

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería

Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Dr. Leopoldo Gutiérrez B.

Ingeniero Supervisor

Ing. Nicolás Miranda M.

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN
OPERACIONAL DE RECUPERACIÓN DE MOLIBDENO
EN LÍNEA SUBTERRÁNEA, DIVISIÓN ANDINA -
CODELCO CHILE.**

DANIELA FERNANDA ZAPATA ALARCÓN

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Mayo 2019

AGRADECIMIENTOS

Después de 6 años de esfuerzo, estudio y mucha constancia finaliza una de las etapas más importantes en mi vida. Muchas personas me han encaminado hasta este punto, pero de forma especial mis padres, quienes me apoyaron y me entregaron las herramientas suficientes para mi desarrollo personal.

A mis hermanos, sobrina Martina y mi Tita que se encargaban de distraerme y sacarme de mis estudios que a veces debo admitir me absorbían y estresaban demasiado.

A mi pololo, quien me ha acompañado durante toda la etapa universitaria y me apoyó a la distancia, agradezco su dedicación y el hecho de dejar todo de lado con tal de aprovechar al máximo el tiempo juntos cuando yo viajaba.

A mi familia y amigos de Santiago agradecerles siempre su buena disposición al recibirme los fin de semana, salir a pasear y cuando era necesario darme el tiempo y las comodidades para estudiar tranquila.

A mis amigos de universidad, con los que generamos lazos que espero nunca se pierdan, agradezco las noches de estudio donde la Feñita, las clases del Emilio, los bailes del Seba y la risa de la Noe. A todos ustedes y al resto del equipo espero que logren sus metas.

A mis amigos de Andina, en especial a la Javi, Ale, Mirko y don Juan, sin ellos definitivamente los días hubiesen sido muy distintos, agradezco su compromiso, apoyo y amistad que me entregaron todo el tiempo, sin lugar a dudas nunca los olvidare.

A mi tutor en DAND, Nicolás Miranda y a todos aquellos que aportaron a la realización de mis pruebas de laboratorio.

Finalmente agradecer a mi profesor tutor, Leopoldo Gutiérrez, que estuvo cada vez que lo solicité y que siempre me demostró su preocupación y compromiso durante mi estadía en Andina.

“Cuanto mayor sea el obstáculo, mayor es la gloria de superarlo”- Moliere

RESUMEN

La presente Memoria de Título se desarrolló en la planta concentradora de Codelco Chile División Andina, con el objetivo de optimizar la recuperación de molibdeno en el sub-proceso de flotación colectiva, enfocando los esfuerzos sobre la línea rougher E, etapa que presenta las menores recuperaciones de Mo dentro de las etapas rougher, aproximadamente 10% de diferencia respecto de la rougher A y B. Para esto se hizo un análisis estadístico de datos de planta, además de pruebas de laboratorio variando: dosificación y tipo de reactivos, flotación a diferentes granulometrías, flujo de aire, pH, porcentaje de sólidos y prueba de nuevas estrategias, por ejemplo; la adición de reactivos en avance y flotaciones a distintas aguas. Sobre la base del análisis estadístico se obtuvo que la variable operacional que mayor afecta a la recuperación colectiva de molibdeno es el P80, siendo el de la sección B el responsable del no cumplimiento del P80 establecido por la SIPP(Superintendencia de Ingeniería y Procesos Planta) y de las bajas recuperaciones de molibdeno. Del diseño 2^{k-p} llevado a cabo a través de las pruebas de laboratorio se corrobora lo obtenido por la estadística, revelando que las variables que más afectan a la recuperación de Mo son el P80 seguido de la dosificación de diésel, influyendo negativa y positivamente un incremento de éstas. Posterior a esto, se estudiaron mediante un diseño hexagonal las variables mencionadas y se llegó a un modelo de segundo orden para la recuperación de molibdeno:

$$\%Rec. Mo = 225,8800 - 2,9750 \cdot dosificación\ diésel - 1,1462 \cdot P80 + 0,0044 \cdot dosificación\ diésel \cdot P80 + 0,1025 \cdot dosificación\ diésel^2 + 0,0022 \cdot P80^2$$

Las cinéticas de flotación a distintos reactivos no mostraron posibilidad de modificar la actual combinación de reactivos de DAND en cuanto al mineral que alimenta a la línea subterránea, ya que al ser un circuito de pocas celdas requiere de reactivos que aumenten la constante cinética de las especies de interés, condición que no se logró con los reactivos probados. Por otro lado, las pruebas de flotación a distintas aguas evidenciaron que el agua recuperada es la mejor opción para el proceso de DAND, y que la influencia de los iones calcio y magnesio efectivamente juegan un rol importante sobre la flotación y depresión de molibdenita. A raíz de los resultados se concluye que cumplir con el P80 estándar de 240 micrones y aumentar la dosis de diésel a 14 g/t permite llegar a recuperaciones de molibdeno por sobre el 70% en laboratorio y por tanto se recomienda evaluar en planta.

ABSTRACT

The present study was carried out in CODELCO Chile - División Andina concentrating plant, with the objective of optimizing the recovery of molybdenum in the sub-process of collective flotation. The efforts were focused on the rougher E line, because this stage presents the lowest Molybdenum recovery, around 10% less than Rougher A and B. For this, a statistical analysis of plant data was made, in addition to laboratory tests varying: dosage of reagents, P80, air flow rate, pH, percentage of solids. Also, new strategies were tried, for example; the addition of reagents in advance and floating on different types of water. On the basis of the statistical analysis, the most affecting variable in the molybdenum recovery is the P80, being the P80 of the section B responsible for not complying with the P80 established by the SIPP (Superintendence of Engineering and Plant Processes) and therefore to which the low recoveries of molybdenum are attributed. The 2^{k-p} design carried out in the laboratory tests corroborates the results obtained by the statistics, revealing that the variables that most affect the recovery of Mo are the P80 followed by the Diesel Dosing, negatively and positively influencing an increase in these. Following this, the aforementioned variables were studied using a hexagonal design and a second-order model for the recovery of molybdenum was reached:

$$\begin{aligned} \%Rec. Mo = & 225,88 - 2,975 * dosificación diesel - 1,1462 * P80 + 0,0044 * dosificación diesel \\ & * P80 + 0,1025 * dosificación diesel^2 + 0,0022 * P80^2 \end{aligned}$$

Kinetics flotation to different reagents showed no possibility of modifying the current DAND recipe, since the main problem with rougher E is that it is a short circuit (with a few cells) and therefore requires reagents that increase the kinetic constant of the species of interest, condition that was not achieved with the tested reagents. By the other side flotation tests with different waters showed that the recovered water is the best option for the DAND process, and that the influence of calcium and magnesium ions play an important role in the depression of molybdenite. Based on the results, it is concluded that the increase of diesel dosing to 14 g/t and maintaining the P80 standard of 240 microns would allow reaching molybdenum recoveries above 70% in the laboratory and therefore, it is recommended to evaluate in plant.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivo general.....	1
1.2	Objetivos específicos	1
2	ANTECEDENTES	2
2.1	Descripción de la división.....	2
2.2	Descripción de la planta.....	3
2.3	Flotación colectiva	3
3	MARCO TEÓRICO	6
3.1	Flotación de minerales	6
3.1.1	Fundamentos	6
3.1.2	Variables del proceso de flotación	7
3.1.3	Modelo cinético de flotación	8
3.2	Molibdeno	8
3.3	Molibdenita	10
3.3.1	Flotabilidad de la molibdenita	11
3.4	Espectrofotometría.....	19
3.5	Diseño experimental	19
3.5.1	Clasificación y selección de los diseños experimentales	20
4	DESARROLLO EXPERIMENTAL	23
4.1	Muestras y reactivos	23
4.2	Equipos y procedimiento.....	24
4.2.1	Pruebas de flotación.....	24
4.2.2	Microscopía óptica	25
4.2.3	Pruebas de espectrofotometría	26
4.3	Metodología de trabajo	28
4.3.1	Análisis estadístico	28
4.3.2	Flotaciones a distintas variables operacionales	29
4.3.3	Flotaciones probando distintos reactivos	32
4.3.4	Flotaciones a distintos tipos de agua.....	32
5	RESULTADOS Y DISCUSIONES	34
5.1	Análisis data operacional	34
5.1.1	Leyes de alimentación.....	35
5.1.2	pH	36

5.1.3 Tratamiento y P80	38
5.1.4 Operación molinos y baterías de hidrociclones.....	41
5.2 Resultados Microscopía óptica	42
5.3 Diseño experimental	43
5.3.1 Evaluación de resultados experimentales y determinación del modelo de primer orden	43
5.3.2 Determinación de puntos óptimos operacionales mediante modelo de segundo orden obtenido por diseño hexagonal.....	47
5.4 Evaluación cambio de reactivos	49
5.5 Efecto de los iones presentes en las aguas sobre la recuperación de Mo.....	52
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
6.1 Conclusiones	55
6.2 Recomendaciones	56
7 BIBLIOGRAFÍA	57
8 ANEXOS	59
8.1 Microscopía óptica	59
8.1.1 Procedimiento	59
8.2 Manual Spectroquant nova 60	61
8.3 Estándares SIPP.....	63
8.4 Diseño experimental procedimiento	64
8.5 Mineralogía	65
8.5.1 Modelo geometalúrgico de flotación de molibdeno	65
8.5.2 Zonas de extracción mina Rajo	66
8.5.3 Zonas de extracción mina Subterránea	67
8.6 Informe de compuestos mensuales.....	68
8.7 Ecuaciones diseño de experimentos.....	70
8.7.1 Decodificación del modelo matemático a escala natural.....	70
8.7.2 Análisis de máximos y mínimos.....	71
8.8 Cinética de flotación pruebas a diferentes reactivos	72
8.9 Balance global planta Agosto 2018	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición típica del agua convencional de proceso (Aaltonen et al., 2011) y del agua de mar (Floor, 2006).....	18
Tabla 2: Composición química de la muestra.	23
Tabla 3: Reactivos empleados en pruebas de flotación.....	24
Tabla 4: Condiciones operacionales flotación rougher E.	25
Tabla 5: Niveles de los factores usados en el diseño	30
Tabla 6: Condiciones de flotación estándar para pruebas metalúrgicas de laboratorio DAND.....	30
Tabla 7: Matriz en orden según corrida con valores a escala real.	31
Tabla 8: Matriz de tratamientos diseño hexagonal con valores codificados y reales.....	31
Tabla 9: Set de cinéticas de flotación con diferentes reactivos.	32
Tabla 10: Set de pruebas flotaciones a distintos tipos de agua.	33
Tabla 11: Recuperación colectiva de molibdeno y ley de cabeza ponderada real v/s programa de producción P0, enero 2017 a junio 2018.	34
Tabla 12: Estadística descriptiva de recuperación de molibdeno en función del P80 ponderado...	39
Tabla 13: Recuperación de elementos de interés correspondientes al diseño factorial.	43
Tabla 14: Efectos y coeficientes estimados para Rec. Mo (unidades codificadas).....	43
Tabla 15: Análisis de varianza para recuperación de molibdeno (unidades codificadas).....	45
Tabla 16: Recuperación de molibdeno en todas las pruebas del diseño hexagonal.	47
Tabla 17: Valor de los signos de los coeficientes cuadráticos de la matriz Hessiana	48
Tabla 18: Valor óptimo de las variables operacionales y recuperación de molibdeno respuesta óptima y Std.....	48
Tabla 19: Análisis por espectrofotometría	52
Tabla 20: Consumo de cal para los distintos tipos de agua	53
Tabla 21: Respuesta para cada prueba del diseño de experimentos.....	64
Tabla 22: Características principales de cada UGM	65
Tabla 23: Tipo de punto y forma de la curva según los signos de los coeficientes cuadráticos.	71
Tabla 24: Resumen balance global planta Agosto 2018.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa ubicación Codelco Andina.	2
Figura 2: Flowsheet general línea rajo y subterránea (Gerencia de plantas Codelco Andina)	3
Figura 3: Flujograma flotación colectiva División Andina (Codelco División Andina, 2016).	4
Figura 4: Vista en planta flotación rougher E.	5
Figura 5: Interacción de las fases presentes en el proceso de flotación (Castro y García, 2003). ...	6
Figura 6: Representación proceso de flotación (Gutiérrez, 2017).	6
Figura 7: Uso final molibdeno (Cochilco, 2017).	9
Figura 8: Reservas mundiales de molibdeno (Cochilco, 2017).	9
Figura 9: Estructura cristalina de molibdenita, donde se muestran las caras que son hidrofóbicas y los bordes que son hidrofílicos (Gutiérrez, 2017).	10
Figura 10: Angulo de contacto de bordes y caras de partículas de molibdenita en función del pH, en ausencia y presencia de varias concentraciones de iones calcio (Tabares et al., 2006).	11
Figura 11: Flotabilidad natural de partículas de distintos tamaños de molibdenita en función del pH (Tabares et al., 2006).	12
Figura 12: Potencial zeta de muestras de molibdenita en función del pH (Tabares et al., 2006). ...	12
Figura 13: Diagrama de estabilidad de las especies de calcio en función del pH (Gutiérrez, 2017)13	
Figura 14: Recuperación de Mo en función de la concentración de Ca^{2+} (López y Reyes, 2005). .	13
Figura 15: Fenómeno de heterocoagulación (Gutiérrez, 2017).	14
Figura 16: Potencial zeta de la molibdenita en presencia de cationes Fe^{3+} , Al^{3+} y Mg^{2+} (López-Valdivieso, 1980).	14
Figura 17: Diagrama de estabilidad de las especies de calcio en función del pH (Castro, 2013)...	15
Figura 18: Efecto del Fe^{3+} sobre la flotabilidad de la molibdenita (Lenkovskaya y Stepanov, 1969).	16
Figura 19: (A) Recuperación de molibdenita en presencia del ion Al^{3+} y (B) diagrama de estabilidad de especies de aluminio en función del pH (Castro, 2003).	16
Figura 20: Diagrama de precipitación para hidróxidos metálicos (Stumm and Morgan).	17
Figura 21: Consumo de cal en función del pH, para sistemas de flotación con distintas proporciones en volumen de agua de mar (Landro, 2010).	19
Figura 22: Ejemplo de factores de proceso y variables de respuesta para un sistema cualquiera. (Gutiérrez y De la Vara, 2004).	20
Figura 23: Clasificación general de los diseños experimentales (Gutiérrez y De La Vara, 2004).	21
Figura 24: Representación gráfica de un diseño hexagonal (Seco, 2017)	22
Figura 25: (A) Roller y molino de bolas y (B) celda de flotación Denver laboratorio metalúrgico.	25

Figura 26: Equipos de microscopía óptica: (A) divisor rotatorio, (B) microscopio óptico Nikon 50i POL, (C) pulidora Leco GPX200 y (D) briquetera Leco PR-36.	26
Figura 27: Spectroquant Nova 60 acompañado de vaso precipitado, embudo, papel filtro, aguas y kit fotométrico.	27
Figura 28: Esquema plan de trabajo (Elaboración propia).	28
Figura 29: Diseño factorial fraccionado generado por software Minitab.	29
Figura 30: Datos de media mensual de recuperación colectiva de molibdeno planta concentradora periodo año 2015 y desde enero 2017 hasta junio 2018.	34
Figura 31: Ley de cabeza acumulada mensual de molibdeno por línea de tratamiento en los periodos 2015, 2017 hasta junio 2018.	35
Figura 32: Recuperación de molibdeno colectiva en función de la ley de alimentación ponderada, periodos 2015, 2017 a junio 2018.	36
Figura 33: pH pulpa por línea de tratamiento, periodos 2015, 2017 hasta junio 2018.	36
Figura 34: Recuperación de molibdeno en función del pH rougher ponderado, periodos 2015, 2017 a junio 2018.	37
Figura 35: Ley de cabeza ponderada de hierro en el periodo 2017.	37
Figura 36: Tonelaje diferentes líneas de tratamiento periodo 2015, 2017 hasta junio 2018.	38
Figura 37: P80 por sección periodo 2015, 2017 a junio 2018.	39
Figura 38: Recuperación colectiva de molibdeno en función del P80 ponderado, periodos 2015, 2017 hasta junio 2018.	39
Figura 39: (A) P80 sección B-C y (B) recuperación colectiva de molibdeno en junio 2018.	40
Figura 40: (A) %sólido y (B) %+65# sección B y C molienda convencional enero-17 a junio-18. ...	41
Figura 41: Asociación Mo/Ganga.	42
Figura 42: Asociación Cpy/Ganga.	42
Figura 43: (A) Gráfica normal y (B) Pareto de efectos estandarizados para Rec.Mo.	44
Figura 44: Gráfico de efectos principales para la recuperación de molibdeno.	45
Figura 45: Gráfica de superficie de recuperación de molibdeno v/s colector secundario y P80.	46
Figura 46: Contraste de recuperación de molibdeno obtenidas vía análisis químico y por el modelo lineal.	47
Figura 47: Contraste recuperación de molibdeno obtenida vía análisis químico y por el modelo de segundo orden.	48
Figura 48: Valores promedio de recuperaciones Cu-Mo-Fe al minuto 11 de flotación con sus respectivas barras de error ($\pm\sigma$).	49
Figura 49: Curvas cinéticas de flotación para recuperación de Cu-Mo-Fe variando el colector primario.	50

Figura 50: Parámetros cinéticos especies de interés para distintos colectores primarios: (A) $R_{\text{máx}}$ y (B) constante de Klimpel.	50
Figura 51: Parámetros cinéticos especies de interés para distintos colectores secundarios: (A) $R_{\text{máx}}$ y (B) constante de Klimpel.....	51
Figura 52: Parámetros cinéticos especies de interés para distintos espumantes: (A) $R_{\text{máx}}$ y (B) constante de Klimpel.	51
Figura 53: Parámetros cinéticos especies de interés para distintos depresores de hierro: (A) $R_{\text{máx}}$ y (B) constante de Klimpel.	52
Figura 54: Recuperación al minuto 11 y consumo de cal para cada agua.	53
Figura 55: Parámetros cinéticos para los distintos tipos de agua: (A) Recuperación infinita y (B) constante cinética de Klimpel.	54
Figura 56: Briqueta mineral de cabeza correa 10B.....	60
Figura 57: Instructivo de trabajo para (A) aluminio, (B) calcio, (C) cloro y (D) cobre.....	61
Figura 58: Instructivo de trabajo para (A) hierro, (B) manganeso y (C) sulfatos.....	62
Figura 59: Nota Interna: Definición de Estándares Operacionales GPLA 27-07-2016	63
Figura 60: Selección diseño factorial software Minitab 16	64
Figura 61: Sección longitudinal NE-SW esquemática definición de Unidades para RecMo	65
Figura 62: Fases mina Rajo (Geometalúrgia DAND).....	66
Figura 63: Vista 3D mina Rajo y zonas de extracción por periodo (Geometalúrgia DAND).	66
Figura 64: Distribución de molibdeno en la mina subterránea (III Panel) según modelo de bloque 2017 y considerando la altura teórica al mes de octubre 2018 (Geometalúrgia DAND).....	67
Figura 65: Perfil Longitudinal NW-SE con la estimación del %Molibdeno en el sector que actualmente está en producción (Geometalúrgia DAND).....	67
Figura 66: Asociaciones minerales 2015, 2017 a Junio 2018 (Geometalúrgia DAND).....	68
Figura 67: Composición mineralógico modal 2015, 2017 a Junio 2018 (Geometalúrgia DAND)....	68
Figura 68: Liberación por perímetro Cabeza convencional E 2015, 2017 a Junio 2018 (Geometalúrgia DAND).....	69
Figura 69: Recuperación de Cu-Mo-Fe variando el colector secundario.....	72
Figura 70: Recuperación de Cu-Mo-Fe variando espumante.....	72
Figura 71: Recuperación Cu-Mo-Fe variando el depresor de Fe	73

1 INTRODUCCIÓN

El molibdeno se ha transformado en el principal subproducto del cobre en Chile, adquiriendo una gran importancia debido a sus usos y el precio comercial que éste tiene, alcanzando 11,94 USD/lb promedio en el 2018, cifra entregada por COCHILCO. Junto a esto y dadas las exigencias y competencias en el ámbito minero CODELCO ANDINA ha debido generar estrategias que le permitan optimizar sus procesos y ha decidido disponer de sus recursos para lograr mayor recuperación de este metal, teniendo siempre en cuenta que el cobre es el protagonista. Basado en lo anterior, la presente memoria de título está orientada a identificar las principales causas de pérdida de Mo en la planta de flotación colectiva a modo de establecer las directrices que permitan aumentar la recuperación de éste.

El estudio tuvo por objetivo optimizar la operación de la línea rougher E en División Andina (DAND), sobre la base del análisis estadístico y pruebas de flotación a escala laboratorio. La metodología consistió en una recopilación de datos operacionales de la plataforma PI Process Book, periodos 2015, 2017 hasta julio del 2018 y múltiples pruebas de laboratorio: diseño 2^{k-p} , evaluación cambio reactivos e influencia de iones presentes en las aguas sobre la recuperación de molibdeno, a modo de tener resultados que justifiquen o expliquen la influencia de un eventual cambio del tipo de agua en DAND sobre la recuperación de las especies de interés.

1.1 Objetivo general

Evaluar, determinar y optimizar las variables más influyentes sobre la recuperación de molibdeno en la línea subterránea a través del análisis estadístico y pruebas de laboratorio.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar mediante análisis estadístico impacto de las variables operacionales sobre la recuperación colectiva de Mo.
- Determinar y optimizar a través del diseño factorial las variables más influyentes sobre la recuperación de molibdeno en la línea subterránea.
- Determinar un modelo matemático de la recuperación de molibdeno en función de las variables más influyentes en el proceso.
- Determinar influencia de los iones de las aguas sobre la recuperación de molibdeno.
- Evaluar cambio de la receta actual línea subterránea DAND.
- A través del estudio de la data operacional y pruebas de laboratorio vislumbrar posibles cambios de los estándares SIPP y generar propuesta operacional.

2 ANTECEDENTES

2.1 Descripción de la división

Las instalaciones de División Andina se ubican a 38 km de la ciudad de los Andes, en la V Región, aproximadamente a 50 km hacia el noreste de la ciudad de Santiago, a una altura de aproximadamente 3.500 m.s.n.m. (Figura 1). Sus operaciones mineras se desarrollan mediante la explotación de los yacimientos Río Blanco (mina subterránea) y Sur-Sur (mina a rajo abierto) que geológicamente corresponde a un yacimiento tipo pórfido cuprífero, ubicados en la cordillera de los Andes entre los 3.500 y 4.000 m.s.n.m., respectivamente.

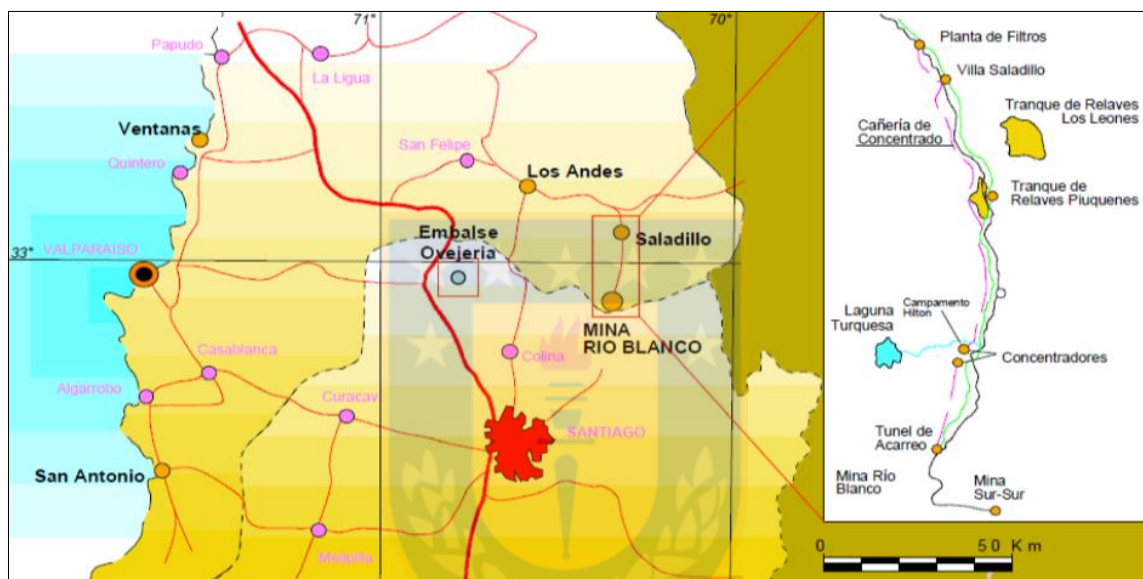


Figura 1: Mapa ubicación Codelco Andina.

