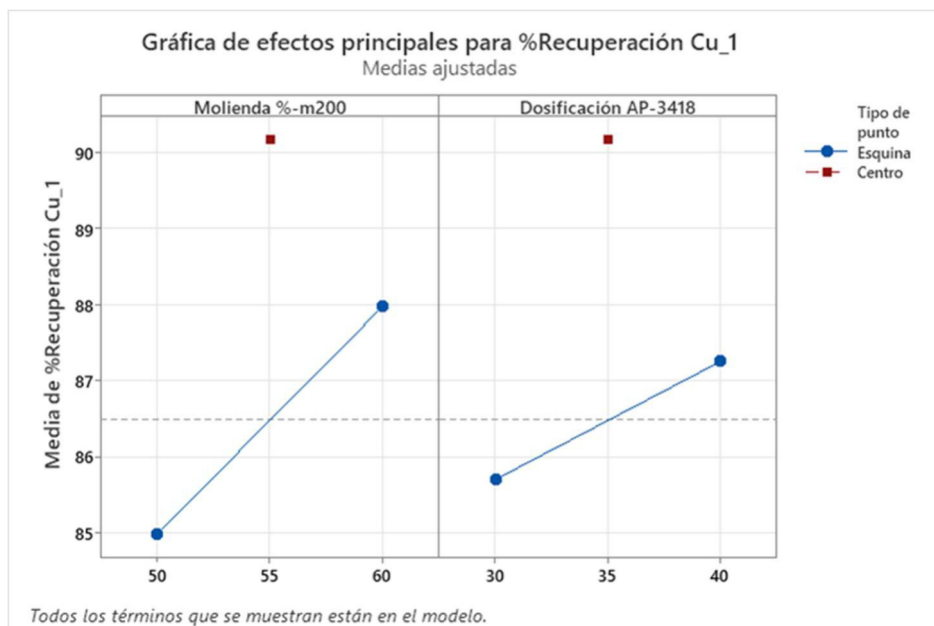


Figura 23

Gráfico de Pareto de la Ley de Plomo según la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda

