



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

**Evaluación del blending del mineral mediante software
PIDATA para mejorar la recuperación del molibdeno
en el proceso de flotación en Uchumayo- Arequipa**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTOR

Kevin Guissepi SILVA HUAMANI

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

Silva, K. (2025). *Evaluación del blending del mineral mediante software PIDATA para mejorar la recuperación del molibdeno en el proceso de flotación en Uchumayo- Arequipa*. [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	
Nombres y apellidos	Kevin Guissepi Silva Huamani
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	73690026
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 Dávila
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	Jose 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	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Arequipa Provincia: Arequipa Distrito: Uchumayo Latitud: -16.496419 Longitud: -71.612663
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022
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



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

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS 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 jueves 18, del mes de setiembre del 2025 siendo las 18:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila	(PRESIDENTE)
Ing MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios	(MIEMBRO)
Ing. JOSE LUIS, Vidarte Merizalde	(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS Titulada: «EVALUACIÓN DEL BLENDING DEL MINERAL MEDIANTE SOFTWARE PIDATA PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DE MOLIBDENO EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN UCHUMAYO-AREQUIPA» presentada por Don: KEVIN GUISEPPI SILVA HUAMANI, 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, 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 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: **Kevin Guissepi Silva Humani**.

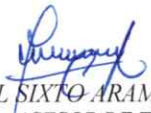
Siendo las **19:10** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 18 de setiembre del 2025


Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente


Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS
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

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N.0001178-2023-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es "EVALUACIÓN DEL BLENDING DEL MINERAL MEDIANTE SOFTWARE PIDATA PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN DEL MOLIBDENO EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN EN UCHUMAYO-AREQUIPA" presentado por el bachiller KEVIN GUISEPI SILVA HUAMANI 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 15 % 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 profesional de Ingeniero Metalúrgico.

Lima, 25 de mayo de 2026

Firma del Asesor

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS

DNI: 08608364

ÍNDICE

RESUMEN	vi
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO I: Introducción	1
CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema.....	3
2.1. Descripción de la Problemática	3
2.2. Problemática de la Investigación.....	4
2.2.1. Problema General	4
2.2.2. Problemas Específicos	4
2.3. Justificación de la Investigación.....	5
2.4. Objetivos de la Investigación	5
2.4.1. Objetivos Generales.....	5
2.4.2. Objetivos Específicos	5
2.5. Hipótesis y Variables.....	6
2.5.1. Hipótesis General	6
2.5.2. Hipótesis Específicas	6
2.5.3. Identificación de Variables.....	7
2.5.4. Operacionalización de Variables	7
CAPÍTULO III: Marco Teórico	8
3.1. Antecedentes de la Investigación	8
3.2. Bases Teóricas	12
3.2.1. Uchumayo.....	12
3.2.1.1. Etimología de Uchumayo	12
3.2.1.2. Ubicación De Uchumayo.....	12

3.2.1.3.	Vías de Acceso a Uchumayo	13
3.2.2.	Cobre y Molibdeno	14
3.2.3.	Principios de la Flotación	15
3.2.3.1.	Reactivos de Flotación	16
3.2.3.1.1.	Colectores	17
3.2.3.1.2.	Espumadores.....	18
3.2.3.1.3.	Modificadores.....	19
3.2.3.2.	Flotación de Cobre-Molibdeno.....	21
3.2.3.2.1.	Depresión de Pirita	23
3.2.3.2.2.	Factores que Intervienen en la Flotación Cu-Mo	27
3.2.4.	Sistema Pi	34
CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación		36
4.1.	Tipo y Diseño de Investigación	36
4.2.	Unidad de Análisis	37
4.3.	Población de Estudio	37
4.4.	Selección de Muestra.....	37
4.5.	Procedimiento Metodológico de la Investigación	38
CAPÍTULO V: Resultados.....		39
5.1.	Blending de Minerales de Procesamiento	39
5.2.	Microscopia Óptica del Blending.....	40
5.2.1.	Entrelazamiento de Minerales y Posibilidades de Liberación	42
5.3.	Microscopia QEMSCAN y Análisis Químico del Blending	47
5.4.	Proceso de Flotación Bulk Cu-Mo	51

5.5.	Circuito de Remolienda y Celdas Columna	55
5.6.	Planta de Flotación de Molibdeno	56
5.7.	Proceso Estándar de Flotación para Recuperación de Molibdenita	59
5.7.1.	Análisis de la Recuperación y Calidad de Molibdeno en planta	61
5.7.1.1.	Análisis de la Varianza para la Recuperación de Molibdeno en el Concentrado	62
5.7.1.1.1.	Modelo para la Recuperación de Molibdeno	64
5.7.1.2.	Análisis de la Varianza para la Ley de Molibdeno en el Concentrado	66
5.7.1.2.1.	Modelo para la Ley de Molibdeno	68
5.7.2.	Optimización de los Resultados Obtenidos	70
CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados		72
CONCLUSIONES		75
RECOMENDACIONES		77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		78
ANEXOS		84

DEDICATORIA

- A mis padres, José y Roxana, por acompañarme en cada paso que doy en la búsqueda de ser mejor persona y profesional.

AGRADECIMIENTOS

- En primer lugar, les agradezco a mis padres que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades.

RESUMEN

Una muestra de mineral mixto de la provincia de Uchumayo se observó al microscopio óptico de luz relaja, identificando especies de minerales sulfurados como la molibdenita, calcopirita, pirita, arsenopirita, esfalerita, enargita, además de magnetita y gangas. La molibdenita se observó ocupando un volumen de 0.21% y 60%, se identificó como especie libre, además de esto, se observaron enlaces cp-mo con una distribución de 0.13%, y mo-py-ggs que representaron el 0.65% del volumen total de la muestra. La mayor distribución volumétrica de las gangas pudo identificarse a detalle en la mineralogía QEMSCAN, identificando especies de minerales tipos insolubles (ISA), caolinita, clorita, arcillas, muscovita, anhidrita, yeso, entre otras especies.

En la planta de beneficio de Cu-Mo, se instaló el software PIDATA con sensores que miden el porcentaje de las especies de minerales considerados perjudiciales para el proceso, además de leyes de cabeza y granulometría. La data generada por el PIDATA se filtró y procesó con paquete estadístico Minitab 19, la cual permitió ajustar el siguiente modelo de recuperación: $\text{Rec. Mo (\%)} = 190.4 + 475 \text{ \% Mo Cabeza} + 3.468 \text{ P80} - 2.52 \text{ ISA} + 50.7 \text{ Caolinita} + 8.76 \text{ Clorita} + 3.79 \text{ Sclays} - 0.91 \text{ Muscovita} - 4.57 \text{ Anhidrita} - 13.2 \text{ Yeso}$, la cual presenta un coeficiente de correlación predictivo del 77.65%, además la ley de Molibdeno en el concentrado quedó determinada por la ecuación: $\text{Ley \%Mo} = 57.73 - 47.3 \text{ \% Mo Cabeza} - 0.0265 \text{ P80} - 1.369 \text{ ISA} - 2.09 \text{ Caolinita} - 0.346 \text{ Clorita} - 0.306 \text{ Sclays} + 0.0437 \text{ Muscovita} + 0.186 \text{ Anhidrita} - 0.018 \text{ Yeso}$, con un R^2 predictivo del 84.77%

Las ecuaciones obtenidas por regresión lineal múltiple fueron optimizadas para obtener los valores de: $\text{Ley Mo (\%)} = 0.01$, $\text{P80} = 66.04$, $\text{ISA (\%)} = 3$, $\text{Caolinita} = 0.46\%$, $\text{Clorita} = 5.7 \text{ \%}$, $\text{Sclays} = 2.28\%$, $\text{Muscovita} = 28.98 \text{ \%}$, $\text{Anhidrita} = 1.55 \text{ \%}$, $\text{Yeso} = 0.3$

%, Ley de concentrado (%Mo) = 49.32, Recuperación (% Mo) = 80.40, además, el análisis de la varianza determinó la mayor influencia de la granulometría sobre la recuperación de Mo, y los minerales insolubles sobre la calidad del concentrado.

ABSTRACT

A sample of mixed mineral from the province of Uchumayo was observed under a relaxed light optical microscope, identifying species of sulfide minerals such as molybdenite, chalcopyrite, pyrite, arsenopyrite, sphalerite, enargite, as well as magnetite and gangue. Molybdenite was observed occupying a volume of 0.21% and 60% was identified as free species. In addition, cp-mo bonds were observed with a distribution of 0.13%, and mo-py-ggs that represented 0.65% of the total volume. of the sample. The greatest volumetric distribution of the gangues could be identified in detail in the QEMSCAN mineralogy, identifying species of insoluble type minerals (ISA), kaolinite, chlorite, clays, muscovite, anhydrite, gypsum, among other species.

In the Cu-Mo benefit plant, the PIDATA software was installed with sensors that measure the percentage of mineral species considered harmful to the process, in addition to head grades and granulometry. The data generated by PIDATA was filtered and processed with Minitab 19 statistical package, which allowed adjusting the models $\text{Rec. Mo (\%)} = 190.4 + 475 \text{ \% Mo Head} + 3.468 \text{ P80} - 2.52 \text{ ISA} + 50.7 \text{ Kaolinite} + 8.76 \text{ Chlorite} + 3.79 \text{ Sclays} - 0.91 \text{ Muscovite} - 4.57 \text{ Anhydrite} - 13.2 \text{ Gypsum}$, which presents a predictive correlation coefficient of 77.65%, in addition the Mo grade in the concentrate was determined by the equation: $\text{Law \% Mo} = 57.73 - 47.3 \text{ \% Mo Head} - 0.0265 \text{ P80} - 1.369 \text{ ISA} - 2.09 \text{ Kaolinite} - 0.346 \text{ Chlorite} - 0.306 \text{ Sclays} + 0.0437 \text{ Muscovite} + 0.186 \text{ Anhydrite} - 0.018 \text{ Gypsum}$, with a predictive R^2 of 84.77%

The equations obtained by multiple linear regression were optimized to obtain the values of: $\text{Law Mo (\%)} = 0.01$, $\text{P80} = 66.04$, $\text{ISA (\%)} = 3$, $\text{Kaolinite} = 0.46\%$, $\text{Chlorite} = 5.7\%$, $\text{Sclays} = 2.28\%$, $\text{Muscovite} = 28.98 \text{ \%}$, $\text{Anhydrite} = 1.55 \text{ \%}$, $\text{Gypsum} = 0.3 \text{ \%}$, $\text{Concentrate grade (\% Mo)} = 49.32$, $\text{Recovery (\% Mo)} = 80.40$, in addition, the analysis

of variance determined the greatest influence of the granulometry on the recovery of Mo, and insoluble minerals on the quality of the concentrate.

NOMENCLATURA

cp	Calcopirita
py	Pirita
apy	Arsenopirita
ef	Esfalerita
mo	Molibdenita
en	Enargita
mg	Magnetita
GGs	Gangas
cc	Calcocita
cv	Covelita
bn	Bornita
td	Tetraedrita
rej	Rejalgar
gn	Galena
qz	Cuarzo
FPTs	Feldespatos
pl	Plagioclase
tour	Turmalina
mg	Magnetita
sd	Siderita
ca	Calcita
bio	Biotita
cl	Clorita

cao	Caolinita
tlc	Talco
cao	Caolinita
pir	Pirofilita
es	Esmectita
al	Alunita
an	Anhidrita
ys	Yeso
%	Porcentaje
μm	Micrómetros
g	Gramos
mg/l	Miligramos por litro
kg/TM	Kilogramos por toneladas métricas
l/s	Litros por segundos
min	Minutos
RPM	Revoluciones por minuto
GL	Grados de libertad
SC	Suma de cuadrados
MC	Media de los cuadrados
S	Desviación estándar
R	Regresión

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Blending de minerales según la zona programado por el año 2022	39
Tabla 2 Especies mineralógicas identificadas con la microscopía óptica	41
Tabla 3 Entrelazamientos de especies encontradas en el mineral	43
Tabla 4 Especies y entrelazamientos del mineral	44
Tabla 5 Especies mineralógicas identificadas con la microscopía QEMSCAN	47
Tabla 6 Análisis químico del mineral.....	50
Tabla 7 Condiciones de operación de la flotación.....	60
Tabla 8 Balance del proceso de flotación	60
Tabla 9 Condiciones de operación de la flotación.....	61
Tabla 10 Balance del proceso de flotación selectiva.....	61
Tabla 11 Data histórica de las variables independientes y dependientes, del proceso de flotación.....	62
Tabla 12 ANOVA para la recuperación de Mo	63
Tabla 13 Resumen del modelo obtenido de la recuperación de Mo.....	64
Tabla 14 Diseño del análisis para la ley de Mo	67
Tabla 15 Resumen del modelo obtenido de la ley de Mo	68
Tabla 16 Resumen de la optimización de los variables.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de Arequipa.....	13
Figura 2 Esquema de la flotación	16
Figura 3 Efecto del colector en el mineral.....	18
Figura 4 Efecto del espumante en el mineral	19
Figura 5 Diagrama de Bjerrum.....	21
Figura 6 Diagrama de distribución de especies de calcio.....	28
Figura 7 Potencial Zeta de moly en función del pH, con o sin iones de calcio.....	29
Figura 8 Comportamiento de los iones de calcio en la flotación de moly	30
Figura 9 El efecto slime coating	32
Figura 10 Blending según zonas.....	40
Figura 11 Volumen porcentual de las especies	41
Figura 12 Blending según zonas.....	42
Figura 13 Volumen porcentual de las especies	43
Figura 14 Micrografía con presencia de molibdenita y calcopirita dispersas en la ganga	45
Figura 15 Micrografía con ganga libre y entrelazamiento de calcopirita y pirita	45
Figura 16 Micrografía con molibdenita aislada en la matriz de ganga	46
Figura 17 Micrografía con presencia de calcopirita y molibdenita dispersas en la muestra	46
Figura 18 Micrografía de molibdenita, arsenopirita, turmalina y cuarzo con intercrecimientos y reemplazos.	48
Figura 19 Micrografía de pirita, magnetita, esfalerita y siderita con texturas de reemplazo y relleno de fracturas	49

Figura 20 Micrografía de turmalina, calcopirita, calcita y cuarzo con texturas de relleno y reemplazo.....	49
Figura 21 Micrografía de turmalina, clorita, feldespato potásico y cuarzo con texturas de reemplazo y relleno	50
Figura 22 Comparativa de análisis	51
Figura 23 Flowsheet de flotación Rougher-Scavenger	53
Figura 24 Flowsheet de flotación Cleaner-Scavenger.....	54
Figura 25 Flowsheet de Remolienda - Flotación.....	56
Figura 26 Flowsheet del circuito de moly	59
Figura 27 Pareto de los efectos estandarizados de recuperación de Mo	63
Figura 28 Gráfica de la probabilidad normal de la recuperación de Mo	65
Figura 29 Histograma de la recuperación de Mo	65
Figura 30 Gráfica de residuos de la recuperación de Mo	66
Figura 31 Pareto de los efectos estandarizados de ley de Mo	67
Figura 32 Gráfica de la probabilidad normal de la ley de Mo.....	69
Figura 33 Histograma de la ley de Mo	69
Figura 34 Gráfica de residuos de la ley de Mo.....	70
Figura 35 Gráfica de la optimización de las variables.....	71
Figura 36 Gráfica de efectos principales para ley de Mo	74

CAPÍTULO I: Introducción

El departamento de Arequipa es una de las principales regiones mineras del Perú, destacándose por su potencial en la explotación de minerales polimetálicos, especialmente en el procesamiento de sulfuros de cobre. Los sulfuros primarios están compuestos por minerales de interés económico, como la calcopirita (CuFeS_2) y, en menor proporción, la molibdenita, tetraedrita, enargita, calcosina y bornita. Además, contienen material estéril (ganga), conformado por pirita, sílice, cuarzo, sericita, minerales arcillosos y óxidos de hierro.

El molibdeno es un metal estratégico ampliamente utilizado en la fabricación de aceros de alta resistencia, superaleaciones y diversas aplicaciones industriales, como lubricantes, productos químicos y componentes electrónicos. Su principal fuente es la molibdenita, que generalmente se encuentra como subproducto del cobre en los yacimientos porfiríticos, muchas veces acompañada de trazas de metales de alto valor comercial, como el renio. La producción de molibdeno del Perú en el tercer trimestre del 2022 tuvo un decrecimiento con respecto al tercer trimestre del 2021, esto debido a los menores niveles de producción en compañías mineras como Southern Perú Copper Corporation, Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. y Compañía Minera Antamina, siendo estas las principales productoras de este elemento en nuestro país, estos bajos niveles son consecuencia de la menor producción de minas Toquepala, Buenavista y la Caridad. A nivel global, China y algunos países sudamericanos, entre ellos el Perú, se posicionan entre los mayores productores de este metal.

En este contexto, las plantas concentradoras desempeñan un papel fundamental en el procesamiento de sulfuros, permitiendo la recuperación eficiente de cobre y molibdeno. Una planta concentradora con una capacidad de diseño de 130,000 toneladas

métricas de mineral procesado por día está estructurada en diversas etapas, que incluyen: Área seca (chancado primario, secundario y terciario) y Área húmeda (molienda, flotación Cu/Mo, remolienda, planta de molibdeno y filtros de cobre).

El presente estudio tiene como objetivo analizar las causas de la baja recuperación de molibdeno en la planta concentradora ubicada en el distrito de Uchumayo, Arequipa. Para ello, se empleará un enfoque basado en el análisis estadístico y la interpretación del comportamiento de variables operativas clave, tales como la calidad del mineral y la granulometría, con el propósito de identificar oportunidades de mejora en la eficiencia del proceso de flotación.

CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema

2.1. Descripción de la Problemática

El objetivo operacional de la planta concentradora es producir concentrados de calidad comercial, es decir, con un contenido superior al 48% de Mo y 21% de Cu, al menor costo posible. Para ello, es esencial utilizar los recursos de manera eficiente y garantizar una recuperación mínima del 65% de Mo en la planta de molibdeno, cumpliendo así los presupuestos de producción establecidos.

El problema central de la investigación radica en la baja recuperación de molibdeno en minerales sulfurados de baja ley, lo que compromete su viabilidad económica debido a las dificultades que presenta el beneficio por flotación. Actualmente, la recuperación promedio de molibdeno se encuentra en un 55%, lo que representa una pérdida significativa en la eficiencia del proceso. Este problema se agrava en minerales sulfurados de baja ley, donde la flotación no justifica económicamente su explotación y beneficio. Por ello, se requiere un estudio detallado sobre la influencia de variables operativas como la calidad del mineral, la granulometría y el porcentaje de sólidos, con el fin de establecer estrategias de optimización y estabilización del proceso.

Para abordar este problema, se propone el uso del software PIDATA, que permite recopilar una base de datos para correlacionar la mineralogía del mineral procesado con los valores de recuperación y calidad de molibdeno. La variabilidad en la composición mineralógica y la presencia de especies insolubles afectan negativamente la eficiencia del proceso, por lo que es crucial un monitoreo constante de estos minerales perjudiciales dentro de la planta de procesamiento.

La estrategia de homogenización o mezcla del mineral busca reducir la variabilidad de la alimentación a la flotación, minimizando el impacto negativo de los

minerales perjudiciales y optimizando la flotación del molibdeno. Al homogenizar los lotes de mineral, se busca mejorar la estabilidad del proceso y evitar fluctuaciones en la recuperación de Mo. De esta manera, se asegura una alimentación más uniforme al circuito de flotación, permitiendo una respuesta más predecible del mineral ante los reactivos y condiciones operativas, lo que a su vez contribuye a mejorar la eficiencia del proceso.

2.2. Problemática de la Investigación

2.2.1. Problema General

- ¿De qué manera podemos mejorar la baja recuperación de Mo en el proceso de flotación del blending de minerales sulfurados empleando el software Pidata, en el distrito de Uchumayo - Arequipa?

2.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo se pueden identificar las especies minerales, su distribución volumétrica, grados de liberación, partículas mixtas y posibilidades de liberación en el blending de minerales sulfurados del distrito de Uchumayo - Arequipa, mediante técnicas de microscopía óptica, análisis QEMSCAN y evaluación química?
- ¿De qué forma podemos relacionar la data proporcionada por el software Pidata con los valores de recuperación y calidad del concentrado de Mo, empleando métodos estadísticos?
- ¿Cómo interpretar y analizar los resultados obtenidos mediante software Pidata y análisis estadístico?

2.3. Justificación de la Investigación

La investigación referente a analizar el problema de la baja recuperación de molibdeno en planta Cu y planta Mo, permitirá orientar las condiciones operativas hacia los rangos necesarios para mejorar y estabilizar el performance de la concentradora, dándole viabilidad técnica y económica al procesamiento de este tipo de minerales de manera eficiente en el departamento de Arequipa.

El alcance de la presente investigación está orientado a la estabilización de la recuperación de Molibdeno en una planta concentradora mediante el manejo correcto de las variables operativas, ya sea para grandes o pequeños productores mineros en el distrito de Uchumayo - Arequipa.

2.4. Objetivos de la Investigación

2.4.1. *Objetivos Generales*

- Mejorar la baja recuperación de Mo de 55% a 80% en el proceso de flotación del blending de minerales sulfurados empleando el software Pidata, en el distrito de Uchumayo - Arequipa.

2.4.2. *Objetivos Específicos*

- Identificar las especies minerales, su distribución volumétrica, grados de liberación, partículas mixtas y posibilidades de liberación en el blending de minerales sulfurados del distrito de Uchumayo - Arequipa, mediante microscopía óptica, análisis QEMSCAN y evaluación química.
- Relacionar la data proporcionada por el software Pidata con los valores de recuperación y calidad del concentrado de Mo, empleando métodos estadísticos.

- Interpretar y analizar los resultados obtenidos mediante software Pidata y análisis estadístico.

2.5. Hipótesis y Variables

2.5.1. Hipótesis General

- La aplicación del software Pidata permitirá mejorar la recuperación de Mo en el proceso de flotación del blending de minerales sulfurados, en el distrito de Uchumayo - Arequipa mediante la reducción de la variabilidad del blending.

2.5.2. Hipótesis Específicas

- El uso combinado de microscopía óptica, análisis QEMSCAN y evaluación química permitirán caracterizar con mayor precisión las especies minerales, su distribución volumétrica, los grados de liberación y la presencia de partículas mixtas en el blending de minerales sulfurados en Uchumayo – Arequipa.
- El análisis de datos mediante el software Pidata y métodos estadísticos puede revelar correlaciones significativas entre las variables independientes del proceso y la recuperación/calidad del molibdeno.
- El análisis de resultados obtenidos a través del software Pidata y métodos estadísticos influye en la toma de decisiones para optimizar la recuperación de Mo.

2.5.3. Identificación de Variables

Para la identificación de variables tomaremos en cuenta aquellas que tienen mayor impacto en la flotación del molibdeno. Las variables por considerarse en el proceso de flotación de Mo son:

Variable independiente

- ✓ Granulometría
- ✓ Porcentaje de sólidos
- ✓ Distribución volumétrica de las especies minerales

Variable dependiente

- ✓ Porcentaje de recuperación de molibdeno
- ✓ Calidad del concentrado de moly

Variables intervinientes controladas

- ✓ Nivel de carga
- ✓ Dosificación de reactivos

2.5.4. Operacionalización de Variables

Para procesar e identificar la influencia de las variables en el proceso de flotación de Mo, se aplicará balances metalúrgicos y análisis estadístico en hojas de cálculo, cuyos valores se recopilaban con ayuda del software Pidata, a fin de evaluar e interpretar las relaciones entre las variables, independientes y dependientes en estudio.

CAPÍTULO III: Marco Teórico

3.1. Antecedentes de la Investigación

(Abdollahi et al., 2020), en su investigación "A process mineralogy approach to optimize molybdenite flotation in copper – molybdenum processing plants", realizaron una propuesta para la separación de un mineral de cobre-molibdeno utilizando el enfoque de mineralogía de procesos, el cual busca diagnosticar los flujos principales dentro del circuito de procesamiento para mejorar la calidad de los concentrados de molibdeno. Los resultados del diagnóstico determinaron que hubo una pérdida de partículas ultrafinas en los relaves por el exceso del proceso de trituración, además se encontró que no se logró separar una porción de cobre del concentrado, por la asociación de partículas calcopirita-pirita del mineral, la cual se adhirió a la espuma del concentrado junto con el molibdeno.

(Huangfu et al., 2018), en su artículo "Utilization of petrochemical by-products as a new frother in flotation separation of molybdenum", evaluaron un espumante a base de un subproducto petroquímico para reemplazar al terpineol en la flotación de molibdeno, el cual es el reactivo comúnmente utilizado en esa industria. Se realizaron pruebas tanto a nivel de laboratorio como a nivel industrial, las cuales concluyeron que el nuevo reactivo presenta una mayor velocidad de formación de espuma en la flotación de molibdenita, así como mayor estabilidad en su tiempo de vida media. Adicional a ello, la recuperación de molibdeno se incrementó en un 2.5% con una concentración de reactivo de 100 g/TM, siendo así más eficiente que el terpineol en el proceso metalúrgico de recuperación de molibdenita.

(Wisnu et al., 2023), en su propuesta titulada "Sodium metabisulfite as a copper depressant in the selective flotation of copper-molybdenum concentrate using seawater", examinaron la flotación selectiva de cobre-molibdeno utilizando agua de mar en el

procesamiento, así como también evaluaron la eficiencia del reactivo metabisulfito de sodio como depresor de cobre en condiciones de acidez, neutralidad y basicidad. Los resultados concluyeron que utilizando 3.6 kg/T de metabisulfito de sodio a un pH de 5.5, se logra una recuperación de molibdeno de 94% y cobre de 11%, verificando que fue posible la separación a condiciones débilmente ácidas.

(Wu et al., 2024), en su artículo "Selective flotation separation of molybdenite and talc by yeast infusion with H₂O₂ peroxidation", evaluaron la separación de molibdenita mediante la flotación inversa de un mineral talco-molibdeno e investigaron la influencia de la levadura y peróxido de hidrógeno como pre-tratamiento a la flotación. Los datos obtenidos mediante la medición del potencial zeta, del ángulo de contacto y la espectroscopía de rayos X mostraron la oxidación de la molibdenita por el tratamiento con peróxido de hidrógeno, lo que permitió la infusión de la levadura en el mineral y este en consecuencia, la separación del talco. La ley de molibdeno fue de 42.8% y su recuperación de 80.0%.

(Zhang et al., 2023), en su estudio "Advanced collector-free flotation of typical sulfide minerals using a novel heterocyclic depressant", propusieron el uso de 2,4-tiazolidinediona (CSD7) como depresor de calcopirita, pirita y galena asociados a molibdenita. El mecanismo que utiliza este reactivo es la quelación selectiva de los iones cobre, hierro y plomo. Las pruebas realizadas determinaron que el CSD7 hidrofiliiza a los minerales asociados al molibdeno, pero no influye en este, lo cual lo convierte en ideal para el proceso, además que es considerado un reactivo ecológico y de bajo costo. La recuperación de molibdenita fue óptima, esta alcanzó más del 80% de extracción y las leyes fueron mayores al 50%, a condiciones de operación de pH igual a 7 y concentración de reactivo de 5×10^{-4} mol/L.