DAND es propietaria de la parte oriental de este yacimiento, siendo Los Bronces de Anglo American, dueña de la parte restante. Los recursos tienen una ley de corte de aproximadamente 0,5% Cu, los cuales alcanzan 4450 millones de toneladas de mineral, con una ley media estimada de cobre y molibdeno de 0,83% Cu y 0,022% Mo. Actualmente, la capacidad diaria de tratamiento es de 88.000 toneladas métricas y produce cerca de 250.000 t de concentrado de cobre fino anuales y 5.000 t de molibdeno.

2.2 Descripción de la planta

Los principales procesos que se desarrollan en DAND corresponden a las siguientes etapas:

- Operaciones mina (extracción de mineral del rajo y mina subterránea).
- Operaciones planta concentrador cordillera (chancado, molienda, flotación colectiva).
- Planta de productos comerciales Saladillo (planta de flotación selectiva).
- Transporte y disposición de relaves en tranque ovejería.

La figura 2 presenta el diagrama de flujo Codelco Andina.

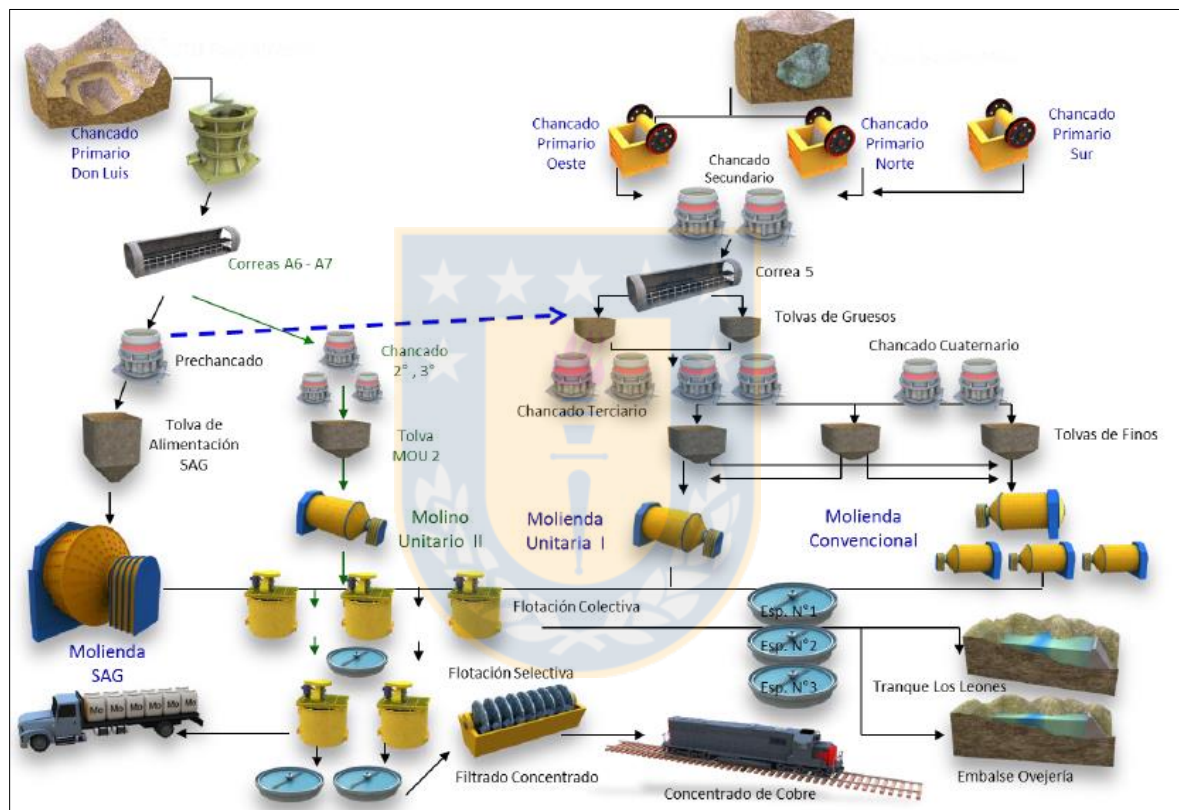


Figura 2: Flowsheet general línea rajo y subterránea (Gerencia de plantas Codelco Andina)

2.3 Flotación colectiva

Tal como se ve en la Figura 3 la planta de flotación colectiva de División Andina consta de las etapas de flotación primaria (rougher), remolienda de concentrados, flotación de limpieza en columnas de flotación y barrido, espesaje de concentrado y relaves, y conducción del concentrado colectivo hasta la planta de flotación selectiva ubicada en Saladillo. La Figura 3 aclara la alimentación a cada línea de flotación primaria, siendo una mezcla de mineral rajo y subterráneo el que alimenta a las flotaciones rougher A-B y únicamente subterráneo el que alimenta a la rougher E.

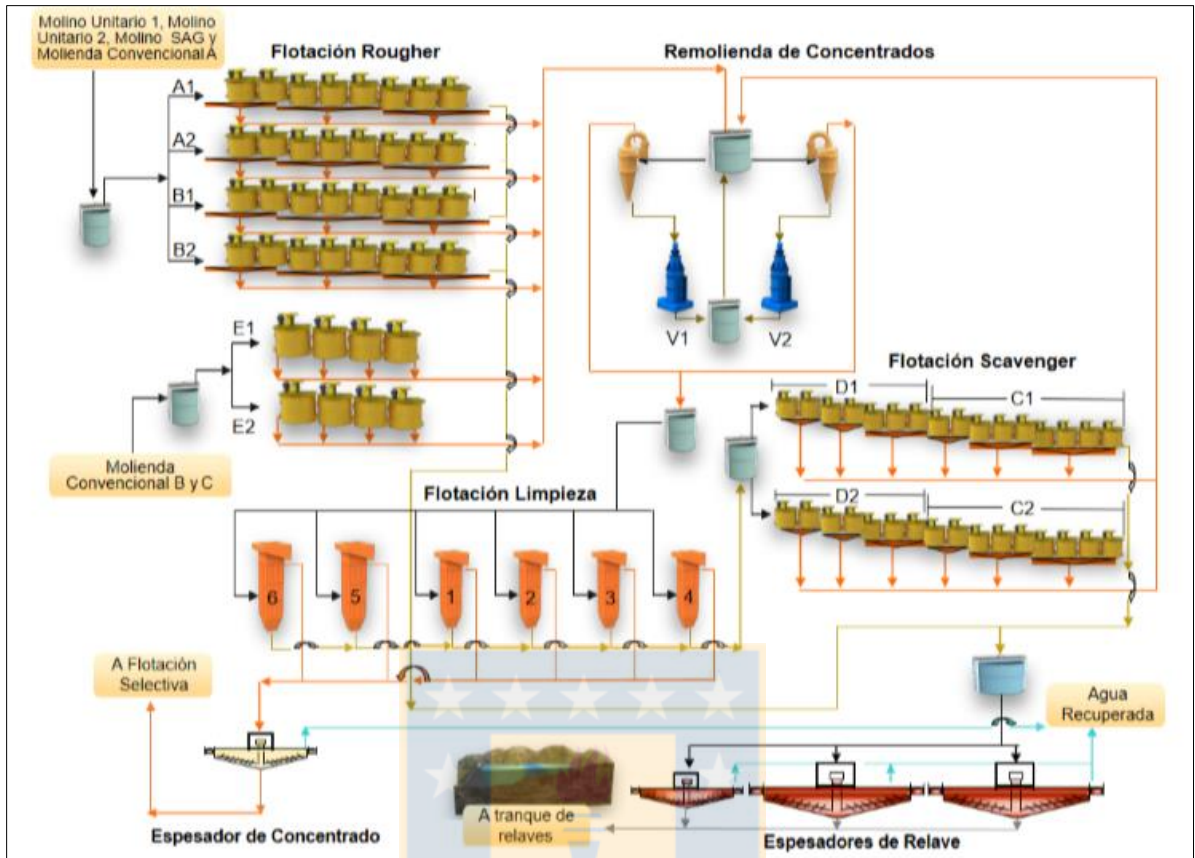


Figura 3: Flujograma flotación colectiva División Andina (Codelco División Andina, 2016).

La flotación rougher A-B se conforma por 32 celdas Outokumpu modelo OK100-TC de 100 m^3 , dispuestas en 4 líneas de 8 celdas c/u en un arreglo 2-3-3. Esta etapa se alimenta desde el cajón centralizado que colecta la pulpa de los procesos Molienda SAG, Molino Unitario 1, Molienda Convencional Sección A y Molino Unitario 2. La flotación rougher E corresponde a un nuevo circuito consistente en dos filas de 4 celdas (130 m^3 c/u) en arreglo 1-1-1-1. Estas celdas tanque estaban destinadas a procesar mineral Rajo con granulometría de $190 \mu\text{m}$, pero dado a problemas principalmente de espacio se le destinó a su alimentación mineral procesado por la molienda convencional (secciones B y C), y por tanto con granulometría más gruesa ($240 \mu\text{m}$). El concentrado de la flotación primaria, con una ley promedio de 10% cobre y 25% de sólidos, es bombeado a la etapa de remolienda a cargo de dos molinos Vertimill cada uno con su batería de hidrociclones asociada. Las colas con una ley promedio de 0,07% de cobre, son conducidas gravitacionalmente hasta el cajón general de colas.



Figura 4: Vista en planta flotación rougher E.

El rebose de los hidrociclones de la etapa de remolienda llega gravitacionalmente al cajón que alimenta al circuito de limpieza que está formado por 6 celdas columnares, de las cuales las columnas 1 a 4 operan continuamente y la 5 y 6 operan una a la vez. El concentrado del circuito de limpieza (concentrado Cu-Mo final) es alimentado al espesador de concentrados, cuya descarga es conducida gravitacionalmente a tres estanques de almacenamiento del sistema de transporte de concentrados (STC), a la planta de productos comerciales ubicada en Saladillo. Por otra parte el circuito de flotación de barrido, que procesa los relaves de la flotación de limpieza, consiste en dos bancos de 16 celdas cada uno, de 38 m³ en arreglo 2-2-3-2-3-4. El relave de esta etapa es transportado de forma gravitacional a través de canaletas al sistema de espesamiento de relave final. El concentrado del circuito de barrido es enviado al actual molino de remolienda n° 1, ubicado en la nave de molienda convencional.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Flotación de minerales

3.1.1 Fundamentos

La flotación es un proceso de concentración ampliamente usado a nivel industrial cuya fuerza impulsora es la diferencia del comportamiento superficial de los minerales. El proceso se lleva a cabo en un medio formado por las fases sólida, líquida y gaseosa (Figura 5), y consiste básicamente en adherir en forma selectiva burbujas de aire a partículas minerales, con el fin de lograr la separación de estas de la ganga.

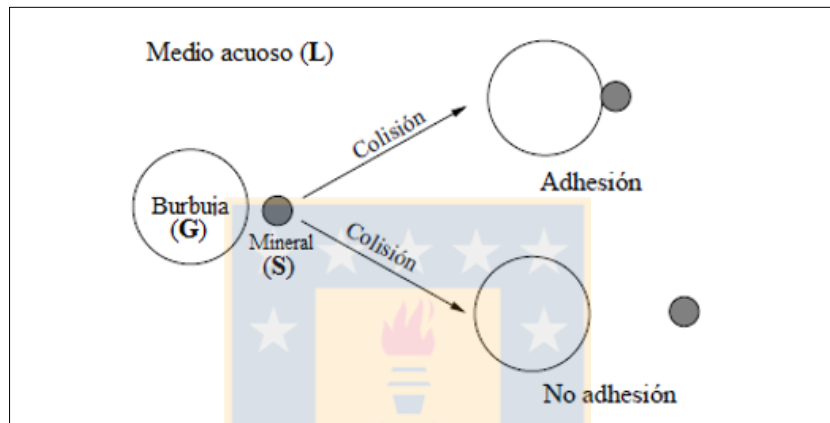


Figura 5: Interacción de las fases presentes en el proceso de flotación (Castro y García, 2003).

La hidrofobicidad es la propiedad de un material que impide la interacción de éste con las moléculas de agua (no se moja), esto según su polaridad. Una partícula de un material hidrofóbico tiene más tendencia a adherirse a una burbuja de aire que a una gota de agua. En esta propiedad de los minerales se sienta el proceso de flotación.

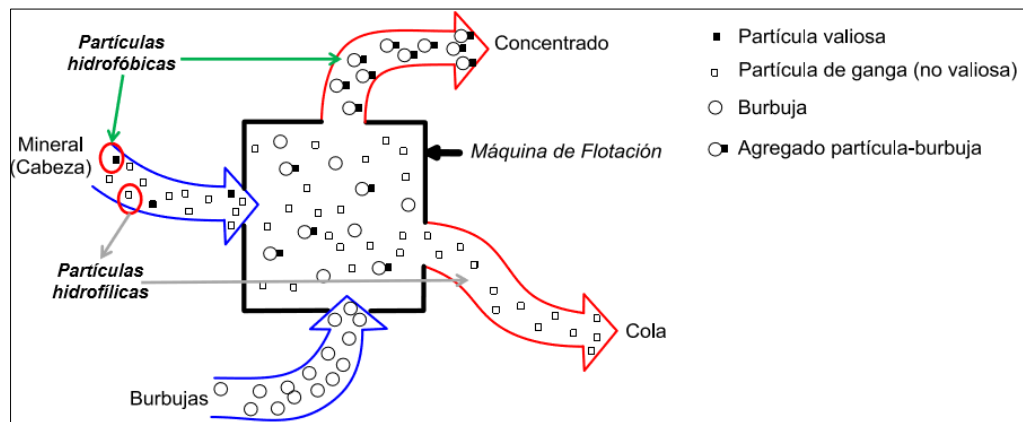


Figura 6: Representación proceso de flotación (Gutiérrez, 2017).

Existen especies con hidrofobicidad natural como la molibdenita, talco, azufre, carbón, entre otras, mientras que otros minerales requieren el uso de reactivos para inducir hidrofobicidad tales como los sulfuros de cobre y de otros metales base. La flotación de estas especies se realiza induciendo hidrofobicidad a través de la acción de reactivos llamados colectores. Junto a los colectores existen otros reactivos de flotación como espumantes, depresores, modificadores y activadores cuya selección depende de las mezclas minerales a tratar. El uso de estos permite controlar la hidrofobicidad relativa de las partículas, el tamaño de burbujas y le otorga ciertas características a la espuma y pulpa.

3.1.2 Variables del proceso de flotación

El proceso de flotación, se rige por una gran cantidad de variables que interactúan entre sí y cuyo conocimiento y comprensión son esenciales para lograr la eficiencia del proceso.

Southerland y Wark (1995) clasificaron las variables del proceso de flotación, según las etapas que las originan:

a) Naturaleza de la mena mineral:

- Mineralogía del mineral
- Asociación con otros componentes
- Presencia de impurezas
- Diseminación
- pH natural
- Procesos secundarios como la oxidación

b) Problemas específicos que se presentan en los circuitos de reducción de tamaño y clasificación previos a la flotación:

- Oxidación superficial en operaciones de trituración en seco y de molienda húmeda
- Disolución de componentes de la mena por contacto con el agua
- Calidad del agua, ya que lleva materias disueltas (reactivos residuales, etc)
- Contaminación directa con hierro proveniente de los medios de molienda

c) Variables operacionales del proceso de flotación:

- Acondicionamiento, tipo y dosificación de reactivos
- Tamaño granulométrico del mineral
- Densidad de la pulpa
- pH de la pulpa
- Método de aireación de la pulpa
- Tiempo de flotación

3.1.3 Modelo cinético de flotación

Para evaluar distintas condiciones entre las pruebas de flotación, se considera la aplicación de modelos teóricos que permitan explicar el proceso como tal. A continuación se presenta el modelo cinético de Klimpel, utilizado para analizar la cinética de flotación batch de las especies de interés en el mineral flotado.

Cabe destacar que el modelo propuesto por Klimpel, pone mayor énfasis en la utilidad del cálculo de k para la evaluación y selección de reactivos de flotación; pero además se usa para ajuste de datos experimentales y cálculo de los parámetros cinéticos de cada especie presente en el mineral. El modelo propuesto es el siguiente:

$$R(t) = R_{\infty} \left[1 - \frac{1}{kt} (1 - e^{-kt}) \right] \quad (1)$$

Donde:

t : Tiempo de flotación

R_{∞} : Recuperación límite a tiempo infinito

k : Constante de cinética de flotación

$R(t)$: Recuperación estimada

La recuperación a tiempo infinito es la máxima recuperación obtenible de la especie o elemento de interés, para las condiciones de flotación dadas. Los parámetros k y R_{∞} se pueden determinar simultáneamente utilizando ajuste matemático por minimización de error cuadrático.

3.2 Molibdeno

El molibdeno es un metal de color gris plateado, que no existe en estado puro en la naturaleza, por lo que generalmente se encuentra asociado a otros elementos, como es el caso de los minerales sulfurados. En Chile el molibdeno se obtiene como un subproducto de la minería del cobre, de donde se obtiene luego del proceso de flotación colectiva y selectiva que se realiza en las plantas concentradoras. La importancia del molibdeno radica en el valor adicional que este confiere a la minería del cobre ya que su venta como subproducto permite recuperar recursos y reducir los costos totales de producción. Esto se debe a que los costos de extracción y molienda de la molibdenita están asociados a los del cobre.

El molibdeno, debido a sus propiedades físicas y químicas, se ha utilizado ampliamente como un elemento de aleación para las industria de armamentos, ingeniería aeronáutica y automotriz (Figura 7). También se utiliza como catalizadores, pigmentos de pintura, inhibidores de la corrosión, retardantes de humo y llamas, y lubricantes secos.



Figura 7: Uso final molibdeno (Cochilco, 2017).

Sus cualidades como elemento de aleación provienen de las altas propiedades mecánicas y anticorrosivas que confiere a las aleaciones. Las pequeñas cantidades de molibdeno, eliminan las fisuras que aparecen en los aceros a temperaturas elevadas, entre los 450 y 600 °C, esto diferencia favorablemente los aceros con molibdeno, de otros aceros. Tanto las reservas como las fuentes principales de producción de molibdeno se encuentran en tres países: China, Estados Unidos y Chile (Figura 8). Este último se consolidó en 2017 como el segundo productor de concentrado de molibdeno, abarcando un 21% de la producción mundial, siendo superado por China, quien fue acreedor del 43% de la producción mundial.

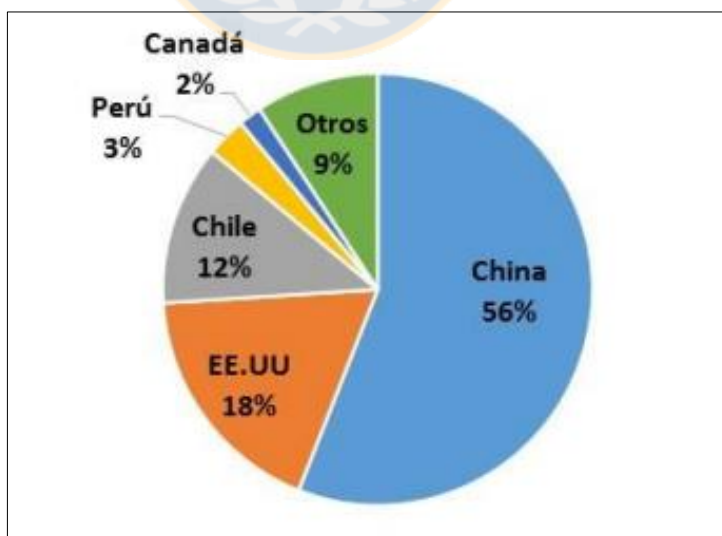


Figura 8: Reservas mundiales de molibdeno (Cochilco, 2017).

3.3 Molibdenita

Tal como se muestra en la Figura 9 la molibdenita (MoS_2) es un sulfuro de molibdeno que se encuentra compuesta de 40% Mo y 60% S, presenta una estructura cristalina hexagonal, con los átomos distribuidos en capas (láminas) en donde cada átomo de molibdeno (Mo) está rodeado por un prisma trigonal de azufre (S). En ésta estructura cristalina se tienen dos tipos de enlaces: 1) enlaces de van der Waals entre capas de S-Mo-S y 2) enlaces covalentes entre átomos de Mo-S (átomos pertenecientes a una misma capa). Debido a esta característica estructural, las partículas de MoS_2 presentan dos tipos distintos de superficie, las cuales están determinadas por el hábito de fractura durante la molienda: 1) una superficie hidrofóbica que se crea por ruptura de enlaces de van der Waals, que se conoce como “cara” y 2) una superficie hidrofílica que se genera por ruptura de enlaces Mo-S, que se conoce como “borde”.

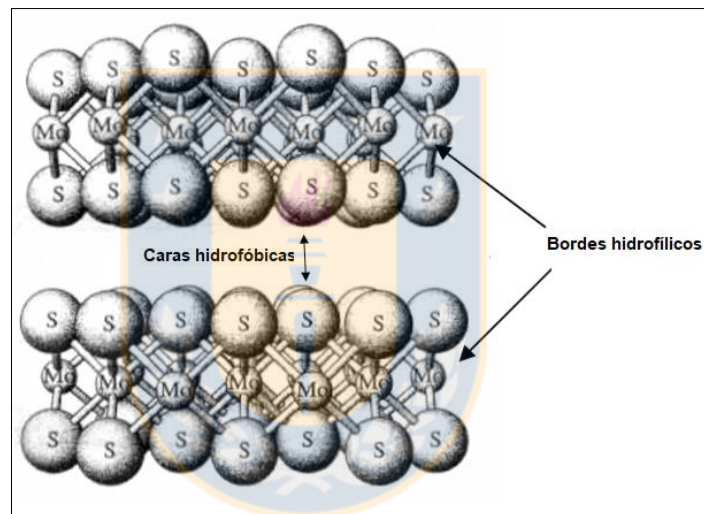


Figura 9: Estructura cristalina de molibdenita, donde se muestran las caras que son hidrofóbicas y los bordes que son hidrofílicos (Gutiérrez, 2017).

El carácter hidrofílico del borde e hidrofóbico de la cara se ha corroborado a través de la medición de ángulo de contacto de burbujas de aire con caras y bordes de partículas de MoS_2 (Figura 10). Se observa que para los bordes de la partícula el ángulo de contacto es 0 para todo rango de pH siendo esta zona de la partícula hidrofílica. Por otro lado se puede ver que a medida que aumenta la concentración de calcio disminuye la hidrofobicidad de las caras, este fenómeno se atribuye a que las caras no son perfectamente hidrofóbicas, teniendo terrazas y cráteres en los planos basales que poseen sitios micro-bordes y carga eléctrica capaz de adsorber especies catiónicas (López-Valdivieso et al., 2012).

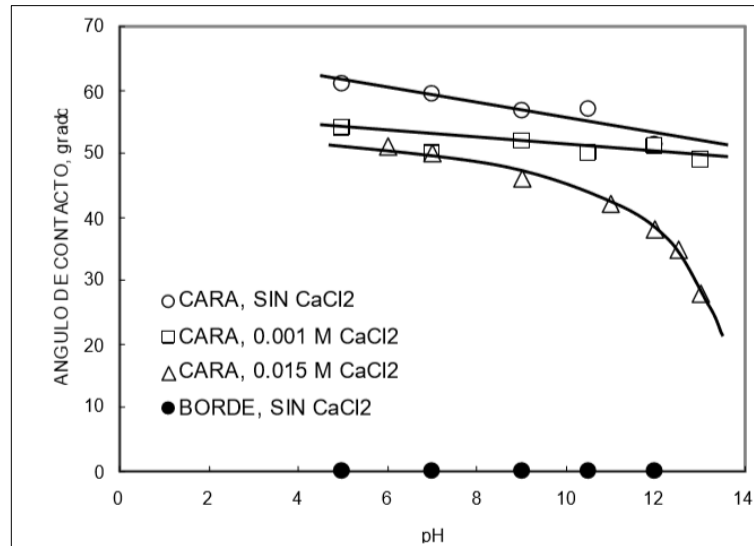


Figura 10: Ángulo de contacto de bordes y caras de partículas de molibdenita en función del pH, en ausencia y presencia de varias concentraciones de iones calcio (Tabares et al., 2006).