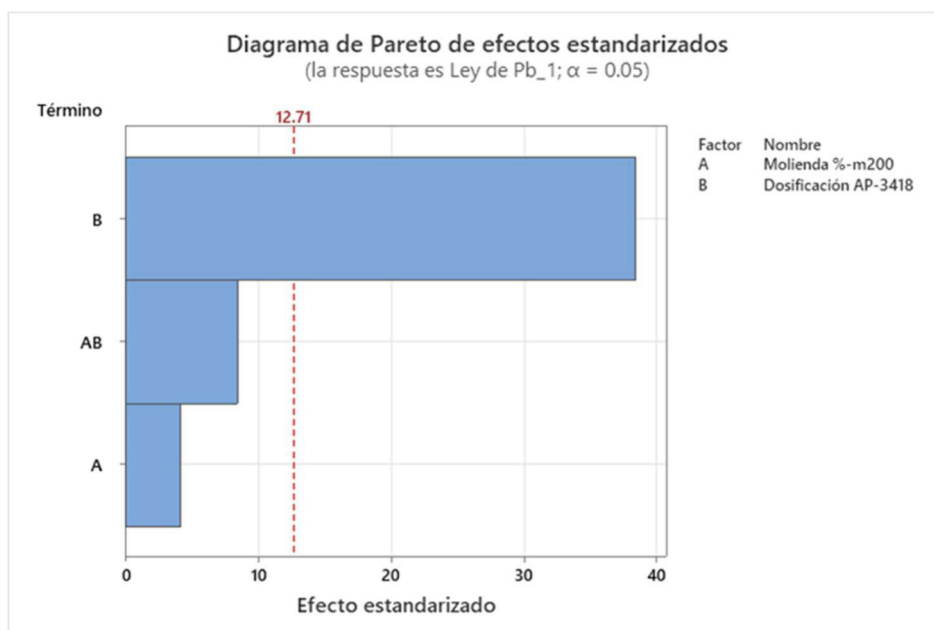


Figura 24

Efectos principales de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Plomo

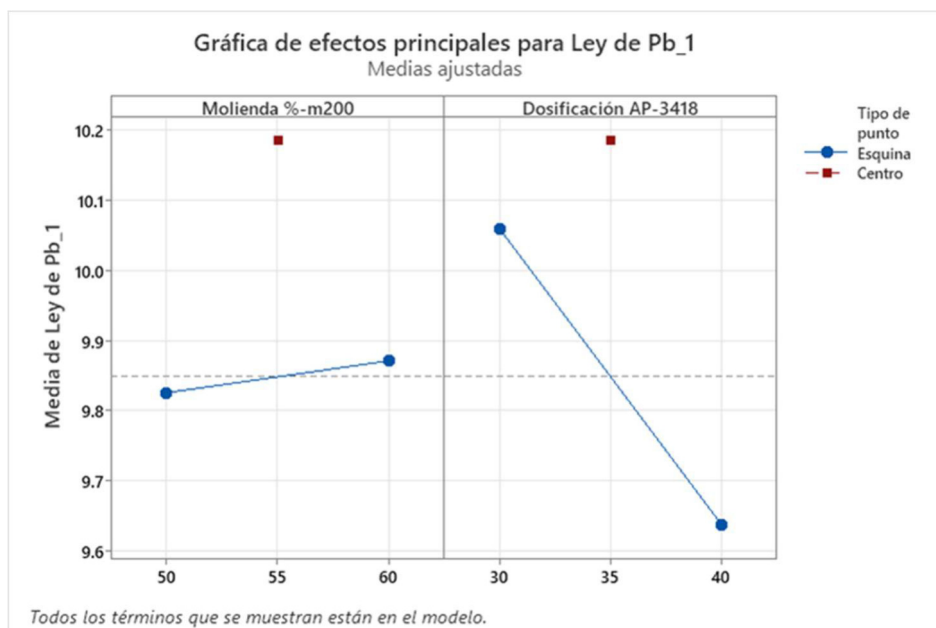


Figura 25

Gráfico de contorno de efectos de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Plomo

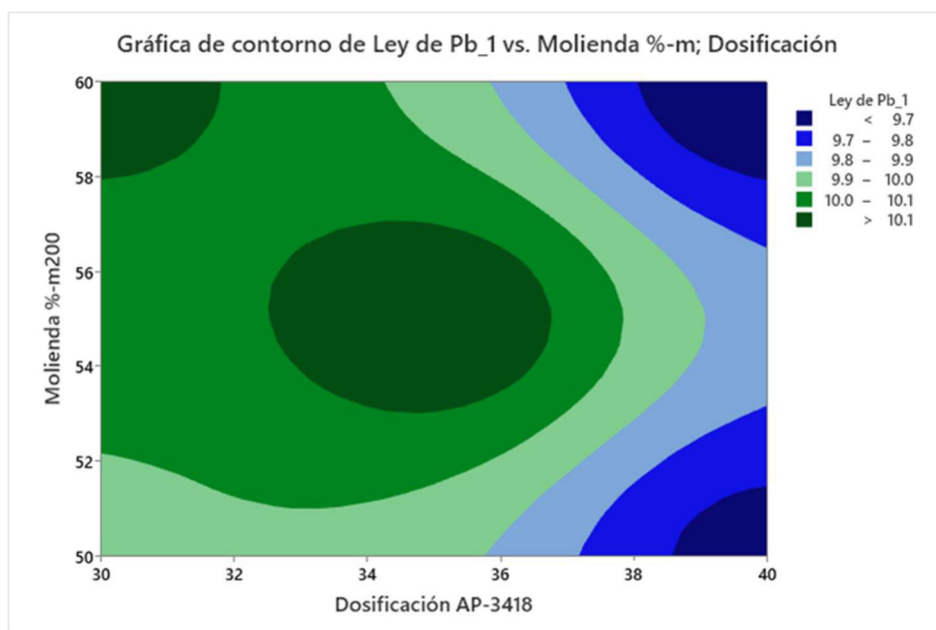


Figura 26

Gráfico de superficie de efectos de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Ley de Plomo