(Guang et al., 2012), en su proyecto "A novel approach for preferential flotation recovery of molybdenite from a porphyry copper–molybdenum ore", compararon tres enfoques distintos de procesos de flotación para la separación de cobre-molibdeno: El primero consistía en una flotación bulk seguida de una selectiva; la segunda de una flotación selectiva de cobre, luego una separación bulk y una selectiva de molibdeno. La tercera en una flotación preferencial de molibdeno, finalizando con una flotación de cobre. Los resultados de las pruebas metalúrgicas realizadas a nivel industrial mostraron que el tercer enfoque obtuvo mejor performance, puesto que el concentrado final, después de la limpieza, obtuvo una ley de 48.83% de molibdeno y una recuperación del 90.60%.

(Li et al., 2015), en su estudio "Flotation separation of copper–molybdenum sulfides using chitosan as a selective depressant", investigaron el efecto del polímero biodegradable quitosano, como depresor en la separación de cobre-molibdeno. Las pruebas de flotación de un concentrado de cobre con presencia de molibdeno confirmaron la eficiencia del reactivo en la separación del molibdeno a condición de pH igual a 6, logrando una recuperación mayor al 70% de molibdeno y 24% en cobre.

(Zúñiga, 2018), en la tesis “Caracterización de la distribución y ocurrencia de la molibdenita y su influencia en la recuperación de molibdeno en el yacimiento El Teniente”, evaluaron principalmente la relación de la granulometría del mineral sulfurado y el % recuperación evidenciando dos tipos de muestras determinando que por lo general se evidencia que la recuperación aumenta si es que los cristales de Molibdenita presentan un alto grado de liberación y un gran tamaño. También la recuperación disminuye si los cristales se encuentran asociados a partículas complejas o minerales pesados como pirita y silicatos duros, presentan gran parte de su superficie ocluida y sus cristales libres son de tamaño fino ($<12\ \mu\text{m}$). Sin embargo se observaron muestras que presentan excepciones a las tendencias generales, La muestra S 1233 presenta un gran porcentaje de Molibdenita

asociada a partículas complejas y con un bajo porcentaje de Molibdenita liberada sobre el 80%, sin embargo presenta una buena recuperación, debido a que un cristal asociado a estas partículas complejas es de gran tamaño, presenta un grado de liberación mayor al 50% y corresponde a más del 50% de la Molibdenita presente en la muestra, por lo que no presentó dificultades para flotar. Un caso similar sucede con la muestra 1226 donde gran cantidad de cristales de Molibdenita de tamaño medio-fino (>12 / <24 μm) se encuentran dentro de una partícula compleja asociados a diversos minerales, debido a la gran cantidad de Molibdenita presente, la partícula flota y el Mo es recuperado.

(Méndez, 2013), en la tesis “Optimización en la recuperación metalúrgica de molibdeno, planta I Las Tórtolas, división Los Bronces - Angloamerican”, al analizar la recuperación de molibdeno en el circuito colectivo, se identificó que las pérdidas se encuentran principalmente en el circuito rougher y la variable operacional asociada a estos resultados es el porcentaje de sólidos, donde la evaluación de esta variable indicó que un aumento de dos puntos de porcentaje de sólidos impacta inmediatamente la recuperación colectiva de molibdeno en 7 puntos porcentuales. Las pérdidas de molibdeno se deben a que se encuentran los cristales ocluidos en ganga (gn) cuyo tamaño es mayor a lo habitual, por lo tanto, es una causa de las pérdidas en el circuito rougher. Con respecto a la granulometría que presenta el concentrado scavenger en cuanto al contenido de molibdeno, este se presenta en partículas de tamaños superiores a 26 μm , por lo tanto, sería necesario evaluar en otro estudio el efecto del tamaño en la flotación selectiva.

(Zapata, 2019), en la tesis “Análisis y propuesta de optimización operacional de recuperación de molibdeno en línea subterránea, división andina - Codelco Chile”, en relación al análisis estadístico se llegó a la conclusión de que el P80 es la variable operacional que más influye sobre la recuperación de molibdeno, encontrándose que la

principal falla está en la alimentación del circuito de flotación rougher E (producto de molienda convencional), alimentación gruesa y alto porcentaje de sólidos todas por sobre el establecido por la SIPP y por tanto no siendo aptos para una eficiente flotación primaria. Del diseño 2k-p se determinó que para el mineral subterráneo no se está operando en condiciones óptimas, encontrando a través del modelo matemático de segundo orden que un menor P80 (220 μ m) y una mayor dosis de diésel (14 g/t) podrían llegar a lograr recuperaciones de molibdeno por sobre el 70%, valor que está sobre la recuperación rougher E reportada en el último balance global planta de 66%.

3.2. Bases Teóricas

3.2.1. *Uchumayo*

3.2.1.1. Etimología de Uchumayo

El origen de la palabra Uchumayo proviene de dos palabras en la lengua peruana quechua: "Uchu" y "Mayo". La primera palabra significa "Ají" y la segunda "Río", lo que compone "Río de Ají". Este nombre se refiere al cultivo del ají durante la época del Tahuantinsuyo, siendo posteriormente reemplazada en la colonia por el cultivo de trigo y frutas (Arrizabalaga, 2016).

3.2.1.2. Ubicación De Uchumayo

Uchumayo es un distrito turístico ubicado en la ciudad blanca de Arequipa, a las riberas del río Chili. Sus coordenadas geográficas corresponden a una latitud de -16.425 y longitud de -71.6725 a 16° 25' 30" Sur y 71° 40' 21" Oeste. La superficie presenta 27.100 hectáreas con una altitud aproximada de 1.973 m. El clima de esta zona es generalmente árido y presenta una población de 12.436 habitantes (Palza & Quequesana, 2019).

Los distritos que limitan con Uchumayo son los siguientes: Por el norte se encuentra Yura; por el sur se ubica Yarambamba y La Joya; por el este, Tiabaya y Cerro Colorado; finalmente, por el Oeste, Vitor y La Joya (Apaza & Cayllahui, 2018).

Figura 1

Mapa de Arequipa



Nota: (Anculle et al., 2017).

3.2.1.3. Vías de Acceso a Uchumayo

La accesibilidad a la zona de Uchumayo se realiza por la carretera Arequipa–Cerro Verde, el cual está localizado por el kilómetro número 107, atravesando las

localidades de Sachaca, Cerro Verde y Congata, desde el centro de la ciudad blanca (Cuela & Ramos, 2021).

3.2.2. Cobre y Molibdeno

El mineral de cobre se encuentra en la corteza terrestre como minerales de sulfuro de cobre, hierro y sulfuro de cobre, como calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4) y calcocita (Cu_2S). Además, los minerales en la región superior oxidada de carbonatos, óxidos, hidrosilicatos y sulfatos también se consideran minerales de cobre. Todos estos minerales que contienen menas pueden tener bajas concentraciones de cobre que van desde el 0,5% (minas a cielo abierto) hasta el 1 o 2% (minas subterráneas). Los sulfuros se recuperan mediante concentración, fundición y refinación, mientras que los óxidos generalmente se extraen mediante métodos hidrometalúrgicos (solución de lixiviación, extracción con solventes y circuito de electroobtención) (Yufan et al., 2016).

La mineralogía del mineral determina el proceso de extracción implementado para recuperar un metal específico. En el caso del cobre, aproximadamente el 80% del cobre obtenido a partir de mineral se origina en minerales de Cu-Fe-S. A pH bajo y/o en presencia de bacterias, los minerales de Cu-Fe-S se pueden tratar mediante soluciones acuosas; sin embargo, la mayor parte de la extracción de cobre en todo el mundo se realiza mediante métodos pirometalúrgicos. Además, muchos depósitos de mineral de sulfuro de cobre también contienen otros minerales como molibdenita como mineral secundario y (entre otros minerales) pirita y silicato como minerales de ganga (Rabatho et al., 2011).

Los minerales de cobre sulfurados contienen molibdenita como subproducto, un importante subproducto mineral de las concentradoras de cobre. La producción mundial de molibdeno tiene un uso del 50% como agente de aleación en la industria del acero para acero de alta velocidad para producir herramientas de material de corte. Otros usos del

molibdeno incluyen piezas de aviones, algunos misiles y la industria de la energía nuclear, en comparación con los metales básicos y preciosos, el uso de molibdeno es menor. La mayor parte de este subproducto, el molibdeno, proviene de minerales de sulfuro de cobre y, en menores recuperaciones, de minerales de pórfido de cobre. Sin embargo, desde el 2004 el molibdeno ha aumentado su precio de mercado casi diez veces, lo que ha resultado en un énfasis renovado en la producción de este metal, incluidos esfuerzos para optimizar su recuperación de flotación (Guang et al., 2012).

Las recuperaciones de cobre y molibdeno cuando se producen como minerales de sulfuro dependen principalmente de un proceso llamado flotación (Huang, 2015).

3.2.3. Principios de la Flotación

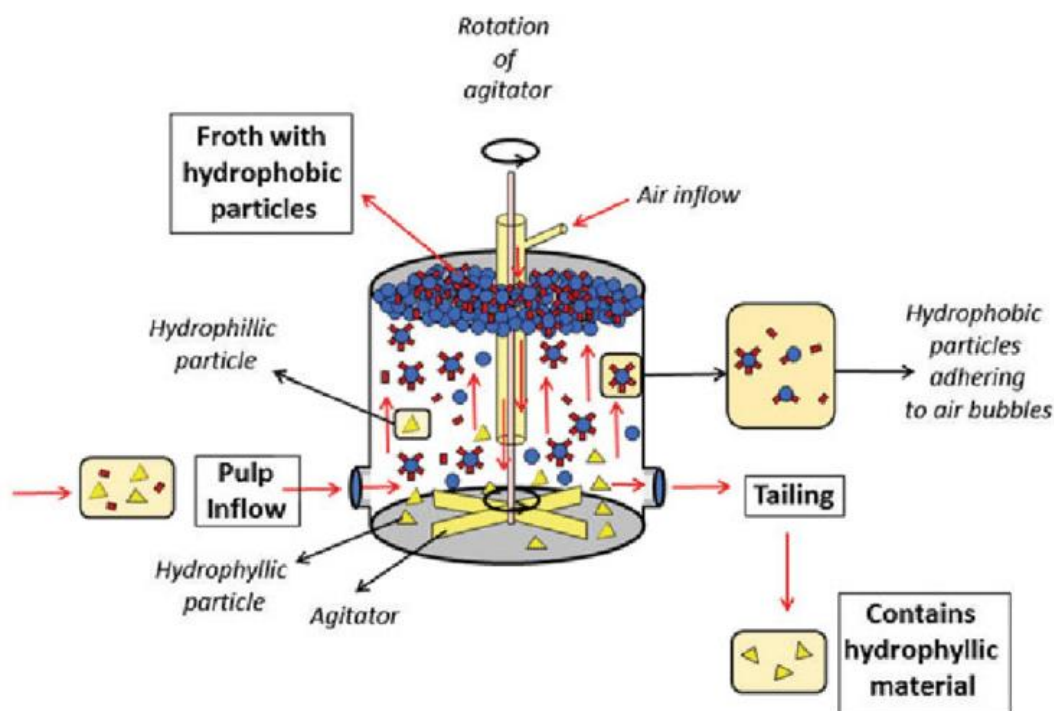
La flotación es un método de concentración muy común en la industria minera debido principalmente a su versatilidad y capacidad para beneficiar depósitos naturalmente complejos o de baja ley en grandes tonelajes. La flotación se patentó en 1906 y la aplicación se ha vuelto cada vez más popular desde entonces. Actualmente, el método se utiliza ampliamente para minerales de sulfuros complejos, elementos del grupo del platino, sulfuros que contienen níquel-oro, óxidos metálicos y minerales no metálicos como fosfatos y carbón (Castro, 2003).

La flotación es un tipo de técnica de separación interfacial que se basa en la diferencia en la hidrofobicidad de la superficie de diferentes componentes (Washington, 2018). En una celda de flotación tradicional, se requiere agitación del impulsor de alta velocidad para mantener las partículas minerales en suspensión. Se introduce o, a veces, se fuerza aire dentro de la celda cerca del impulsor para formar finas burbujas bajo el efecto de corte del impulsor (Nguyen, 2013). Las burbujas de aire ascendentes transportan partículas hidrófobas para formar una capa de espuma, que luego se transporta a las

lavadoras, mientras que las partículas hidrófilas se hunden hasta el fondo de la celda hasta el rechazo (Yoon, 2000). Entre todos los factores que influyen en el rendimiento de la flotación, la unión de burbujas y partículas es la clave para una flotación exitosa (Pan et al., 2011).

Figura 2

Esquema de la flotación



Nota: (Voncken, 2016).

3.2.3.1. Reactivos de Flotación

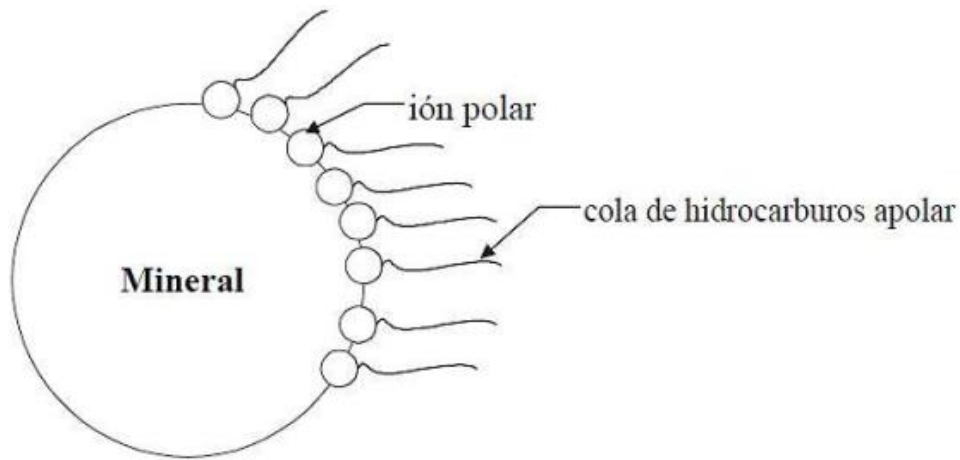
La unión de las partículas de burbujas y, en consecuencia, la flotación de la espuma de los minerales depende de la hidrofobicidad, es decir, de la humectabilidad. Algunos de los minerales se pueden encontrar como naturalmente hidrófobos, mientras que la mayoría de ellos se encuentran como hidrófilos. Para crear las condiciones deseadas de la pulpa y la polaridad entre la ganga y las valiosas propiedades de la

superficie del mineral, se utilizan varios reactivos de apoyo. Los reactivos se clasifican comúnmente en tres grupos: colectores, espumantes y modificadores (Xie et al., 2017).

3.2.3.1.1. *Colectores*

Los colectores son compuestos orgánicos que incluyen una longitud variable de cadenas de carbono con un extremo polar. Estos reactivos se adhieren al mineral con sus extremos polares y la cadena de carbono en el otro extremo produce la superficie hidrofóbica. En otras palabras, la adsorción de los colectores por las superficies minerales produce un compuesto insoluble que proporciona una superficie repelente al agua. La longitud de la cadena de carbono determina la fuerza de la adsorción y relativamente la selectividad de la separación (Bulatovic, 2007).

Los colectores se clasifican en no iónicos (por ejemplo, aceite de pino) e iónicos, mientras que los recolectores iónicos también se clasifican en dos grupos: recolectores activos aniónicos (por ejemplo, xantatos) y activos catiónicos (por ejemplo, aminas). El tipo de colector utilizado en el proceso varía según las propiedades superficiales de los minerales objetivos. La dosis industrial del reactivo puede variar desde diez gramos por tonelada hasta varios cientos. Esta variación puede deberse a la longitud de la cadena de carbono, el conjunto de minerales o la finura del tamaño del alimento. La sobredosificación de los colectores disminuye la selectividad del proceso al adsorber superficies minerales no deseadas además de los minerales objetivo. Por otro lado, una dosis insuficiente del recolector conduce a la llamada “inanición del recolector” y disminuye la recuperación del proceso (Bulatovic, 2007).

Figura 3*Efecto del colector en el mineral***Nota:** (Yianatos, 2005).

3.2.3.1.2. *Espumadores*

Al igual que los colectores, la estructura del espumador también es una combinación de partes no polares (hidrofóbicas) y polares (hidrófilas). Esta polaridad mixta conduce a una disminución en la tensión superficial de la pulpa y permite producir burbujas de menor tamaño, una espuma más estable durante la flotación de la espuma.

El flujo del área de superficie de la burbuja (S_b) es uno de los parámetros para la determinación de la constante de velocidad de flotación, el S_b se define con la siguiente reacción (1).

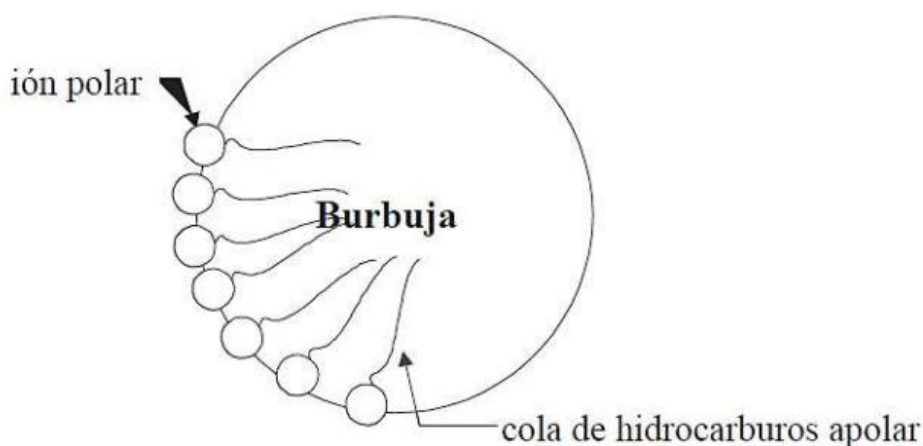
$$S_b = \frac{6J_g}{d_{32}} \quad (1)$$

Donde J_g es la tasa de aire volumétrico por unidad de área de la sección transversal de la celda (dependiendo del caudal de aire y las dimensiones de la celda) y d_{32} (tamaño medio de burbuja de Sauter), que depende de la dosis del espumador y de los parámetros específicos de la unidad (es decir, velocidad del impulsor, flujo de aire) (Finch et al., 2008).

Una dosis baja de uso de espumador puede provocar burbujas de gran tamaño y espuma inestable, lo que en consecuencia disminuye la recuperación. Por otro lado, también se debe evitar el uso excesivo de espumadores, ya que estos influyen en los colectores, lo que puede causar un problema de selectividad en el proceso. Además, una espuma demasiado estable crea problemas en las plantas, como la acumulación de espuma en la etapa de espesamiento o una disminución en la eficiencia del transporte del proceso posterior (Bulatovic, 2007).

Figura 4

Efecto del espumante en el mineral



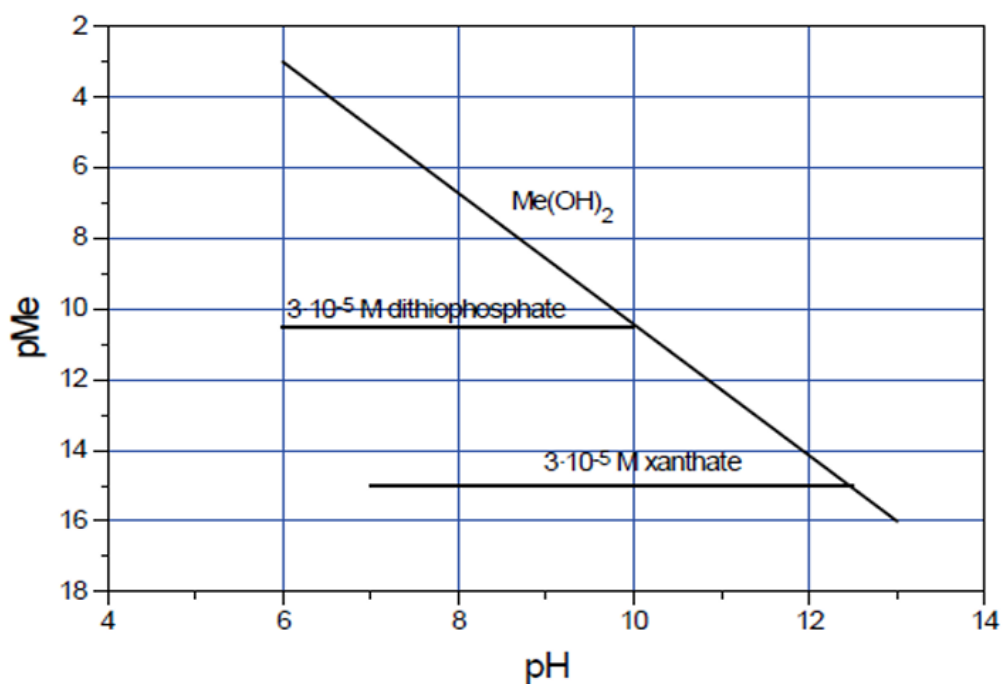
Nota: (Yianatos, 2005).

3.2.3.1.3. *Modificadores*

Los modificadores son reactivos de apoyo adicionales para una flotación eficiente de la espuma y se subdividen en activadores, depresores y reguladores de pH. Los activadores son generalmente sales solubles que se utilizan para alterar la superficie del mineral objetivo y aumentar la intensidad de los colectores (por ejemplo, CuSO_4). Por el contrario, los depresores se utilizan para retener un mineral alterando su superficie a hidrófila (por ejemplo, cianuro (NaCN)). Ambos reactivos se utilizan simplemente para

aumentar la diferencia de hidrofobicidad entre minerales con el fin de aumentar la selectividad y la eficiencia del colector (Gutiérrez & Manríquez, 2019).

Los reguladores de pH (por ejemplo, H_2SO_4 , NaOH) se utilizan para cambiar la alcalinidad de la pulpa, que es sustancial para las cargas de propiedades de la superficie, la adsorción de los colectores en la superficie mineral y la concentración de reactivos. La solubilidad de las sales colectoras de metales se presenta en el llamado "Diagrama de Bjerrum" como concentración de iones metálicos versus concentrado de iones hidróxido (en pH) como en la figura 5. Según esta determinación, intersección de los productos de solubilidad de la línea de hidróxido metálico (línea de 45°) y productos de solubilidad para compuestos que no liberan iones de hidrógeno o hidróxido (líneas horizontales) llamados pH crítico. En condiciones de pH más alto de puntos críticos, el hidróxido metálico se mantiene estable y, en consecuencia, el mineral es hidrófilo. Por otro lado, en condiciones de pH más bajo se puede lograr la adsorción del colector de la superficie del metal, lo que hace que la superficie del mineral se vuelva hidrófoba. Siguiendo esta información, el pH de la pulpa se puede ajustar para activar o deprimir una determinada superficie mineral (Azañero, 2015).

Figura 5*Diagrama de Bjerrum**Nota:* (Umur, 2015).**3.2.3.2. Flotación de Cobre-Molibdeno**

La mayoría de los minerales de sulfuro de cobre dependen de la flotación por espuma para la recuperación del cobre junto con cualquier otro subproducto rentable. Según los principios de la flotación por espuma (Davenport & Shclessinger, 2002):

- Los minerales de sulfuro son partículas hidrófilas, pero al acondicionar la química de su superficie con reactivos químicos (colectores), se vuelven repelentes del agua.
- Esta naturaleza repelente se aplica selectivamente a los minerales de Cu dejando el material de ganga humedecido.

- Las burbujas de aire ascendentes chocan con los “minerales de Cu que ahora repelen el agua”, lo que hace que las partículas de mineral de Cu floten.
- Las partículas minerales mojadas, al no estar ligadas al aire, permanecen hundidas en el agua.

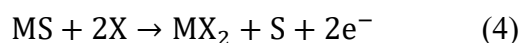
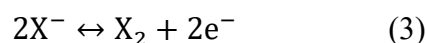
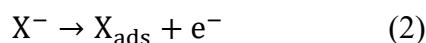
De manera similar, los minerales de molibdenita pueden flotar aplicando principios de flotación. Sin embargo, estos minerales son naturalmente hidrofóbicos o repelentes del agua, lo que facilita el proceso de separación junto con otros minerales valiosos del material de ganga. Su hidrofobicidad permite que la molibdenita flote fácilmente. Factores como la mineralogía, los recubrimientos de limo, la optimización de la metalurgia del cobre a expensas del molibdeno, la molienda y liberación y los reactivos de flotación podrían afectar la recuperación de molibdeno de los minerales de pórfido de cobre. Aunque la molibdenita flota sin mayor acondicionamiento de reactivos, los factores mencionados tienden a impactar el enriquecimiento del mineral por flotación. Así, los minerales que contienen molibdenita como material recuperable y arcilla como material de ganga dan como resultado, una disminución de la recuperación de molibdeno a poco menos del 40% de recuperación (Rabatho et al., 2011). La arcilla tiene un impacto significativo en la recuperación por flotación de cobre y molibdeno porque la flotación de molibdenita se ve afectada negativamente por la oxidación de la superficie y los iones de calcio revelaron una afinidad para absorberse en la superficie de molibdenita causando la inversión de su potencial η . Debido a esta interacción, la flotabilidad de la molibdenita disminuye, lo que resulta en bajas recuperaciones de los minerales de pórfido. Para mitigar este efecto causado por la arcilla, un estudio de 2008 encontró que al disminuir la densidad de alimentación que va a la flotación, la molibdenita mejoraba su recuperación mientras que el cobre se mantenía sin cambios o mejoraba marginalmente. Sin embargo,

el objetivo de este trabajo de tesis se centra en la calcopirita y la pirita, pero entendiendo que la molibdenita se produce como un subproducto del proceso (Liu et al., 2012).

3.2.3.2.1. Depresión de Pirita

Como se mencionó anteriormente, la principal impureza que se encuentra en el proceso de recuperación del cobre como calcopirita es la pirita. Desde una perspectiva mineralógica, la pirita (FeS_2) o disulfuro de hierro es el mineral sulfurado más abundante en la tierra, pero también el material de ganga más común a la hora de recuperar otros minerales metálicos básicos. Cantidades elevadas de pirita degradan el valor mineral de los concentrados y aumentan el contenido de hierro y azufre, lo que aumenta los costos de fundición. Minerales valiosos como esfalerita, calcopirita, Depresión de Pirita Como se mencionó anteriormente, la principal impureza que se encuentra en el proceso de recuperación del cobre como calcopirita es la pirita. Desde una perspectiva mineralógica, la pirita (FeS_2) o disulfuro de hierro es el mineral sulfurado más abundante en la tierra, pero también el material de ganga más común a la hora de recuperar otros minerales metálicos básicos. Cantidades elevadas de pirita degradan el valor mineral de los concentrados y aumentan el contenido de hierro y azufre, lo que aumenta los costos de fundición. Minerales valiosos como la esfalerita, la calcopirita, galena, el oro y el carbón se encuentran comúnmente con la pirita. Sin embargo, la pirita tiene “una baja importancia económica” en comparación con otros minerales sulfurados, y se convierte en un material de desecho o ganga en muchos depósitos minerales. Además, la presencia de pirita afecta otros procesos pirometalúrgicos. Por ejemplo, es el principal componente de azufre que contribuye a los carbones con alto contenido de azufre. Su combustión a partir de carbón que contiene pirita liberará componentes de azufre: SO_x (SO , SO_2 o SO_3), a lo que se ha atribuido la causa de la lluvia ácida. Por lo tanto, los aspectos económicos

y ambientales exigen la separación de la pirita de los minerales valiosos en las primeras etapas del procesamiento. Además, la flotación por espuma logra este objetivo mediante la adición de reactivos para cambiar la química de la superficie de la suspensión que contiene minerales valiosos y de ganga. El xantato (ROCSS_2M) se usa comúnmente como reactivo colector en la flotación de minerales de sulfuro de metales básicos. La absorción de este colector en superficies de minerales de sulfuro implica reacciones electroquímicas que incluyen la transferencia de carga en la quimisorción de xantato (Reacción 2), la oxidación de xantato a dixantógeno (Reacción 3) y/o la formación de xantato metálico (Reacción 3).