3.3.1 Flotabilidad de la molibdenita

Según Gutiérrez (2017) “Cerca del 40 al 50% de la molibdenita se pierde durante la flotación primaria debido a diferentes aspectos asociados a su tamaño, estructura cristalina y al efecto depresor de la cal”. A continuación se presentan las principales causas de pérdidas molibdenita en la flotación colectiva (Castro, 2013):

- Falta de liberación.
- Molibdenita depresada por exceso de cal.
- Molibdenita en partículas finas liberadas (menor a 8 micrones y cinética lenta).
- Molibdenita con recubrimiento de óxidos de Mo.
- La flotación de molibdenita es afectada por la calidad química del agua de proceso.

Tamaño de partícula y grado de liberación

La relación cara/borde en una partícula de MoS_2 es de gran importancia debido a que determina su flotabilidad. La Figura 11 muestra la flotabilidad para distintos tamaños de partícula de molibdenita en función del pH, se observa que a medida que se rompen los cristales de la partícula de molibdenita (disminuye tamaño de partícula) existe una mayor probabilidad de que sea a través de los bordes, disminuyendo así la relación cara/borde, creándose superficies polares y por ende una menor flotabilidad. Además, se ve que la flotabilidad de la molibdenita disminuye en la medida que aumenta el pH, esto debido a la presencia de iones calcio.

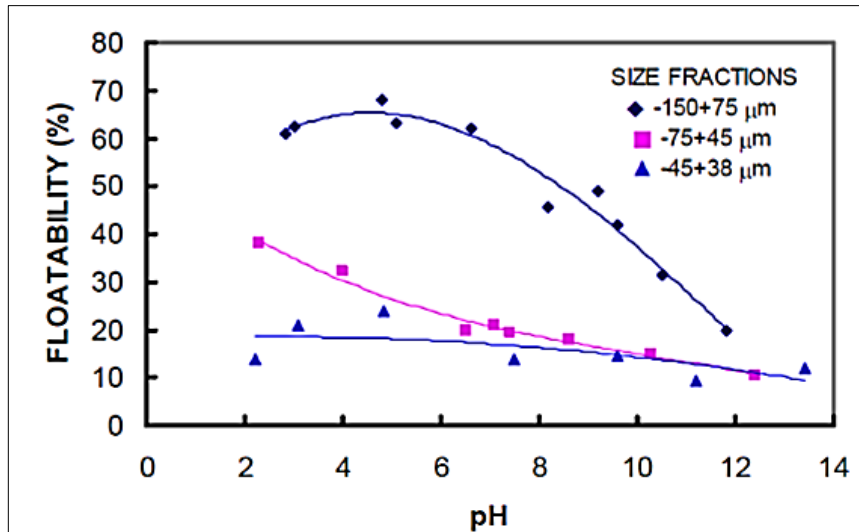


Figura 11: Flotabilidad natural de partículas de distintos tamaños de molibdenita en función del pH (Tabares et al., 2006).

La Figura 12 muestra que el potencial Z de las partículas de MoS₂ depende de la relación cara/borde, teniéndose que a mayor relación cara/borde el potencial Z se hace menos negativo. Fuerstenau y Chander (1972), han explicado que el potencial zeta de una partícula de molibdenita se debe a la generación de cargas eléctricas en los bordes de las partículas, dado que las caras no presentan carga eléctrica alguna, a raíz de que sólo se tienen fuerzas de van der Waals. De lo anterior es de esperar que el aumento de la carga negativa a medida que disminuye la relación cara/borde se deba a la presencia de MoO₄⁻ en los bordes, esto ya que aumenta la repulsión eléctrica, disminuyendo la probabilidad de adhesión partícula-burbuja.

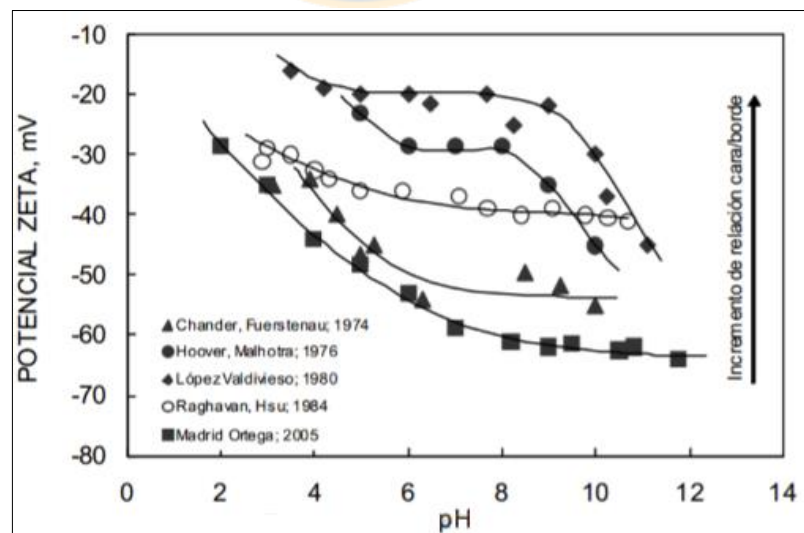


Figura 12: Potencial zeta de muestras de molibdenita en función del pH (Tabares et al., 2006).

Efecto depresor de la cal sobre la molibdenita

El principal problema en la recuperación de molibdenita se debe a que este mineral es obtenido como subproducto en las plantas concentradoras de sulfuros de cobre y por tanto el proceso y los reactivos están destinados a la eficiencia de la recuperación del cobre, perjudicando la recuperación del molibdeno. En estos circuitos de flotación colectiva de Cu-Mo se utiliza cal para ajustar el valor de pH entre 9 y 12, con el fin de deprimir pirita (FeS_2). Con esta adición de cal y según los pH de trabajo se tiene un compuesto hidrolizado de calcio, tal como se ve en la Figura 13, el cual se adsorbe sobre los bordes y micro bordes (aniónicos) de los planos basales de la molibdenita formándose molibdatos de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), provocando una disminución en la flotabilidad de la molibdenita, traduciéndose en bajas recuperaciones de este mineral (ver Figura 14).

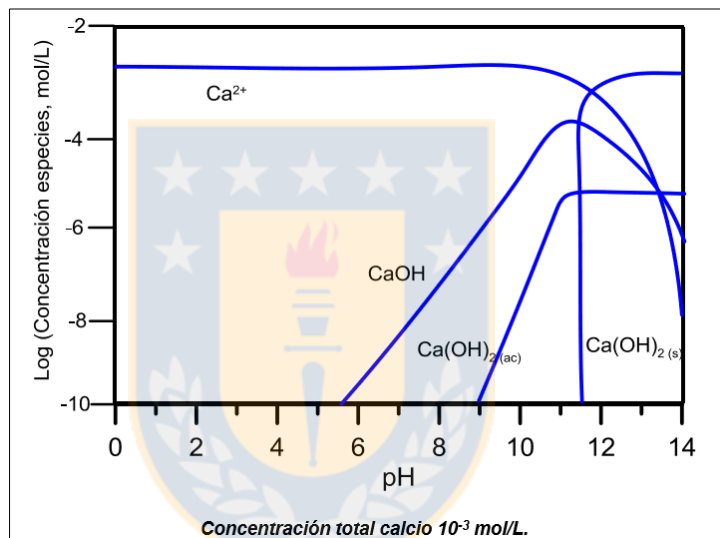


Figura 13: Diagrama de estabilidad de las especies de calcio en función del pH (Gutiérrez, 2017)

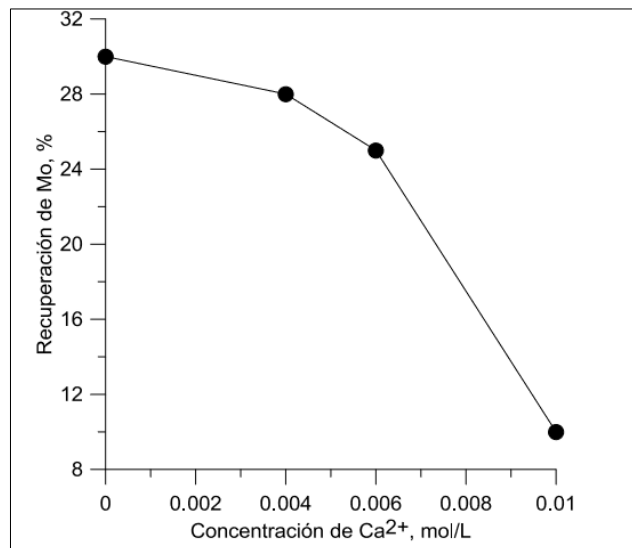


Figura 14: Recuperación de Mo en función de la concentración de Ca^{2+} (López y Reyes, 2005).

En consecuencia el calcio produce pérdidas de molibdenita a través del fenómeno de heterocoagulación entre partículas de molibdenita y ganga silicosa, tal como muestra la Figura 15.

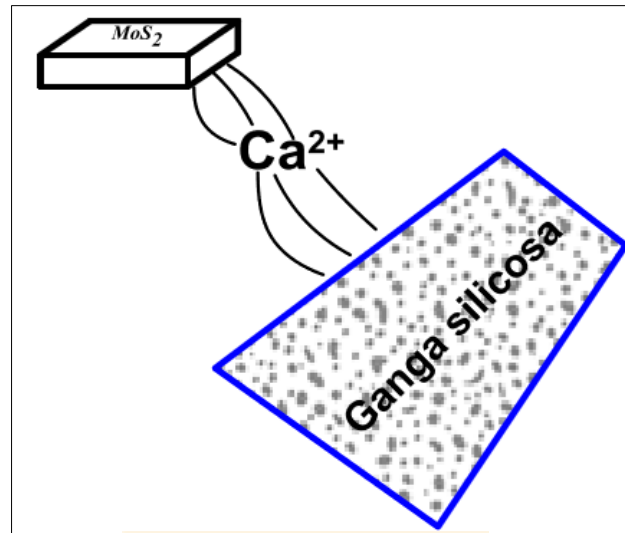


Figura 15: Fenómeno de heterocoagulación (Gutiérrez, 2017).

Efecto depresor de cationes metálicos hidrolizables

Además del efecto del calcio, la recuperación de molibdenita puede estar afectada por la presencia de otros cationes metálicos hidrolizables, los cuales al igual que el calcio se adsorben en la superficie de las partículas de molibdenita disminuyendo su recuperación. La Figura 16 muestra el potencial zeta de la molibdenita en ausencia y presencia de los cationes metálicos hidrolizables Fe^{3+} , Al^{3+} y Mg^{2+} , en este gráfico se observa cómo el punto de inversión de carga se relaciona con la región de pH donde ocurre la precipitación de los diferentes cationes.

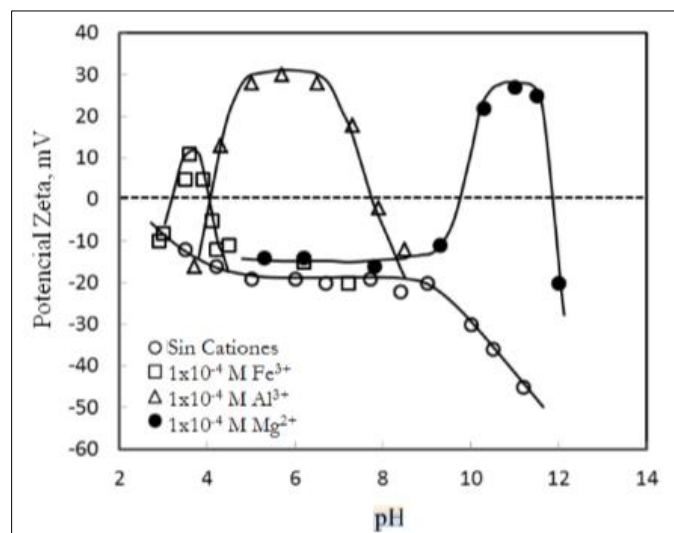
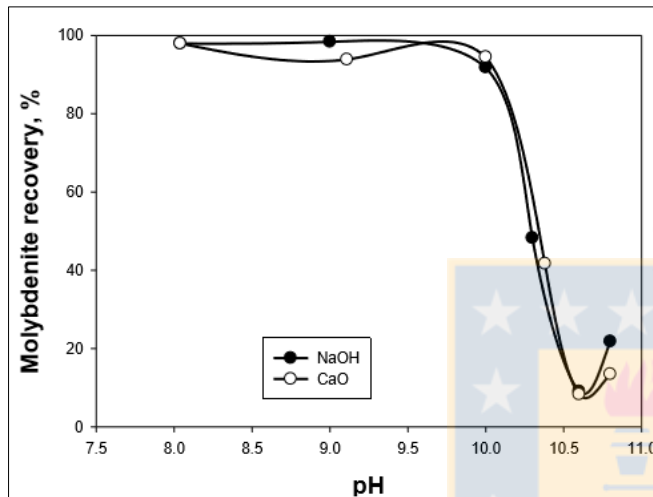


Figura 16: Potencial zeta de la molibdenita en presencia de cationes Fe^{3+} , Al^{3+} y Mg^{2+} (López-Valdivieso, 1980).

a) Depresión de molibdenita por iones Mg^{2+}

De las Figura 16 y 17 se aprecia que el principal responsable de la depresión de molibdenita por ión magnesio es el precipitado coloidal de hidróxido de Mg ($Mg(OH)_{2(s)}$), que se forma alrededor de pH 10. Este se adsorbe sobre la superficie de la molibdenita provocando su depresión, ya que, al igual que el calcio es capaz de heterocoagular la molibdenita con la ganga silicosa por diferencia de las cargas superficiales

(A)



(B)

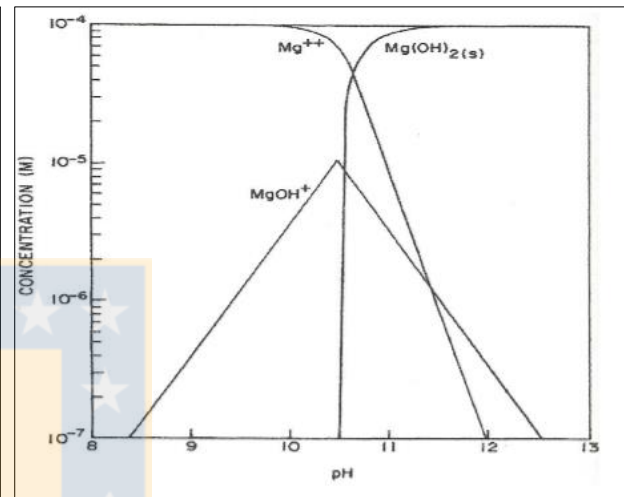


Figura 17: Diagrama de estabilidad de las especies de calcio en función del pH (Castro, 2013).

b) Depresión de molibdenita por iones Fe^{3+}

Lenkovskaya y Stepanov (1969) estudiaron el efecto de Fe^{3+} en la flotabilidad de MoS_2 en un amplio rango de valores de pH en presencia de $Ca(OH)_2$ y NaOH. La Figura 18 muestra que: a pH mayores a 10,5 se produce una disminución abrupta en la flotabilidad de la molibdenita, particularmente en presencia de cal, y a pH sobre 12 esta situación se comienza a revertir. Esto se explica por la adsorción superficial de precipitados coloidales hidrofílicos de hierro los cuales aparecen en el rango de pH de 10-12. Estos precipitados de Fe son originados a partir del Fe en solución que aportan los medios de molienda, entre otros. En la Figura 18 se observa, una menor recuperación de molibdenita al usar hidróxido de calcio que hidróxido de sodio como modificador de pH, esto se atribuye a la precipitación de hidróxidos de calcio mencionados en el punto anterior.

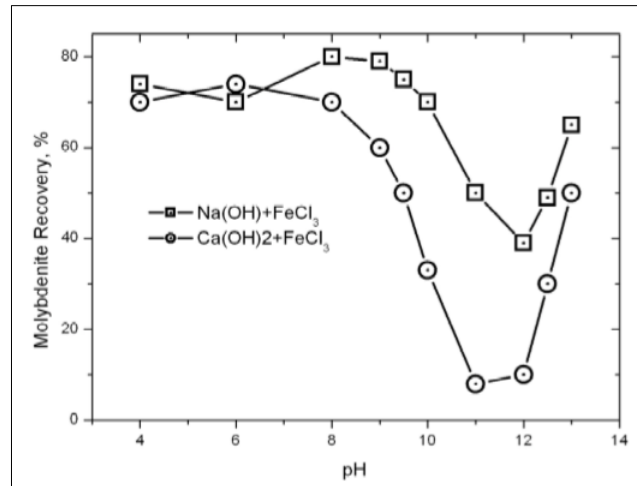
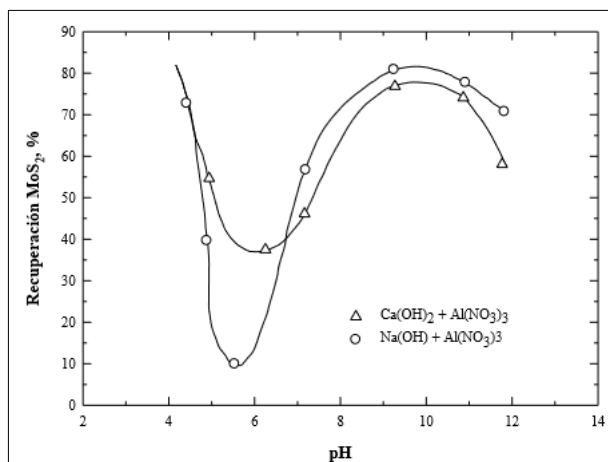


Figura 18: Efecto del Fe^{3+} sobre la flotabilidad de la molibdenita (Lenkovskaya y Stepanov, 1969).

c) Depresión de molibdenita por iones Al^{3+}

El efecto depresor de Al^{3+} se probó en un amplio rango de valores de pH en presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y NaOH . Los resultados experimentales en la Figura 19 muestran que Al^{3+} produce el mayor efecto depresivo en la flotabilidad de MoS_2 en el rango de pH 4,5-8. Al igual que el Fe^{3+} , el efecto depresor de Al^{3+} coincide con la formación de precipitados visibles, $\text{Al}(\text{OH})_3$. A valores de pH más altos se tienen precipitados $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, los que se cargan negativamente igual que la molibdenita y por tanto no se adsorben sobre su superficie debido a la repulsión eléctrica. Como resultado, se restaura la flotabilidad a pH mayores ya que la presencia de Ca^{2+} disminuiría la carga negativa de molibdenita, lo que no favorece el recubrimiento con $\text{Al}(\text{OH})_3$, razón por la cual, en presencia de Ca^{2+} el efecto depresivo de Al^{3+} no es tan fuerte como cuando se utiliza NaOH como el modificador de pH.

(A)



(B)

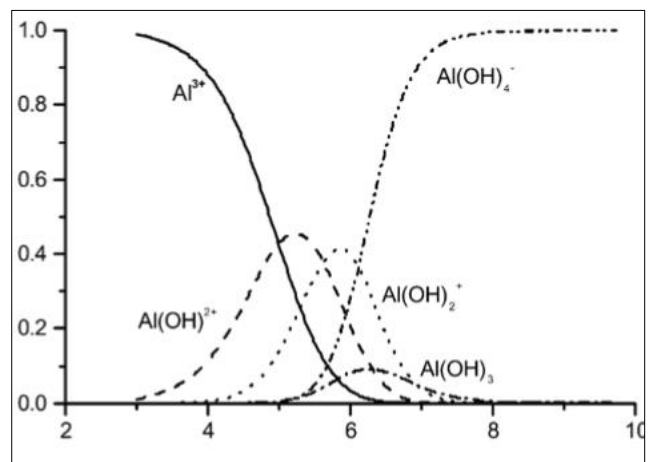


Figura 19: (A) Recuperación de molibdenita en presencia del ion Al^{3+} y (B) diagrama de estabilidad de especies de aluminio en función del pH (Castro, 2003).

Aguas utilizadas en flotación

Hoy en día casi la totalidad del agua empleada en los procesos productivos mineros corresponde a agua recuperada, que junto a los drenajes ácidos de mina (DAM) y agua de mar han surgido como una alternativa para reemplazar el uso de agua convencional (fresca), la cual sigue siendo indispensable en ciertos sistemas, tales como: sellos de bomba, preparación de reactivos, sistemas supresores y colectores de polvo, sistemas de refrigeración, duchas de flotación columnar y otros. El gran problema del uso de estas aguas alternativas, es que al ser empleadas en grandes cantidades aportan al proceso reactivos residuales, arrastre de impurezas, metales en solución, entre otras, afectando así a la calidad del agua y por ende al proceso de concentración.

a) Aguas ácidas

Los DAM corresponden a una percolación proveniente de la mina, es un drenaje ácido en el cual la pirita se descompone y forma ácido sulfúrico en tiempos geológicos. Estos poseen mucho cobre, hierro y otros cationes, lo cual se transforma en un problema a la hora de usar estos drenajes en el proceso de flotación, ya que pudiese ocurrir activación de pirita por el Cu^{2+} en solución. Es por esto que se recomienda retirar el cobre disuelto del drenaje antes de emplear dicha agua. Las soluciones de DAM por lo general tienen un color característico rojo-marrón atribuido a la existencia de Fe. Sin embargo, puede prevalecer un color verde-azul si el hierro disuelto se encuentra en el estado ferroso, lo que a su vez se vuelve marrón-rojizo cuando se expone a la atmósfera.

Los iones metálicos mayoritarios en los drenajes ácidos de mina, corresponden a Cu^{2+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} y Fe^{2+} , estos según el pH pueden estar en disolución o bien como precipitados y para poder conocer el punto donde precipitan es necesario conocer los diagramas termodinámicos, (Figura 20), que determina el pH a la cual precipita la especie dependiendo de su concentración.

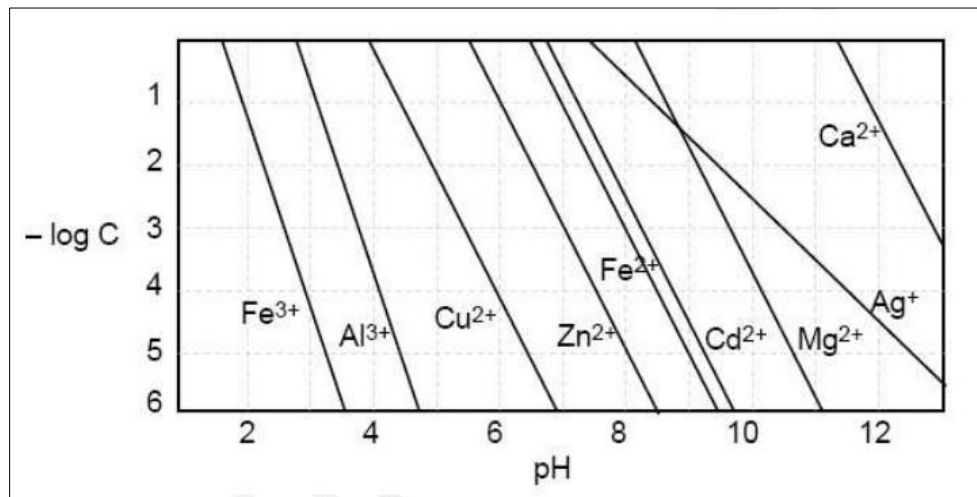


Figura 20: Diagrama de precipitación para hidróxidos metálicos (Stumm and Morgan).

b) Agua de Mar

La Tabla 1 deja en evidencia que la química del agua de mar es muy diferente a la del agua convencional. Por ejemplo, la total salinidad del agua convencional consiste principalmente de sulfatos, nitratos, magnesio, calcio y sodio y el pH típico es de 6,7 a 7,5. El agua de mar en cambio, es un sistema más complejo el cual posee alta concentración de iones y un pH natural alrededor de 7,8 y 8,2. El agua de mar está compuesta de agua pura en un 96,4% aproximadamente y de minerales disueltos en un 3,6 %.

Tabla 1: Composición típica del agua convencional de proceso (Aaltonen et al., 2011) y del agua de mar (Floor, 2006).