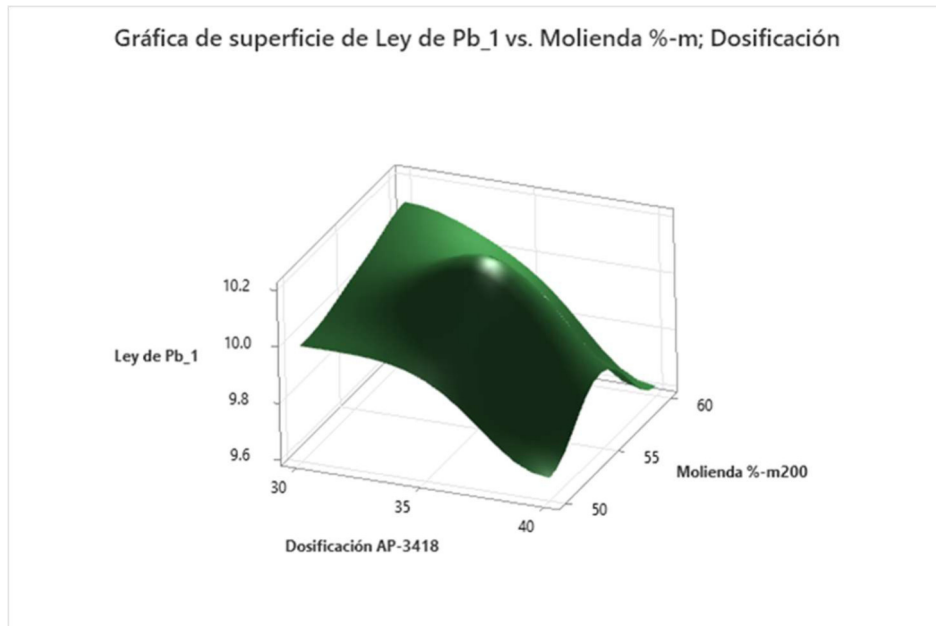


Figura 27

Gráfico de Pareto de la Recuperación de Plomo según la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda

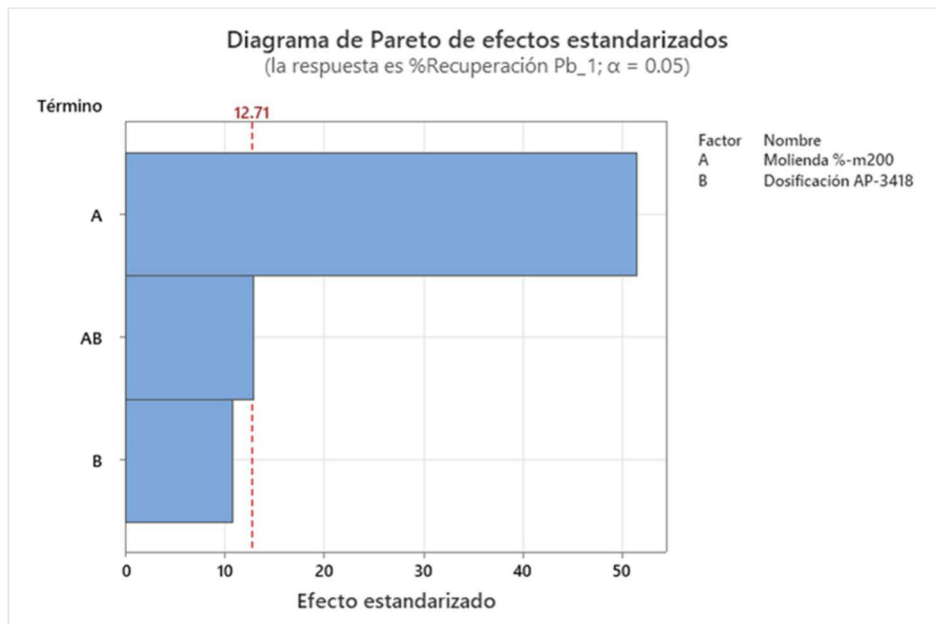


Figura 28

Efectos principales de la Dosificación de AP-3418 y el % de Molienda sobre la Recuperación de Plomo