X^- , X_{ads} , X_2 , MS , MX_2 y S representan iones xantato, el xantato adsorbido, dixantógeno, mineral de sulfuro, xantato metálico y azufre o polisulfuro elemental, respectivamente. De los agentes involucrados en el proceso de flotación, el dixantógeno se considera la especie predominante responsable de la hidrofobicidad de la pirita (Mu et al., 2016). Por lo tanto, estas reacciones electroquímicas y la flotación de pirita han mostrado una fuerte correlación que causa diversos fenómenos como cambios en la química de la superficie de la pirita debido a la oxidación, la interacción de la pirita con otros componentes, la adsorción del colector y la precipitación de metales en la superficie (Moslemi et al., 2017).

Las interacciones a nivel electroquímico entre la pirita, los reactivos y los minerales valiosos, como la calcopirita, comienzan en el circuito de molienda. El beneficio de minerales de sulfuro de cobre involucra circuitos de molienda húmeda utilizando molinos de bolas y, en algunos casos, se agregan reactivos en esta etapa

temprana del proceso de recuperación. Condiciones como pH, potencial de oxidación de la pulpa, medios de molienda, interacciones galvánicas o reacciones electroquímicas, entre otras, pueden controlarse en cualquier etapa del circuito de procesamiento. No obstante, todas las condiciones anteriores han mostrado un gran potencial que afecta la flotabilidad de los minerales de cobre. Como resultado, el proceso puede hacer flotar más pirita como impureza en el concentrado o deprimir minerales valiosos, lo que resulta en bajas recuperaciones.

En los circuitos de flotación de cobre, se sabe que la calcopirita tiene mejores recuperaciones cuando se agrega xantato al sistema; sin embargo, aumenta la flotabilidad de la pirita. Como se indicó anteriormente, la adición de xantato provoca una cadena de reacciones presentadas previamente que puede producir dixantogeno como producto. El dixantogeno ha sido conocido como el principal producto hidrofóbico formado en la superficie de la pirita en presencia de xantatos (Moslemi et al., 2017). Sin embargo, estudios muestran que el xantato, como colector, de hecho, hace flotar la pirita a potenciales catódicos más altos que los potenciales de equilibrio de los pares xantato/dixantogeno. Además, los dixantógenos no son los únicos responsables de la flotación de la pirita en un concentrado de cobre, lo que sugiere que pueden estar presentes otros mecanismos. Otro agente que causa este fenómeno es la formación de compuestos de xantato férrico y la absorción de iones de xantato de etilo pueden ser la razón por la cual la flotación de pirita ocurre a potenciales más catódicos que el potencial requerido para la formación de dixantógenos a partir de xantatos (Moslemi et al., 2017).

La reducción de la flotabilidad de la pirita se puede lograr modificando el pH a condiciones alcalinas que provoquen su depresión. La pirita tiende a deprimirse a un pH alto que oscila entre 9 y 11 para las etapas más ásperas y $\text{pH} > 11$ para las etapas de limpieza. Estas condiciones se obtienen añadiendo cal (CaO) en su forma de suspensión

($\text{Ca}(\text{OH})_2$) al circuito de flotación. En condiciones alcalinas, la interacción entre los iones hidroxilo y las especies de la superficie da como resultado un hidroxilo de hierro hidrófilo en la superficie de la pirita, lo que impide la absorción de los colectores. El aumento de las condiciones de pH oxida la superficie de la pirita, lo que sugiere que la oxidación de la pirita reemplaza la oxidación del xantato. Esta interacción electroquímica entre pirita, xantato y modificadores de pH inhibe la formación de dixantógeno a pH alto. Por lo tanto, en condiciones alcalinas, la pirita es más catódica que la calcopirita, lo que provoca que se forme oxidación superficial en la pirita, lo que conduce a su depresión. Sin embargo, si bien el ajuste del pH es un método conocido para la depresión de pirita en circuitos de flotación de cobre y molibdenita, no es barato. Algunas grandes minas (como el nuevo proyecto de cobre en Panamá: Cobre Panamá) pueden procesar miles de toneladas de mineral por hora. El volumen de agua necesario para extraer tanto mineral puede ser enorme. Intentar elevar el pH de millones de galones de agua dulce supondría un coste enorme para el proceso. Por tanto, se necesitan procesos alternativos para mitigar el coste de los consumibles (Mu et al., 2016).

La evaluación y selección de los esquemas de reactivos se basan en revisiones de la literatura y sugerencias de expertos en el tema (consulte la Sección Selección de reactivos). El objetivo principal de la selección de este reactivo es observar qué combinación de sustancias químicas o una sola sustancia química deprimen la pirita del circuito más rugoso. La idea es que, si la pirita puede deprimirse durante el primer proceso de separación, será menos problemático para el circuito de limpieza y también para los circuitos de molibdenita. Para comparar los resultados de los reactivos propuestos, la métrica estándar elegida se basó en modificaciones del pH ya que es el método más común para deprimir la pirita de una pulpa de calcopirita-pirita. Este fenómeno es causado por la adición de cal o hidróxido de calcio – CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o piedra caliza –

CaCO_3 . Estas fuentes de calcio han sido el principal reactivo para recuperar un concentrado de cobre que contiene calcopirita y pirita. Al modificar el pH de la pulpa a condiciones alcalinas, las partículas de pirita tienden a deprimirse volviéndose más hidrófilas debido a la abundancia relativa del hidróxido hidrófilo respecto de las especies de azufre hidrófobas. Esta relación entre hidróxido hidrófilo y especies de azufre hidrófobas depende en gran medida de la solubilidad de los productos de oxidación. Los experimentos han demostrado que la superficie de la pirita se oxida desde la red mineral hacia la superficie debido a su alta movilidad (Moslemi et al., 2017).

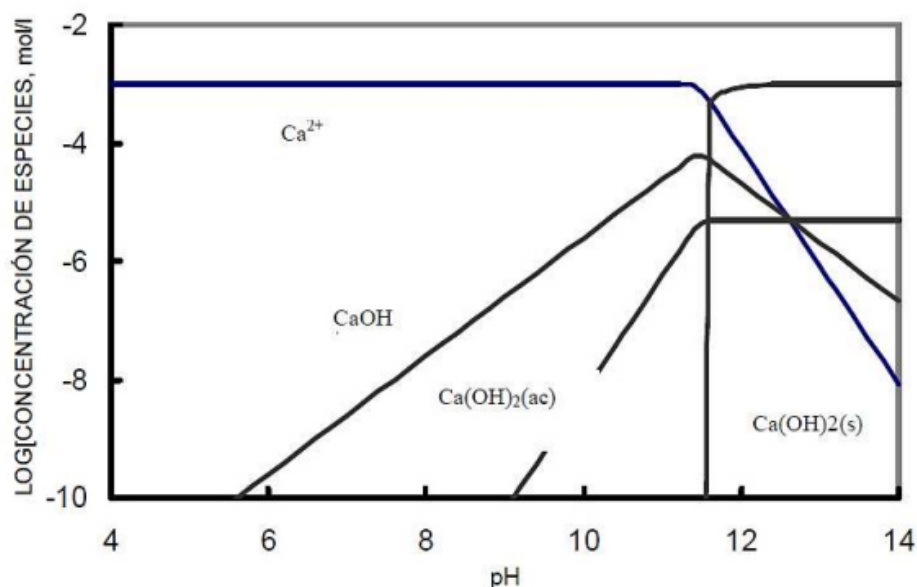
3.2.3.2.2. Factores que Intervienen en la Flotación Cu-Mo

a. Iones de Ca

Cuando se llevan a cabo procesos de concentración de pórfidos de cobre y molibdeno, se inicia con la fase de flotación colectiva. En esta etapa, se realiza un ajuste de los niveles de pH a valores elevados, pero aún dentro de los rangos aceptables. Este ajuste es esencial para lograr la depresión efectiva de la pirita (FeS_2). La introducción de la lechada de cal durante este proceso conlleva la presencia de especies como Ca^{+2} , CaOH^+ , $\text{Ca(OH)}_{2(\text{ac})}$, y $\text{Ca(OH)}_{2(\text{s})}$, desempeñando un papel crucial en la modificación de las propiedades superficiales de los minerales y, por ende, en la eficacia del proceso de flotación.

Figura 6

Diagrama de distribución de especies de calcio

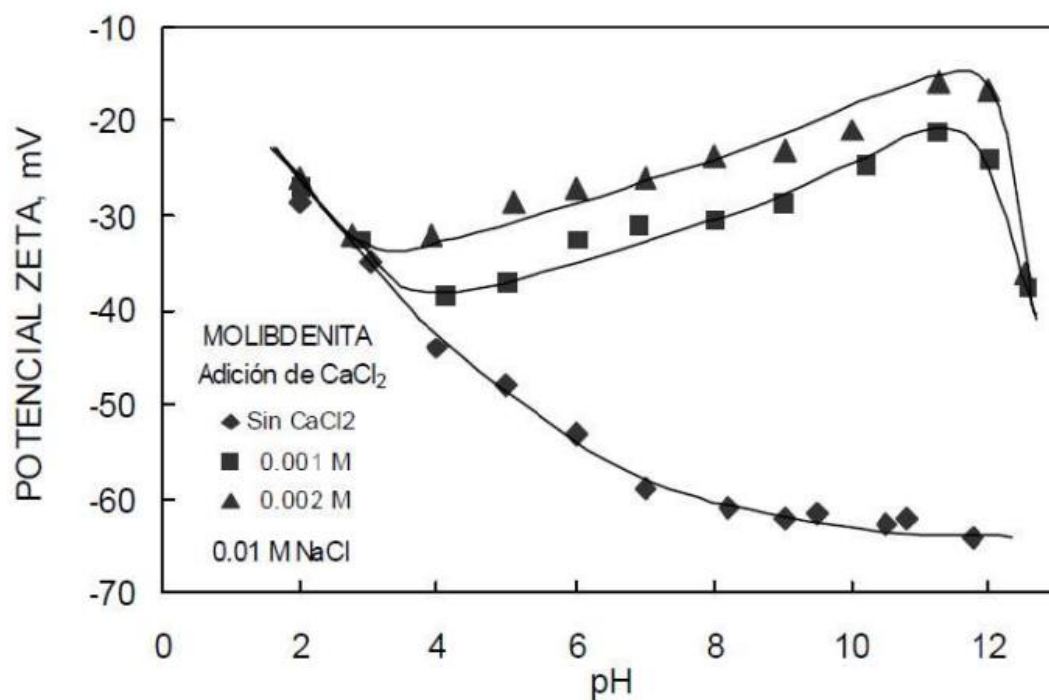


Nota: (López & Reyes, 2005).

Los iones de calcio tienen un ligero efecto en la disminución del ángulo de contacto, mostrando una baja afinidad por las caras de la molibdenita. Específicamente, los iones en forma de CaOH^+ exhiben una alta afinidad por los bordes de la molibdenita, interactuando con los sitios aniónicos del molibdato. Este fenómeno se traduce en una disminución menos pronunciada del potencial zeta de la molibdenita, siendo más significativo en un rango de pH donde la concentración de CaOH^+ es máxima. La absorción de estas especies de calcio en los bordes de la molibdenita impacta el tiempo de inducción en la interacción entre la molibdenita y las burbujas de aire, resultando en una reducción de la adherencia y flotabilidad de la molibdenita (López & Reyes, 2005).

Figura 7

Potencial Zeta de moly en función del pH, con o sin iones de calcio

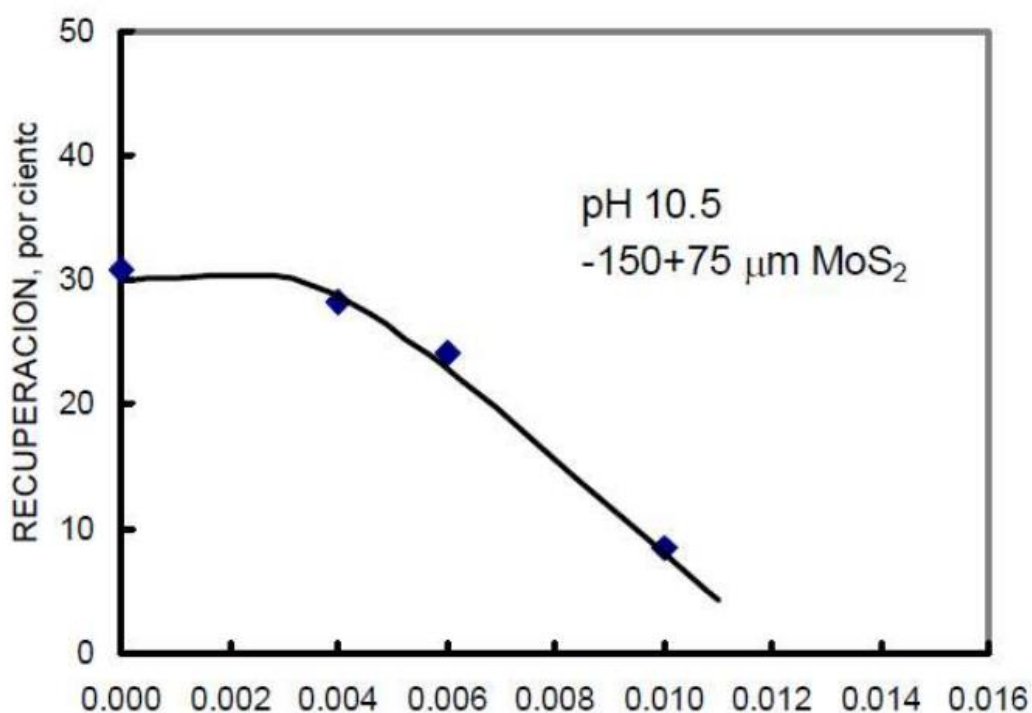


Nota: (Madrid, 2005).

La figura 8 ilustra cómo, a concentraciones más elevadas de iones de calcio, la recuperación de molibdenita disminuirá gradualmente en pruebas con un tamaño de partícula de $-150 +75 \mu\text{m}$ y un pH de 10.5. Esto sugiere que los iones de calcio ejercen un impacto negativo en el proceso de flotación de la molibdenita.

Figura 8

Comportamiento de los iones de calcio en la flotación de moly



Nota: (Madrid, 2005).

En 1984, se realizaron estudios de flotación para evaluar los efectos del ion calcio en condiciones de pH 11 y diferentes tamaños de partículas. Observaron que la presencia de iones calcio mejoraba ligeramente la tasa de recuperación de molibdenita al reducir la carga negativa entre burbujas y partículas. Sin embargo, la heterocoagulación con partículas finas de cuarzo resultó en recuperaciones deficientes, especialmente en presencia de sílice, lo que afectó negativamente la recuperación, excepto para algunas fracciones de tamaño específicas (Raghavan & Hsu, 1984).

En la interacción entre la molibdenita, partículas de sílice y iones calcio, se observa que los potenciales zeta de la sílice y molibdenita, en ausencia de iones de calcio a pH 11, se sitúan alrededor de -40 mV. Con la adición de iones calcio, los potenciales zeta del cuarzo disminuyen, y a una concentración de 1×10^{-3} M, la carga superficial de la

sílice se vuelve positiva. En ausencia de iones calcio, la fuerte repulsión de la doble capa entre la molibdenita y el cuarzo evita su coagulación. Sin embargo, con la presencia de iones calcio, los potenciales zeta de la molibdenita y la sílice se vuelven menos negativos e incluso positivos, lo que indica la posibilidad de heterocoagulación entre molibdenita y sílice y resulta en una baja recuperación de la molibdenita (Raghavan & Hsu, 1984).

b. Arcillas

La presencia de arcilla en los procesos de flotación de minerales puede resultar en una disminución de la recuperación debido a la formación de una capa de lama en la superficie del mineral o en las burbujas de aire. Este fenómeno también puede aumentar el consumo de reactivos y ocasionar problemas en la formación o ausencia de espuma, generando una acumulación significativa de lamas en las etapas de rougher y scavenger (Bulatovic, 2007).

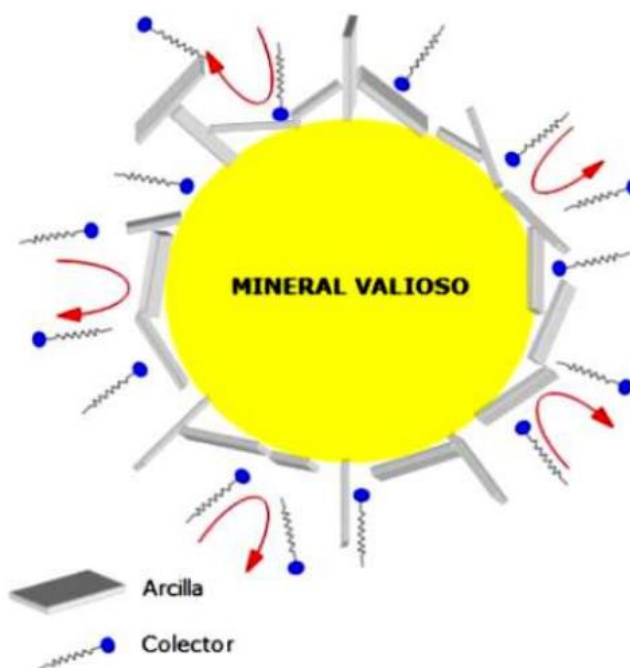
La formación de lama se atribuye a la atracción electrostática; las zonas arcillosas, al tener carga opuesta a la superficie del mineral, son atraídas hacia esta por fuerzas electrostáticas. La probabilidad de la formación de recubrimientos de arcilla se ve influenciada por la presencia de iones solubles y el pH del sistema. Las partículas de arcilla pueden flocular o agregarse en diversas combinaciones cara-borde, borde-borde y cara-borde. Estas combinaciones pueden estar afectadas por cambios en la carga de la arcilla, que tiende a cargarse negativamente, y los bordes que exhiben un punto isoeléctrico a un pH natural (Bulatovic, 2007).

El "Efecto Slime Coating" está relacionado con la formación de lama y ocurre cuando las arcillas cubren parcial o totalmente partículas gruesas, disminuyendo la hidrofobicidad de las partículas valiosas y obstaculizando la acción del colector. Este

efecto, derivado de fuerzas electrostáticas entre las partículas de mineral y las arcillas, se ilustra en la figura 9 (Cortés, 2016).

Figura 9

El efecto slime coating



Nota: (Cortés, 2016).

El conocimiento de la carga superficial de las partículas es crucial, y las mediciones del potencial zeta son fundamentales para comprender y abordar la interacción entre las partículas valiosas y la arcilla. Las arcillas exhiben comportamiento anisotrópico, con planos de partículas claramente diferenciados, y su carga superficial varía con el pH, lo que desempeña un papel fundamental en las interacciones con partículas valiosas. Algunos ejemplos de arcillas presentes en las unidades mineras incluyen la montmorillonita, caolinita, moscovita, biotita, entre otras (Farrokhpay & Ndlovu, 2013).

c. Iones de Mg, Fe y Al

La recuperación de molibdenita puede verse afectada por la presencia de otros cationes metálicos hidrolizables, como el calcio, que se absorben en la superficie de las partículas de molibdenita, disminuyendo su recuperación (Zapata, 2019).

La formación del precipitado coloidal $\text{Mg}(\text{OH})_2$ alrededor de pH 10 puede ser absorbida en la superficie de la molibdenita, provocando su depresión. Este precipitado, al igual que el calcio, puede heterocoagular con la molibdenita y la ganga silicosa. Por otro lado, la presencia de iones hierro en la molibdenita a pH mayores de 10.5 disminuye la flotabilidad en presencia de cal y, a pH superiores a 12, comienza a revertirse. Además, la presencia de iones de aluminio en el rango de pH 4.5 a 8 conlleva a la formación de precipitados visibles de $\text{Al}(\text{OH})_3$, que se cargan negativamente al igual que la molibdenita. La presencia de cal puede disminuir la carga negativa de ambos, la molibdenita y los precipitados de aluminio (Villalta, 2022).

d. Granulometría y Tiempo de Molienda

En el proceso de flotación, la reducción del tamaño de partícula es crítica para lograr una óptima recuperación del mineral. Si las partículas son demasiado finas, conocidas como "lamas", la eficiencia de recuperación disminuye. Por otro lado, si las partículas son demasiado grandes en comparación con las burbujas de flotación, estas no serán captadas adecuadamente y tenderán a precipitarse con las colas del proceso, resultando en pérdidas significativas de molibdenita (Raghavan & Hsu, 1984).

La relación entre la superficie expuesta y el volumen de la partícula, conocida como relación cara/borde, es crucial para determinar su flotabilidad. Partículas más grandes tienen una mayor relación cara/borde y, por lo tanto, una mayor hidrofobicidad, lo que aumenta su capacidad de flotación. Por el contrario, partículas más pequeñas tienen

una menor relación cara/borde y menor hidrofobicidad, lo que reduce su capacidad de flotación.

A mayor tamaño de partícula, mayor es la velocidad y la recuperación. Sin embargo, la molienda prolongada puede disminuir la flotabilidad de la molibdenita al alterar su distribución superficial y aumentar los recubrimientos superficiales, lo que requiere mayores cantidades de reactivos y tiempo de flotación para las partículas más finas (Raghavan & Hsu, 1984).

e. Oxígeno

La molibdenita, que normalmente flota en el agua, pierde esas características en medios alcalinos. Esto se debe a una transformación en su superficie que la vuelve hidrofílica, dificultando su flotabilidad. Esta oxidación aumenta en medios alcalinos, afectando especialmente a las partículas más pequeñas y reduciendo su capacidad de recuperación durante el proceso de flotación, la molibdenita necesita ayuda adicional para flotar en medios alcalinos (Paye, 2018).

3.2.4. Sistema Pi

El Sistema PI de Osisoft constituye un conjunto de herramientas diseñadas para la captura, almacenamiento, procesamiento y representación de datos en diversas aplicaciones industriales. Este programa proporciona una gestión en tiempo real de eventos en distintos contextos operativos. En la actualidad, se ha implementado la aplicación Web-Parts de Osisoft, que presenta similitudes con la navegación en Internet Explorer. Esta aplicación facilita la visualización en tiempo real de una amplia gama de parámetros en entornos industriales, contribuyendo así a la monitorización efectiva de procesos y eventos.

Han sido creados totalizadores, representaciones gráficas de datos a lo largo del tiempo, estimadores, cálculos metalúrgicos, sistemas de alerta, entre otros, que están disponibles en el portal concentrador. Este portal cuenta con una interfaz basada en web que simplifica la exploración entre las distintas pantallas correspondientes a diversas operaciones. Asimismo, ofrece la capacidad de generar representaciones visuales del comportamiento temporal de cualquier variable.

Se tiene un AddIn denominado PI Datalink, diseñado para Microsoft Excel, que posibilita la importación de datos con marca temporal, permitiendo la ejecución de cálculos, análisis estadísticos, y otras funciones relacionadas con el manejo y evaluación de datos. Esta herramienta se revela como un recurso valioso para realizar tareas diversas, como análisis de tendencias, evaluación de estadísticas, y manipulación de datos, proporcionando una interfaz efectiva y eficiente para llevar a cabo estas operaciones directamente en el entorno de Microsoft Excel. Por ejemplo, si se presenta un reporte de rayos X de los principales flujos se muestra un resumen de las leyes (Cañapataña, 2014).

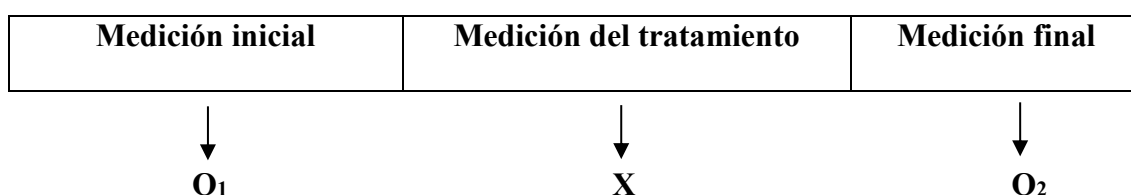
CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación

4.1. Tipo y Diseño de Investigación

Para el desarrollo de la presente tesis el diseño de la investigación es de tipo experimental cuantitativo, la cual permite la manipulación de las variables independientes.

El tipo de diseño de investigación seleccionado es experimental cuantitativo, la cual implica la manipulación de las variables independientes para evaluar su efecto sobre la recuperación y calidad del concentrado de molibdenita en el proceso de flotación en Uchumayo-Arequipa, mediante la evaluación del blending del mineral utilizando el software Pidata.

El diseño experimental permite controlar variables de confusión y minimizar sesgos, lo que aumenta la validez interna de la investigación. Además, al ser un estudio cuantitativo, se emplearán técnicas estadísticas para el análisis de datos, lo que permitirá obtener conclusiones precisas y fundamentadas.



O₁: Recolección de datos sobre el proceso de flotación del blending de minerales en Uchumayo -Arequipa

X: Aplicación del software Pidata y métodos estadísticos para mejorar la recuperación de molibdeno en el proceso de flotación del blending de minerales.

O₂: Predecir la recuperación y calidad de molibdeno en el proceso de flotación en Uchumayo-Arequipa.

4.2. Unidad de Análisis

El área de estudio está situada en el distrito de Uchumayo, perteneciente a la provincia de Arequipa, con clima seco, lluvioso y parcialmente nublado en los meses de enero a marzo, abril a diciembre calurosos, con temperaturas de 11°C a 25°C. Su clima es muy impredecible en los dos primeros meses del año teniendo lluvias y tormentas eléctricas en un solo día.

4.3. Población de Estudio

La población de estudio de la presente investigación es el blending mineral de cabeza de procesamiento de la planta de beneficio de flotación de pórfidos Cu-Mo, en el distrito de Uchumayo

Los estudios del proyecto de investigación y la caracterización del mineral, se realizó mediante el uso del software Pivision, además de microscopía y ensayos químicos correspondientes. La cantidad estimada de muestra fue tomada teniendo en cuenta los parámetros de población, nivel de confianza, margen de error y varianza, definiendo para los estudios correspondientes fue de 350Kg, de lo cual se dejó 100 Kg como muestra testigo.

4.4. Selección de Muestra

Se emplearon las técnicas de cuarteo en lona, teniendo en cuenta la segregación del material, así también se utilizó cucharones para muestreos de pulpa en las pruebas de flotación. Para la toma de muestras de proceso, se llevó a cabo con técnicas de muestreos aleatorios con la muestra debidamente homogenizada.