Agua convencional	
Especie iónica	Concentración [ppm]
Nitrato, NO_3^-	21,3
Tiosulfato, $S_2O_3^{2-}$	<5
Amonio, NH_4^+	<1
Aluminio, Al^{3+}	<1
Magnesio, Mg^{2+}	47,4
Calcio, Ca^{2+}	77,0
Hierro, Fe^{2+}	<0.8
Sodio, Na^+	31,5
Agua de Mar	
Cloruro, Cl^-	19345
Sodio, Na^+	10755
Sulfato, SO_4	2701
Magnesio, Mg^{2+}	1295
Calcio, Ca^{2+}	416
Potasio, K^+	390
Bicarbonato, HCO_3^-	145
Bromuro, Br^-	66
Borato, BO_3^{3-}	27
Estroncio, Sr^{2+}	13
Fluoruro, F^-	1

Estudios apuntan que la concentración de los minerales de enriquecimiento primario responde bien en agua de mar en un amplio rango de pH. En el caso de los minerales de enriquecimiento secundario (calcosina, covelina) su respuesta es fuertemente dependiente del pH y tienen su óptimo alrededor de pH 10 (Castro, 2012). En particular, en los estudios realizados se concluye que siempre la recuperación de minerales de cobre es mayor en agua dulce que en agua de mar para cualquier valor de pH, de igual forma, se indica a su vez, que las leyes de concentrado son siempre menores en agua de mar. Desde el punto de vista del Fe, se ha establecido que las recuperaciones son similares utilizando ambos tipos de agua (mar y dulce), lo que explicaría en mayor o menor medida una menor ley de cobre en los concentrados alcanzados con el uso de agua de mar, desde el punto de vista técnico, la diferencia de velocidades de flotación entre los minerales de Cu y Fe disminuye, perjudicando la limpieza del concentrado final.

En relación a la molibdenita, diferentes estudios muestran que en agua de mar, entre pH 9.5 y pH 10 ocurre una fuerte depresión de molibdenita, este comportamiento es atribuido principalmente a la presencia de cationes de magnesio (Mg^{2+}) y calcio (Ca^{2+}). Los procesos de flotación de cobre-molibdeno se llevan a cabo a valores entre pH 10 y pH 11 en presencia de cal con el objetivo de inhibir la flotación de pirita. Sin embargo, este proceso resulta poco favorable en este medio debido a que alcanzar este valor de pH conlleva a requerir altas cantidades de cal (Uribe, 2017). La Figura 21 muestra como aumenta el consumo de cal a medida que aumenta la presencia de agua de mar.

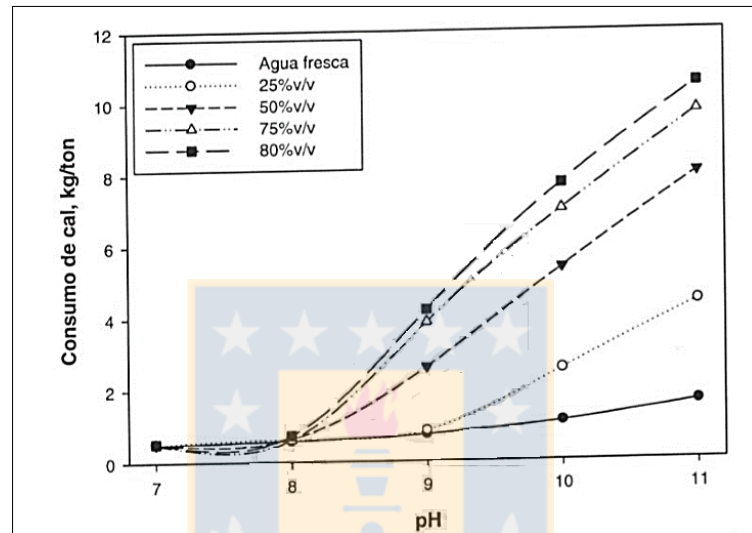


Figura 21: Consumo de cal en función del pH, para sistemas de flotación con distintas proporciones en volumen de agua de mar (Landeró, 2010).

3.4 Espectrofotometría

La espectrofotometría UV- Visible es una técnica de medición de concentración de masa de elementos y compuestos químicos, cuyo principio es la interacción entre la energía electromagnética con la materia. La espectrofotometría se fundamenta en medir la radiación monocromática absorbida por un elemento o molécula causante de desplazamientos electrónicos a capa superiores, estas transiciones determinan la región del espectro en la que tiene lugar la absorción.

3.5 Diseño experimental

El diseño estadístico de experimentos se refiere al proceso de planear un experimento de tal forma que se recaben datos adecuados que puedan analizarse con métodos estadísticos que lleven a conclusiones válidas y objetivas. Todo problema experimental incluye dos aspectos: el diseño del experimento y el análisis estadístico de datos. Gutiérrez y De La Vara (2004) consideran que para fines prácticos, a la hora de aplicar un diseño experimental, es importante tener una visión clara del proceso o sistema que se va a estudiar, de esta manera, se puede simplificar el sistema e identificar los factores de proceso y las variables de respuesta involucradas en él, tal como se ilustra en la

Figura 22. Las variables de respuesta son las características de calidad del producto del proceso y los factores son las variables que se investigan para saber cómo afectan a las variables de respuesta.

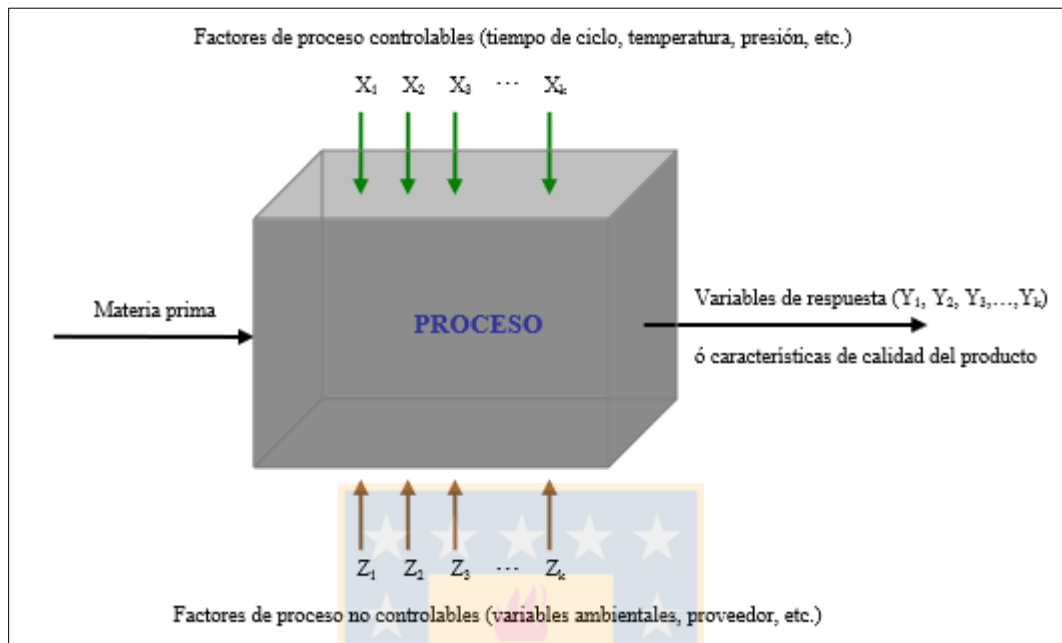


Figura 22: Ejemplo de factores de proceso y variables de respuesta para un sistema cualquiera. (Gutiérrez y De la Vara, 2004).

Los diseños experimentales constituyen la estrategia más adecuada para obtener modelos matemáticos empíricos con un mínimo de pruebas experimentales. Los tres principios básicos en el diseño de experimentos son:

- Obtener las réplicas, para la determinación del error experimental y calcular en forma más precisa el efecto de un factor en el experimento.
- Aleatoriedad: asignación del material experimental y orden en que se realizan las pruebas individuales o ensayos se determinan aleatoriamente.
- Análisis por bloques: técnica usada para incrementar la precisión del experimento.

3.5.1 Clasificación y selección de los diseños experimentales

En la selección de un diseño experimental, básicamente, influyen cinco aspectos importantes:

- El objetivo del experimento.
- El número de factores de proceso a estudiar.
- El número de niveles que se pueden probar en cada factor.
- Los efectos que interesan estudiar (relación factores-respuestas).
- El costo del experimento, el tiempo y la precisión deseada.

En la Figura 23 se muestra la clasificación general de los diseños experimentales de acuerdo con su objetivo. Dentro de cada rama se pueden subclasificar de acuerdo al número de factores, al tipo de efecto que se pretende estudiar y según las restricciones existentes.

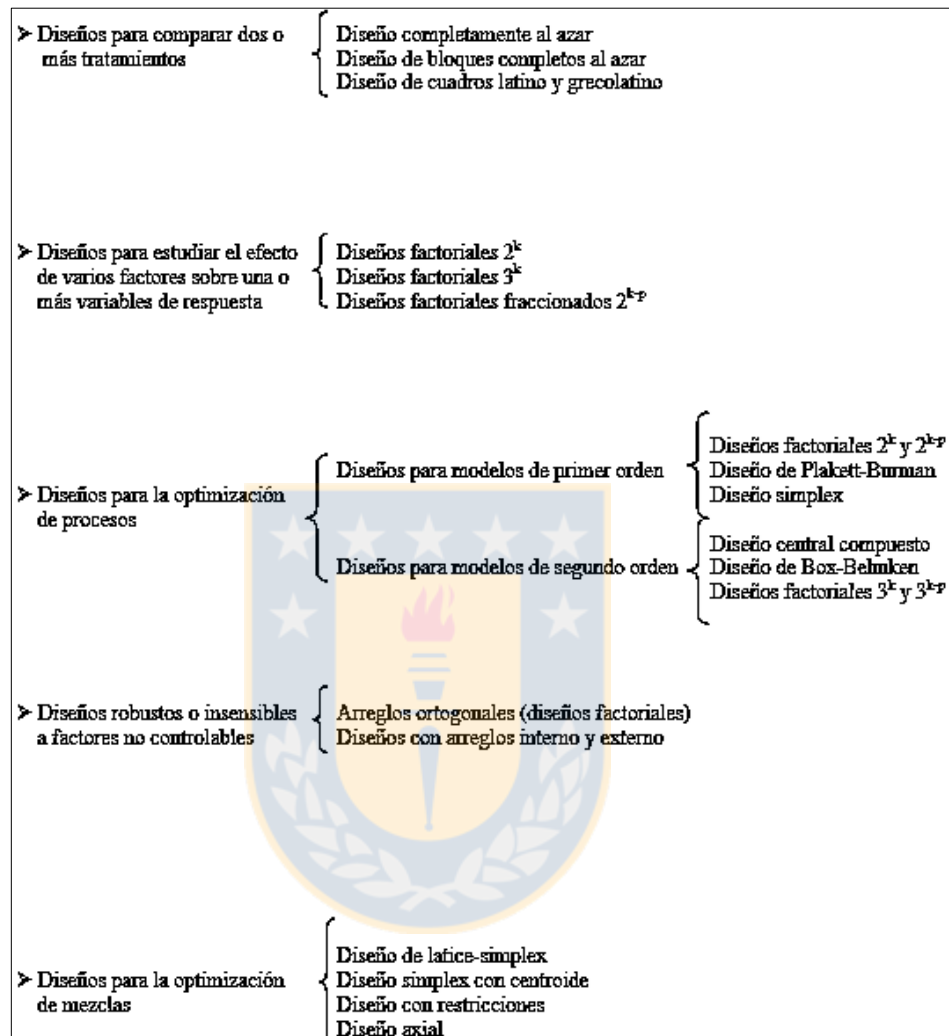


Figura 23: Clasificación general de los diseños experimentales (Gutiérrez y De La Vara, 2004).

Los diseños factoriales 2^k son útiles para realizar estudios preliminares con varios factores, y para identificar las variables más influyentes en el proceso (a través de la estimación de los 2^k efectos). Sin embargo, el número de pruebas experimentales aumenta geométricamente con el número de factores en estudio. En la práctica resulta extremadamente raro que aparezcan interacciones de tres o más factores que resulten ser significativas, teniéndose modelos robustos considerando sólo los efectos principales y las interacciones de dos factores. Por lo anterior y de acuerdo con el objetivo del trabajo, sólo interesa estudiar en detalle el diseño factorial fraccionado $2^{(k-p)}$ y el diseño central compuesto rotatable (diseño hexagonal), ambos correspondientes al tipo de diseños más utilizados para optimizar procesos. Los diseños factoriales fraccionados utilizan la

notación 2^{k-p} , donde 2 corresponde al número de niveles, k el número de factores con los que se experimentará y la letra p indica el grado de fraccionamiento. Estos usan sólo la mitad ($p=1$), la cuarta parte ($p=2$) ó incluso una fracción menor de las 2^k combinaciones de tratamientos y se usan cuando: el número de tratamientos necesarios excede a los recursos disponibles, sólo se requiere información sobre los efectos principales y las interacciones de bajo orden, se necesitan estudios exploratorios para muchos factores y cuando se hace la suposición de que sólo unos cuantos efectos son importantes.

Por otro lado, el diseño rotatable hexagonal es muy útil para estimar modelos de segundo orden. Consiste en realizar pruebas experimentales en seis puntos que son los vértices de un hexágono regular circunscrito en una circunferencia de radio 1 a escala codificada, tal como se muestra en la Figura 24, más los puntos necesarios en el centro para estimar el error experimental.

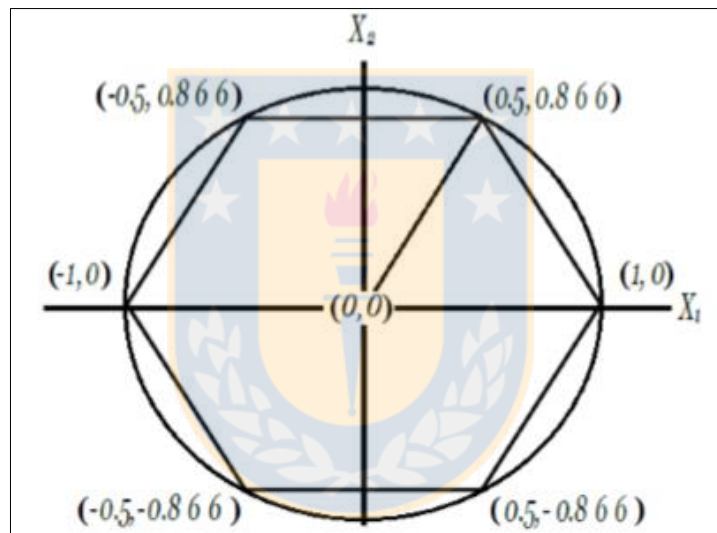


Figura 24: Representación gráfica de un diseño hexagonal (Seco, 2017) .

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

La presente memoria de título comprende dos vías de estudio, la primera en base al análisis de la data recolectada y la segunda en función de pruebas de laboratorio. A continuación se proporciona la información necesaria para la comprensión de la metodología empleada.

4.1 Muestras y reactivos

En primer lugar, se define la muestra mineral a flotar, para esto se requiere obtener una muestra proveniente de la mina subterránea acorde al P0 (programa de producción anual) programado para el 2019 (%Mo 0,022), esto ya que es el mineral proveniente de ésta línea el que alimenta a la flotación Ro-E, específicamente la muestra es obtenida desde la correa 10B (alimentación a molino de barras 2), la cantidad requerida para realizar todas las pruebas de laboratorio es de 140 Kg. Esta es chancada bajo malla 12# (ASTM), y posteriormente pasan por un proceso de cono y cuarteo, para ser divididas en muestras de 1180 g. de modo que cada muestra sea representativa, dichas muestras presentan la composición química resumida en la Tabla 2.

Tabla 2: Composición química de la muestra.

Muestra/Leyes	%Cu	%Mo	%Fe	%As	%Insoluble	%CuNS
Correa 10B Fecha:14-08-2018	0,70	0,022	3,6	0,010	78,0	0,03

Un Segundo muestreo fue realizado para recolectar las aguas necesarias involucradas en las pruebas de flotación, las cuales son obtenidas desde:

- Agua Fresca del laboratorio metalúrgico.
- Agua desmineralizada del laboratorio metalúrgico.
- Agua recuperada desde cuba molino sección B o C.
- Agua Haulage, desde la canaleta del Refugio Haulage.
- Agua de Mar, traída desde la costa de Viña del Mar.

Estas aguas fueron analizadas por espectrofotometría bajo las siguientes especies:

- Iones Calcio (Ca^{2+}).
- Iones Magnesio (Mg^{2+}).
- Iones Cloruros (Cl^{-}).
- Ion cobre (Cu^{2+}).
- Iones férricos y ferrosos (Fe^{+3}).
- Iones aluminio (Al^{+3}).
- Iones Sulfato (SO_4^{2-}).

Los reactivos usados para el desarrollo de las pruebas se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3: Reactivos empleados en pruebas de flotación.

Clasificación	Reactivos	Proveedor	Característica
Colector 1 ^{rio}	X-023	Clariant	Tionocarbamato
	TX-2901	Proquimin	Soluble en agua, cuya dispersión promueve la colección temprana, contiene Tiofosfato y debiese ser más selectivo frente a la pirita
Colector 2 ^{rio}	Diésel	Copec	Colector oleoso
	MX-5173	Solvay	Colector selectivo para uso en avance
Espumante	MIBC	Mathiesen	Alcohol alifático, versátil.
	Jiahua 100 B	Jiahua	Recuperación de molibdenita en fracciones más finas
	AF 70 plus	Solvay	Espumante con % de glicol objetivo: generar burbujas más finas, uso en avance
Regulador de pH	CaO	Sibelco	Lechada de Cal (diluida en agua fresca)
Depresores de Fe	JCC 469	Jiahua	Disminuir el consumo de cal operando a menor pH, optimizar la ley de concentrado
	MBS	Mathiesen	Depresor de pirita.

4.2 Equipos y procedimiento

A continuación se presentan los equipos y procedimientos involucrados en las pruebas de laboratorio.

4.2.1 Pruebas de flotación

Una vez chancadas la muestra mineral se procede con las pruebas de Cinética de Molienda, a fin de obtener el tiempo necesario de molienda para obtener una distribución de tamaños de partículas deseada. Esta serie de pruebas se realizan en un molino de bolas (Figura 25 A) e implican la molienda de muestras de mineral para diferentes tiempos, la medición de la distribución granulométrica de los productos y el trazado de una curva de molienda en función del tiempo para seleccionar el tiempo para alcanzar el P80 deseado según la prueba. Una vez obtenidos los tiempos del molienda se realiza una molienda controlada con el tiempo de molienda determinado en el punto anterior según la prueba a realizar para obtener la granulometría correspondiente, en esta etapa se agregan además los reactivos (Colector 1rio y 2rio).

El mineral, previamente molido al tamaño apropiado, fue adicionado a la celda Denver D-12 de 2300 cm³(Figura 25 B) según procedimiento laboratorio DAND, aquí se acondiciona la pulpa y se procede con la prueba agregando lechada de cal a modo de obtener el pH indicado por la prueba.

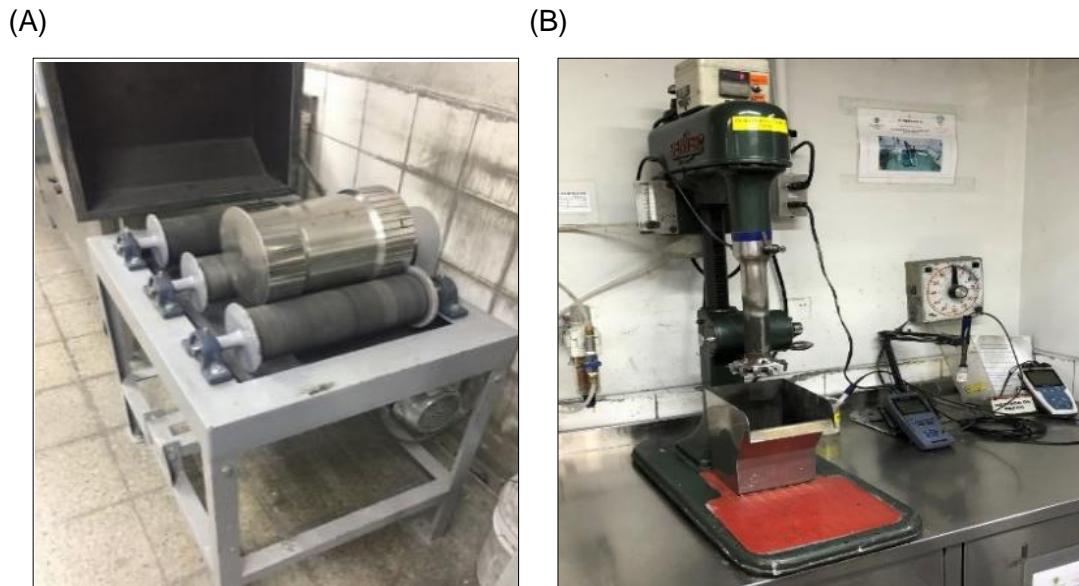


Figura 25: (A) Roller y molino de bolas y (B) celda de flotación Denver laboratorio metalúrgico.

A continuación la prueba prosigue bajo las condiciones de la Tabla 4:

Tabla 4: Condiciones operacionales flotación rougher E.

Condición	Detalle
pH	Según prueba
Flujo de aire	Según prueba
Tiempo de acondicionamiento	3 min
Tiempo fijo	11 min
Cinética de flotación	1-2-4-7-11 y 16 min
Velocidad de agitación	1500 RPM
Frecuencia de paletado	c/ 10 segundos
Agua adicionada	Criterio flotador

4.2.2 Microscopía óptica

La microscopía óptica permite la identificación de minerales de una muestra, tanto de mena como de ganga. Esta técnica es de suma importancia a la hora de analizar los resultados de las pruebas de flotación, ya que entrega información del mineral, tales como: Ley de Cu-Mo y Fe, grado de liberación, asociaciones, oxidación superficial, forma y tamaño.

Materiales:

- Tamiz 140#,
- polvo transóptico,
- pasta, lijas y soluciones pulidoras,
- aceites lubricantes.

En el presente estudio se realizará microscopía óptica de opacos al mineral de cabeza, el cual responde al procedimiento descrito en el Anexo 1, sección 8.1.1

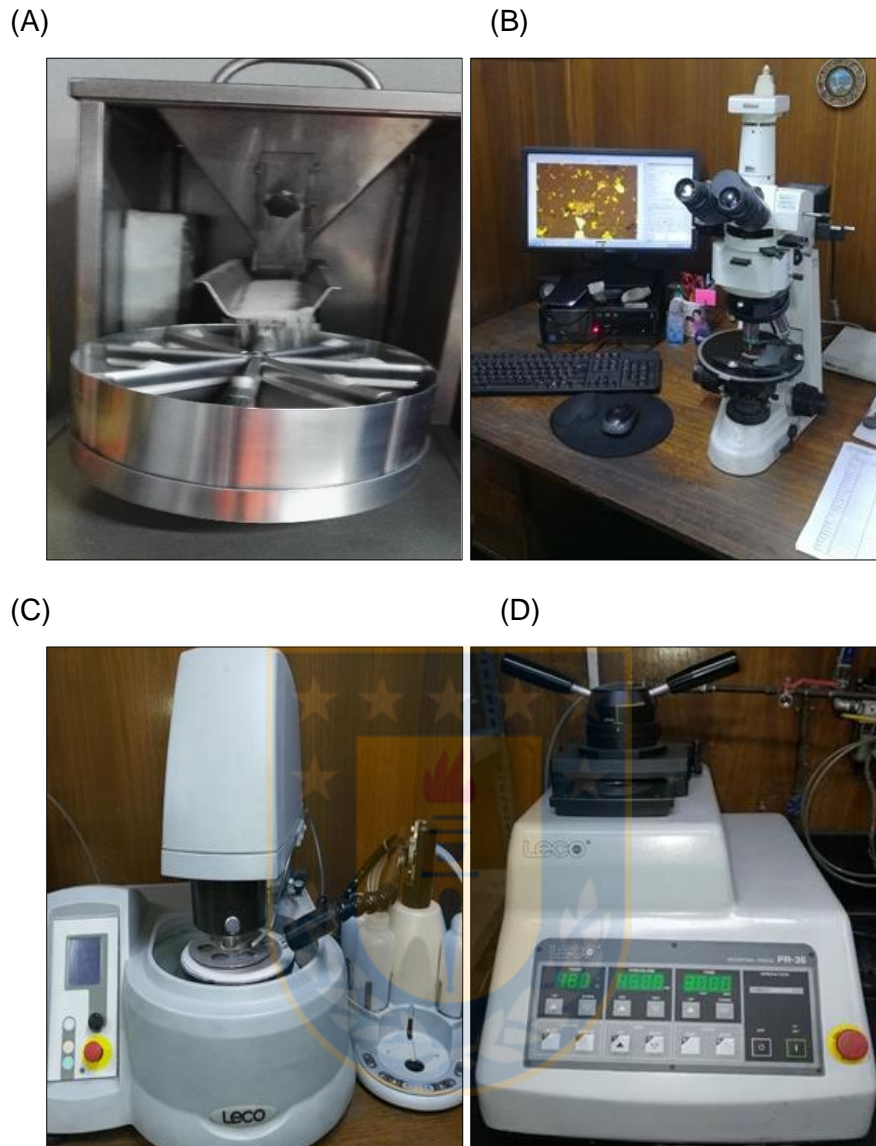


Figura 26: Equipos de microscopía óptica: (A) divisor rotatorio, (B) microscopio óptico Nikon 50i POL, (C) pulidora Leco GPX200 y (D) briquetera Leco PR-36.