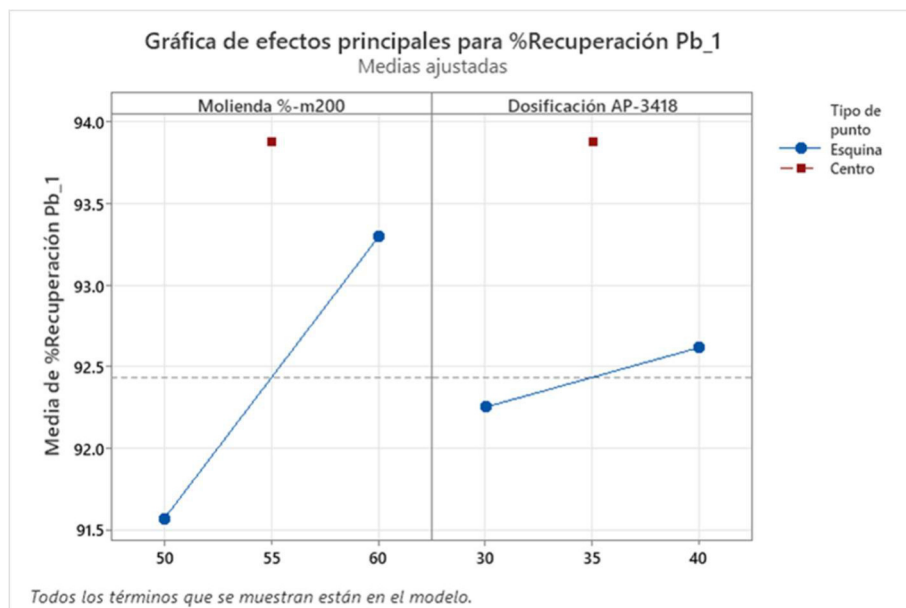


Figura 29

Fotografía de la Preparación Mecánica de Muestras



En la figura de la izquierda se observa a la muestra mineral en su granulometría natural, mientras que en la figura de la derecha se observa al mismo mineral después de haber realizado un chancado controlado hasta obtener una granulometría de 100%-m10Ty.

Figura 30

Fotografía de la Determinación de la Gravedad Específica (Picnómetro)



En las figuras anteriores se observa la determinación de la gravedad específica por el método del picnómetro a la muestra mineral chancada a una granulometría de 100%-m10Ty.

Figura 31

Fotografía de la Moliendabilidad en Bolas y Análisis Granulométrico



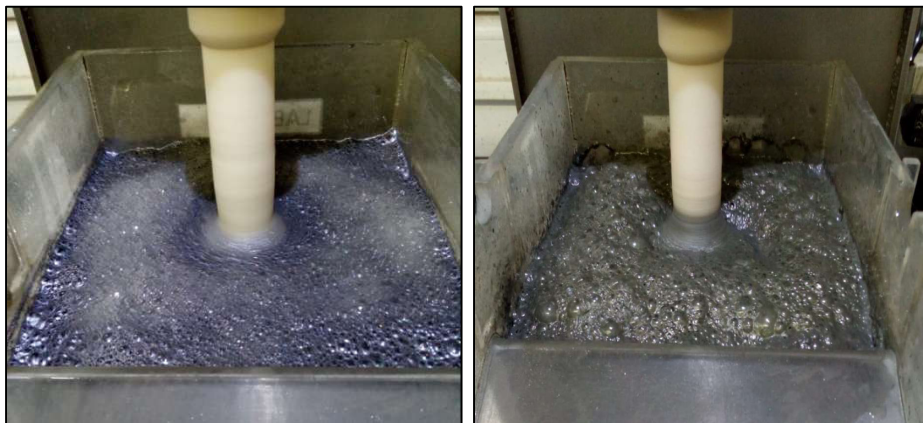
En las figuras anteriores se observa la determinación del tiempo de molienda en un molino de bolas estándar de laboratorio a partir de la muestra mineral chancada previamente a una granulometría de 100%-m10Ty.

Figura 32
Fotografía de la Determinación del Work Index



En las figuras anteriores se observa la determinación del Work Index por el método de Bond a partir de la muestra mineral chancada previamente a una granulometría de 100%-m6Ty.

Figura 33
Fotografía de la Flotación Rougher / Scavenger Bulk (P05)



En las figuras anteriores se observan unas muy buenas y espumaciones estables en las etapas de flotación Rougher (Primera figura) y Scavenger (Segunda figura), a partir de la muestra mineral previamente molida a una granulometría de 55%-m200Ty.