4.5. Procedimiento Metodológico de la Investigación

- Información bibliográfica sobre la problemática de la investigación.
- Obtener una muestra representativa de mineral alterado del distrito de Uchumayo - Arequipa.
- Se envían 500 gramos de muestra molida a laboratorio de análisis químico para el reporte de ley de Cu y Mo.
- Se envían 500 gramos de muestra molida al laboratorio de Microscopía óptica, para la caracterización cuantitativa y tener como resultado los componentes de la muestra, diferentes tipos de entrelazamientos, tamaño de las partículas y grados de liberación de las especies mineralógicas.
- Se enviaron 500 g. de mineral al laboratorio de microscopía electrónica.
- Diseño de pruebas metalúrgicas de flotación con el uso de Excel y recopilación de datos del software Pivision.
- Ajuste de un modelo para predecir la recuperación y calidad de molibdeno en el concentrado.
- Optimización de variables.
- Redacción del informe final.

CAPÍTULO V: Resultados

5.1. Blending de Minerales de Procesamiento

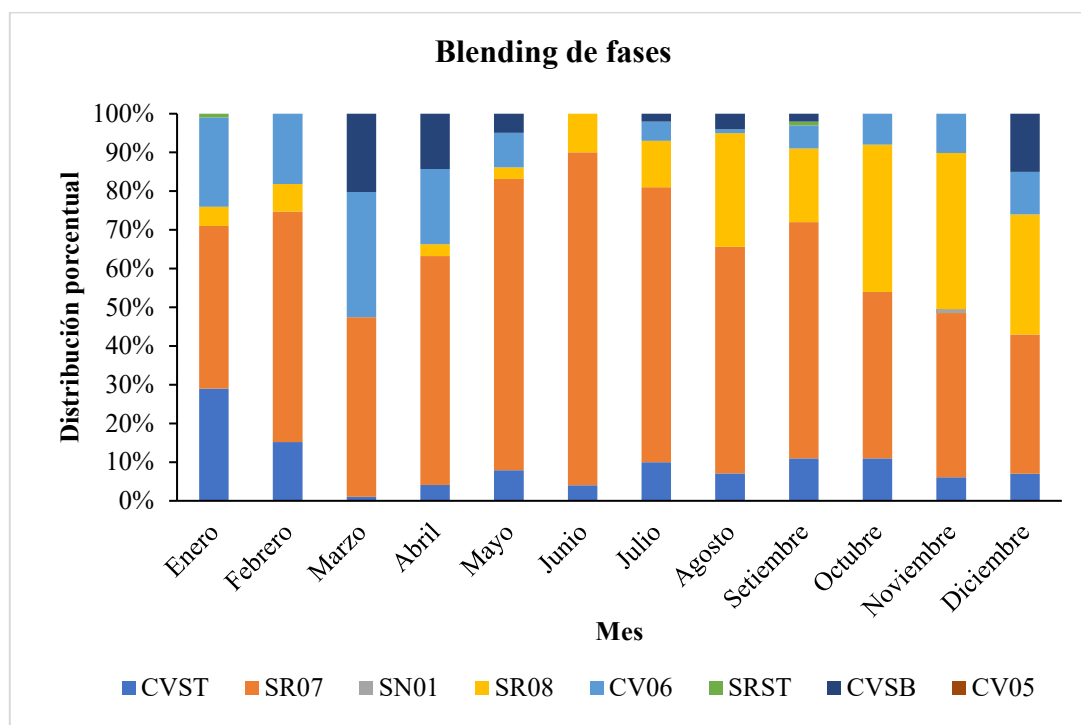
La planta de procesamiento de minerales tipo pórfidos de Cu-Mo extrae material a tajo abierto, y se clasificaron 8 tipos de mineralizaciones de nombres CVST, SR07, SN01, SR08, CV06, SRST, CVSB, y CV05 los cuales corresponden a distintas zonas del tajo. La programación del blending de minerales de procesamiento se describe en la tabla 1 y en el gráfico de barras de la figura 10.

Tabla 1

Blending de minerales según la zona programado por el año 2022

Mes	CVST	SR07	SN01	SR08	CV06	SRST	CVSB	CV05
Enero	29%	42%	0%	5%	23%	1%	0%	0%
Febrero	15%	59%	0%	7%	18%	0%	0%	0%
Marzo	1%	46%	0%	0%	32%	0%	20%	0%
Abril	4%	58%	0%	3%	19%	0%	14%	0%
Mayo	8%	76%	0%	3%	9%	0%	5%	0%
Junio	4%	86%	0%	10%	0%	0%	0%	0%
Julio	10%	71%	0%	12%	5%	0%	2%	0%
Agosto	7%	58%	0%	29%	1%	0%	4%	0%
Setiembre	11%	61%	0%	19%	6%	1%	2%	0%
Octubre	11%	43%	0%	38%	8%	0%	0%	0%
Noviembre	6%	42%	1%	40%	10%	0%	0%	0%
Diciembre	7%	36%	0%	31%	11%	0%	15%	0%

Nota: Considerando los datos porcentuales mensualmente.

Figura 10*Blending según zonas*

Nota: Gráfico de barras de la distribución de minerales en el blending por mes

5.2. Microscopia Óptica del Blending

Con una muestra representativa del blending de minerales de Cu-Mo correspondiente a la programación de enero del 2023, se preparó una briqueta con mineral molido a una granulometría de 60 μ , logrando identificar especies de cobre como la calcopirita, la cual representó una distribución volumétrica del 1.16%, encontrándose como especies libres un 75%, además se identificó especies de molibdenita con una distribución del 0.21%, de las cuales el 60% se encuentran como especies libres. Así también, se lograron identificar minerales sulfurados de hierro, como la pirita y arsenopirita. La mayor distribución de especies en la muestra representativa corresponde a las gangas, con un valor de distribución del 97.28 %, tal y como lo denota la tabla 2 y

figura 11. La figura 12 representa en un gráfico de barras comparativo el grado de liberación de las especies.

Tabla 2

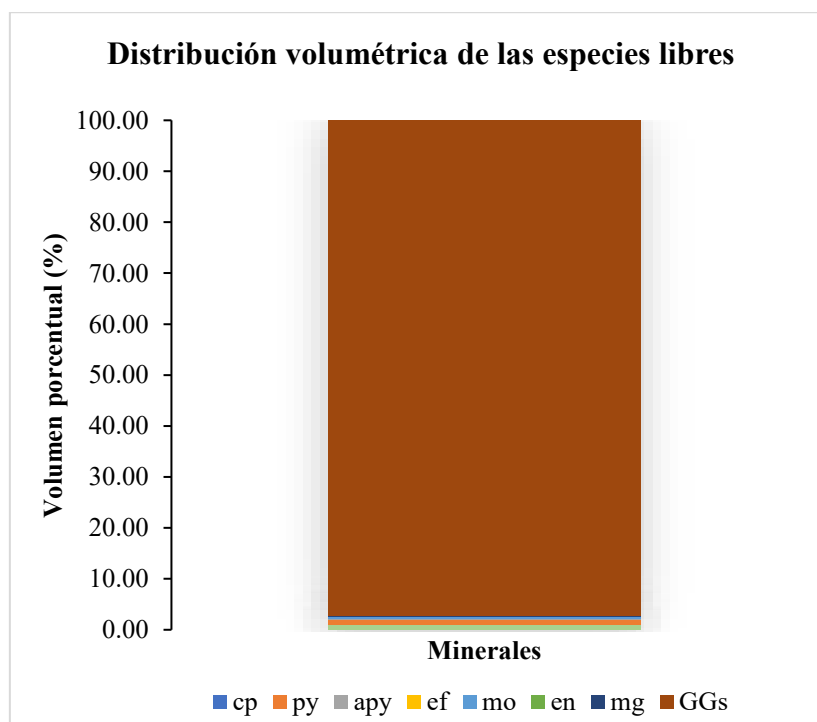
Especies mineralógicas identificadas con la microscopía óptica

Minerales	Volumen porcentual (%)	Grado de liberación (%)
Calcopirita	1.16	75.00
Pirita	0.95	54.55
Arsenopirita	0.13	33.33
Esfalerita	0.13	66.67
Molibdenita	0.21	60.00
Enargita	0.18	50.00
Magnetita	0.08	50.00
Gangas	97.28	98.53
Total	100.00	

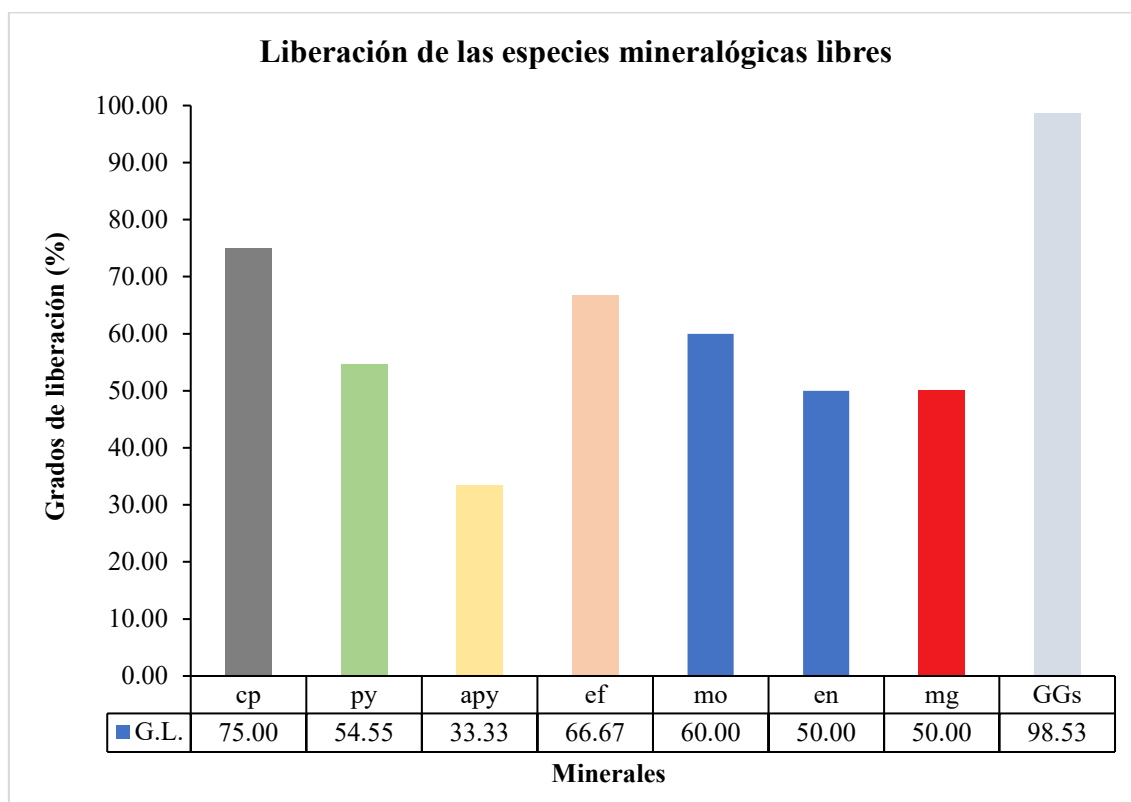
Nota: Datos de volumen porcentual y liberación de las especies.

Figura 11

Volumen porcentual de las especies



Nota: Gráfico de barras de distribución porcentual

Figura 12*Blending según zonas*

Nota: Gráfico de barras de grados de liberación de las especies

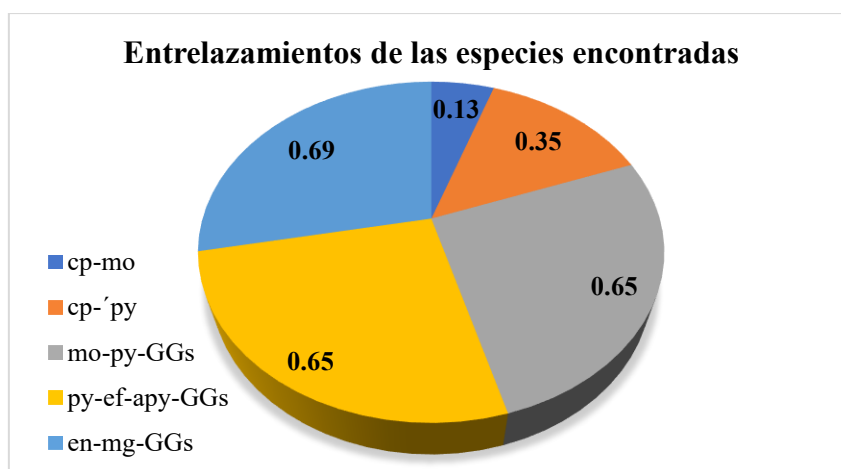
5.2.1. Entrelazamiento de Minerales y Posibilidades de Liberación

Se identificaron partículas mixtas de cp-mo con una distribución volumétrica del 0.13%, y con un tipo de enlace moderadamente fácil de liberar, cp-py ocupando un volumen de 0.35% y con tipos de enlaces fácil y moderadamente fácil de liberar, mo-py-GGs ocupando un volumen de 0.65%, tal y como se representan en la tabla 3. Además, se observaron enlaces ternarios de py-ef-apy-ggs, y en-mg-GGs. El total de las partículas libres y mixtas identificadas en el microscopio óptico de luz reflejada se describe en la tabla 4. Las figuras 14, 15, 16 y 17 representan las principales micrografías obtenidas por el microscopio óptico.

Tabla 3*Entrelazamientos de especies encontradas en el mineral*

Minerales entrelazados	Tipo entr.	Num part.	Dist. Porc. (%)	Posibilidades de liberación completa
Partículas libres		2257	97.54	
cp-mo	1bIV	1	0.04	Moderadamente fácil
	1aI	2	0.09	Fácil
	1aII	4	0.18	Fácil
cp-py	1bIII	1	0.04	Moderadamente fácil
	3aI	3	0.13	Moderadamente fácil a difícil
	1aII	3	0.12	Fácil
mo-py-GGs	3aIV	4	0.17	Moderadamente fácil a difícil
	1bII	6	0.26	Moderadamente fácil
	4aII	2	0.09	Muy difícil
	1bIV	4	0.17	Moderadamente fácil
py-ef-apy-GGs	3aII	3	0.13	Moderadamente fácil a difícil
	4bI	2	0.09	Moderadamente difícil
	2bIII	6	0.26	Muy difícil
	4bIII	3	0.13	Moderadamente difícil
	2bIV	1	0.04	Muy difícil
en-mg-GGs	1cI	2	0.09	Muy difícil a imposible
	4aI	6	0.26	Muy difícil
	3cIII	4	0.17	Imposible
TOTAL		2314	100.00	

Nota: Datos de número de partículas, distribución porcentual y posibilidad de liberación de los entrelazamientos.

Figura 13*Volumen porcentual de las especies*

Nota: Gráfico circular que representa el volumen porcentual de las especies

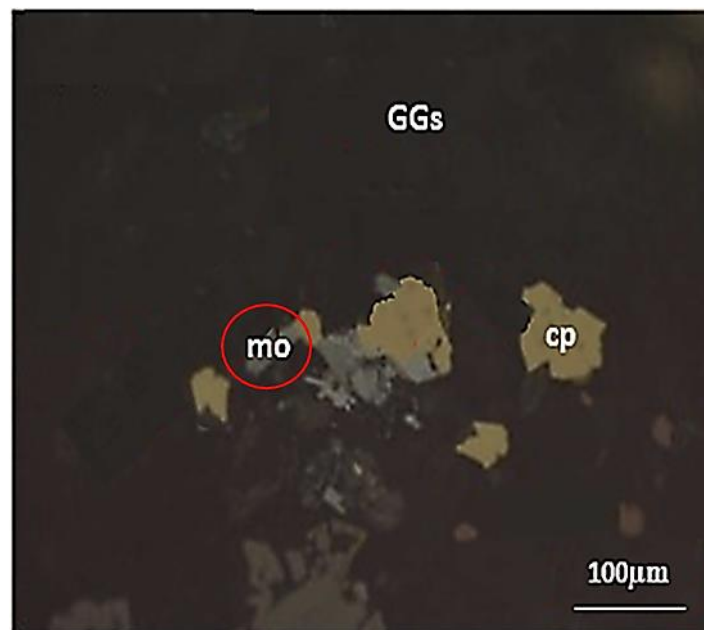
Tabla 4*Especies y entrelazamientos del mineral*

Minerales			Calcopirita		Pirita		Arsenopirita		Esfalerita		Molibdenita		Enargita		Magnetita		Gangas	
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V
Total de Partículas libres		2257.00	18.00		12.00		1.00		2.00		3.00		2.00		1.00		2218.00	
% Volumen Partículas libres		97.54		0.78		0.52		0.04		0.09		0.13		0.09		0.04		95.85
Total de partículas entrelazadas	Número de partículas	Volumen porcentual	Calcopirita		Pirita		Arsenopirita		Esfalerita		Molibdenita		Enargita		Magnetita		Gangas	
			N	%V	N	%V	N	%V	N	%V	N	%V			N	%V	N	%V
cp-mo	3.00	0.13	2.00	0.09							1.00	0.04						
cp-´py	8.00	0.35	4.00	0.17	4.00	0.17												
mo-py-GGs	15.00	0.65			3.00	0.13					1.00	0.04					11.00	0.48
py-ef-apy-GGs	15.00	0.65			3.00	0.13	2.00	0.09	1.00	0.04							9.00	0.39
en-mg-GGs	16.00	0.69											2.00	0.09	1.00	0.04	13.00	0.56
Total entrelaz.	57.00	2.46	6.00	0.26	10.00	0.43	2.00	0.09	1.00	0.04	2.00	0.08	2.00	0.09	1.00	0.04	33.00	1.43
Total lib. + entrelaz.	2314.00	100.00	24.00		22.00		3.00		3.00		5.00		4.00		2.00		2251.00	
Total volumen porcentual		100.00	1.04		0.95		0.13		0.13		0.21		0.18		0.08		97.28	
Grados de liberación			75.00		54.55		33.33		66.67		60.00		50.00		50.00		98.53	
Símbolos:		N = Número de partículas libres y entrelazadas contabilizadas.																
		%V = Volumen porcentual de las partículas libres y entrelazadas.																

Nota: Datos de número de partículas, distribución y volumen porcentual de las especies y entrelazamientos.

Figura 14

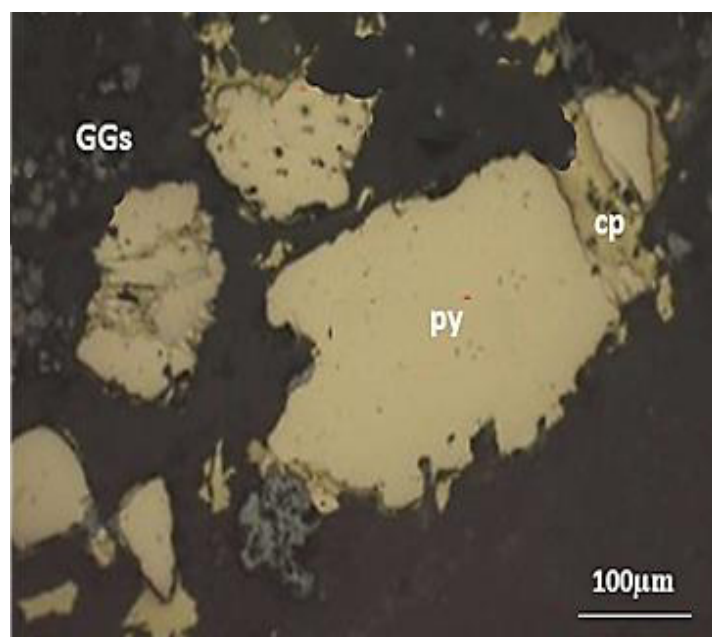
Micrografía con presencia de molibdenita y calcopirita dispersas en la ganga



Nota: Reportado por laboratorio GEOXINPESAC

Figura 15

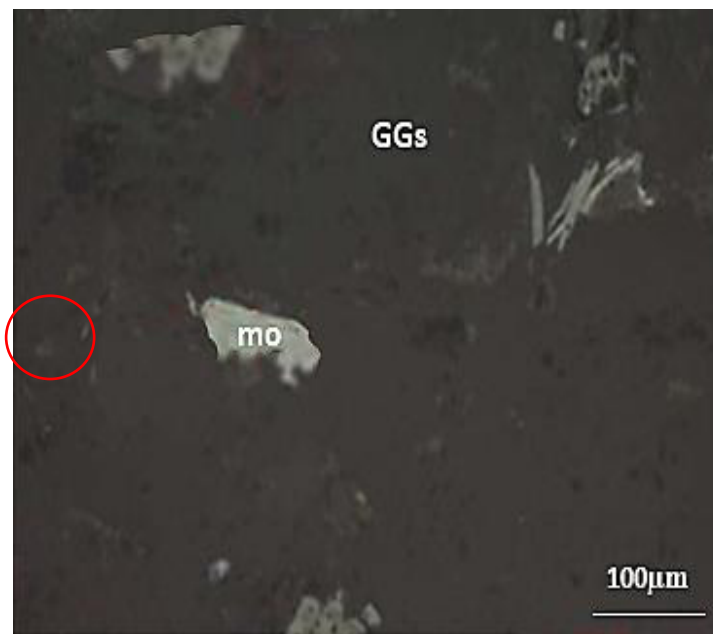
Micrografía con ganga libre y entrelazamiento de calcopirita y pirita



Nota: Reportado por laboratorio GEOXINPESAC

Figura 16

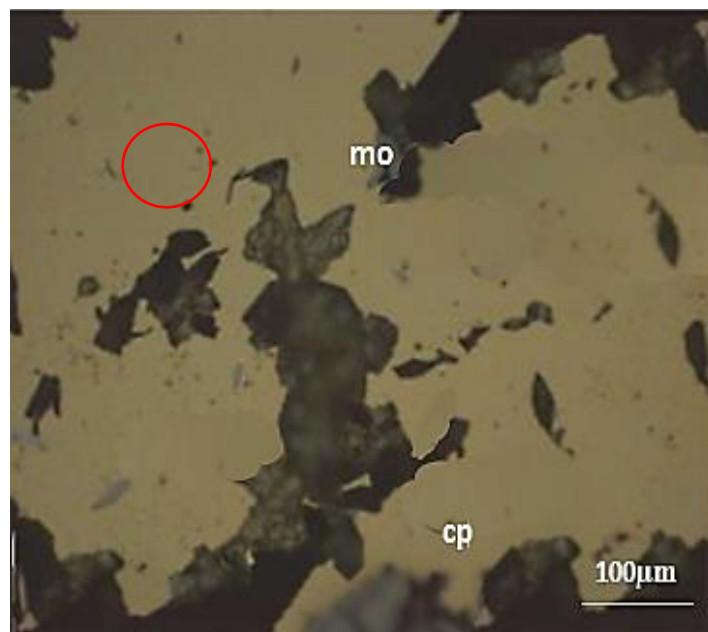
Micrografía con molibdenita aislada en la matriz de ganga



Nota: Reportado por laboratorio GEOXINPESAC

Figura 17

Micrografía con presencia de calcopirita y molibdenita dispersas en la muestra



Nota: Reportado por laboratorio GEOXINPESAC

5.3. Microscopia QEMSCAN y Análisis Químico del Blending

Una muestra de mineral representativo del blending de minerales, se envió al laboratorio de microscopía electrónica de barrido, para identificar a detalle, las especies de minerales presentes en las gangas. Los resultados del análisis QEMSCAN corroboraron la presencia de las especies que se identificaron en la microscopía óptica, además, se identificó especies de arcillas, insolubles (ISA), clorita, caolinita, talco, yeso, entre otras especies que perjudican la recuperación y calidad de los concentrados metálicos. El total de las especies identificadas por la microscopía QEMSCAN se representa en la tabla 5, y la tabla 6 representan los análisis químicos de los elementos y su respectiva ley cuantificada por el microscopio.

Tabla 5

Especies mineralógicas identificadas con la microscopía QEMSCAN

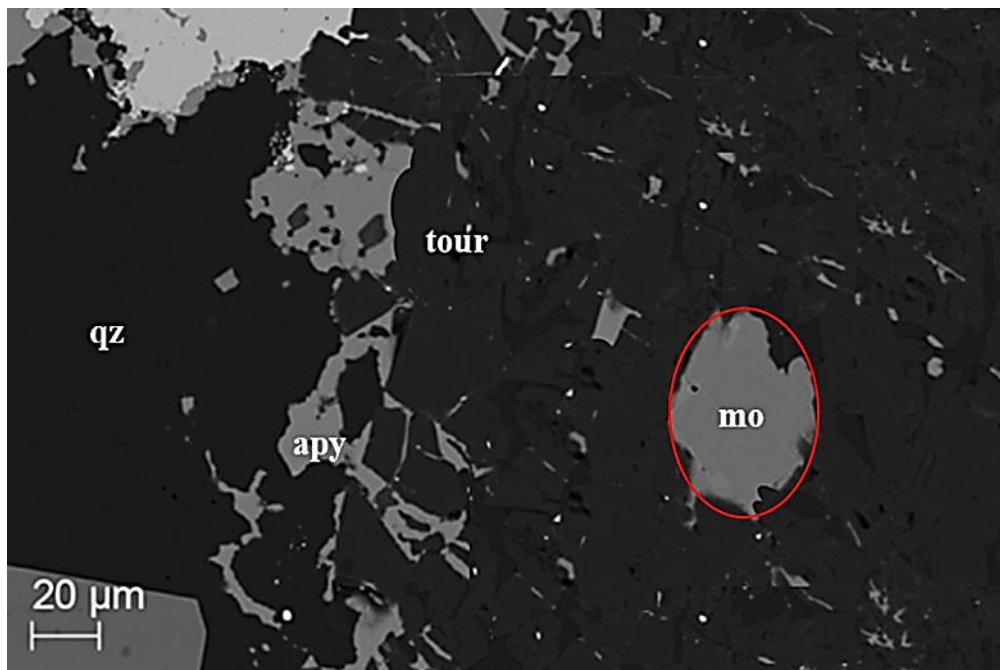
Minerales	Composición	Distribución (%)
Calcopirita	CuFeS_2	1.03
Calcocita	Cu_2S	0
Covelita	CuS	0
Bornita	Cu_5FeS_4	0
Tetraedrita	$(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	0
Enargita	Cu_3AsS_4	0.01
Arsenopirita	FeAsS	0.01
Rejalgar	As_4S_4	0
Cu/Micas	-	0.01
Otros Cu	-	0.01
Pirita	FeS_2	1.3
Molibdenita	MoS_2	0.03
Galena	PbS	0
Esfalerita	ZnS	0.02
Cuarzo	SiO_2	36.27
Feldespatos potásico	KAlSi_3O_8	3.19
Plagioclasa	$(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$	13.7
Turmalina	$(\text{Na,Ca})(\text{Al,Fe,Li})(\text{Al,Mg,Mn})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})\cdot(\text{OH,F})_4$	0.64
Anfibol/piroxeno	$\text{SiO}_4 / (\text{Ca,Mg,Fe,Mn,Na,Li})(\text{Al,Mg,Fe,Mn,Cr,Sc,Ti})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$	0.81
Óxido de hierro	-	0.34
Magnetita	Fe_3O_4	0.14
Moscovita/Sericita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2 / \text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	23.56
Siderita	FeCO_3	0.27
Calcita	CaCO_3	1.03
Biotita	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$	0.13
Clorita	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10} \cdot (\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$	8.04
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	1.29

Talco	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0.03
Pirofilita	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0.17
Esmectita	$\text{A}_{0.3}\text{D}_{2-3}[\text{T}_4\text{O}_{10}]\text{Z}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	2.99
Alunita	$\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	0.04
Anhidrita	CaSO_4	0.55
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.77
Otros	-	1.64

Nota: Distribución total de las especies

Figura 18

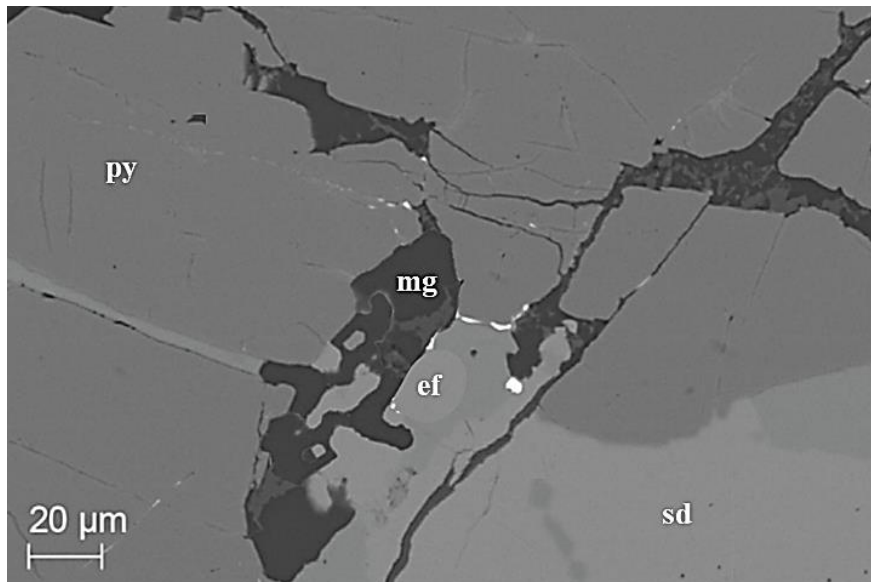
Micrografía de molibdenita, arsenopirita, turmalina y cuarzo con intercrecimientos y reemplazos.