4.2.3 Pruebas de espectrofotometría

Se realiza medición por espectrofotometría al agua industrial utilizada, esto con el fin de conocer cuáles son los iones presentes en estas y que provocan la disminución de la recuperación de molibdenita. El espectrofotómetro usado corresponde al Spectroquant Nova 60 (Figura 27), perteneciente al laboratorio de recursos hídricos de DAND, el equipo cuenta con un Kit fotométrico que permite realizar la medición en ppm del ion en cuestión presente en el agua.



Figura 27: Spectroquant Nova 60 acompañado de vaso precipitado, embudo, papel filtro, aguas y kit fotométrico.

Los reactivos o mezclas de reactivos contienen además del reactivo selectivo para un parámetro a determinar, un determinado número de sustancias auxiliares que son esenciales para el curso de la reacción. Estos incluyen, por ejemplo, soluciones amortiguadoras para ajustar el pH al valor óptimo para la reacción, y agentes enmascarantes que suprimen o minimizan la influencia de iones interferentes. Cabe recalcar que para la medición de cada elemento se sigue un procedimiento diferente, el cual se encuentra en el manual y que en éste estudio se encuentra adjuntado en el Anexo 2. En ocasiones se hará necesario realizar dilución de la muestra, esto es cuando:

- La concentración del parámetro no se encuentra dentro del intervalo de medida.
- Otros componentes de la muestra interfieren en la determinación (interferencia de la matriz);

El resultado analítico se multiplica por el factor de dilución (V_F), el que se calcula:

$$V_F = \frac{\text{Volumen Final}}{\text{Volumen de partida}} \quad (2)$$

Se debe tener en cuenta que las muestras fuertemente enturbiadas necesitan antes de la determinación fotométrica un tratamiento previo de filtrado, ya que una muestra turbia puede conducir a intensas oscilaciones del valor de medición y a resultados demasiado altos. La turbidez débil es eliminada por la corrección automática de turbidez incluida en el fotómetro; en este caso no es necesario filtrar la muestra antes del análisis. Para diferenciar entre sustancias contenidas en el agua disueltas y no disueltas, la muestra de agua puede filtrarse a través de papel de filtro sencillo, el cual fue el caso del agua de mar, Recuperada y Haulage.

4.3 Metodología de trabajo

El plan de trabajo desarrollado en el estudio se basó en 4 hitos, los cuales se encuentran resumidos en la Figura 28 y que buscan encontrar y dar solución a una de las problemáticas de DAND, como lo es la perdidas de molibdenita en la flotación colectiva.

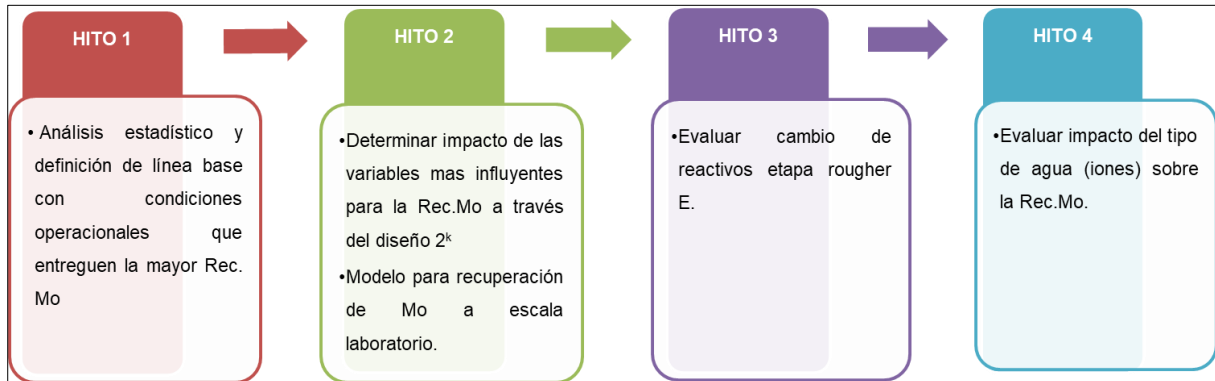


Figura 28: Esquema plan de trabajo (Elaboración propia).

4.3.1 Análisis estadístico

El análisis estadístico tiene por objetivo encontrar posibles causas de pérdidas de molibdeno a través del estudio de las variables de la concentradora, así mismo permitirá analizar la operación a través de la comparación de los estándares SIPP (Anexo 3) con el punto de operación óptimo encontrado en base a la data histórica.

Dentro de las variables estudiadas en este ítem se destacan:

- 1) Recuperación Mo/Cu colectivo.
- 2) Leyes de alimentación Mo, Cu y Fe por línea.
- 3) %Cu, Mo y Fe concentrado colectivo.
- 4) Tratamiento.
- 5) pH.
- 6) P80.

Estos datos fueron obtenidos desde el PI process Book y de planillas de reportes mensuales RESPMET, siendo considerados valores promedio día. Cabe recalcar que la data empleada corresponde a los periodos 2015, 2017 hasta junio del 2018, dejando de lado el periodo 2016 por ser muy inestable reflejado en sucesivas detenciones de planta.

4.3.2 Flotaciones a distintas variables operacionales

Estas pruebas se llevaron a cabo a través de un diseño factorial de experimentos mediante el software Minitab 16 Statistical para conocer los principales factores y su interacción en la recuperación de molibdeno a escala laboratorio. En este ítem se estudiaron 7 variables, las cuales fueron seleccionadas y estudiadas a dos niveles según el resultado del estudio estadístico, histórico de pruebas de laboratorio, restricciones operacionales y en base a estándares SIPP.

Al iniciar este estudio, no se tienen claras las influencias de las variables que afectan al proceso de flotación cobre-molibdeno, por lo que es necesario realizar un diseño de experimentos que permita identificar las variables más significativas para la recuperación de molibdeno, entre las que tenemos: P80, %Cp (porcentaje de sólidos), flujo de aire, pH, dosificación de reactivos (Colector 1rio, 2rio y espumante). Esto llevaría en una primera etapa a realizar $2^7 = 128$ experiencias con sus repeticiones respectivas, es decir 256 flotaciones, y esto sólo considerando dos niveles (superior e inferior) para cada variable. Para evitar un set de pruebas tan amplio y que logre igual representatividad que la realización de 256 pruebas es que se utilizan los diseños factoriales fraccionados. Para el presente estudio se utilizó el diseño factorial fraccionado 2^{7-3} , el cual permite estudiar 7 variables en 16 experimentos. Suponiendo que todas las interacciones de tercer orden o superior y una parte de las de segundo orden sean cero, permitiría estimar los efectos principales y los de las restantes interacciones de dos factores. Minitab, por defecto confunde las variables E, F y G con las interacciones ABC, BCD y ACD, como se muestra en la Figura 29. El procedimiento empleado a través del software Minitab 16 se encuentra en el Anexo 4.

Diseño factorial fraccionado			
Factores:	7	Diseño de la base:	7; 16
Corridas:	35	Réplicas:	2
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	3
Resolución: IV			
Fracción: 1/8			
Generadores del diseño: E = ABC; F = BCD; G = ACD			

Figura 29: Diseño factorial fraccionado generado por software Minitab.

Los valores indicados en el nivel cero de la Tabla 5 están de acuerdo a los procedimientos actuales de DAND, que dan resultados aceptables con recuperación de 66% de Molibdeno.

Tabla 5: Niveles de los factores usados en el diseño

Factor	Nivel inferior (-)	Nivel central (0)	Nivel superior(+)
A: Colector 1rio (g/t)	18,0	22,0	26,0
B: Colector 2rio (g/t)	6,0	10,0	14,0
C: Espumante (g/t)	7,0	13,0	19,0
D: P_{80} (μm)	220	240	260
E: pH	9,5	10,5	11,5
F: %Cp	34	38	42
G: Flujo Aire (L/min)	3,00	6,00	9,00

La Tabla 6 expone las condiciones estándar del laboratorio metalúrgico DAND en cuanto a las pruebas de flotación

Tabla 6: Condiciones de flotación estándar para pruebas metalúrgicas de laboratorio DAND.

Molienda	
Masa mineral	1180 g
Cp Molienda	66%
P80 Mineral Subterráneo	240 micrones
Tipo de agua	Fresca
Flotación	
Celda	Denver
Cp	38%
Volumen celda	2300 cm ³
pH	10,5
Tiempo de acondicionamiento	3 min
Tiempo fijo	11 min
Cinética de flotación	1-2-4-7-11 y 16 min
Velocidad de agitación	1500 RPM
Frecuencia de paleteo	c/ 10 segundos
Agua adicionada	Criterio flotador

La Tabla 7 corresponde a la plantilla del diseño experimental, en donde el número total de experimentos realizados fue de 35, esto como resultado del estudio de 7 factores a dos niveles, resultando en un factorial fraccionado de $2^{7-3}=2^4=16$, el cual se realiza por duplicado y se le agregan 3 puntos centrales para estimar el efecto de la curvatura y el error experimental, resultando en 35 pruebas de flotación (Tabla 7). Cabe mencionar que en escala real las variables A-G corresponden a: dosis de colector primario, colector secundario y espumante (g/t), P80 (micrones), pH, porcentaje de sólidos y flujo de aire (L/min) respectivamente. Por otro lado en la Tabla 8 se presenta la matriz de tratamiento del diseño hexagonal con valores codificados y reales, donde los subíndices 2 y 5 hacen referencia a dosis de diésel y P80 respectivamente.

Cabe recalcar que todas las pruebas fueron realizadas a nivel laboratorio, con el mismo mineral y con la misma lechada de cal.

Tabla 7: Matriz en orden según corrida con valores a escala real.

N° Prueba	ESCALA REAL						
	A	B	C	D	E	F	G
1	26	6	7,0	260	11,5	34	9
2	18	14	19,0	220	9,5	42	3
3	18	6	7,0	220	9,5	34	3
4	18	6	19,0	260	9,5	42	9
5	22	10	13,0	240	10,5	38	6
6	18	14	7,0	260	11,5	42	3
7	18	14	19,0	220	9,5	42	3
8	18	6	7,0	220	11,5	42	9
9	18	6	19,0	260	11,5	34	3
10	18	6	19,0	260	11,5	34	3
11	18	14	7,0	260	9,5	34	9
12	18	6	7,0	220	11,5	42	9
13	18	14	7,0	260	11,5	42	3
14	18	6	7,0	220	9,5	34	3
15	26	6	19,0	220	11,5	42	3
16	26	6	7,0	260	9,5	42	3
17	26	6	7,0	260	9,5	42	3
18	18	14	19,0	220	11,5	34	9
19	18	14	7,0	260	9,5	34	9
20	26	6	19,0	220	9,5	34	9
21	26	14	19,0	260	9,5	34	3
22	26	14	7,0	220	9,5	42	9
23	26	14	19,0	260	11,5	42	9
24	26	6	7,0	260	11,5	34	9
25	26	14	19,0	260	9,5	34	3
26	26	6	19,0	220	11,5	42	3
27	26	6	19,0	220	9,5	34	9
28	18	6	19,0	260	9,5	42	9
29	18	14	19,0	220	11,5	34	9
30	22	10	13,0	240	10,5	38	6
31	26	14	7,0	220	9,5	42	9
32	22	10	13,0	240	10,5	38	6
33	26	14	7,0	220	11,5	34	3
34	26	14	19,0	260	11,5	42	9
35	26	14	7,0	220	11,5	34	3
	Procedimiento actual DAND						

Tabla 8: Matriz de tratamientos diseño hexagonal con valores codificados y reales.

N° Prueba	Escala codificada		Escala real	
	X_2	X_5	Z_2	Z_5
1	1	0	14	240
2	0,5	0,866	12	257
3	-0,5	0,866	8	257
4	-1	0	6	240
5	-0,5	-0,866	8	223
6	0,5	-0,866	12	223
7	0	0	10	240
8	0	0	10	240
9	0	0	10	240

4.3.3 Flotaciones probando distintos reactivos

La finalidad del set de pruebas expuesto en la Tabla 9, es analizar la posibilidad de modificar los reactivos actuales de DAND, para esto se recopilamos los reactivos que hayan aumentado la Rec. Mo a escala laboratorio, además de probar nuevos reactivos y procedimientos, tales como el uso de reactivos en avance.

Tabla 9: Set de cinéticas de flotación con diferentes reactivos.

N° Prueba	Colector 1rio	Colector 2rio	Colector en avance	Espumante	Espumante en avance	Depresor de Fe
1	X-23 22 g/t	Diesel 10 g/t	-	MIBC 13 g/t	-	-
2	TX-2901 22 g/t	Diesel 10 g/t	-	MIBC 13 g/t	-	-
3	X-23 22 g/t	MX-5173 10 g/t	-	MIBC 13 g/t	-	-
4	X-23 22 g/t	Diesel 5 g/t	Diesel 5 g/t	MIBC 13 g/t	-	-
5	X-23 22 g/t	Diesel 5g/t	MX-5173 5g/t	MIBC 13 g/t	-	-
6	X-23 22 g/t	Diesel 10 g/t	-	Jiahua 100B 13 g/t	-	-
7	X-23 22 g/t	Diesel 10 g/t	-	MIBC 7 g/t	AF-70 plus 6 g/t (t: 4 min)	-
8	X-23 22 g/t	Diesel 10 g/t	-	MIBC 7 g/t	MIBC 6 g/t (t: 4 min)	-
9	X-23 22 g/t	Diesel 10 g/t	-	MIBC 13 g/t	-	JC-469 5 g/t
10	X-23 22 g/t	Diesel 10 g/t	-	MIBC 13 g/t	-	MDS 100 g/t
11	X-23 22 g/t	Diesel 10 g/t	-	MIBC 13 g/t	-	MDS 200 g/t

Cabe recalcar que el set se realiza por duplicado, teniendo un total de 22 cinéticas de flotación.

4.3.4 Flotaciones a distintos tipos de agua

El objetivo del set de pruebas de la Tabla 10 es determinar la influencia de los iones presentes en las aguas que provocan una disminución de la flotabilidad de molibdenita, para esto es que se realizan pruebas de espectrofotometría, técnica que proporciona información acerca de la cantidad del ion presente en el agua. Adicionalmente se busca estudiar posibilidad de tener una alternativa al agua recuperada.

Tabla 10: Set de pruebas flotaciones a distintos tipos de agua.

N° Prueba	Colector 1rio (g/t)	Colector 2rio (g/t)	Espumante (g/t)	P80 (µm)	pH	Sólidos (%)	Flujo de aire (L/min)	Tipo de Agua
1	22	10	13,0	240	10,5	38	6	Recuperada
2	22	10	13,0	240	10,5	38	6	Recuperada
3	22	10	13,0	240	10,5	38	6	Desmineralizada
4	22	10	13,0	240	10,5	38	6	Desmineralizada
5	22	10	13,0	240	10,5	38	6	Haulage
6	22	10	13,0	240	10,5	38	6	Haulage
7	22	10	13,0	240	10,5	38	6	De Mar
8	22	10	13,0	240	10,5	38	6	De Mar



5 RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico y pruebas de laboratorio. La finalidad de este ítem es generar una propuesta de operación óptima, para esto se analizaron la influencia de las variables operacionales, además de tratamiento y leyes.

5.1 Análisis data operacional

Según balance metalúrgico acumulado a junio del 2018 expuesto en la Tabla 11, se tiene una diferencia en contra de 2,27% de recuperación colectiva de molibdeno, esto a pesar de tener una ley de cabeza mayor de la esperada por programa. De aquí queda en evidencia que la recuperación no depende sólo de la ley de alimentación, sino de otros factores tales como grado de liberación, ocurrencia, variables operacionales, etc., y que serán estudiadas en esta sección.

Tabla 11: Recuperación colectiva de molibdeno y ley de cabeza ponderada real v/s programa de producción P0, enero 2017 a junio 2018.

Comparación	Ley Cabeza Molibdeno [%]	Recuperación colectiva [%]
Real	0,022	66,58
Programa P0	0,019	68,85

Además, la Figura 30 muestra a través de un boxplot la recuperación colectiva de molibdeno mensual en el periodo de estudio, la cual servirá de referencia y de punto de comparación para el análisis de las variables estudiadas.

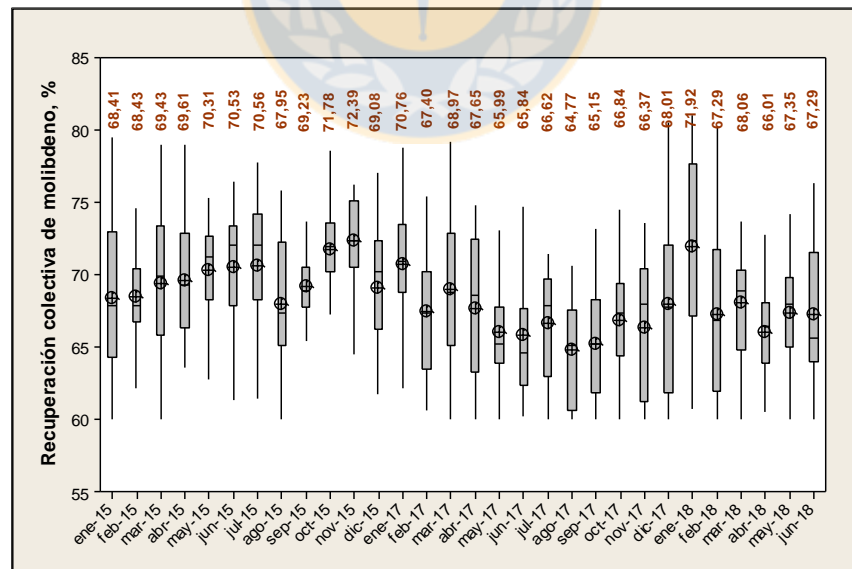


Figura 30: Datos de media mensual de recuperación colectiva de molibdeno planta concentradora periodo año 2015 y desde enero 2017 hasta junio 2018.

Se debe mencionar que el siguiente análisis fue realizado filtrando la data para lograr así representatividad de la información expuesta, en general los siguientes filtros fueron usados:

- Detenciones en la molienda.
- Sección B+C >700 t/h.
- Leyes de cabeza de molibdeno <0,022%.
- Recuperación colectiva de Mo >60 y <80.
- pH rougher <10,5.
- P80 ponderado <220 micrones.

5.1.1 Leyes de alimentación

La Figura 31 muestra mayores leyes de cabeza para la línea convencional proveniente de la mina subterránea en comparación a la SAG que procesa mineral proveniente de la mina Rajo. Además, se observa la tendencia a la disminución de las leyes de cabeza de Mo en la línea subterránea mientras que se ve poca variabilidad para la línea SAG, esto tiene relación directa con las zonas y métodos de extracción que poseen las respectivas líneas de tratamiento. Atribuyendo así la variabilidad de la convencional al tratamiento de carga secundaria y que queda de manifiesto en la Figura 65 del Anexo 5.

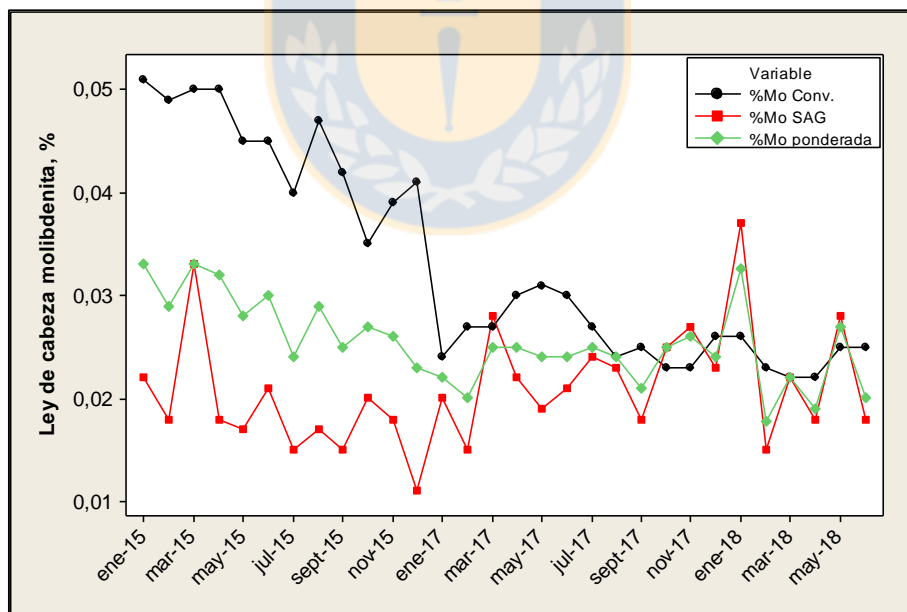


Figura 31: Ley de cabeza acumulada mensual de molibdeno por línea de tratamiento en los periodos 2015, 2017 hasta junio 2018.

La Figura 32 muestra que al aumentar la ley de cabeza aumenta la recuperación de Mo, esto al agrupar las recuperaciones según distintos rangos de leyes de cabeza. Cabe recalcar que la ley promedio del año en DAND es de 0,022%, con una recuperación de Mo promedio de 66%, no obstante a medida que aumenta la ley la recuperación aumenta (en condiciones óptimas) llegando a valores promedio de 72,04%.

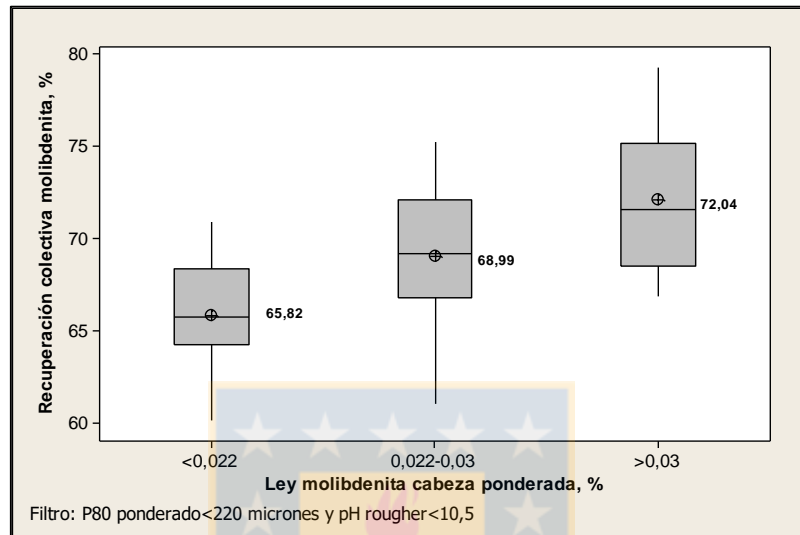


Figura 32: Recuperación de molibdeno colectiva en función de la ley de alimentación ponderada, periodos 2015, 2017 a junio 2018.

5.1.2 pH

De la Figura 33 se aprecia que el pH presenta gran variabilidad en las tres líneas de alimentación a la flotación, presentándose en varios meses sobre el estándar SIPP de 10,5.