Nota: Con un aumento de 20μm.

Figura 19

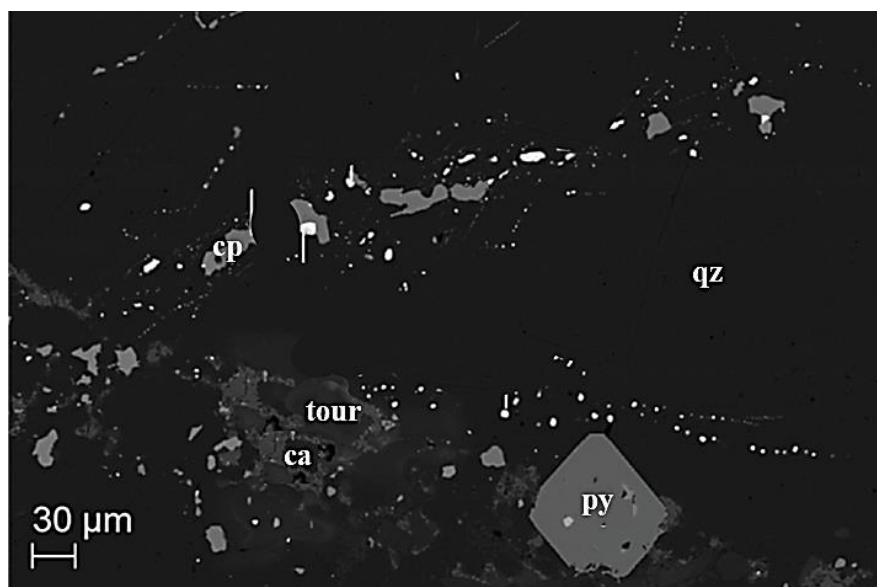
Micrografía de pirita, magnetita, esfalerita y siderita con texturas de reemplazo y relleno de fracturas



Nota: Con un aumento de 20μm.

Figura 20

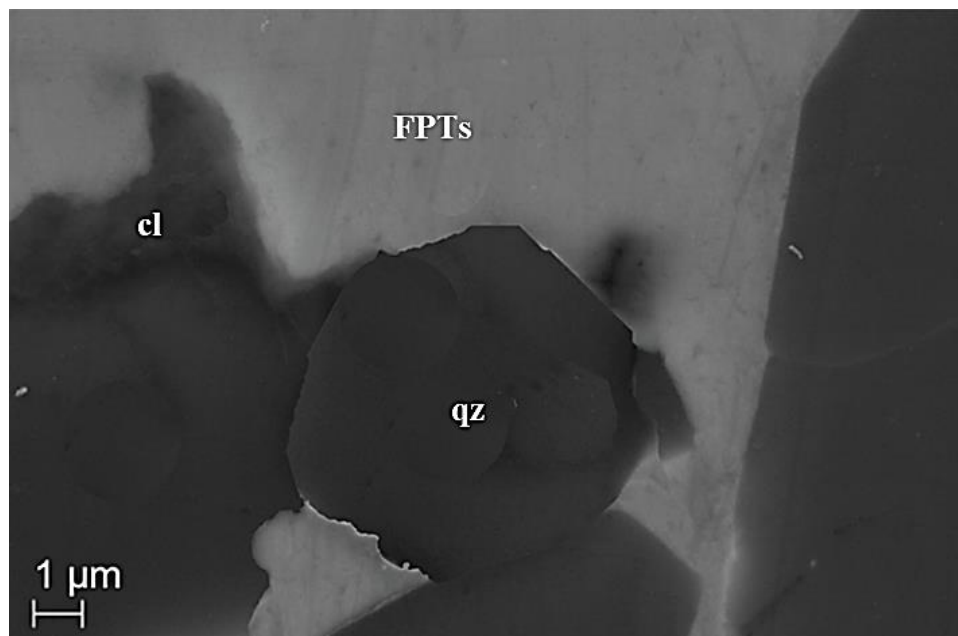
Micrografía de turmalina, calcopirita, calcita y cuarzo con texturas de relleno y reemplazo



Nota: Con un aumento de 30μm.

Figura 21

Micrografía de turmalina, clorita, feldespato potásico y cuarzo con texturas de reemplazo y relleno



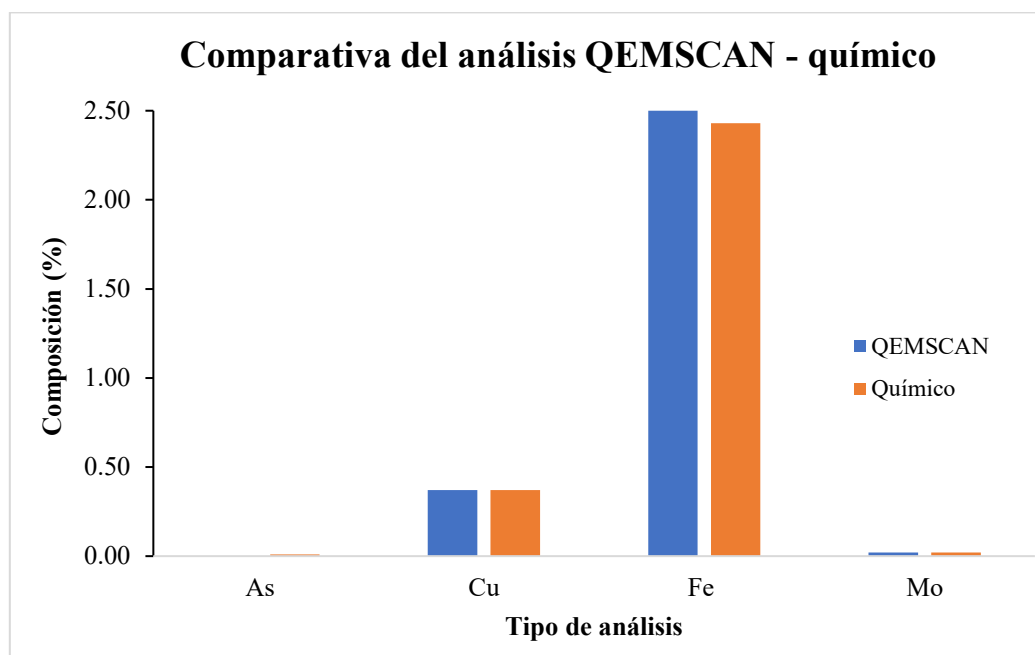
Nota: Con un aumento de 1μm.

Tabla 6

Análisis químico del mineral

Elemento	Análisis QEMSCAN (%)	Análisis Químico (%)
As	0.00	0.01
Cu	0.37	0.37
Fe	2.50	2.43
Mo	0.02	0.02

Nota: Comparativo de los datos del análisis químico y el análisis QEMSCAN,

Figura 22*Comparativa de análisis*

Nota: Considerando arsénico, cobre, hierro y molibdeno.

5.4. Proceso de Flotación Bulk Cu-Mo

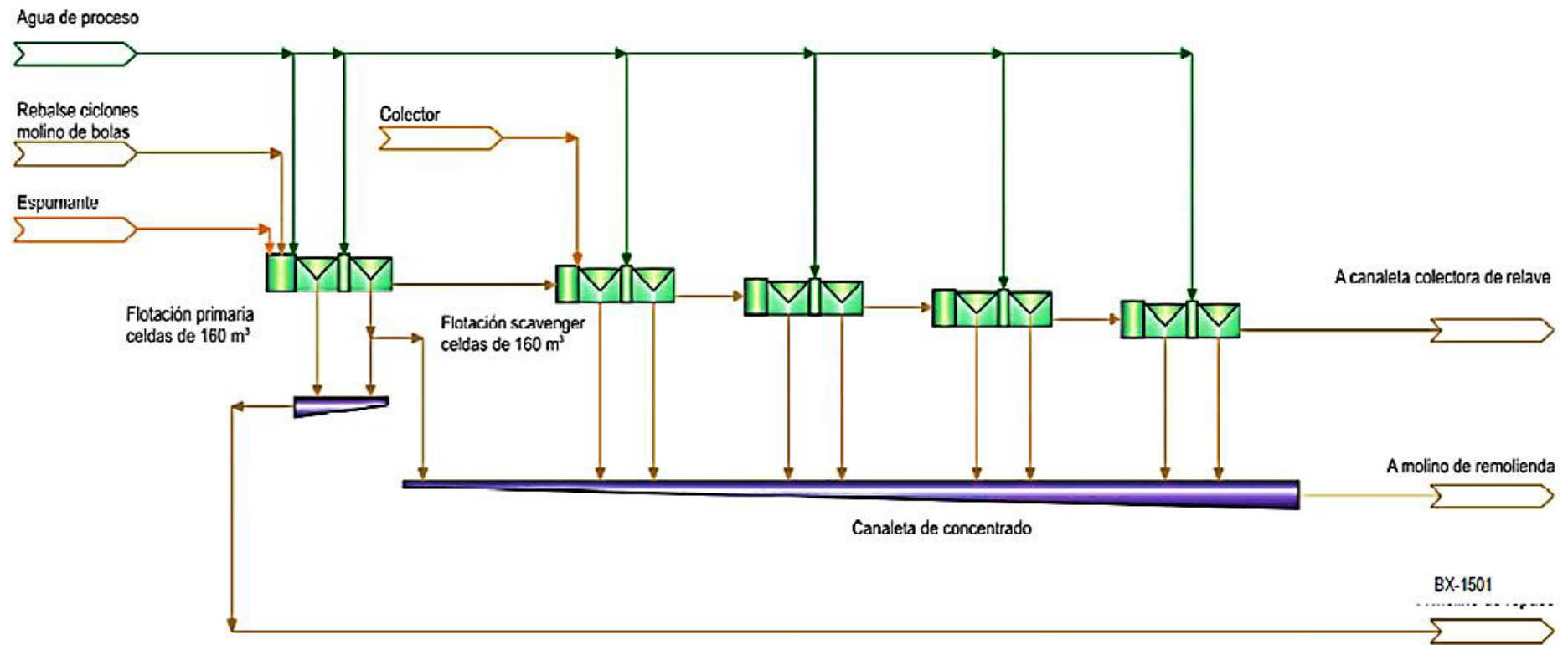
El circuito de flotación está constituido por 5 líneas. Las líneas 1 – 4 están conformados por 10 celdas mecánicas cada una. La primera celda de cada línea es una celda rougher, la segunda celda es normalmente usada como una celda rougher o scavenger dependiendo de la ley de alimentación, tal y como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 23. Las ocho celdas sobrantes por fila son usadas exclusivamente como celdas de flotación Scavenger. La línea 5 está conformada por 11 celdas mecánicas. Las 4 primeras celdas son cleaner, la celdas 5 y 6 pueden ser cleaner o cleaner – scavenger dependiendo del grado de cobre del concentrado bulk; y las 5 celdas restantes son celdas cleaner – scavenger, tal y como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 24.

El overflow de los ciclones con una ley promedio de cobre de 0.45 – 0.65 % y molibdeno de 0.19% ingresa a las líneas 1 – 4. En las celdas rougher flota la mayor parte

de los sulfuros valiosos que rebosan como espuma a la canaleta que descarga hacia el BX-501. Las colas de las celdas rougher alimentan a las celdas scavenger mediante 2 válvulas dardo. En las celdas scavenger se recupera la mayor cantidad de cobre, el concentrado o rebose cae a la canaleta que alimenta al BX – 503 y las colas se dirigen a los espesadores de relaves.

Figura 23

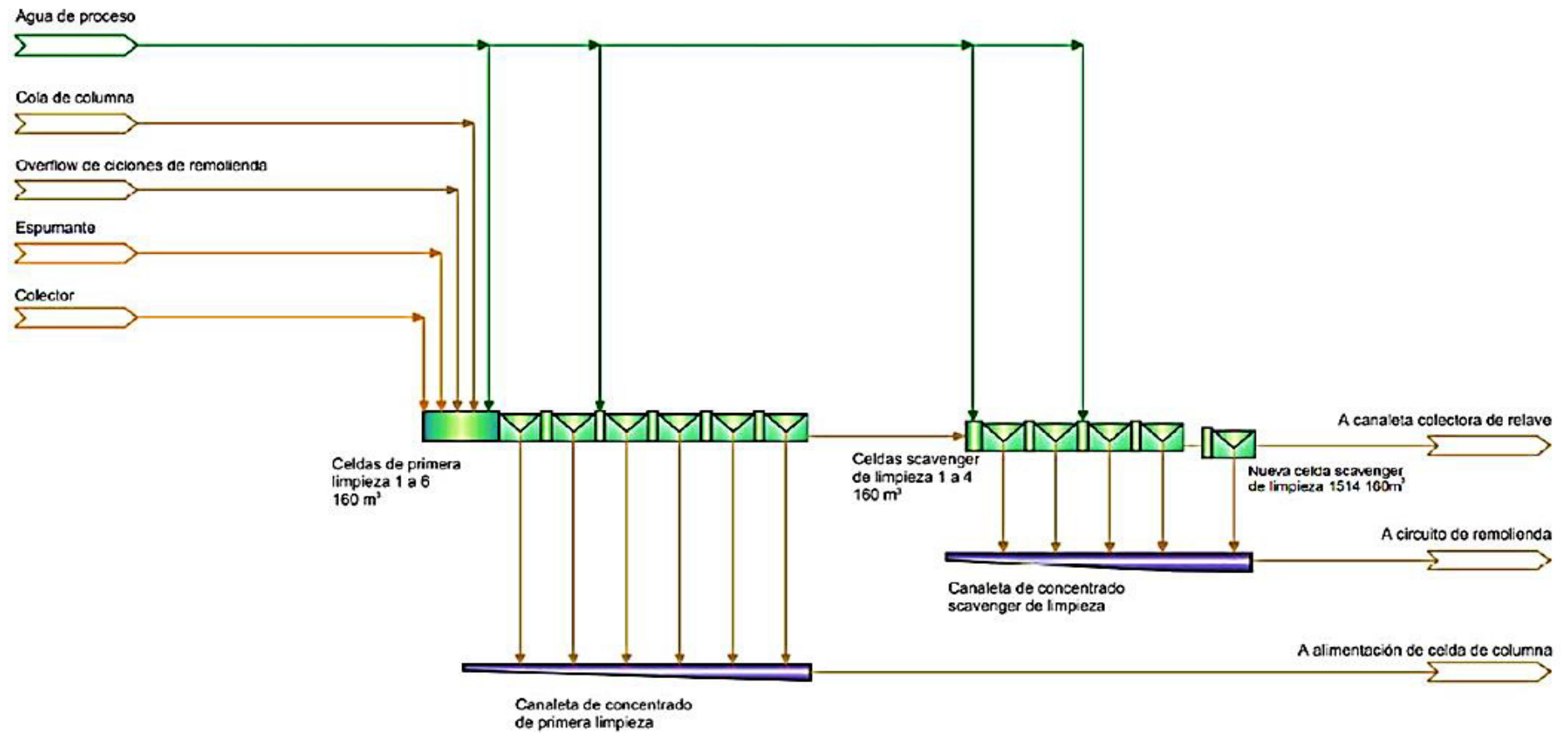
Flowsheet de flotación Rougher-Scavenger



Nota: Elaborado con software JKSIMMET.

Figura 24

Flowsheet de flotación Cleaner-Scavenger



Nota: Elaborado con software JKSIMMET.

5.5. Circuito de Remolienda y Celdas Columna

En el diagrama de flujo de la figura 25, el concentrado rougher descarga en el BX 501 para ser clasificado por el nido de ciclones CS 1502. El overflow es enviado al BX 1502 para ser transportado al distribuidor que alimenta a las celdas columna. El underflow se envía a los vertimill ML 505,1506 para ser reducidos de tamaño a una malla +365 de 25 a 30% con bolas de 1.5”, el rebose de los molinos descarga nuevamente en el BX 501. El concentrado rougher-scavenger y cleaner-scavenger descargan en el BX 503 para ser clasificado por el nido de ciclones CS 501. El overflow es enviado al BX 1505 para ser transportado a la quinta línea de flotación. El underflow se envía a los vertimill ML-503,504 para ser reducidos de tamaño y el rebose descarga nuevamente en el BX-503.

Los medios molientes del vertimill conforman el 60 – 61% del volumen del molino y consisten en una mezcla de bolas metálicas de 1.5”. Su adición se calcula en base a la potencia. El rango normal es de 450 a 500 KW, una potencia menor indica que se deben adicionar bolas.

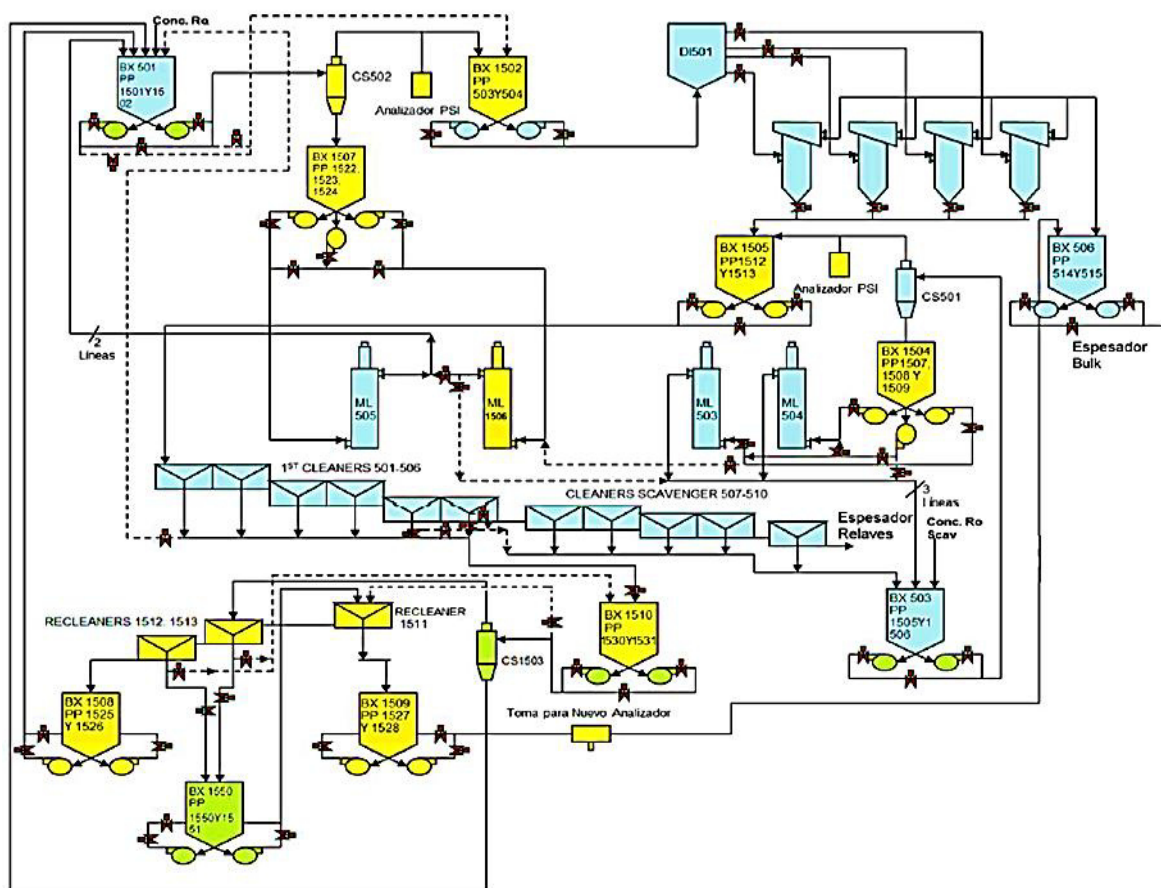
Las celdas columnas son las encargadas de limpiar el concentrado rougher. Gracias a su gran altura, el nivel de la espuma generada por el aire inyectado en los spargers permite tener un tiempo de residencia mayor y coleccionar el mineral valioso; además por la parte superior se dosifica agua fresca en contracorriente para lavar el concentrado y eliminar la mayor cantidad de insolubles. La alcalinidad también juega un rol importante en aumentar el grado. El concentrado de las celdas columnas se envía al BX 506 para su transporte al espesador bulk, mientras que las colas son enviadas al BX -1505 y el overflow del CS-501 constituyen la alimentación de la quinta línea.

El concentrado cleaner de la quinta línea descarga en el BX-1510. Antes de ingresar al circuito recleaner es clasificado por el nido de ciclones CS-1503. El underflow se envía al BX-501, mientras que el overflow alimenta la celda CF-1512. El concentrado

de esta celda descarga en el BX-1550, mientras su cola alimenta a la celda CF-1513. También el concentrado de la celda CF-1513 descarga en el BX-1550 y junto al concentrado de la CF-1512 alimentan a la CF-1511. El concentrado del circuito recleaner (concentrado de la CF-1511) es enviado al BX-1509 para su envío al espesador Bulk, la cola final (de la CF-1513) descarga en el BX-1508 para alimentar al BX-1501.

Figura 25

Flowsheet de Remolienda - Flotación



Nota: Elaborado con software JKSIMMET.

5.6. Planta de Flotación de Molibdeno

En la planta de molibdeno se extrae la molibdenita (MoS_2) mediante flotación del concentrado bulk (cobre-molibdeno) producto de la planta de cobre. El producto final es

un concentrado de molibdeno empacado en bolsas con un grado de 52% y una humedad de 4%. Las colas de la planta de molibdeno constituyen el concentrado final de cobre.

El espesador bulk es alimentado principalmente con el concentrado de las celdas columnas y concentrado recleaner; además recibe el concentrado rougher-scavenger de las celdas de molibdeno, así como las colas del primer cleaner. En el diagrama de flotación de molibdeno que se muestra en la figura 26, la pulpa sedimentada en el espesador es descargada al tanque agitador (TK 601), donde se adiciona CO_2 hasta conseguir un pH de 10 y NaHS, la cual deprime la flotación del mineral de cobre sulfurado, pero no afecta a la flotación del molibdeno; para ser transportado a los bancos de celdas mecánicas rougher (2 bancos con 2 celdas cada uno). Estas celdas funcionan con nitrógeno para la generación de espuma (en caso la espumación sea inadecuada se adiciona espumante) y cuentan con un punto de adición de NaHS por cada banco en caso de que el ORP (Potencial Óxido Reducción) se haga menos negativo. El concentrado rougher posee un bajo grado de molibdeno, pero alta recuperación y descarga por el lado sur y norte de las celdas. La canaleta sur transporta la pulpa al cajón BX 601 para ser enviado al tanque agitador TK 603. La canaleta norte descarga en el cajón BX 615 para su envío al BX 601. A ambas canaletas se adiciona antiespumante para evitar el rebalse en los cajones.

Las colas rougher alimentan al banco rougher-scavenger (2 celdas mecánicas). El concentrado producido se transporta al cajón BX 602 para ser bombeado al espesador bulk. Las colas constituyen las colas finales de la planta, por lo que el contenido de molibdeno deberá ser lo más bajo posible.

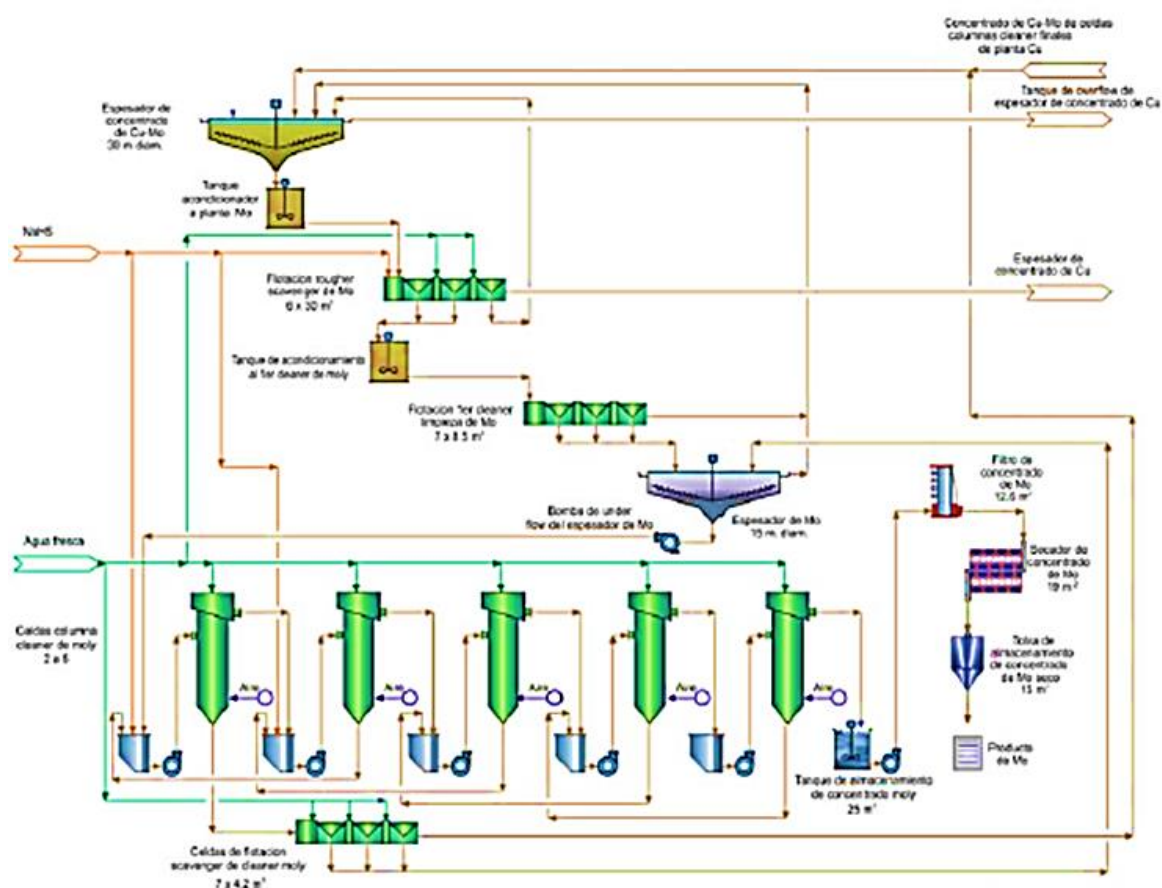
Al tanque TK 603 que colecta el concentrado rougher y las colas cleaner scavenger también se adiciona NaHS y CO_2 hasta un pH de 10 para alimentar al circuito cleaner (3 bancos, los dos primeros con 2 celdas y el último con 3 celdas). El circuito

funciona con nitrógeno y cada banco cuenta con dosificación de NaHS en caso se requiera. El concentrado cleaner se envía al cajón BX-606 para ser bombeado al espesador de molibdeno y las colas descargan en el BX-604 para ser enviados al espesador Bulk.

El espesador de molibdeno sedimenta el concentrado cleaner y cleaner scavenger para ser descargados en el cajón BX 1604. El rebose del espesador se transporta al espesador bulk hacia el BX 604 y junto con las colas del cleaner ser bombeados al espesador bulk. Otra opción es descargar el rebose al piso para que las bomba sumidero PP-608 lo envíe al espesador bulk.

El underflow del espesador de molibdeno del cajón BX 1604 se envía a los tanques agitadores de alto corte TK 1605 y TK 1606 en los cuales se destruyen las cadenas de reactivos. Después de la agitación la pulpa fluye al tanque agitador TK 605 donde se adiciona el colector de moly y pasa al cajón BX 608 para alimentar a las celdas columnas; el circuito posee 5 celdas columnas, del segundo cleaner al sexto cleaner donde se mejora la ley de molibdeno y se eliminan insolubles. El concentrado final es enviado al tanque TK-604 para ser filtrado y las colas descargan en el cajón BX-609 para alimentar al circuito cleaner scavenger.

El circuito cleaner scavenger que recibe las colas del segundo cleaner utiliza aire para la flotación debido a que la cantidad de cobre es pequeña y se requieren pocas cantidades de NaHS. El concentrado se envía al espesador de molibdeno y sus colas al TK-603 por medio del BX-605.

Figura 26*Flowsheet del circuito de moly***Nota:** Elaborado con software JKSIMMET.

5.7. Proceso Estándar de Flotación para Recuperación de Molibdenita

Se muestreo en operación el mineral de proceso en el circuito de alimentación a la flotación Bulk, para reproducir a nivel de laboratorio el proceso de planta, la cual, en una primera etapa se recupera un bulk Cu- Mo, bajo las condiciones de operación que se detallan en la tabla 7. Los resultados de la flotación Bulk se representa en el balance metalúrgico de la tabla 8, alcanzando una recuperación de 88.80% de Cu, y 83.23% de Mo.

Tabla 7*Condiciones de operación de la flotación*

Parámetro	Valor
Granulometría	150 μ
pH	10.5
Flomin C – 4132	10 g/t
A3302	3 g/t
McFroth H-75	10 g/t
Xantato Z-11	20 g/t

Nota: Parámetros óptimos para la operación.**Tabla 8***Balance del proceso de flotación*

Componentes	Peso (g)	% Peso	Ley (%)		Metálico		Recuperación (%)		Ratio
			Cu	Mo	Cu	Mo	Cu	Mo	
Cabeza	1000	100							
Concentrado Bulk	25.45	2.55	12.15	1.9	30.92	4.84	88.80	83.23	39.29
Relave final	974.55	97.46	0.04	0.01	3.90	0.97	11.20	16.77	
Cabeza calculada			0.35	0.058					

Nota: Datos obtenidos de la flotación bulk.

Las leyes del concentrado Bulk no alcanzan los grados comerciales de Cu y Mo, por lo que se realiza una flotación selectiva bajo las condiciones de operación que se detallan en la tabla 9, deprimiendo los sulfuros de cobre con NaSH y empleando gas nitrógeno. Los resultados de la flotación de separación Cu-Mo se detalla en el balance metalúrgico de la tabla 10, la recuperación total de Cu fue de 85.80%, y 71.41% de Mo.

Tabla 9*Condiciones de operación de la flotación*

Parámetro	Valor
Granulometría	65 μ
pH	8.5
NaSH	10 Kg/t
P 4000-K	5 g/t
Mc froth H-75	15 g/t
Molyflo	5 g/t
Na ₂ SiO ₃	10 g/t
Nitrógeno	150 Kg/h

Nota: Parámetros óptimos para la operación.**Tabla 10***Balance del proceso de flotación selectiva*

Componentes	Peso (g)	% Peso	Ley (%)		Metálico		Recuperación (%)		Ratio
			Cu	Mo	Cu	Mo	Cu	Mo	
Conc. Bulk	500								
Concentrado Cu	254.15	50.83	21.33	0.014	1084.20	0.71	96.85	0.36	1.97
Concentrado Mo	20.4	4.08	3.13	41.11	12.77	167.73	1.14	85.80	24.51
Medio Mo	225.45	45.09	0.5	0.6	22.55	27.05	2.01	13.84	
Cabeza calculada									

Nota: Datos obtenidos de la flotación selectiva.**5.7.1. Análisis de la Recuperación y Calidad de Molibdeno en planta**

Empleando el software PIDATA se recopiló data histórica del proceso productivo en la etapa de recuperación de molibdeno con la finalidad de ajustar un modelo matemático que permita predecir las variables de recuperación y calidad del concentrado en función del tamaño de partícula (P80), ley de cabeza (%Mo Cab.), % ISA, caolinita, clorita, sclays, muscovita, anhidrita, yeso. Los valores que se representan en la tabla 11, corresponde a una data filtrada, obtenidos durante la operación de procesamiento en un año, en ambas guardias.

Tabla 11*Data histórica de las variables independientes y dependientes del proceso de flotación*

Rec.	Ley	% Mo	P80	IS	Caolinit	Clorit	Sclay	Muscovit	Anhidrit	Yes
52.00	47.37	0.016	64.1	4.2	0.17	5.10	3.01	27.72	0.00	0.69
53.44	47.21	0.015	62.5	4.5	0.16	5.13	3.10	25.87	0.00	0.71
54.01	47.35	0.015	63.4	4.6	0.18	5.15	3.15	26.65	0.00	0.77
61.76	47.03	0.015	64.2	4.6	0.16	4.63	2.72	24.38	0.00	0.46
60.54	47.39	0.017	62.4	4.5	0.15	4.78	2.84	21.65	0.00	0.51
62.33	47.28	0.016	62.2	4.6	0.15	4.75	2.85	22.60	0.00	0.54
54.95	44.11	0.018	63.1	6.4	0.31	4.07	3.33	25.54	0.25	0.35
50.78	44.37	0.017	60.0	6.2	0.29	4.11	3.45	26.70	0.36	0.38
48.79	44.29	0.017	61.4	6.3	0.31	4.01	3.50	27.00	0.35	0.39
63.65	46.85	0.013	65.1	5.4	0.21	5.32	3.31	26.64	1.33	0.33
58.33	46.22	0.014	60.4	5.1	0.24	5.35	3.20	27.60	1.45	0.35
57.45	46.19	0.012	64.3	5.1	0.30	5.25	3.25	27.50	1.55	0.34
46.48	47.86	0.017	58.3	4.2	0.42	3.64	2.84	25.55	0.74	0.37
47.51	48.72	0.019	60.4	4.1	0.44	3.42	2.77	26.01	0.87	0.39
48.35	47.63	0.019	61.2	4.1	0.45	3.45	2.28	26.00	0.90	0.35
57.43	48.01	0.019	62.1	3.9	0.45	3.91	3.24	27.88	0.99	0.45
59.33	48.76	0.018	63.5	3.7	0.41	4.01	3.32	28.04	1.04	0.41
59.07	48.28	0.018	62.5	3.8	0.44	4.00	3.04	27.99	1.15	0.45
33.44	48.87	0.019	58.1	3.6	0.46	3.98	3.11	28.98	1.25	0.63
35.44	48.73	0.018	59.6	3.8	0.39	3.95	3.64	27.85	1.30	0.65
30.65	48.92	0.01	57.4	3.7	0.35	3.81	3.22	19.72	0.47	0.41
7.89	49.18	0.016	48.7	3.0	0.44	4.44	3.09	25.91	0.79	0.63
10.64	49.07	0.017	43.1	3.1	0.41	4.51	3.14	24.69	0.88	0.60
9.87	49.03	0.017	44.8	3.1	0.44	4.35	3.16	25.87	0.90	0.58
74.38	48.99	0.011	65.8	3.2	0.24	4.77	3.09	24.14	1.13	0.50
76.05	48.10	0.013	66.0	3.4	0.28	4.80	3.51	23.54	1.24	0.47
77.42	48.22	0.012	66.0	3.4	0.30	4.88	3.44	22.69	1.25	0.50
28.24	48.98	0.019	55.7	3.4	0.10	5.08	2.90	21.82	1.29	0.35
30.34	48.84	0.018	54.1	3.5	0.11	5.11	2.87	22.06	1.44	0.37
29.18	48.52	0.018	56.0	3.6	0.15	5.15	2.46	22.15	1.46	0.38
9.08	46.97	0.013	50.2	5.4	0.13	5.64	3.15	22.20	0.52	0.33
10.21	45.90	0.014	50.1	5.8	0.14	5.70	3.04	22.87	0.60	0.30
11.04	45.81	0.011	51.1	5.8	0.15	5.65	3.15	23.64	0.87	0.91

Nota: Data representativa obtenidos por el software PIDATA en el periodo de un año

5.7.1.1. Análisis de la Varianza para la Recuperación de Molibdeno en el Concentrado

El análisis de la varianza para la recuperación de molibdeno en el proceso de flotación selectiva determinó que la granulometría es la variable de mayor contribución

en el proceso, presentando un valor del estadístico $P = 0$, con 95% de confiabilidad, tal y como se representa en la tabla 12 y en el diagrama de Pareto de la figura 27.

Tabla 12

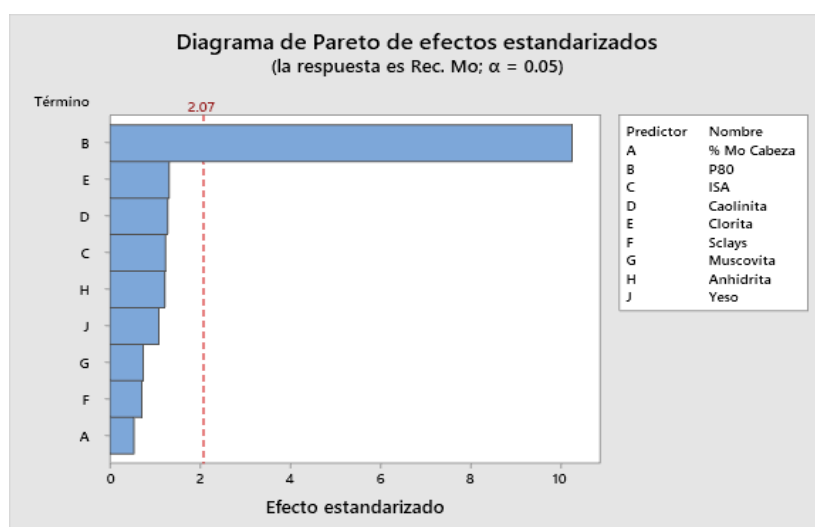
ANOVA para la recuperación de Mo

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	9	12721.1	1413.46	27.04	0
% Mo Cabeza	1	14.9	14.94	0.29	0.598
P80	1	5497	5496.98	105.17	0
ISA	1	79.6	79.59	1.52	0.23
Caolinita	1	86.6	86.56	1.66	0.211
Clorita	1	90.7	90.69	1.74	0.201
Sclays	1	26.1	26.12	0.5	0.487
Muscovita	1	28.4	28.43	0.54	0.468
Anhidrita	1	77.7	77.65	1.49	0.235
Yeso	1	61.7	61.71	1.18	0.288
Error	23	1202.2	52.27		
Total	32	13923.3			

Nota: | Los valores de p menor a 0.05 se consideran significativos

Figura 27

Pareto de los efectos estandarizados de recuperación de Mo



Nota: El P80 tiene mayor contribución sobre la recuperación de Mo

5.7.1.1.1. *Modelo para la Recuperación de Molibdeno*

Se ajustó un modelo matemático para predecir la recuperación de molibdeno en el proceso, en función de las variables independientes antes mencionadas, tal y como se representa en la ecuación 1. El modelo presentó un coeficiente de correlación predictivo de 77.65 %, lo cual garantiza la confiabilidad del modelo.

Ecuación 1

Ecuación de regresión para la recuperación de Mo

$$\begin{aligned} \text{Rec. Mo} = & -190.4 + 475(\% \text{Mo Cabeza}) + 3.468(\text{P80}) - 2.52(\text{ISA}) \\ & + 50.7(\text{Caolinita}) + 8.76(\text{Clorita}) + 3.79(\text{Sclays}) - 0.91(\text{Muscovita}) \\ & - 4.57(\text{Anhidrita}) - 13.2(\text{Yeso}) \end{aligned}$$

Nota: La ecuación está en función de las variables independientes estudiadas

Tabla 13

Resumen del modelo obtenido de la recuperación de Mo

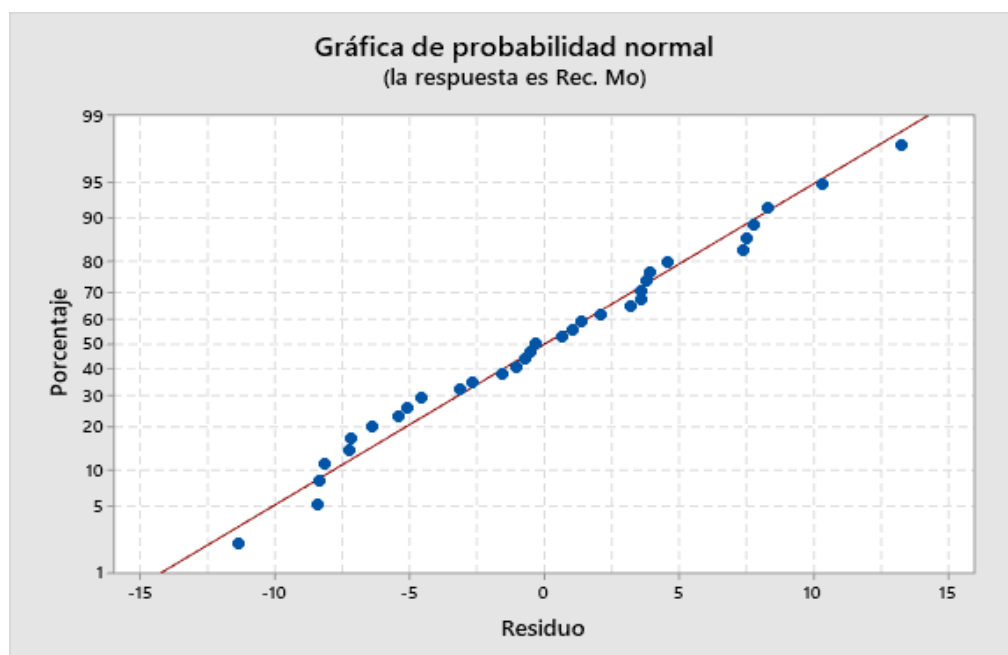
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
7.22977	91.37%	87.99%	77.65%

Nota: Los coeficientes de correlación indican la confiabilidad del modelo matemático.

En la gráfica de probabilidad normal de la figura 28 podemos observar que los residuos siguen una distribución normal, por lo que se concluye que no existen datos atípicos. Así también, la figura 29, representa la distribución normal de los datos a través de histogramas que representan la frecuencia de los residuos.

Figura 28

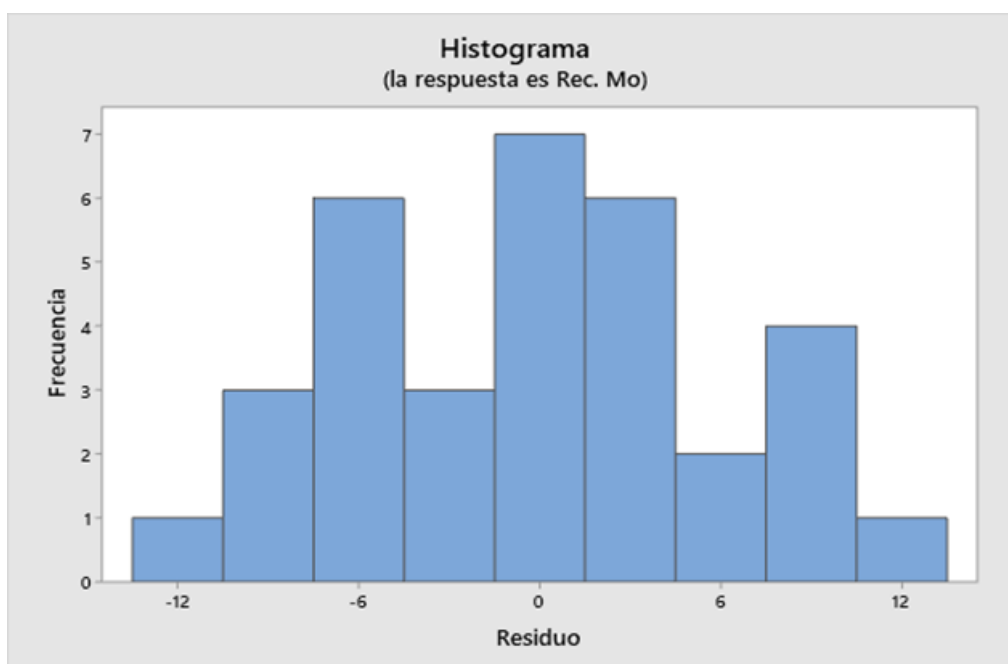
Gráfica de la probabilidad normal de la recuperación de Mo



Nota: Los datos se encuentran en una distribución normal.

Figura 29

Histograma de la recuperación de Mo

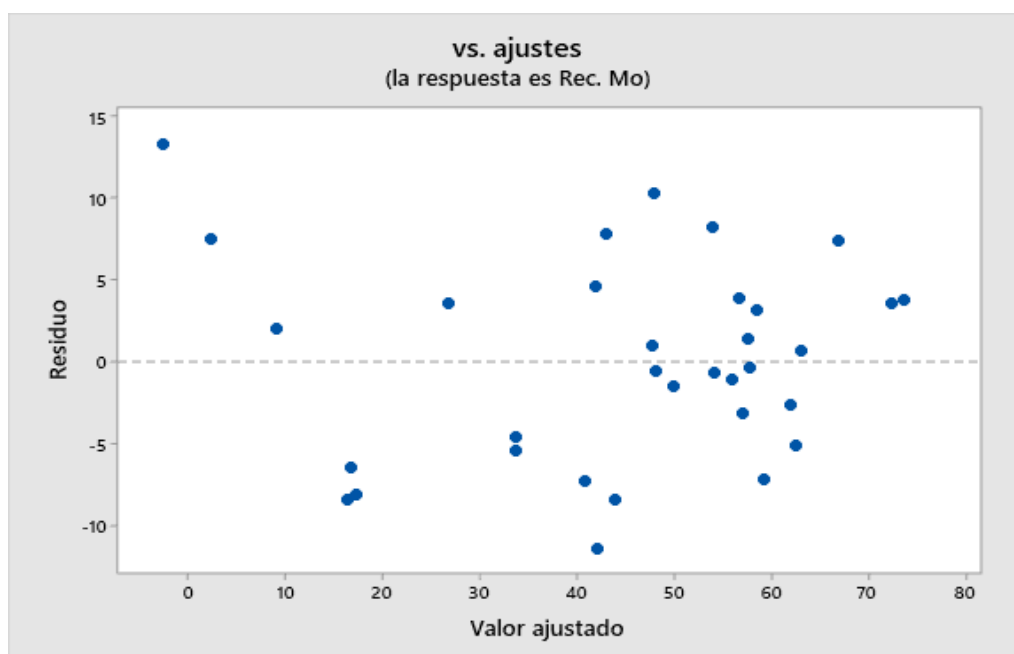


Nota: Los datos se miden según la frecuencia.

La figura 30 representa los residuos del modelo en relación con los valores ajustados, los cuales se distribuyen de forma aleatoria a lo largo de la línea recta, lo que indica que es un modelo confiable.

Figura 30

Gráfica de residuos de la recuperación de Mo



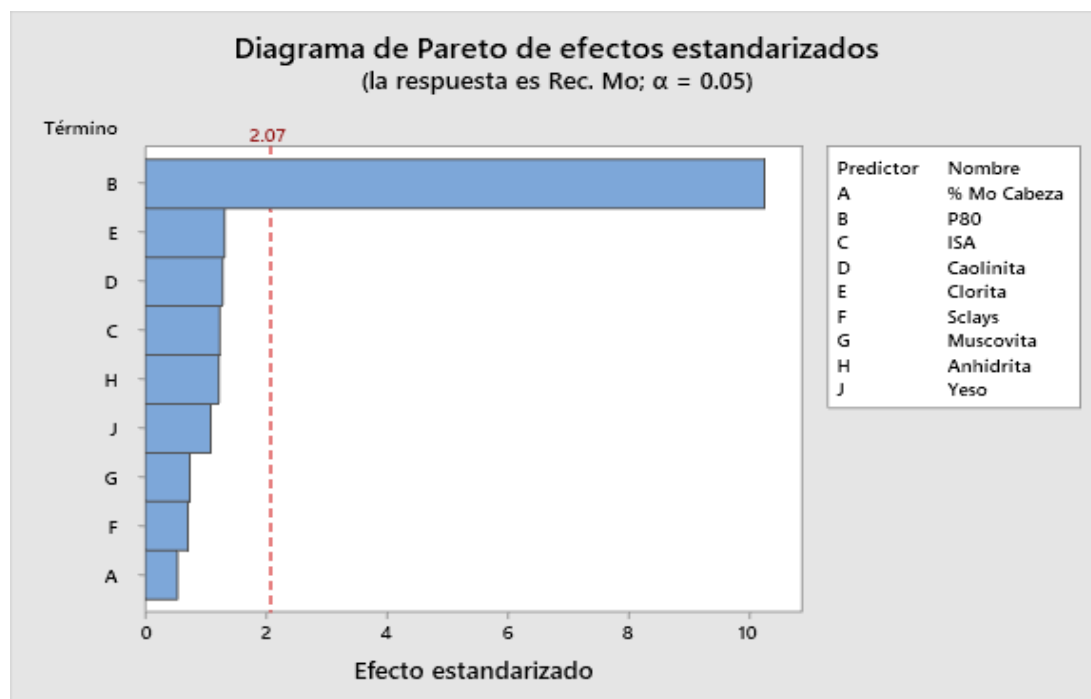
Nota: Datos de los residuos y su valor ajustado.

5.7.1.2. Análisis de la Varianza para la Ley de Molibdeno en el Concentrado

El análisis de la varianza para la calidad de molibdeno en el proceso de flotación selectiva determinó que el porcentaje de ISA (insolubles) es la variable de mayor contribución en el proceso, con un valor $P = 0$, tal y como se representa en la tabla 14 y en el diagrama de Pareto de la figura 31.

Tabla 14*Diseño del análisis para la ley de Mo*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	9	61.6284	6.8476	31.37	0
% Mo Cabeza	1	0.1478	0.1478	0.68	0.419
P80	1	0.322	0.322	1.48	0.237
ISA	1	23.4623	23.4623	107.47	0
Caolinita	1	0.1472	0.1472	0.67	0.42
Clorita	1	0.1419	0.1419	0.65	0.428
Sclays	1	0.1702	0.1702	0.78	0.386
Muscovita	1	0.0663	0.0663	0.3	0.587
Anhidrita	1	0.1286	0.1286	0.59	0.451
Yeso	1	0.0001	0.0001	0	0.982
Error	23	5.0211	0.2183		
Total	32	66.6495			

Nota: Considerando las variables.**Figura 31***Pareto de los efectos estandarizados de ley de Mo***Nota:** Del gráfico se destaca que la variable P80 tiene influencia.

5.7.1.2.1. *Modelo para la Ley de Molibdeno*

Se ajustó un modelo matemático para predecir la ley de molibdeno en el concentrado, en función de las variables independientes antes mencionadas, tal y como se representa en la ecuación 2. El modelo presentó un coeficiente de correlación predictivo de 84.77 %, lo cual garantiza la confiabilidad del modelo.

Ecuación 1

Regresión del modelo de la ley de Mo

$$\begin{aligned} \text{Ley \% Mo} = & 57.73 - 47.3(\% \text{Mo Cabeza}) - 0.0265(\text{P80}) - 1.369(\text{ISA}) \\ & - 2.09(\text{Caolinita}) - 0.346(\text{Clorita}) - 0.306(\text{Sclays}) \\ & + 0.0437(\text{Muscovita}) + 0.186(\text{Anhidrita}) - 0.018(\text{Yeso}) \end{aligned}$$

Nota: La ecuación incluye a todas las variables.

Tabla 15

Resumen del modelo obtenido de la ley de Mo

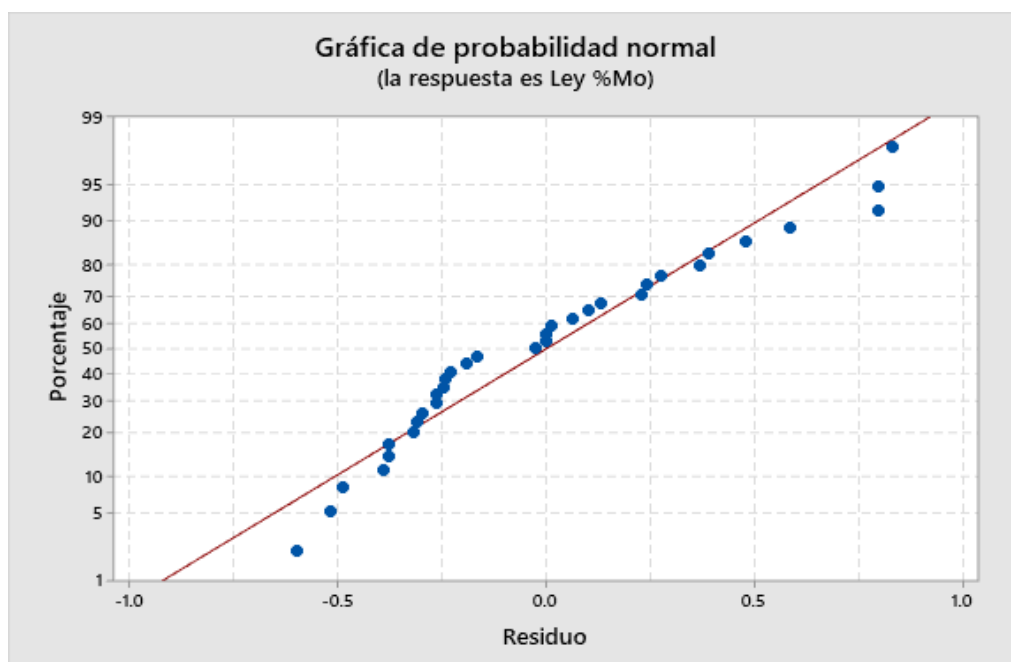
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.467235	92.47%	89.52%	84.77%

Nota: Los coeficientes de correlación indican la confiabilidad del modelo matemático.