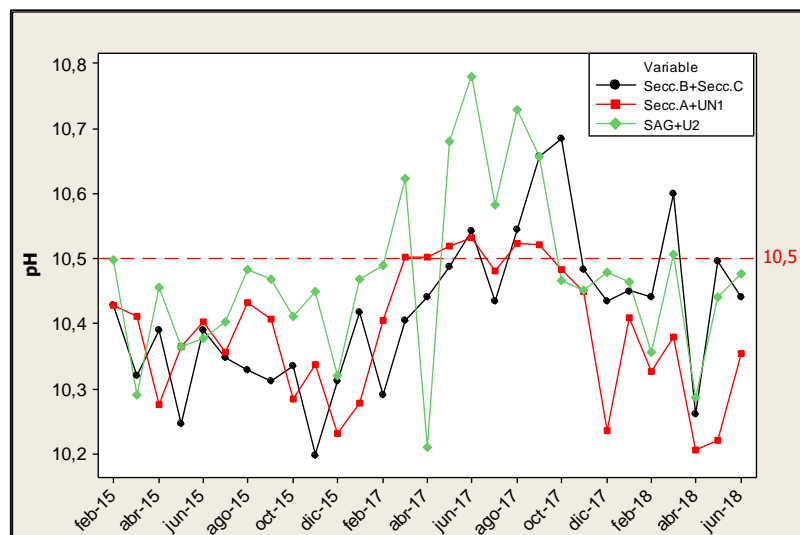


Figura 33: pH pulpa por línea de tratamiento, periodos 2015, 2017 hasta junio 2018.

Según la Figura 34 un aumento de pH genera un impacto de 2% de disminución de recuperación colectiva de molibdeno, hecho que hace sentido al analizar la recuperación colectiva en los meses de mayo a septiembre del 2017 (meses en los cuales no se cumple con el pH Std), en donde efectivamente se tiene ésta diferencia de recuperación de molibdeno con el resto de los meses. El aumento del pH en los meses de may-sep 2017 se atribuye al aumento de hierro en la alimentación (ver Figura 35), el cual corresponde mayoritariamente a pirita, esto según los resultados de los compuestos mensuales Anexo 6 Figuras 66 y 67.

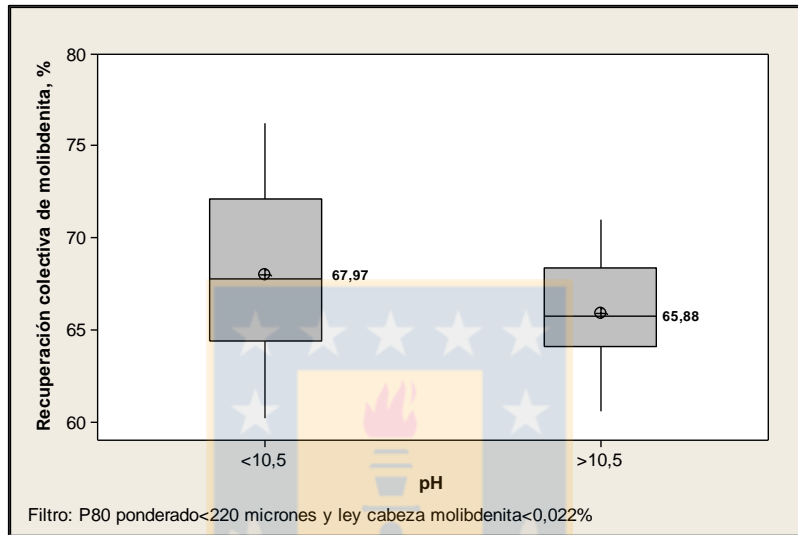


Figura 34: Recuperación de molibdeno en función del pH rougher ponderado, periodos 2015, 2017 a junio 2018.

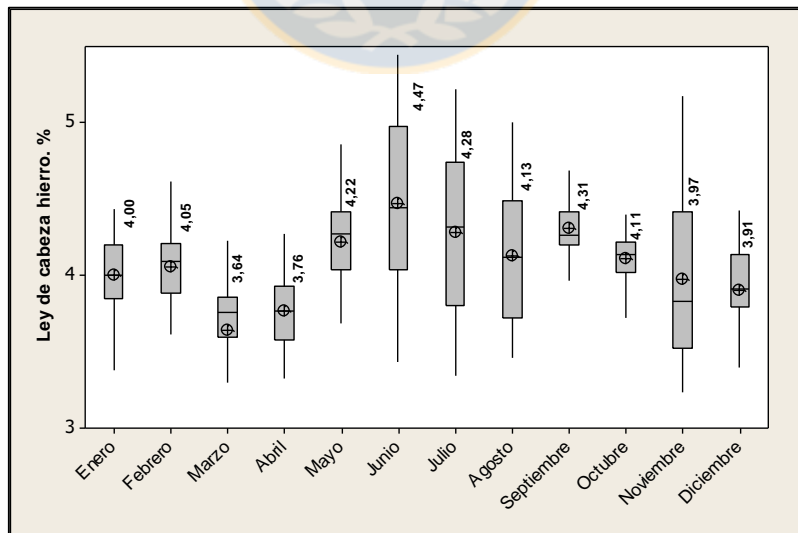


Figura 35: Ley de cabeza ponderada de hierro en el periodo 2017.

5.1.3 Tratamiento y P80

De la Figura 36, se tiene que la línea SAG+U2 es la que procesa la mayor cantidad de mineral, adjudicándose el 60% del tratamiento total de la planta. En relación a la molienda convencional, se tiene que cada una de sus secciones procesa aproximadamente 450 t/h, destacándose un mayor procesamiento en la sección C a fines del 2015 luego de la incorporación del molino de bolas 10.

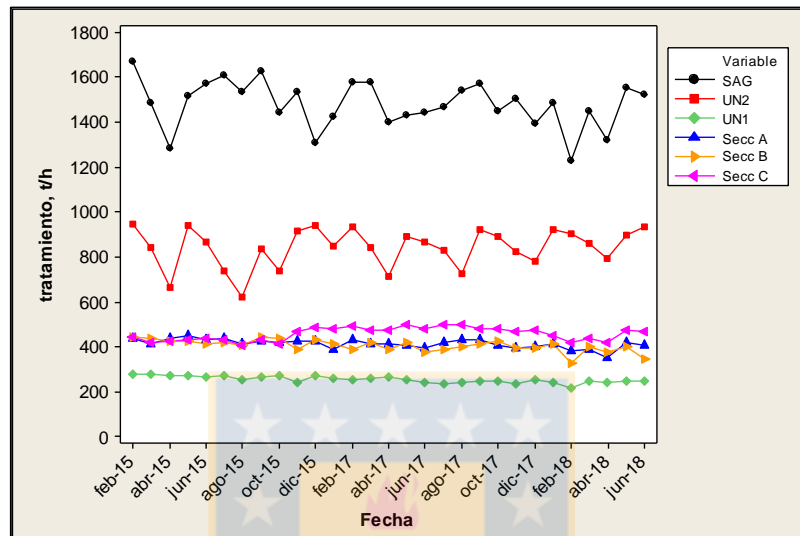


Figura 36: Tonalaje diferentes líneas de tratamiento periodo 2015, 2017 hasta junio 2018.

El principal problema de la rougher E es que el circuito de celdas tanque estaba destinado a procesar el mineral SAG (alto tonELAJE y P80 de 190 micrones). Por esta causa, surge la necesidad de bajar el P80 de la sección B-C a través de la incorporación del molino de bolas 10 en noviembre del 2015. En un comienzo se pretendía disminuir el P80 de la sección a 238 micrones, esto sin aumentar el tratamiento, condición que no se cumplió y que sumado a altos %sólido con el que operan los molinos de la sección B resultaron a partir de abril 2017 en un aumento sostenido del P80 de la sección B-C. En la Figura 37 se observan los P80 de las 3 líneas que alimentan a las flotaciones rougher A-B y E, se tiene que a la fecha la molienda convencional no está cumpliendo con el P80 establecido de 240 micrones. Además, se destaca el cumplimiento de la línea SAG desde fines del 2015, esto debido a la disminución del %sólidos por incorporación de líneas de agua.

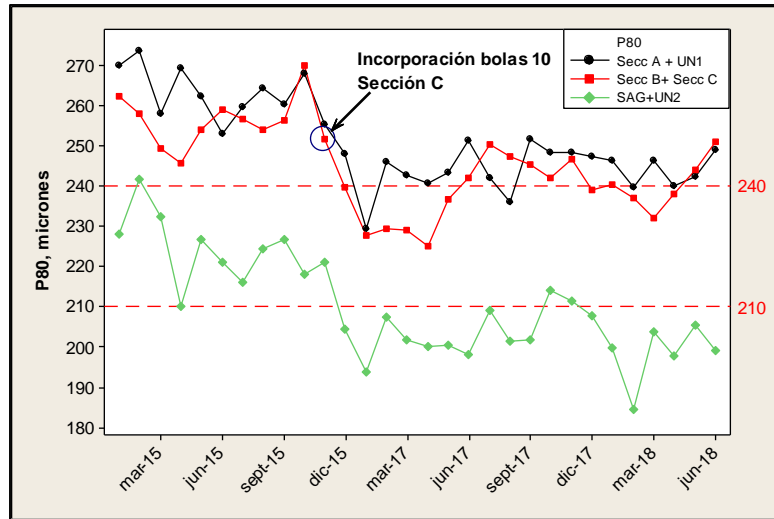


Figura 37: P80 por sección periodo 2015, 2017 a junio 2018.

En la Figura 38 se aprecia una disminución en la recuperación colectiva de molibdeno al aumentar el rango de P80 ponderado. Se tiene que un 75% de los datos de recuperación de Mo se encuentran sobre el 70% al operar a un P80 ponderado menor a 200 micrones y por tanto es en donde se debiesen enfocar los esfuerzos. La Tabla 12 resume la estadística descriptiva de los intervalos de P80 estudiados en la Figura 38.

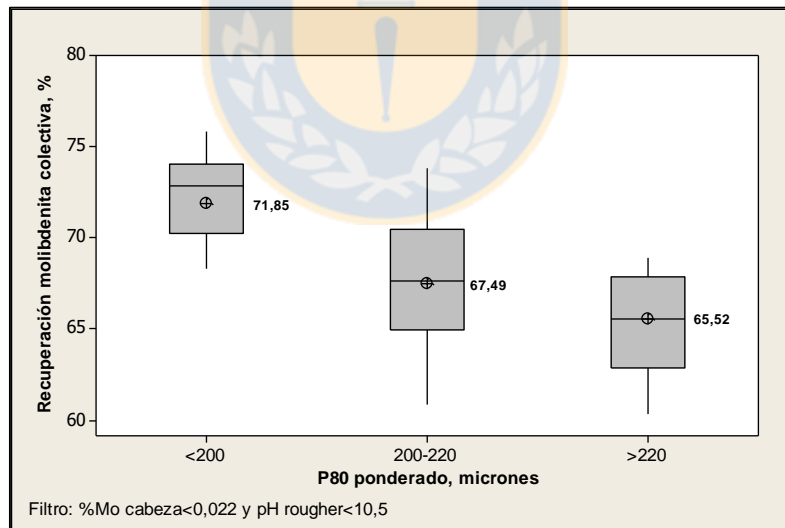


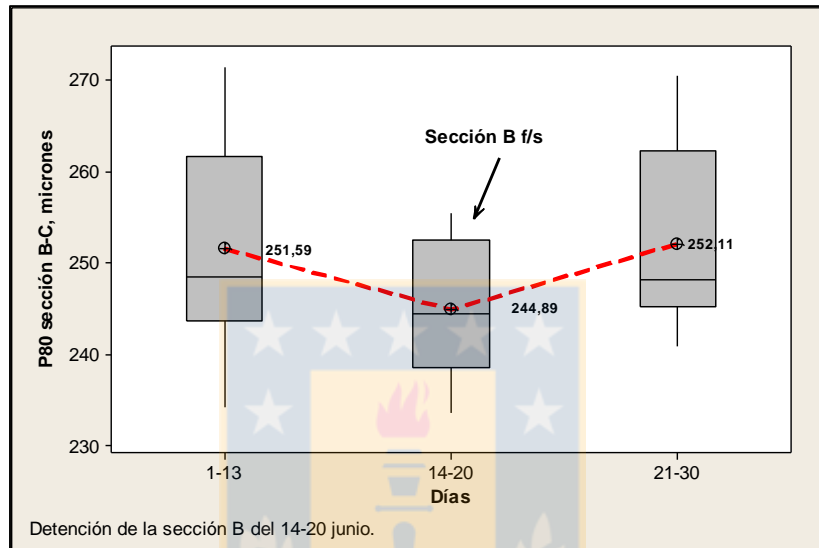
Figura 38: Recuperación colectiva de molibdeno en función del P80 ponderado, periodos 2015, 2017 hasta junio 2018.

Tabla 12: Estadística descriptiva de recuperación de molibdeno en función del P80 ponderado.

Rango P80	Media	Mediana	Desv. Std.	Máx	Min
<200	71,85	72,82	3,54	75,86	64,18
200-220	67,50	67,64	3,57	73,84	60,85
>220	65,52	65,56	2,68	68,86	60,30

En junio del 2018 debido a un problema operacional la sección B de la molienda convencional quedó fuera de servicio (f/s), quedando en operación únicamente la sección C del 14 al 20 de junio, de aquí se obtuvo evidencia clara que es la sección B la responsable del alto P80 que entra a la rougher E (sobre el Std. de $240\mu\text{m}$). La Figura 39 evidencia una diferencia de al menos 7 micrones cuando deja de operar la sección B (cumpliendo con estándares SIPP), resultando en al menos 5 puntos porcentuales de aumento de la recuperación de molibdeno colectivo.

(A)



(B)

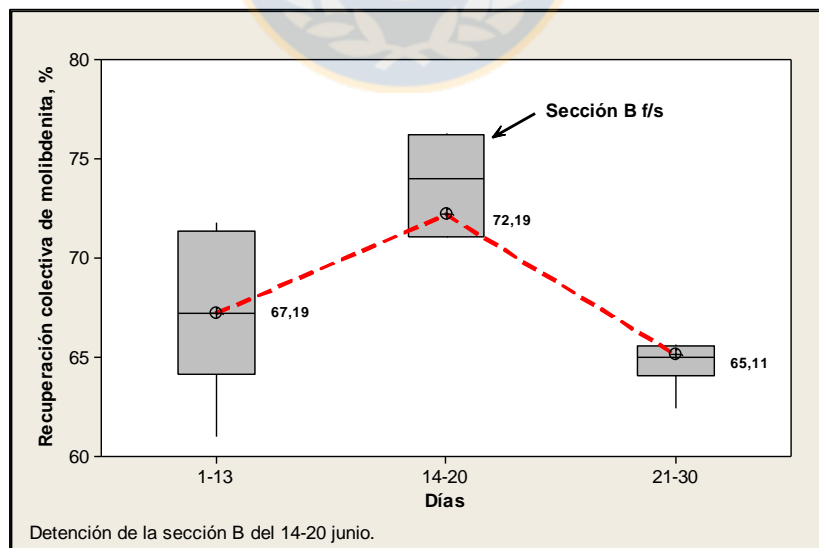
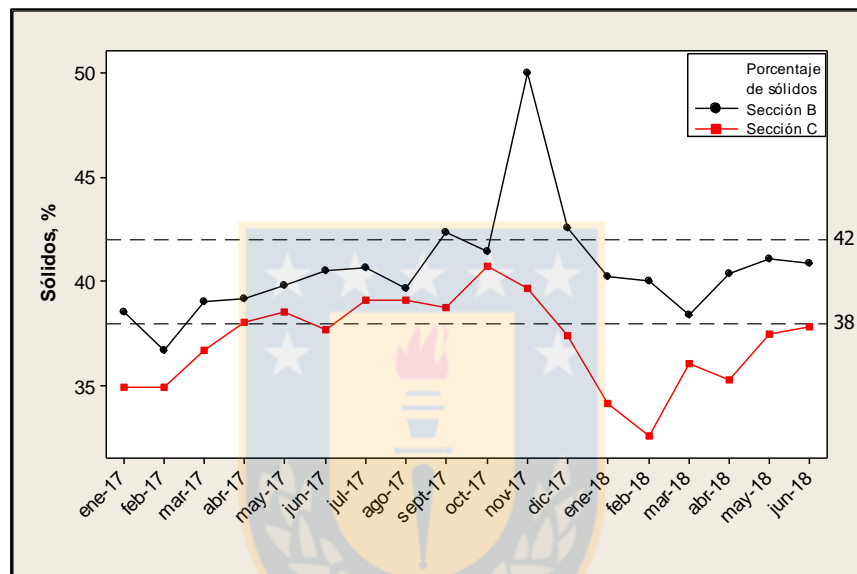


Figura 39: (A) P80 sección B-C y (B) recuperación colectiva de molibdeno en junio 2018.

5.1.4 Operación molinos y baterías de hidrociclones

Para complementar y comprobar la hipótesis de que es la sección B la responsable del alto P80 de la sección B-C, se realizó la revisión operacional del circuito de molienda convencional durante el periodo de estudio, de acá se observa que la sección C de molienda genera un %sólido menor, bajo un 38%, mientras que la sección B sobre 38% incluso más de 42%(Figura 40 A), mientras que el % $+65\#$ genera valores sobre 23% para la sección B y menores para la sección C(Figura 40 B), esto respecto al estándar definido por la SIPP de 23% $+65\text{Ty}\#$.

(A)



(B)

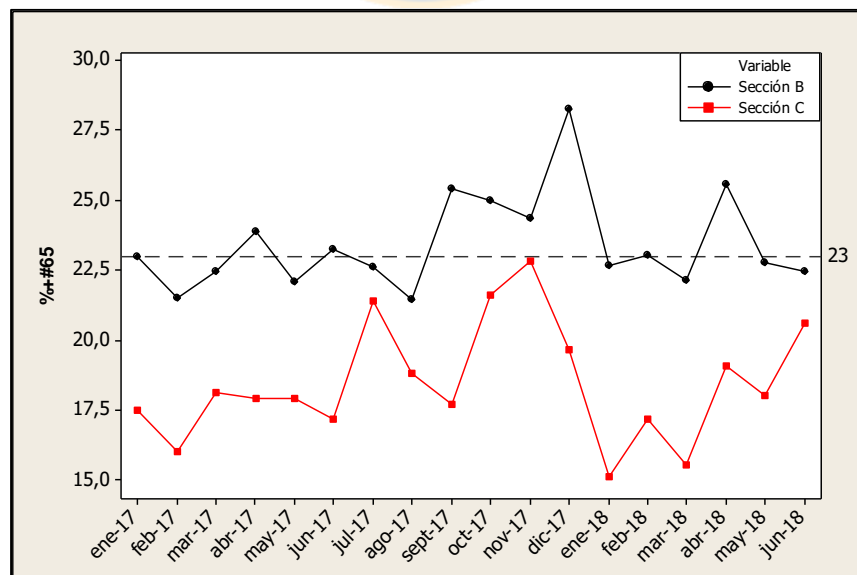


Figura 40: (A) %sólido y (B) %+65# sección B y C molienda convencional enero-17 a junio-18.

5.2 Resultados Microscopía óptica

Antes de introducirse en los resultados de las pruebas de flotación se hace necesario revelar la información obtenida en cuanto a la microscopía óptica, esto a modo de comprender en mayor profundidad el comportamiento del mineral de cabeza ante las distintas condiciones evaluadas.

En el análisis microscópico se observa asociaciones de ganga con cpy (calcopirita) de tamaños de 75 μm con gangas de 200 μm de diámetro promedio. Como se puede ver en micrografía representativa (Figura 41) la molibdenita se encuentra en tamaños suficientes para ser colectada, se presenta en un 88,89 % libre y un 11,11% asociado a ganga con superficies lo suficientemente visibles para ser colectadas, además no se observa oxidación superficial.

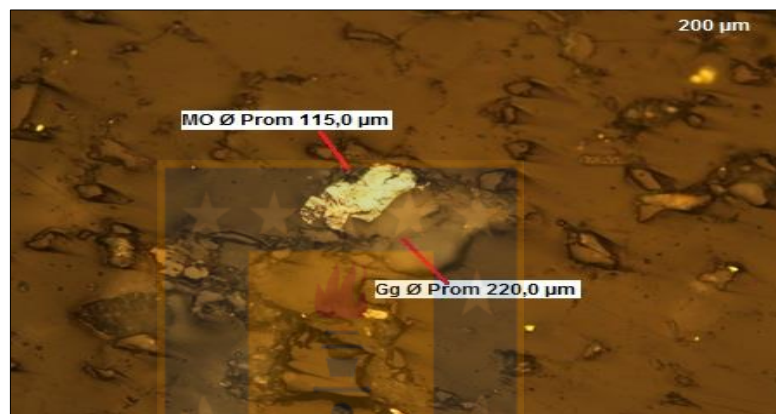


Figura 41: Asociación Mo/Ganga.



Figura 42: Asociación Cpy/Ganga.

5.3 Diseño experimental

5.3.1 Evaluación de resultados experimentales y determinación del modelo de primer orden

Es necesario mencionar que la Tabla 13 expone de forma sencilla los resultados de la Tabla 7, diferenciándose en que ésta expone la respuesta óptima, elegida a través del criterio metalúrgico entre la prueba original y el duplicado.

Tabla 13: Recuperación de elementos de interés correspondientes al diseño factorial.

N° Prueba	Rec. Mo (%)	Rec. Cu (%)	Rec. Fe (%)
1	71,08	65,52	34,88
2	67,35	80,39	34,20
3	72,24	86,56	38,31
4	69,19	80,86	35,52
5	68,15	84,65	37,28
6	64,02	57,06	26,52
7	59,99	60,90	29,67
8	71,52	84,88	38,95
9	70,23	86,47	34,59
10	68,90	57,84	31,21
11	69,99	84,16	37,70
12	70,04	59,04	32,34
13	72,03	85,93	35,44
14	72,76	70,70	32,55
15	70,68	73,30	34,28
16	67,37	84,42	35,98
17	67,65	82,24	31,08
18	73,43	84,42	40,40
19	69,29	70,49	35,59
	Procedimiento actual DAND		

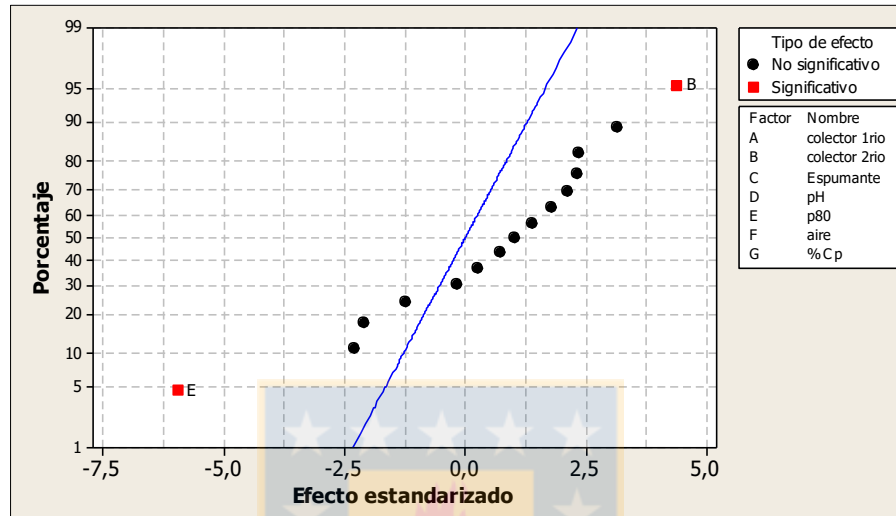
Para determinar de qué variable principal o combinación de éstas depende realmente la respuesta en el diseño factorial, se deben analizar sus efectos sobre la respuesta Rec. Mo obteniendo así los resultados expuestos en la Tabla 14.

Tabla 14: Efectos y coeficientes estimados para Rec. Mo (unidades codificadas).