En la gráfica de probabilidad normal de la figura 32 podemos observar que los residuos siguen una distribución normal, por lo que se concluye que no existen datos atípicos. Así también, la figura 33, representa la distribución normal de los datos a través de histogramas que representan la frecuencia de los residuos.

Figura 32

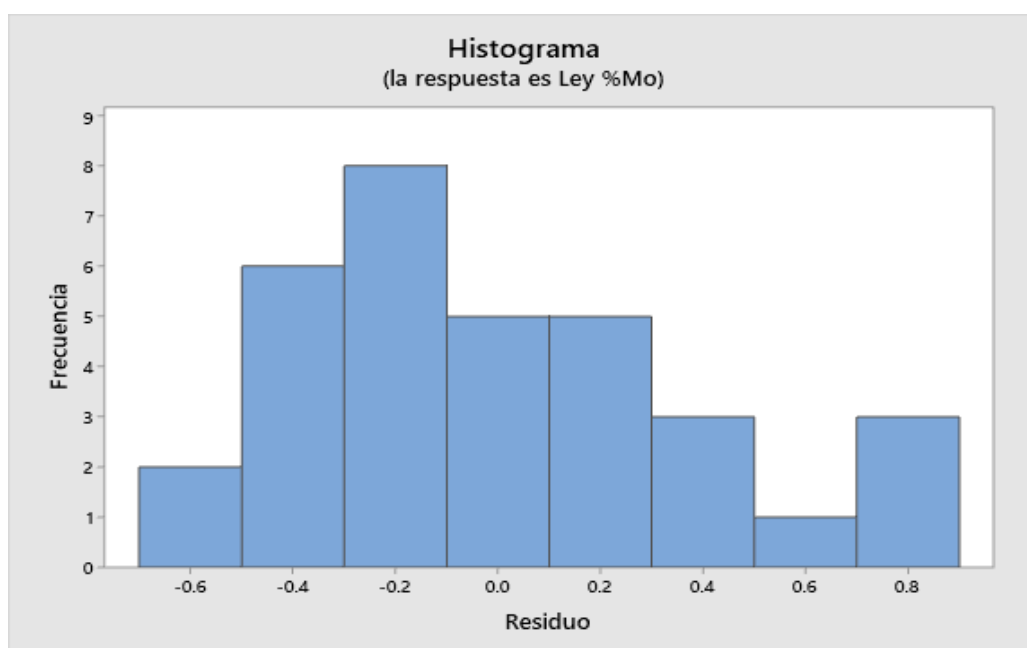
Gráfica de la probabilidad normal de la ley de Mo



Nota: Los datos se encuentran dentro de un rango aceptable para el modelo.

Figura 33

Histograma de la ley de Mo

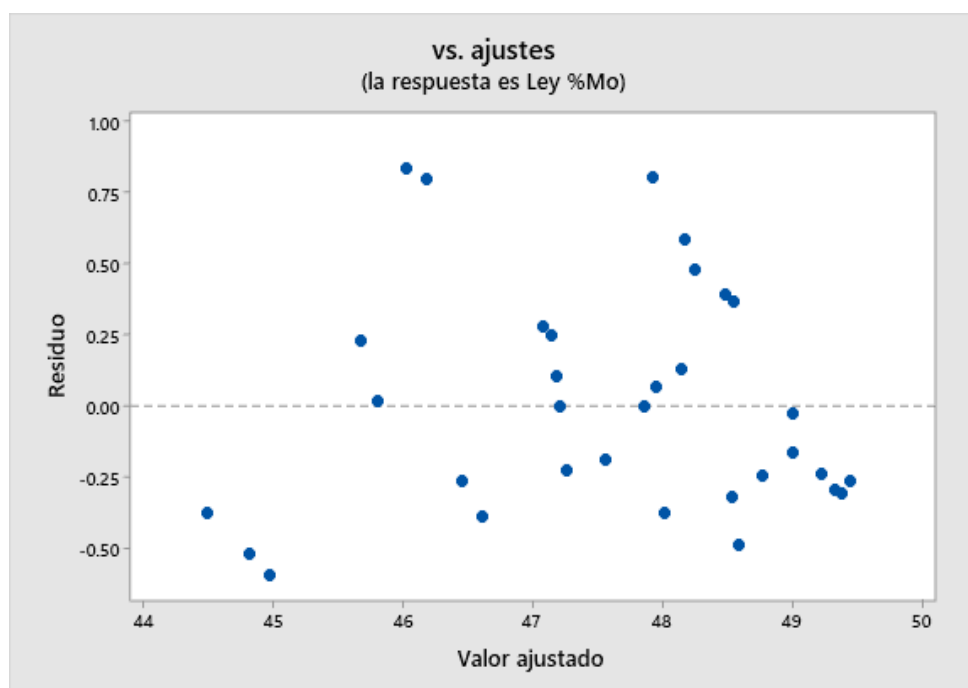


Nota: Los datos se miden según la frecuencia.

La figura 34 representa los residuos del modelo en relación con los valores ajustados, los cuales se distribuyen de forma aleatoria a lo largo de la línea recta, lo que indica que es un modelo confiable.

Figura 34

Gráfica de residuos de la ley de Mo



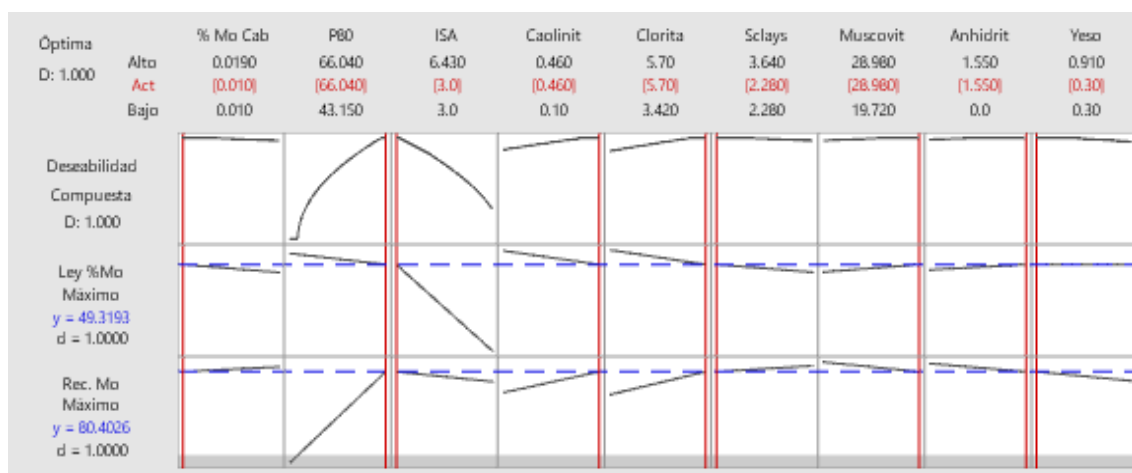
Nota: Datos de los residuos y su valor ajustado.

5.7.2. Optimización de los Resultados Obtenidos

En base a los modelos matemáticos obtenidos por el paquete estadístico para la recuperación y calidad de molibdeno en el concentrado, se optimizaron los valores de las variables independientes para maximizar las variables respuestas, tal y como se representan en la tabla 16 y figura 35.

Tabla 16*Resumen de la optimización de los variables*

% Mo Cabeza	P80	ISA	Caolinita	Clorita	Sclays	Muscovita	Anhidrita	Yeso	Ley %Mo Ajuste	Rec. Mo Ajuste
0.01	66.04	3	0.46	5.7	2.28	28.98	1.55	0.3	49.3193	80.4026

Nota: Resultados del optimizador de variables del Minitab 19.**Figura 35***Gráfica de la optimización de las variables***Nota:** Datos ajustados considerando valores mínimos y máximos de ley y recuperación.

CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados

La muestra de mineral tipo pórfido de Cu-Mo ensayó por microscopía óptica de luz reflejada especies de sulfuro de Cu como calcopirita y especies de molibdenita con distribuciones de 1.16% y 0.21%, respectivamente, además el microscopio identificó una mayor distribución de las gangas, con un valor de 97.28%. El alto valor de distribución de las gangas en la muestra de procesamiento hizo necesario proyectar una microscopia electrónica para detallar las especies de minerales sin valor económico que dentro de la literatura se detallan como perjudiciales para el proceso de flotación de molibdenita. La microscopía óptica ratificó las especies observadas en la microscopia electrónica, además de micas, cuarzo, feldespatos potásicos, plagioclasas, turmalina, anfíbol/piroxeno, óxido de hierro, moscovita/sericita, siderita, calcita, biotita, clorita, talco, pirofilita, esmectita, alunita, anhidrita, yeso, entre otros. De las especies identificadas, el cuarzo ocupa un volumen de 36.27%, seguido de la moscovita/sericita con una distribución de 23.56%, plagioclasa con un valor de 13.7%, clorita ocupando un volumen de 8.04%, además de feldespatos potásicos, esmectita, calcita, caolinita, y yeso, con valores de distribución poco mayor al 1%.

La investigación que se presentó tiene el enfoque de mineralogía de procesos, la cual mantiene una metodología similar al trabajo realizado por **(Abdollahi et al., 2020)**, los cuales sustentaron que no solo es necesario realizar análisis químicos de los elementos, sino que, la identificación de las especies de minerales en el sistema es necesario para evaluar los reactivos a dosificar.

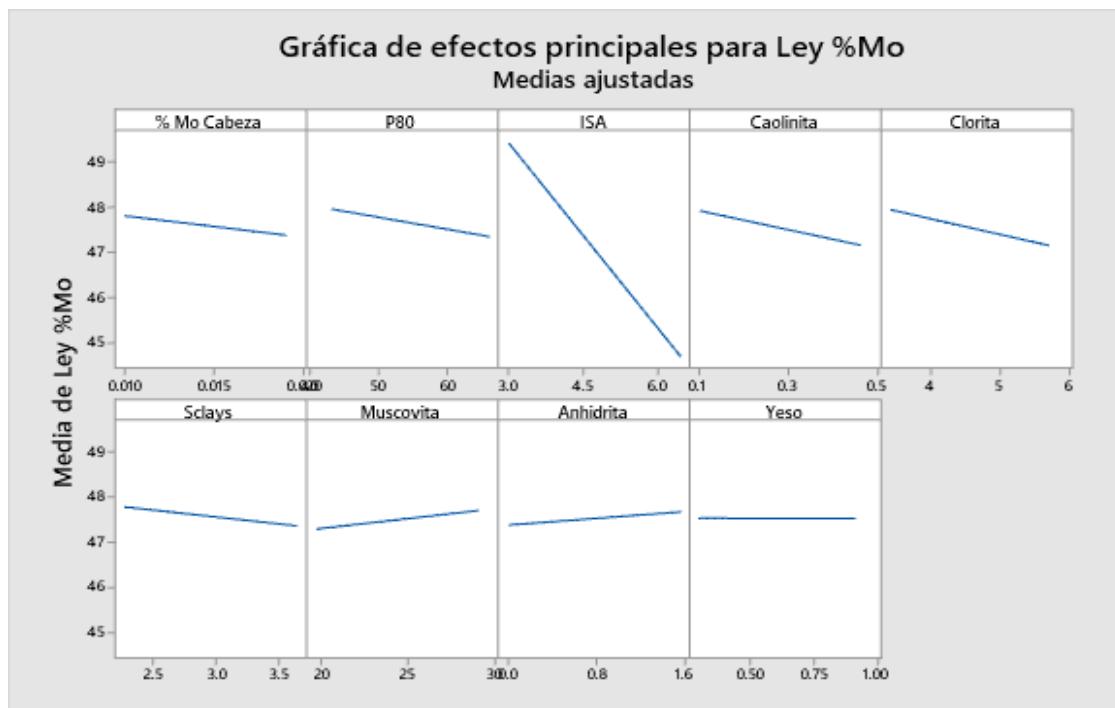
La presencia de talco en la muestra de mineral de procesamiento perjudica el beneficio de mineral desde la etapa de flotación Bulk, de tal manera que es necesario dosificar un dispersor de lamas como el CMC. Un trabajo similar, es el presentado por

(Wu et al., 2024), donde corrobora la complejidad del mineral tipo talco en la flotación, es por ello, que los autores, a diferencia del reactivo usado en el presente trabajo, emplearon oxidantes e inhibidores para realizar la flotación inversa de molibdenita, evaluando la infusión de levadura como un depresor potencial en la separación por flotación inversa de molibdenita del talco.

La complejidad de la flotación de los pórfidos Cu-Mo, radica en las asociaciones de minerales que los acompañan, y los cuales, en ocasiones se encuentran formando enlaces con las partículas de interés comercial. La influencia que ejerce los minerales: Yeso, insolubles, clorita, caolinita, arcillas, muscovita, anhidrita, así como la ley de cabeza y la granulometría son determinantes en la recuperación y calidad del molibdeno en el concentrado, hacen necesario detallar los valores de estas variables a través de software y sensores que permiten detallar estos valores en línea. Por tal razón se instalaron en la planta de procesamiento el software PIDATA, la cual, permitió deducir un modelo en función de las variables antes mencionadas. Las influencias de dichas variables en el proceso se detallan en la figura 36.

Figura 36

Gráfica de efectos principales para ley de Mo



Nota: Pendientes de cada variable.

CONCLUSIONES

- La implementación de estrategias de homogenización y mezcla de minerales sulfurados permitió reducir la variabilidad en la alimentación al circuito de flotación, esto resultó en una mejora en la recuperación de molibdeno de 55% hasta un 80.40% y en la calidad del concentrado con una ley de 49.32% de Mo.
- La aplicación de la microscopía óptica y electrónica permitió identificar y cuantificar la distribución mineralógica del mineral de alimentación al circuito de flotación bulk Cu-Mo. Se determinó que la calcopirita presenta un 1.04% de distribución volumétrica con un 75% de grado de liberación, mientras que la molibdenita representa un 0.21% del volumen total, con un 60% de liberación. Asimismo, las partículas mixtas con enlaces fáciles de liberar tienen un 0.13% de distribución volumétrica.
- El uso del software PIDATA permitió correlacionar la mineralogía del mineral procesado con los valores de recuperación y calidad de molibdeno, facilitando la identificación de los factores que impactan negativamente en el proceso, lo cual permitió ajustar parámetros operativos en tiempo real, optimizando así la flotación del molibdeno.
- Mediante análisis estadístico y regresión lineal múltiple, se determinaron modelos predictivos para la recuperación y calidad del molibdeno. Se concluyó que la granulometría del mineral es la variable de mayor impacto en la recuperación, mientras que la presencia de minerales insolubles afecta la calidad del concentrado.
- Se concluye que la aplicación combinada de análisis mineralógico, monitoreo mediante PIDATA y ajustes en la granulometría y composición del mineral permite optimizar la flotación de molibdeno, revirtiendo las condiciones que generaban la baja recuperación y asegurando un beneficio económico sostenible en la planta concentradora de Uchumayo - Arequipa.

- La baja recuperación de molibdeno en el proceso de flotación selectiva se debe principalmente a la granulometría y la presencia de minerales insolubles como caolinita, clorita, arcillas, muscovita, anhidrita y yeso, los cuales influye significativamente en la liberación y recuperación del molibdeno.

RECOMENDACIONES

- Evaluar el efecto de caolinita, clorita, muscovita, anhidrita y yeso en la flotación, considerando ajustes en reactivos para minimizar su impacto.
- Implementar estrategias de control y monitoreo de las variables críticas en la recuperación y calidad del molibdeno, como la granulometría (P80), especies insolubles (ISA) y mineralogía del mineral de alimentación.
- Integrar el software PIDATA para optimizar el control del proceso, correlacionando la mineralogía del mineral con la recuperación y calidad del concentrado en tiempo real.
- Homogenizar el mineral de alimentación para reducir la variabilidad y estabilizar la recuperación de molibdeno, minimizando el impacto de minerales perjudiciales.
- Validar en planta el modelo de regresión lineal múltiple desarrollado, ajustando parámetros según condiciones operativas para optimizar la flotación.
- Analizar la viabilidad económica de las mejoras propuestas, comparando costos y beneficios para justificar su aplicación a nivel industrial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdollahi, M., Bahrami, A., Mirmohammadi, S., Kazemi, F., Danesh, A., & Ghorbani, Y. (2020). A process mineralogy approach to optimize molybdenite flotation in copper – molybdenum processing plants. *Minerals Engineering*, 157(106557).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106557>
- Anculle, A., Castro, V., & Julca, A. (2017). Characterization of tuna farms (*Opuntia ficus indica*) for the production of carmine mealybug (*Dactylopius coccus*) in La Joya, Arequipa. *Aporte Santiaguino*, 10(2), 245-258.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.32911/as.2017.v10.n2.167>
- Apaza, A., & Cayllahui, A. (2018). *Percepción de los pobladores del distrito de Uchumayo sobre las acciones de responsabilidad social de la empresa Cerro Verde - 2018*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa.
- Arrizabalaga, C. (2016). Anglicismos tempranos en el Perú del siglo XIX. *CONSENSUS*, 21(1).
<https://revistas.unife.edu.pe/index.php/consensus/article/download/980/892>
- Azañero, A. (2015). *Flotación y concentración de minerales*. Lima: Colecciones Jovic.
- Bulatovic, S. (2007). *Handbook of Flotation Reagents, Chemistry, Theory and Practice of Sulfide Ores*. Petersborough: Elsevier Science.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53029-5.X5009-6>
- Cañapataña, I. (2014). *Evaluación metalúrgica del HPGR en el circuito de chancado secundario y terciario en la concentradora Cuajone*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Castro, S. (2003). *Flotación Fundamentos y Aplicaciones*. Universidad de Concepción.

- Cortés, C. (2016). *Efecto de la presencia de caolinita y montmorillonita en la flotabilidad de calcopirita de alta pureza en agua destilada, agua de mar e iones*. Tesis de licenciatura, Universidad de Concepción, Concepción.
- Cuela, F., & Ramos, J. (2021). *Abastecimiento de agua potable y alcantarillado para la asociación de vivienda las Lomas de Uchumayo - Arequipa*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Davenport, W., & Shclessinger, A. (2002). *Extractive metallurgy of copper* (Cuarta ed.). Oxford: Pergamon.
- Farrokhpay, S., & Ndlovu, B. (2013). Effect of phyllosilicate minerals on the rheology, colloidal and flotation behaviour of chalcopyrite mineral. *Chemeca 2013: Australasian Conference on Chemical Engineering, Brisbane*.
- Finch, J., Nasset, J., & Acuña, C. (2008). Role of frother on bubble production and behaviour in flotation. *Minerals Engineering*, 21(12-14), 949-957.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.04.006>
- Guang, L., Yi, L., Hong, Z., Zhan, C., & Zheng, X. (2012). A novel approach for preferential flotation recovery of molybdenite from a porphyry copper–molybdenum ore. *Minerals Engineering*, 36-38, 37-44.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.02.008>
- Gutiérrez, L., & Manríquez, C. (2019). *Uso de depresantes alternativos para la flotación selectiva de molibdeno Codelco División Andina*. Tesis de licenciatura, Universidad de Concepción, Concepción.
- Huang, K. (2015). *Validation and application of a first principle flotation model*. Tesis de maestría, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Huangfu, Z., Khoso, A., Sun, W., Hu, Y., Chen, C., & Zhang, Q. (2018). Utilization of petrochemical by-products as a new frother in flotation separation of

- molybdenum. *Journal of Cleaner Production*, 204, 501-510.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.276>
- Li, M., Wei, D., Liu, Q., Liu, W., Zheng, J., & Sun, H. (2015). Flotation separation of copper–molybdenum sulfides using chitosan as a selective depressant. *Minerals Engineering*, 83, 217-222.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.013>
- Liu, G., Lu, Y., Zhong, H., Cao, Z., & Xu, Z. (2012). A novel approach for preferential flotation recovery of molybdenite from a porphyry copper-molybdenum ore. *Minerals Engineering*, 36-38, 37-44.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.02.008>
- López, A., & Reyes, J. (2005). Flotación de calcopirita, pirita y molibdenita en minerales de cobre tipo pórfidos. *X Simposio sobre Procesamiento de Minerales*.
- Madrid, I. (2005). *Efecto de iones calcio, pH, tamaño de partícula y colectores no polares en la flotabilidad de molibdenita*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Potosí.
- Méndez, X. (2013). *Optimización en la recuperación metalúrgica de molibdeno, planta I Las Tórtolas, división Los Bronces - Angloamerican*. Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso.
- Moslemi, Hossein, & Mahdi, G. (2017). A review on electrochemical behavior of pyrite in the froth flotation process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 47, 1-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.12.012>
- Mu, Y., Peng, Y., & Lauten, R. (2016). The depression of pyrite in selective flotation by different reagent systems – A Literature review. *Minerals Engineering*, 96-97, 143-156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.018>

- Nguyen, A. (2013). Froth Flotation. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*, 1-27. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.04401-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.04401-2)
- Palza, A., & Quequesana, M. (2019). *Declaración de la campiña como patrimonio cultural de la ciudad de Arequipa - 2018*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Pan, L., Jung, S., & Yoon, R. (2011). Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 36(1), 321-330. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.05.057](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.05.057)
- Paye, R. (2018). *Efecto de Los Insolubles en la Recuperacion de Molibdenita*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Rabatho, J., Tongamp, W., Kato, J., & Haga, K. (2011). Effect of Flotation Reagents for Upgrading and Recovery of Cu and Mo from Mine Tailing by Flotation. *Resources Processing*, 58(1), 14-21. [https://doi.org/https://doi.org/10.4144/rpsj.58.14](https://doi.org/10.4144/rpsj.58.14)
- Raghavan, S., & Hsu, L. (1984). Factors affecting the flotation recovery of molybdenite from porphyry copper ores. *International Journal of Mineral Processing*, 12(1-3), 145-162. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-7516\(84\)90026-7](https://doi.org/10.1016/0301-7516(84)90026-7)
- Umur, E. (2015). *Geometallurgical Characterization of Zinkgruvan's New Orebodies for Their Flotation Properties*. Tesis de maestría, Luleå University of Technology, Norrbotten.
- 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*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.

- Voncken, J. (2016). A Special Group of Metals. *The Rare Earth Elements*, 1-13.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-26809-5_1
- Washington, A. (2018). *Estudio de la flotación bulk de minerales pórfidos de cobre con la utilización de agua de mar*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa.
- Wisnu, P., Miki, H., Ochi, D., Aoki, Y., Ura, K., Berdakh, D., Ulmaszoda, A., Dwitama, E., Sasaki, K., & Hirajima, T. (2023). Sodium metabisulfite as a copper depressant in the selective flotation of copper-molybdenum concentrate using seawater. *Advanced Powder Technology*, 34(12).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.appt.2023.104258>
- Wu, Y., Jia, W., Wei, Q., Lin, X., Jiao, F., & Qin, W. (2024). Selective flotation separation of molybdenite and talc by yeast infusion with H₂O₂ peroxidation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 682(132931). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132931>
- Xie, L., Wang, J., Yuan, D., Shi, C., Cui, X., Zhang, H., Liu, Q., Liu, Q., & Zeng, H. (2017). Interaction Mechanisms between Air Bubble and Molybdenite Surface: Impact of Solution Salinity and Polymer Adsorption. *Langmuir*, 33(9), 2353-2361. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b04611>
- Yianatos, J. (2005). *Flotación de minerales*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Yoon, R. (2000). The role of hydrodynamic and surface forces in bubble–particle interaction. *International Journal of Mineral Processing*, 58(1-4), 129-1423.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00071-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00071-X)
- Yufan, M., Yongjun, P., & Rolf, L. (2016). Depression of pyrite in the flotation of chalcopyrite using biopolymer depressants. *XXVIII International Mineral*

Processing Congress Proceedings, 11-15.

<https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:409216>

Zapata, D. (2019). *Análisis y propuesta de optimización operacional de recuperación de molibdeno en línea subterránea, división andina - Codelco Chile*. Tesis de licenciatura, Universidad de Concepción, Concepción.

Zhang, W., Chen, J., Xu, S., Jin, X., Sun, W., & Gao, Z. (2023). Advanced collector-free flotation of typical sulfide minerals using a novel heterocyclic depressant. *Minerals Engineering, 199*(108120).

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108120>

Zúñiga, G. (2018). *Caracterización de la distribución y ocurrencia de la molibdenita y su influencia en la recuperación de molibdeno en el yacimiento El Teniente*. Tesis de licenciatura, Universidad de Chile, Santiago de Chile.

ANEXOS

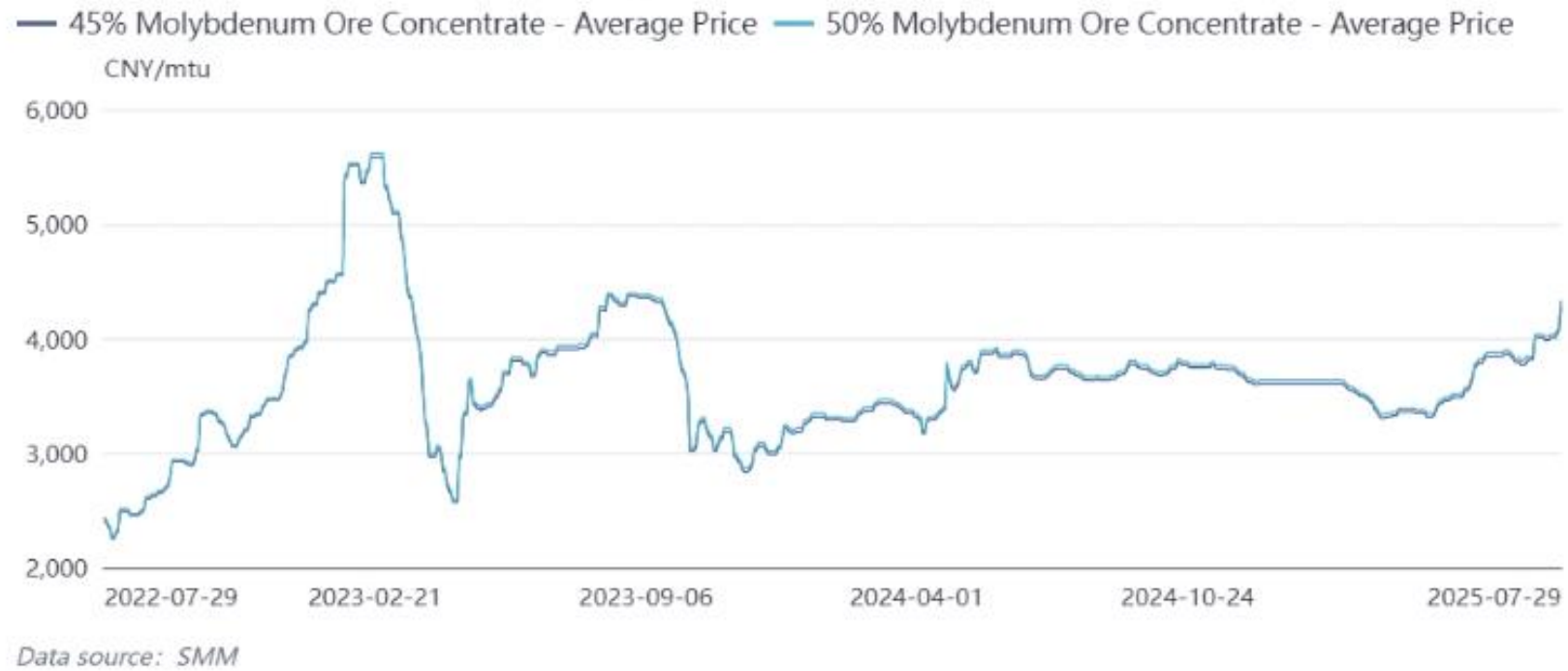
Anexo 1

Matriz de consistencia

“Evaluación del blending del mineral mediante software Pidata para mejorar la recuperación de molibdeno en el proceso de flotación en Uchumayo-Arequipa”			
Problema general	Objetivo general	Hipótesis	Variables
¿De qué manera podemos mejorar la baja recuperación de Mo en el proceso de flotación del blending de minerales sulfurados empleando el software Pidata, en el distrito de Uchumayo - Arequipa?	Mejorar la recuperación de Mo en el proceso de flotación del blending de minerales sulfurados empleando el software Pidata, en el distrito de Uchumayo - Arequipa.	El software Pidata permitirá mejorar la recuperación de Mo en el proceso de flotación del blending de minerales sulfurados, en el distrito de Uchumayo - Arequipa.	Variable independiente - Granulometría - Porcentaje de sólidos - Distribución volumétrica de las especies minerales Variable dependiente - Porcentaje de recuperación de molibdeno - Calidad del concentrado de moly Variables intervinientes controladas - Nivel de carga - Dosificación de reactivos
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	
Problema específico N°1	Objetivo específico N°1	Hipótesis específica N°1	
¿Cómo se pueden identificar las especies minerales, su distribución volumétrica, grados de liberación, partículas mixtas y posibilidades de liberación en el blending de minerales sulfurados del distrito de Uchumayo - Arequipa, mediante técnicas de microscopía óptica, análisis QEMSCAN y evaluación química?	Identificar las especies minerales, su distribución volumétrica, grados de liberación, partículas mixtas y posibilidades de liberación en el blending de minerales sulfurados del distrito de Uchumayo - Arequipa, mediante microscopía óptica, análisis QEMSCAN y evaluación química.	El uso combinado de microscopía óptica, análisis QEMSCAN y evaluación química permite caracterizar con mayor precisión las especies minerales, su distribución volumétrica, los grados de liberación y la presencia de partículas mixtas en el blending de minerales sulfurados en Uchumayo – Arequipa.	
Problema específico N°2	Objetivo específico N°2	Hipótesis específica N°2	
¿De qué forma podemos relacionar la data proporcionada por el software Pidata con los valores de recuperación y calidad del concentrado de Mo, empleando métodos estadísticos?	Relacionar la data proporcionada por el software Pidata con los valores de recuperación y calidad del concentrado de Mo, empleando métodos estadísticos.	El análisis de datos mediante el software Pidata y métodos estadísticos puede revelar correlaciones significativas entre las variables independientes del proceso y la recuperación/calidad del molibdeno.	
Problema específico N°3	Objetivo específico N°3	Hipótesis específica N°3	
¿Cómo interpretar y analizar los resultados obtenidos mediante software Pidata y análisis estadístico?	Interpretar y analizar los resultados obtenidos mediante software Pidata y análisis estadístico.	El análisis de resultados obtenidos a través del software Pidata y métodos estadísticos influye en la toma de decisiones para optimizar la recuperación de Mo.	

Anexo 2

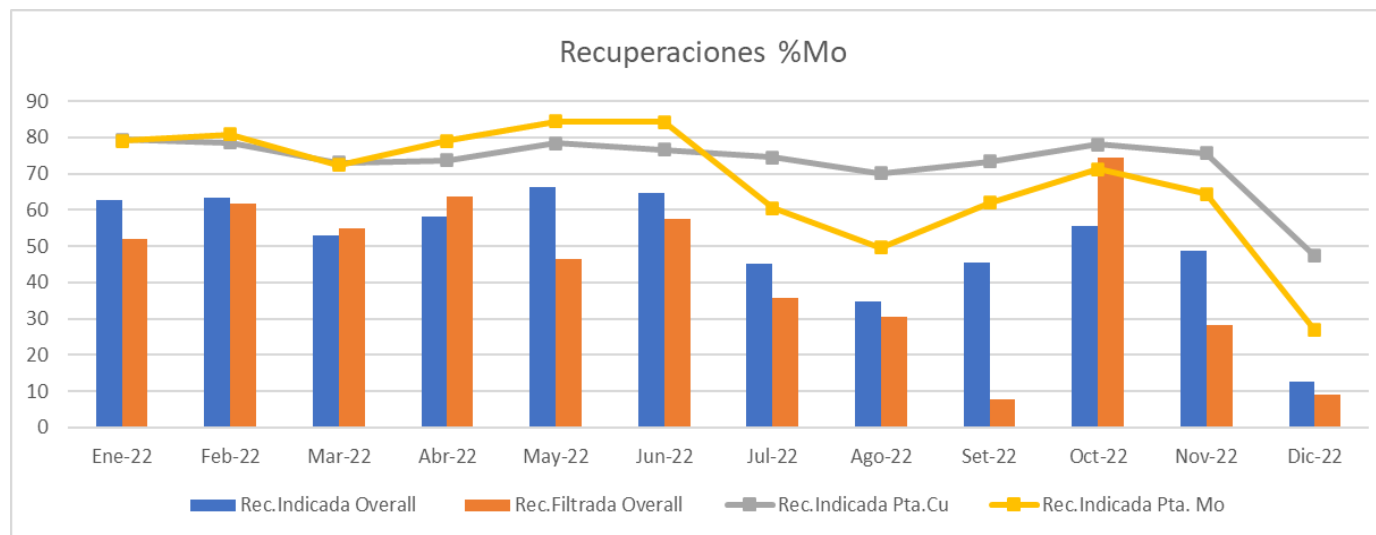
Valor comercial de Molibdeno según grado de Mo (45%-50%)

Molybdenum Ore Concentrate - Average Price

Anexo 3

Recuperación promedio de Molibdeno en el año 2022 por mes en la planta concentradora en el distrito de Uchumayo-Arequipa.

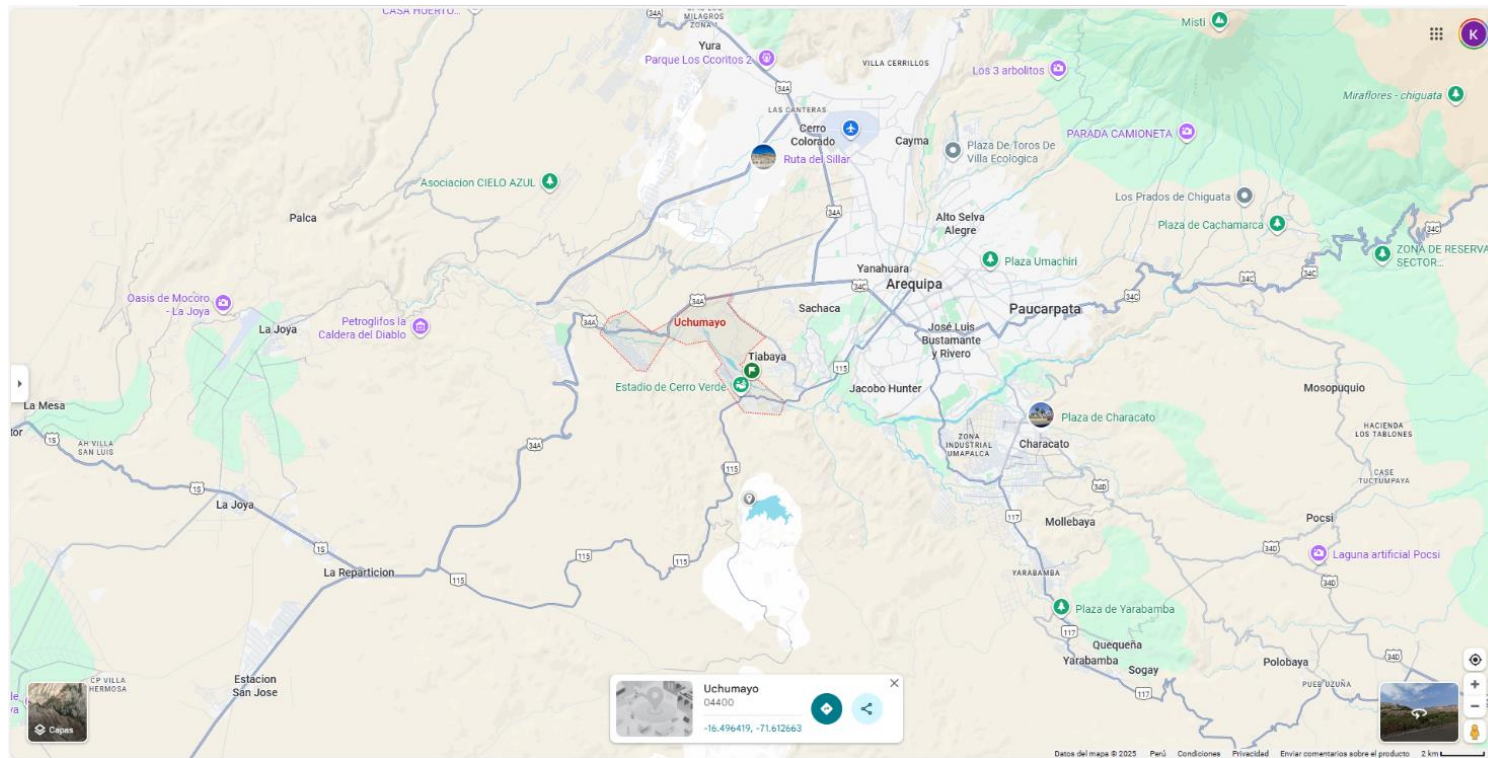
Mes	% Mo en cabeza	Rec.Indicada Pta.Cu	Rec.Indicada Pta. Mo	Rec.Indicada Overall	Rec.Filtrada Overall
Ene-22	0.016	79.48	79.05	62.83	52.00
Feb-22	0.015	78.54	80.88	63.53	61.76
Mar-22	0.018	73.12	72.46	52.98	54.95
Abr-22	0.013	73.73	79.07	58.30	63.65
May-22	0.017	78.51	84.41	66.27	46.48
Jun-22	0.019	76.64	84.26	64.57	57.43
Jul-22	0.019	74.58	60.51	45.13	35.83
Ago-22	0.010	70.07	49.65	34.79	30.65
Set-22	0.016	73.39	61.93	45.45	7.89
Oct-22	0.011	78.04	71.27	55.62	74.38
Nov-22	0.019	75.73	64.42	48.78	28.24
Dic-22	0.013	47.35	26.86	12.72	9.08



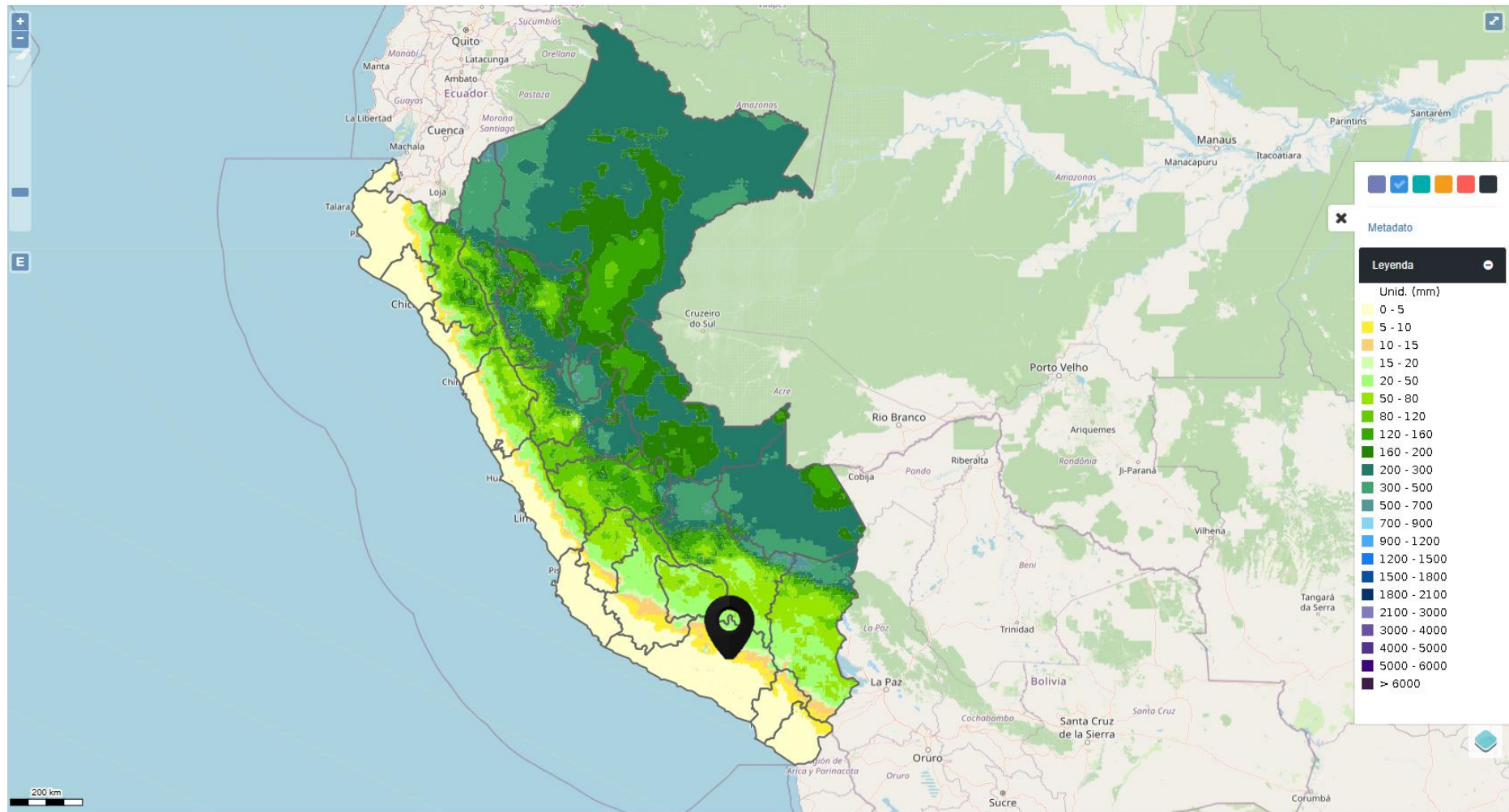
Anexo 4

Unidad de análisis distrito de Uchumayo. (Maps- Senamhi)

Fuente Google Maps.

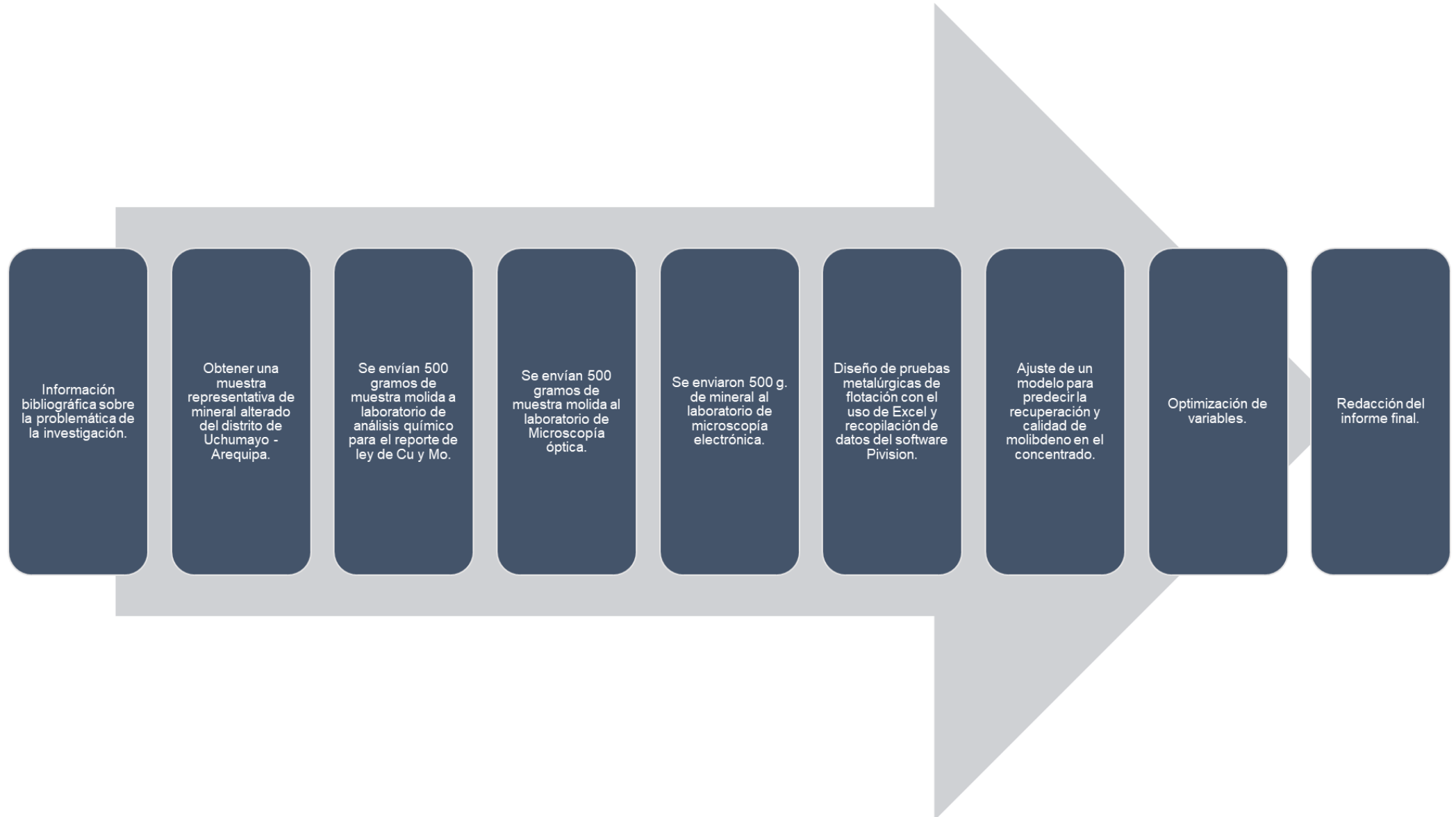


Fuente mapa de temperatura Senamhi de la ubicación de Uchumayo-Arequipa



Anexo 5

Diagrama de flujo del procedimiento Metodológico de la Investigación.



Anexo 6

Valorización de costos de producción de concentrado de Molibdeno.

Considerando una ley de 0.014 % de Mo en la alimentación Rougher y 0.48% de Mo en el concentrado bulk, se estima una pérdida de 337,501

libras pagables de Molibdeno durante el mes de diciembre. Se muestra las siguientes tablas de perdidas.

Planta de Cu		
Tonelaje molido Dic	2,275,466.56	t
Ley Mo	0.014	%
Rec Mo Pta Cu Dic	47.75	%
Rec Mo Ene - Oct	76.00	%
Diferencia en %Rec	28.25	%
Pérdida en T	89.99	t
Pérdida en Lbs	198,404.35	lbs Mo

Planta de Mo		
Conc Bulk Dic	29,466.06	t
Ley Mo	0.48	%
Rec Mo Pta Mo Dic	25.30	%
Rec Mo Pta Mo Ene - Oct	70.00	%
Diferencia en Rec	44.70	%
Pérdida en T	63.09	t Mo
Pérdida en Lbs	139,097.44	lbs Mo

Pérdida total en libras	337,501.80	lbs Mo
Pérdida total en Toneladas	153.09	T Mo

Perdidas en bolsas de Molibdeno

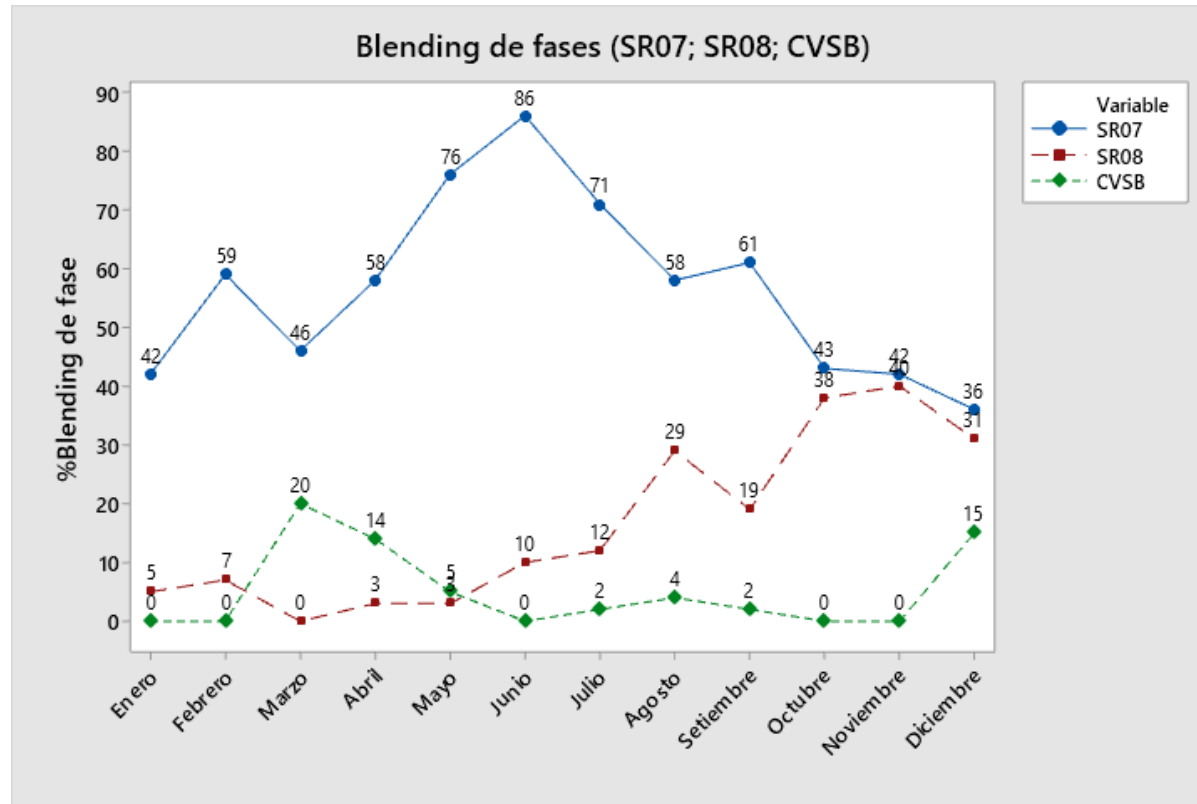
Bolsas de Mo		
%Mo Con final	49.00	%
Mo	312.42	t Mo
T Mo en Bolsa	1.75	t Mo
Bolsas Mo perdidas	178.53	

Costos

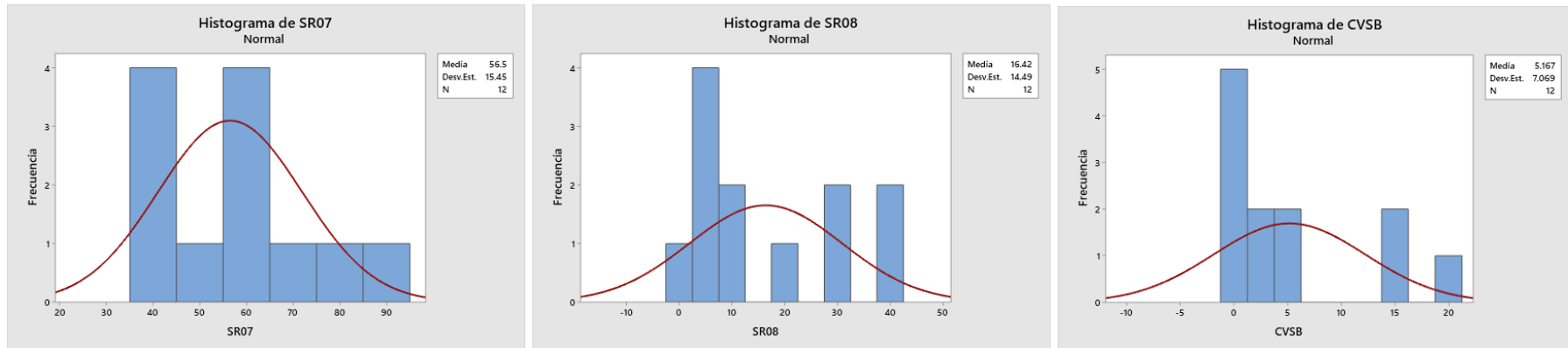
Costos		
Precio Mo	18.00	\$/lb
Costo Op Mo	3.00	\$/lb
Precio Mo neto	15.00	\$/lb
Pérdida en Planta Cu \$	2,976,065.32	\$
Pérdida en Planta Cu \$	2,086,461.67	\$
Pérdida total en \$	5,062,526.99	\$

Anexo 6

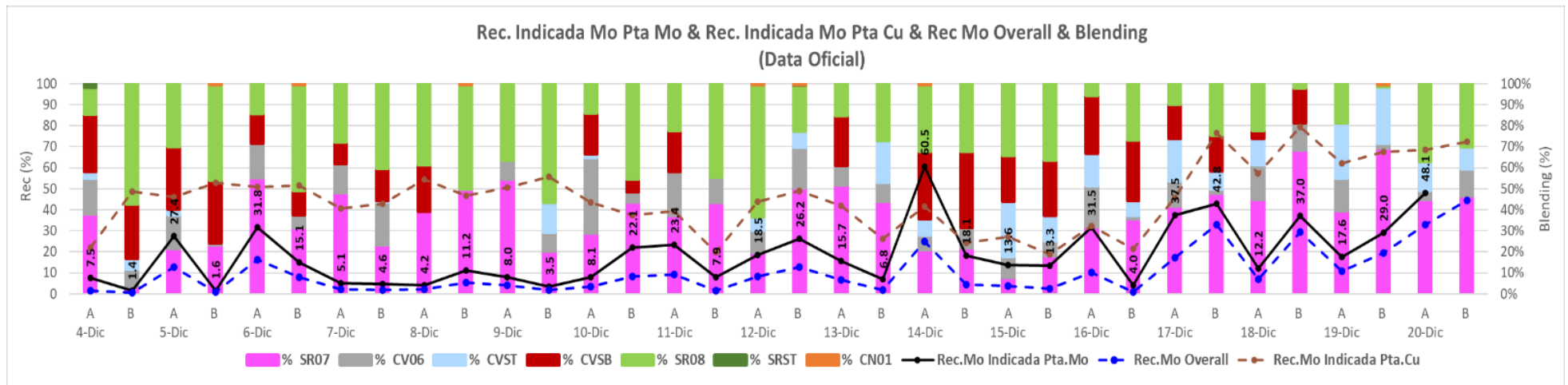
Reducción de la variabilidad mediante el blending



Nota: %Aporte de palas SR07;SR09, CVSB al Blending de fases



Nota: Histograma de aporte de palas al blending de fases / Desviación Estándar.



Nota: Relación de Recuperación vs Blending