Término	Efecto	Coef
Constante		69,400
colector 1rio	0,943	0,471
colector 2rio	2,953	1,476
Espumante	0,492	0,246
pH	-1,400	-0,700
P80	-4,008	-2,004
Aire	-0,825	-0,412
%Cp	2,110	1,055
colector 1rio*colector 2rio	1,435	0,717
colector 1rio*Espumante	1,565	0,783
colector 1rio*pH	0,167	0,084
colector 1rio*P80	-0,110	-0,055
colector 1rio*aire	-1,548	-0,774
colector 1rio*%Cp	1,592	0,796
colector 2rio*pH	1,208	0,604
colector 1rio*colector 2rio*pH	0,685	0,342
Pt Ctral		-0,897

La Tabla 14 en conjunto con el gráfico de probabilidad normal y el diagrama de Pareto (Figura 43) permiten identificar los efectos más importantes y descartar los que no lo son, así mismo, las variables más influyentes para la recuperación de molibdeno son el P80 y dosificación de diésel (para los rangos estudiados).

(A)



(B)

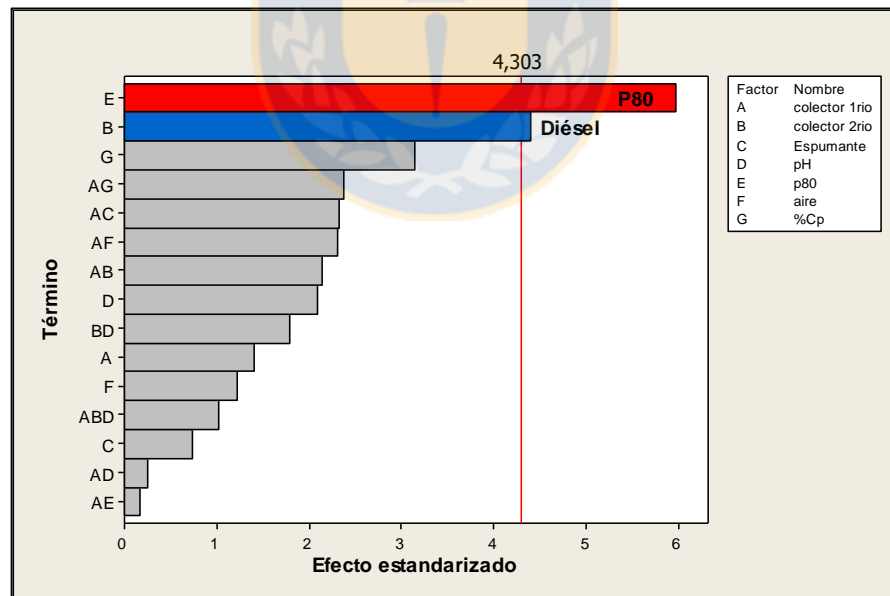


Figura 43: (A) Gráfica normal y (B) Pareto de efectos estandarizados para Rec.Mo.

Las interpretaciones de la gráfica normal y el diagrama de Pareto se realizan visualmente, por lo tanto, pueden resultar subjetivas. Para contrarrestar este posible problema se recurre al análisis

de varianza (Anova) para la recuperación de molibdeno, el cual debe confirmar las interpretaciones gráficas anteriores.

En la Tabla 15 se presenta el Anova de la variable de respuesta. En esta se ve que los efectos P80 y dosis de diésel tienen un Valor-P menor que 0,05, lo cual indica que es un efecto estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 95.

Tabla 15: Análisis de varianza para recuperación de molibdeno (unidades codificadas)

Fuente	GL	F	P
Efectos principales	7	10,42	0,090
colector 1 rio	1	1,96	0,296
colector 2 rio	1	19,27	0,048
Espumante	1	0,54	0,540
pH	1	4,33	0,173
P80	1	35,50	0,027
aire	1	1,50	0,345
%Cp	1	9,84	0,088
2-Interacciones de (No.) factores	7	3,45	0,243
colector 1 rio*colector 2 rio	1	4,55	0,166
colector 1 rio*Espumante	1	5,41	0,145
colector 1 rio*pH	1	0,06	0,827
colector 1 rio*P80	1	0,03	0,885
colector 1 rio*aire	1	5,29	0,148
colector 1 rio*%Cp	1	5,61	0,141
colector 2 rio*pH	1	3,22	0,214
3-Interacciones de (No.) factores	1	1,04	0,416
colector 1 rio*colector 2 rio*pH	1	1,04	0,416
Curvatura	1	1,12	0,400
Error residual	2		
Error puro	2		
Total	18		

Al graficar los 2 efectos principales que mayor efecto tienen sobre la RecMo (Figura 44), se aprecia que el aumento de la dosificación de diésel (X_2) afectan positivamente en la recuperación de molibdeno, mientras que el incremento del P80 (X_5) la afectan de manera negativa.

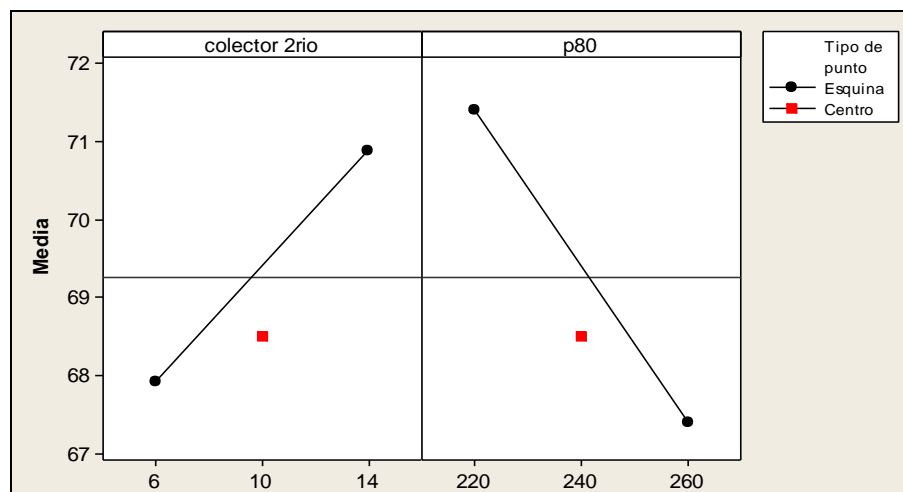


Figura 44: Gráfico de efectos principales para la recuperación de molibdeno.

La superficie de respuesta estimada para la recuperación de molibdeno en función de las variables significativas encontradas revela que no es completamente lineal (ver Figura 45), lo que evidencia la existencia de curvatura. El análisis de varianza previo no destacó la presencia de ella debido a que los factores manipulados impactaban en mayor grado en la respuesta y la curvatura, que vendría a representar el efecto de las perturbaciones del sistema, no incidió significativamente.

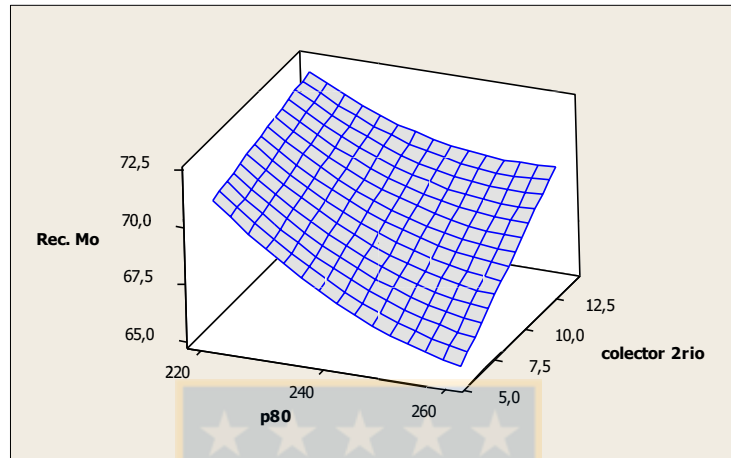


Figura 45: Gráfica de superficie de recuperación de molibdeno v/s colector secundario y P80.

El modelo matemático de primer orden a escala codificada obtenido es el siguiente:

$$Rec. Mo = 69,40 + 1,48 \cdot X_2 - 2,00 \cdot X_5 \quad (3)$$

Los signos del modelo indican el tipo de efecto de cada variable sobre la respuesta, es decir, un aumento en la dosis de diésel se traduce en un aumento de la recuperación de molibdeno, mientras que ante un aumento en el P80 la recuperación responderá con una disminución. La decodificación del modelo matemático se realizó con la ayuda de las fórmulas descritas en el Anexo 7, sección 8.7.1 obteniendo la siguiente ecuación:

$$Rec. Mo = 89,76 + 0,37 \cdot Z_2 - 0,10 \cdot Z_5 \quad (4)$$

Dónde Z_2 y Z_5 corresponden a dosis de diésel y P80 respectivamente, y está definida para los rangos de operación de [6-14]g/t y de [220-260] μ m.

En el gráfico, presente en la Figura 46, se exhibe que el modelo de la Ecuación 4 a pesar de describir la misma tendencia no es capaz de predecir correctamente las recuperaciones de molibdeno obtenidas para los distintos tratamientos vía análisis químico, esto queda en evidencia ya que la correlación obtenidas entre estas es de 0,74. De aquí se hace imprescindible la obtención de un modelo de segundo orden que se ajuste mejor a la realidad de las pruebas de laboratorio.

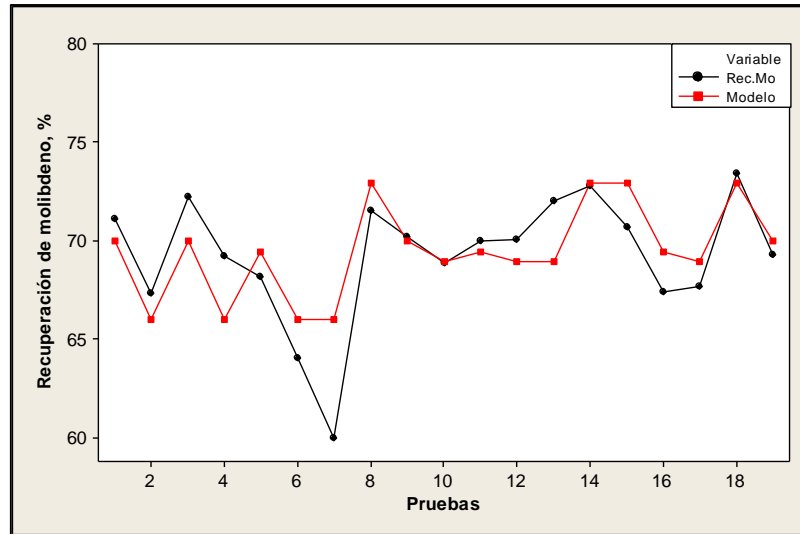


Figura 46: Contraste de recuperación de molibdeno obtenidas vía análisis químico y por el modelo lineal.

5.3.2 Determinación de puntos óptimos operacionales mediante modelo de segundo orden obtenido por diseño hexagonal

Las respuestas ajustadas obtenidas tanto para el diseño hexagonal como para las tres réplicas en los puntos centrales del mismo se encuentran en la Tabla 16.

Tabla 16: Recuperación de molibdeno en todas las pruebas del diseño hexagonal.

N° Prueba	Recuperación de molibdeno
1	70,52
2	69,30
3	68,24
4	69,76
5	70,15
6	70,60
7	68,15
8	69,99
9	67,37

El modelo de segundo orden a escala codificada que representa las respuestas obtenidas anteriormente está dado por la Ecuación 5.

$$Rec. Mo = 68,50 + 0,50 \cdot X_2 - 0,93 \cdot X_5 + 0,35 \cdot X_2 \cdot X_5 + 1,64 \cdot X_4^2 + 0,88 \cdot X_5^2 \quad (5)$$

La evaluación del modelo se llevó a cabo igual que para el modelo lineal, obteniéndose el siguiente modelo a escala real. Cabe recalcar que está definida para los mismos rangos operacionales del modelo lineal.

$$Rec. Mo = 225,8800 - 2,9750 \cdot Z_2 - 1,1462 \cdot Z_5 + 0,0044 \cdot Z_2 \cdot Z_5 + 0,1025 \cdot Z_2^2 + 0,0022 \cdot Z_5^2 \quad (6)$$

De la Figura 47 se aprecia un buen ajuste entre las recuperaciones obtenidas vía análisis químico, lo cual queda demostrado ya que poseen una correlación de 0,98. Esto se debe a que el modelo de segundo orden considera la curvatura de la respuesta.

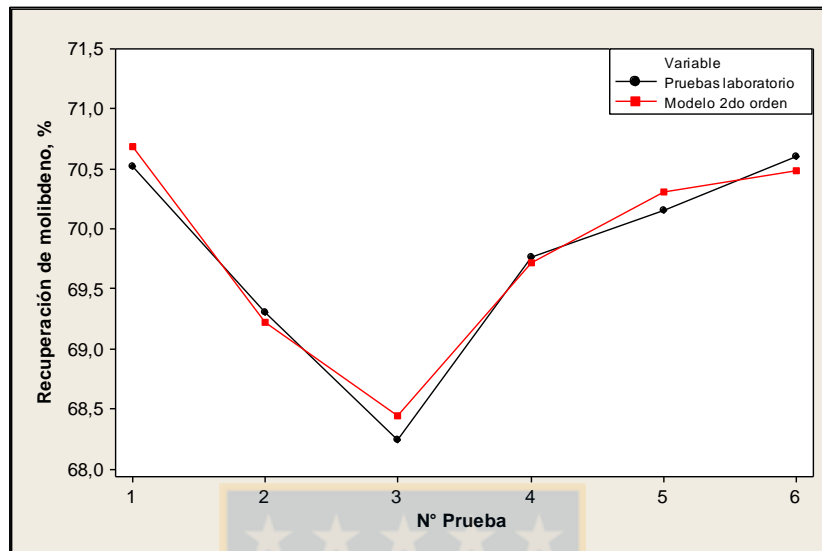


Figura 47: Contraste recuperación de molibdeno obtenida vía análisis químico y por el modelo de segundo orden.

El análisis de máximos y mínimos a la Ecuación 5, se realizó mediante la discriminación de los signos de los coeficientes cuadráticos de la matriz Hessiana (procedimiento descrito en el Anexo 7, sección 8.7.2). Estos presentaron los resultados que se muestran en la Tabla 17:

Tabla 17: Valor de los signos de los coeficientes cuadráticos de la matriz Hessiana

Coeficientes	Valor
b_{11}	3,28
b_{22}	5,07

Al consultar la Tabla 17, se puede concluir que la ecuación 3 presenta un máximo relativo y tiene forma de paraboloides invertido.

Tabla 18: Valor óptimo de las variables operacionales y recuperación de molibdeno respuesta óptima y Std.

Factor	Valor óptimo	Respuesta óptima	Respuesta Std.
Dosificación de diésel [g/t]	14	72,13%	68,57%
P80 [micrones]	220		

5.4 Evaluación cambio de reactivos

La evaluación de los distintos reactivos propuestos se hará en base a los parámetros recuperación al minuto 11 de flotación y constante cinética de Klimpel.

La Figura 48 presenta las recuperaciones de las especies Cu, Mo y Fe para el tiempo de flotación 11 (Std.) en función de los distintos reactivos propuestos. De aquí surgen como alternativas principalmente los reactivos espumantes en avance (AF 70 plus y MIBC) y depresores de Fe (JCC 469 y Metabisulfito). Para complementar lo expuesto recientemente, los reactivos empleados fueron separados según su clasificación, es decir, colector primario, secundario, espumante y depresante de hierro y fueron evaluados según sus parámetros cinéticos, las curvas cinéticas se encuentran adjuntas en el Anexo 8. En cuanto a los parámetros cinéticos presentados a continuación se debe mencionar que corresponden a la mejor prueba obtenida entre la original y su duplicado.

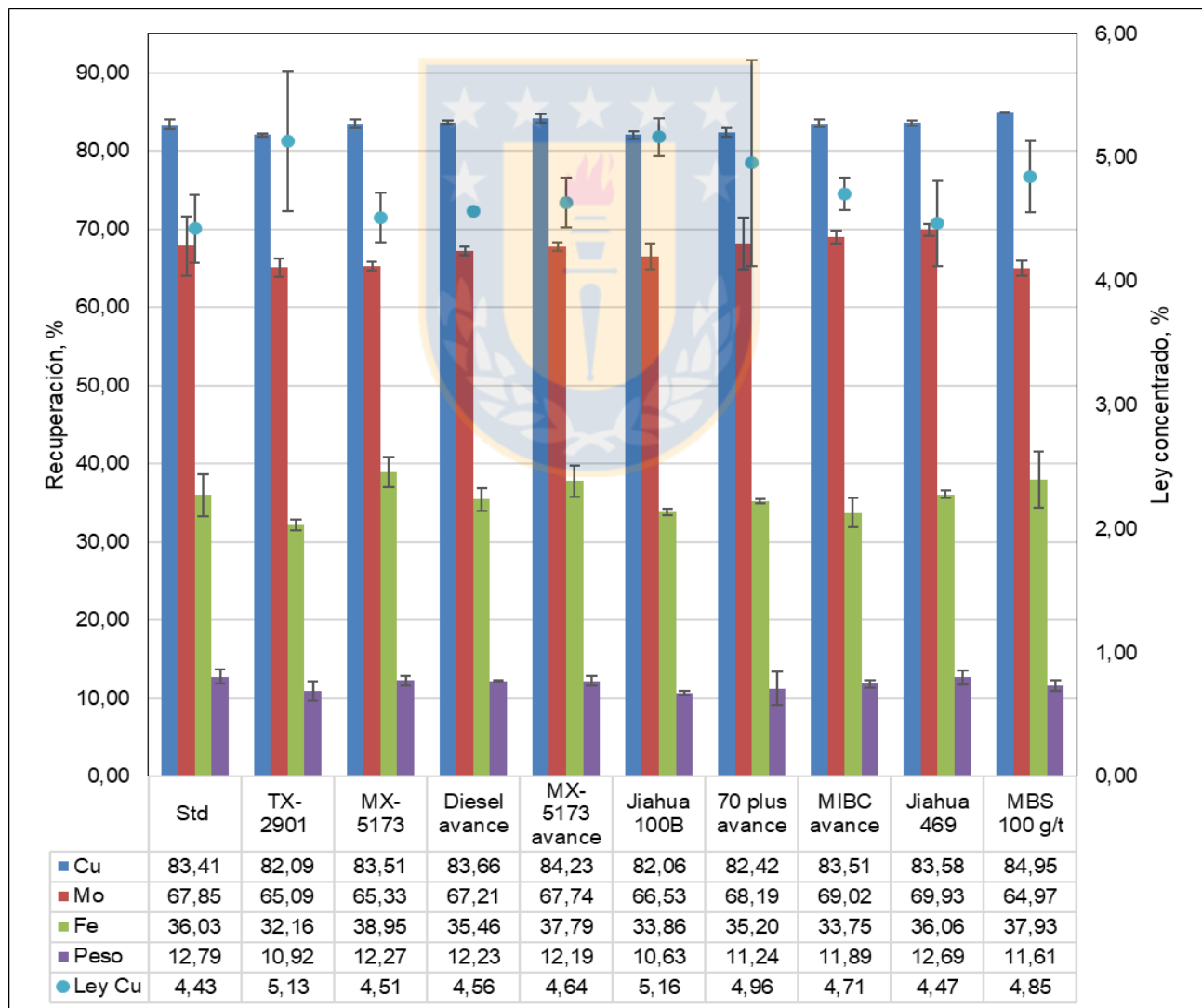


Figura 48: Valores promedio de recuperaciones Cu-Mo-Fe al minuto 11 de flotación con sus respectivas barras de error ($\pm\sigma$).

a) Colector primario:

En relación a la recuperación a los 11 minutos se encontró que el colector propuesto no presenta mejoras en cuanto la recuperación de sulfuros de Cu-Mo, teniendo en contra una diferencia de 2,76 puntos porcentuales de rec.mo en comparación a la prueba std. Las Figuras 49 y 50 respaldan lo expuesto al presentar menores parámetros cinéticos para las especies de interés al usar el colector de cobre TX-2901 y por tanto se descarta su uso como una alternativa al X-023.

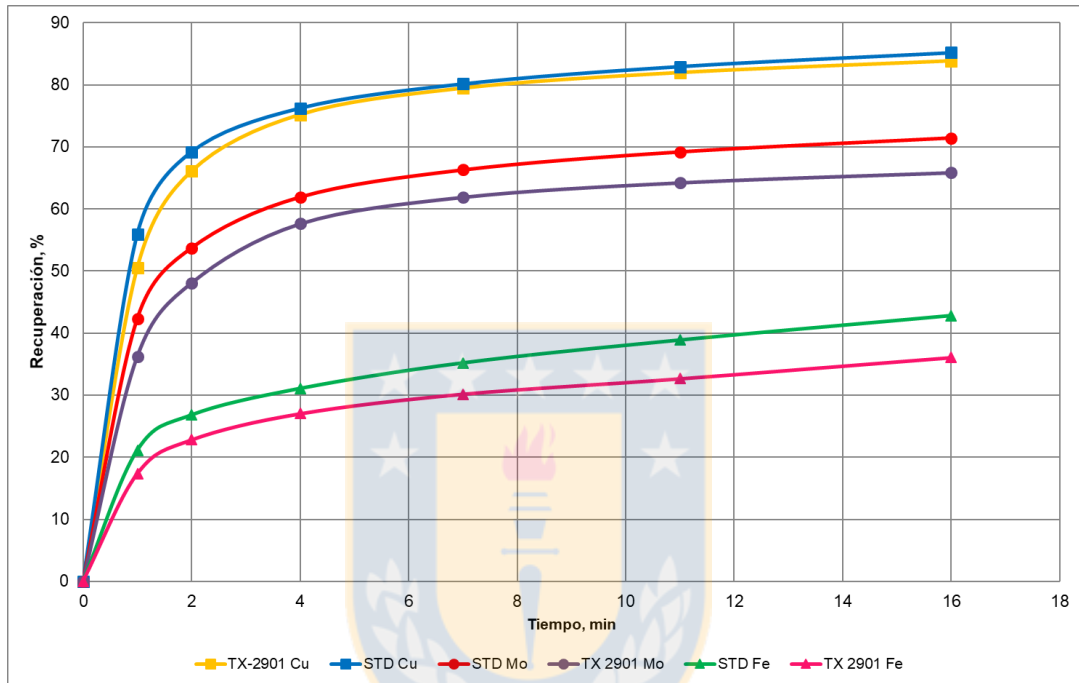
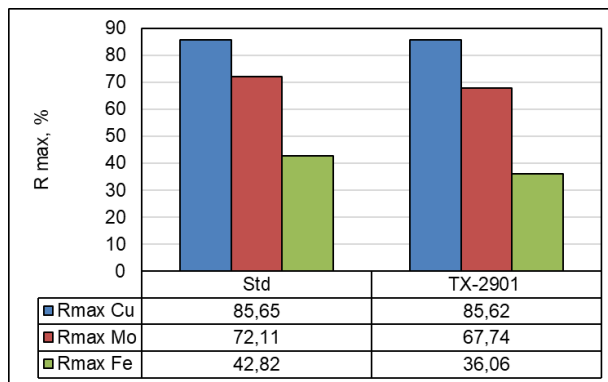


Figura 49: Curvas cinéticas de flotación para recuperación de Cu-Mo-Fe variando el colector primario.

(A)



(B)

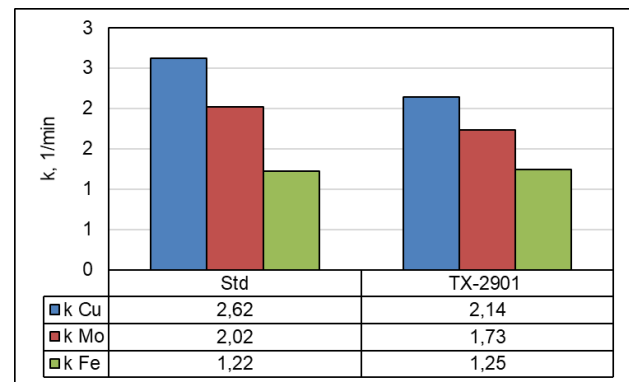
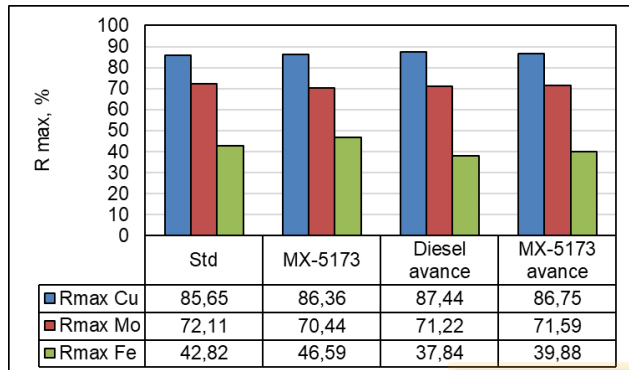


Figura 50: Parámetros cinéticos especies de interés para distintos colectores primarios: (A) R_{máx} y (B) constante de Klumpel.

b) Colector secundario:

En la Figura 51 se aprecia que las pruebas de laboratorio que abarcaron condiciones y reactivos distintos a la estándar no presentan mejores parámetros cinéticos y por tanto se descartan como alternativa del diésel.

(A)



(B)

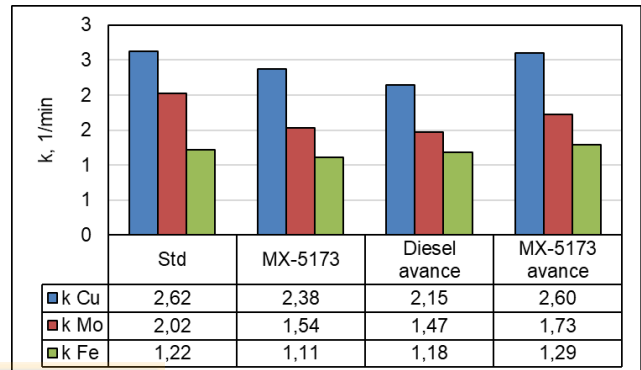
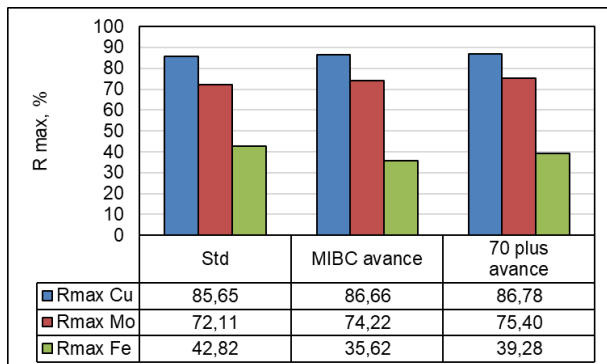


Figura 51: Parámetros cinéticos especies de interés para distintos colectores secundarios: (A) $R_{m\acute{a}x}$ y (B) constante de Klumpel.

c) Espumante:

De la Figura 48 se tiene que el uso del espumante MIBC en avance es la mejor opción en cuanto a recuperación de los elementos de interés, sin embargo la Figura 52 indica que este posee una menor constante cinética (en relación a la std.) y dado que el circuito rougher E es corto (pocas celdas) no se recomienda su uso. No obstante, se recomienda reemplazar la condición estándar por el uso de MIBC en avance para las líneas de flotación rougher A y B que poseen un arreglo con más celdas y por tanto se podría priorizar la recuperación por sobre la constante cinética.

(A)



(B)

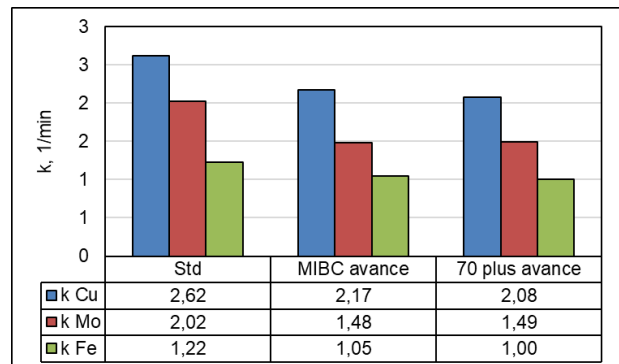
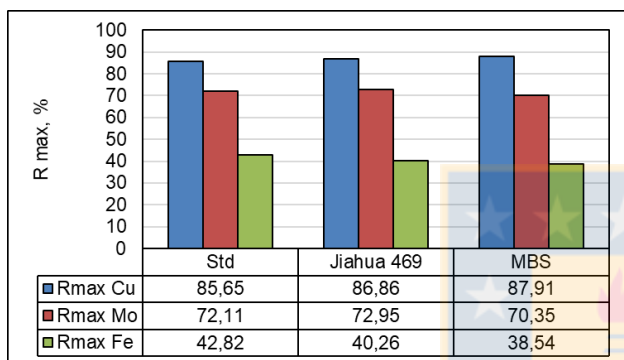


Figura 52: Parámetros cinéticos especies de interés para distintos espumantes: (A) $R_{m\acute{a}x}$ y (B) constante de Klumpel.

d) Depresante de hierro:

De la Figura 48 y 53 B se aprecia que el uso de MBS aumenta la recuperación de cobre y disminuye notablemente la constante cinética de molibdeno, traduciéndose en una menor recuperación de esta especie y por tanto se descarta su uso. En cuanto al Jiahua 469 se tiene de la Figura 53 que posee una menor cinética en comparación a la lograda con los reactivos std, aun así la recuperación de Mo al minuto 11 es de 2 pts. porcentuales por sobre la estándar y por tanto se recomienda evaluar mediante una tercera prueba de laboratorio. Además, se recomienda su evaluación para las líneas rougher A-B.

(A)



(B)

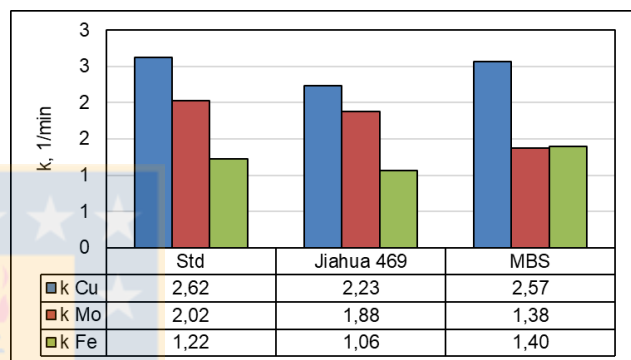


Figura 53: Parámetros cinéticos especies de interés para distintos depresores de hierro: (A) Rmáx y (B) constante de Klimpel.

5.5 Efecto de los iones presentes en las aguas sobre la recuperación de Mo

Finalmente, se estudió el efecto de los distintos iones presentes en las aguas sobre la recuperación de molibdeno. Para esto es necesario analizar la concentración de los iones medidos en las distintas aguas a través de espectrofotometría que se encuentran en la Tabla 19.

Tabla 19: Análisis por espectrofotometría

Iones (mg/L)	Fresca	Haulage	Recuperada	De Mar
Cloruro (Cl ⁻)	5	46	85	36000
Calcio (Ca ²⁺)	<10	430	530	700
Cobre (Cu ²⁺)	<0,05	1,5	0,09	0,14
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	<100	1750	1850	2850
Hierro (Fe ³⁺)	<0,05	0,08	0,1	<0,05
Manganeso (Mn ²⁺)	<0,1	30,2	5,95	0,16
Aluminio (Al ³⁺)	0,05	0,07	0,03	0,11
Magnesio (Mg ²⁺)	<5	152	49	1254

Orden creciente con las aguas que presentan mayor contenido de cationes de interés:

- [Ca²⁺]: Agua de mar > recuperada > Haulage > fresca.
- [Mg²⁺]: Agua de mar > Haulage > recuperada > fresca.

De la figura 54 se tiene que al tiempo 11 de flotación la prueba que entrega las mejores condiciones para la flotación de molibdenita es con agua fresca (superando al agua desmineralizada), esto es de esperarse, ya que presenta una concentración de cationes baja pero que es suficiente para favorecer la flotación de la molibdenita a través de la reducción de la repulsión electrostática entre las partículas negativamente cargadas y las burbujas, mientras según lo expuesto en la Sección 3.3.1 una alta concentración de estos iones es perjudicial para la flotabilidad de este metal. Tal como se esperaba, las recuperaciones de molibdeno con agua de mar y Haulage son las más bajas, esto debido a la alta concentración de iones calcio y magnesio. Además, se cumple lo expuesto en el marco teórico, en donde se tiene que el mayor consumo de cal lo presenta el agua de mar (Tabla 20). De la Figura 54 se aprecia que el agua Haulage es quien presenta la mayor recuperación de Fe y menor ley de concentrado de cobre.

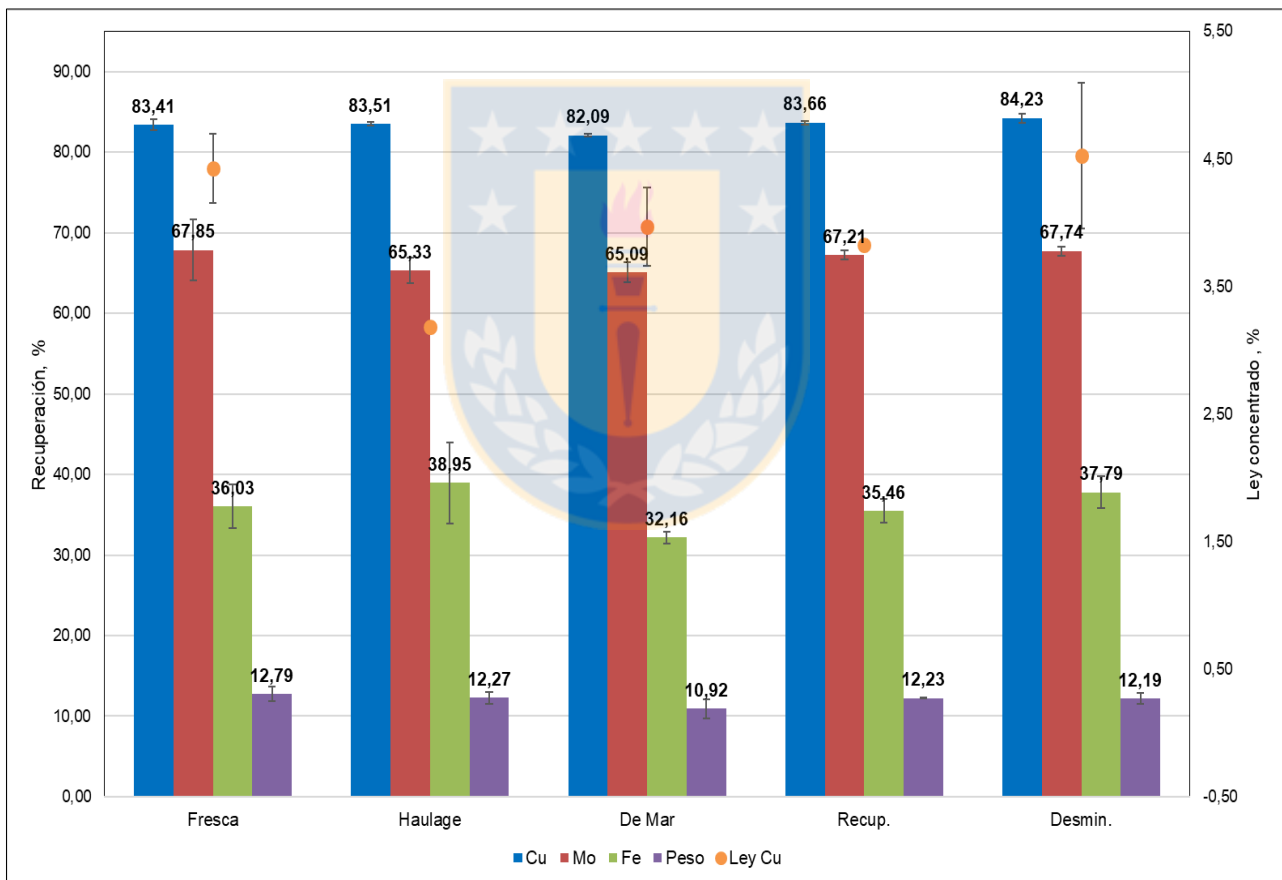


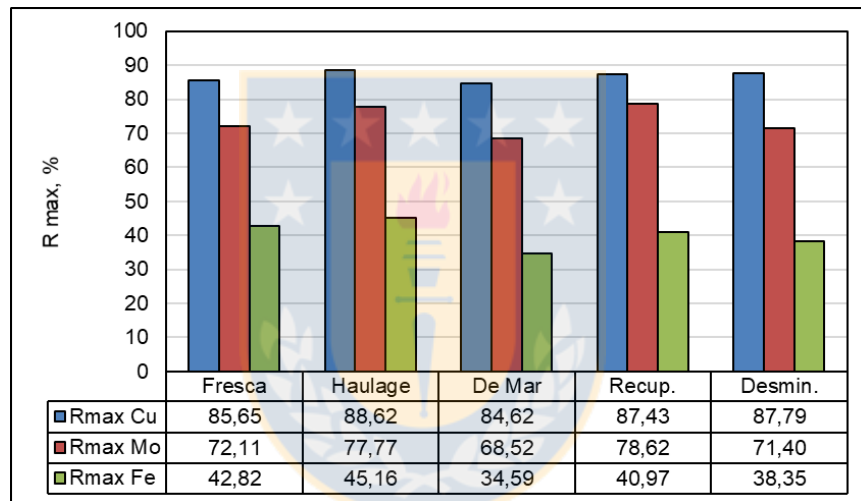
Figura 54: Recuperación al minuto 11 y consumo de cal para cada agua.

Tabla 20: Consumo de cal para los distintos tipos de agua

Agua	Fresca	Haulage	Recuperada	De Mar
Consumo de Cal (g)	0,88	2,79	1,28	11,20

La Figura 55 muestra los parámetros cinéticos para las especies mineralógicas de donde se aprecian mejores parámetros cinéticos de las especies Cu-Mo para las flotaciones realizadas con agua recuperada, esto se debe a la influencia de los iones presentes en el agua recuperada. En relación al uso de agua de mar se tiene que esta presenta las recuperaciones más bajas, adicionalmente se observa una fuerte depresión de pirita lo que se atribuye a la acción depresante conjunta de los diferentes cationes presentes en este medio, siendo más influyentes el calcio y el magnesio, los cuales a pH alcalinos generan productos de hidrólisis hidrofílicos que se adsorben en la superficie de la pirita e inducen a una mayor depresión de este mineral. Las altas recuperaciones de Fe con agua Haulage quedan explicadas por la disminución de la diferencia entre las constantes cinéticas de Cu-Fe y por la presencia de cobre en solución (posible activación de pirita).

(A)



(B)

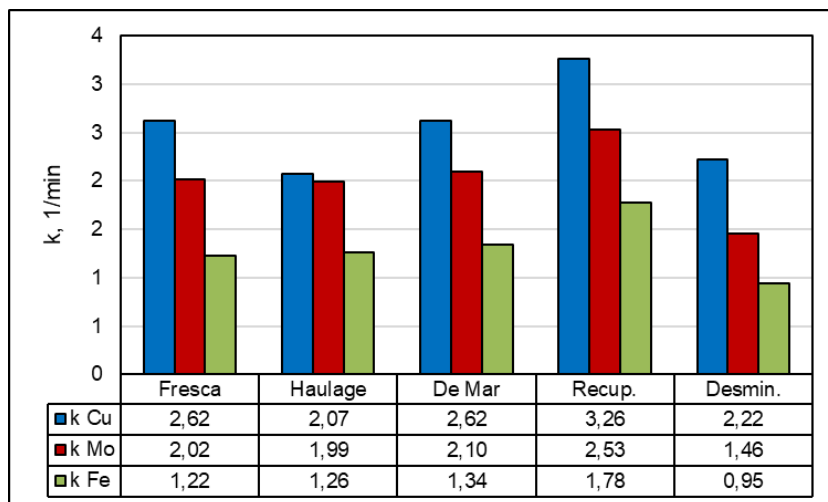


Figura 55: Parámetros cinéticos para los distintos tipos de agua: (A) Recuperación infinita y (B) constante cinética de Klimpel.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- 1) 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.
- 2) Del diseño 2^{k-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) En cuanto a las pruebas de laboratorio destinadas a cambiar la actual combinatoria de reactivos de DAND, no se encontraron reactivos que mejoraran la condición actual de flotación para el mineral subterráneo. Sin embargo, se propone triplicado para corroborar diferencias en cuanto a parámetros cinéticos y recuperación de molibdeno entre la formulación Std de DAND y el JCC 469 que justifiquen una eventual prueba industrial.
- 4) Las pruebas de flotación bajo distintos tipos de agua comprobaron que el agua desmineralizada y fresca presentan las mayores recuperaciones de las especies de interés, no obstante, en términos de viabilidad el agua recuperada sigue siendo la mejor opción para DAND.

Dada la dificultad de lograr un P80 de 220 micrones en la línea subterránea, esto debido a que requiere de una completa evaluación a nivel operacional y del funcionamiento de equipos de la sección B es que se propone una evaluación industrial aumentando la dosis de diésel de 10 a 14 g/t.

6.2 Recomendaciones

A continuación se presentan una serie de recomendaciones operacionales, las cuales fueron planteadas en base al estudio realizado y la recopilación de información de la experiencia de los operadores de terreno.

- 1) Evaluar cambio en las baterías de Hidrociclones de la sección B, ya que cada 1 ½ presentan caída de fondo plano.
- 2) Evaluar sinergia entre reactivos MIBC avance y JCC 469 frente a la actual formulación de DAND.
- 3) Evaluar reactivos MIBC en avance y JCC 469 en líneas de flotación rougher A-B.
- 4) Evaluar presencia de reactivos residuales en agua recuperada y su efecto sobre la recuperación de molibdenita.
- 5) Se recomienda instalar líneas de adición de reactivos independientes entre mineral SAG y Convencional, debido a que actualmente se le adiciona la misma dosificación de reactivos, a pesar de que estos minerales son distintos en su composición.
- 6) Control de pH de acuerdo con mineral de Fe alimentado.
- 7) Emulsión de espumante con diésel previo al proceso de flotación.
- 8) Mayor control sobre estado de los componentes de las celdas para descartar bajas de recuperación por temas mecánicos: Sensores de nivel, impulsor, launder, rotor, estator, etc. Mal estado de estos componentes provoca un menor rendimiento de la celda pudiendo afectar a la recuperación. El hecho de tener un control en cuanto a las inspecciones podría evitar inclusive problemas de limpieza en launders que provocan que se embanque la celda.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Aaltonen, A., Liipo, J. & Nevalato, L. (2011). *Outotec internal publication*.
- Aminpro Chile. (2016). *Programa de modelación y optimización del circuito de flotación bulk para Andina*. Reporte final.
- Bustos, César. (2018). *Análisis estadístico de datos de recuperación de molibdeno*. GRMD-SGEO-055-2018. Los Andes.
- Castro, S. (2013). *Pérdidas de molibdeno en flotación colectiva y selectiva*. FLOTAMIN. Viña del mar.
- Castro, S. (2014). *Aguas salinas en la flotación de minerales Cu-Mo: depresión de molibdenita por ion magnesio*. Flotamin. Viña del mar.
- Castro, S., Rioseco, P., Laskowski, J. (2012). *Depression of molybdenite in sea water*.
- Chander, S. & Fuerstenau, D. (1972). *On the natural floatability of molybdenite*. Trans. AIME, 252, pp.6269.
- Fardis NAKHAEI, Mehdi IRANNAJAD. (2013). *Investigation of effective parameters for molybdenite recovery from porphyry copper ores in industrial flotation circuit*.
- Floor, A.J. (2006). *The chemical composition of sea water*.
- Fuentes, Carlos. (2006). *Factibilidad Técnica de Etapa Pre-Rougher en Planta Flotación Colectiva Codelco Chile División Andina*. Informe de Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil Metalúrgico. Universidad de Concepción.
- Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2004). *Análisis y diseño de experimentos*, 2da ed. México, Mc Graw-Hill. 591 p.
- Gutiérrez, L. (2017). *Presentaciones curso de flotación*. Departamento de Ingeniería.
- Informe Final Proyecto IM2 02/13. (2014). *Aumento de recuperación Mo DAND*.
- Landero, S.A. (2010). *Efecto del agua de mar sobre la flotación de minerales sulfurados de cobre*. Concepción-Chile: Memoria de Título, Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- Lenkovskaya, G. L. and Stepanov, B. A. (1969). *Effect of the ion composition of the pulp on molybdenite floatation*. Chem. Abstr., 71: 15222
- Lin Zhou. (2010). *Molybdenite Flotation*

- López, A. Madrid, I, Reyes, J. Sánchez, A. Song, S. (2005). *Propiedades de la interfase molibdenita/solución acuosa y su relación con la flotabilidad del mineral*. Área de Ingeniería de Minerales, Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- López Pedro. (2008). *Caracterización y optimización de flotación a nivel laboratorio del mineral de cobre de la minera Candelaria*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Metalurgista. Lima, Perú.
- López-Valdivieso, A. (1980). *A study of the electrokinetics and flotation properties of talc and molybdenite (Master of Science)*. South Dakota: South Dakota of Mines and Technology.
- López-Valdivieso, A., Madrid-Ortega, I..V.-P.D., Yang, B. & Song, S. (2012). *The heterogeneity on the basal plane of molybdenite: Its effect on molybdenite floatability and calcium ion adsorption*. In 9th International Mineral Processing Conference, PROCEMIN. Santiago, 2012.
- Méndez, X. (2013). *Optimización en la recuperación metalúrgica de molibdeno, Planta I Las Tórtolas, División Los Bronces – Angloamerican*. Proyecto para optar al título de ingeniero civil en metalurgia extractiva. Valparaíso.
- Mesías, D. (2017). *Optimización del proceso de flotación Rougher E. Codelco División Andina*. Informe de Memoria de Título para optar al Título de Ingeniero Civil Metalúrgico. Concepción.
- Morales, Fernando. (2017). *Estudio del efecto de las interacciones del sistema 'agua de mar – cal' en procesamiento de minerales*. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención metalurgia extractiva. Santiago de Chile.
- Seco, Dania. (2017). *Caracterización y optimización de columnas de flotación 5 y 6 Codelco Chile, División Andina*. Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniera Civil Química. Santiago, Chile.
- Southerland, K. y Wark, I. (1995). *"Principles of Flotation"*. Melbourne.
- Tabares, J. et al. (2006). *Surface properties and floatability of molybdenite*. In Proceedings of 2006 China-Mexico Workshop on Minerals Particle Technology.
- Uribe, Lina. (2017). *Efecto del agua de mar en la recuperación de minerales de cobre-molibdeno por procesos de flotación*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ingeniería Metalúrgica. Dpto. de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería Universidad de Concepción.

8 ANEXOS

8.1 Microscopía óptica

8.1.1 Procedimiento

- 1) Se debe tener una muestra representativa, para esto el producto de molienda una vez secada se hace pasar por el divisor rotatorio de la Figura 26 A, de aquí se obtiene una muestra homogénea.
- 2) Se masan 2 g de la muestra mineral, la cual se pasa por la malla 140, esto por ser mineral de cabeza.
- 3) Masar 3 g de trans optic y rolear con la muestra bajo la malla con que se disgregó, hasta homogenizar completamente. Luego agregar la parte de la muestra que quedó sobre la malla y rolear 60 veces por punta.
- 4) Cargar la muestra a cilindro briqueteador e identificarla.
- 5) Aplicar silicona al molde, separador y embolo más corto.
- 6) Cargar en molde de 1 1/4" la totalidad de la muestra.
- 7) Pesar 4 g de Polvo Transóptico y cubrir con el toda la superficie de la muestra en el molde, depositar un disco de papel con la identificación de la muestra en el interior del cilindro. Terminar de cubrir dicha identificación con el resto de Polvo Transóptico.
- 8) Aplicar presión hidráulica hasta que el manómetro indique 3200 Psi., mantener la presión hasta que el termómetro indique una temperatura de 160°C. Alcanzada la temperatura, elevar la presión hasta 5000 Psi por 30 minutos. Apagar el calentador y retirarlo.
- 9) Instalar los enfriadores alrededor del molde, utilizando agua para el enfriamiento de los mismos y así apurar el proceso de bajar la temperatura. Es necesaria que la presión se mantenga en 5000 PSI.
- 10) Retirar la briqueta del molde. Cuando el molde alcance alrededor de 48°C, según el termómetro, quitar la presión hidráulica y los enfriadores.
- 11) Biselado:
 - Biselar a 45°, aproximadamente, los bordes de la briqueta con lija de 240 grit en mesa pulidora a baja velocidad.
 - Biselar a 90°, Desbastar la briqueta, a baja velocidad, utilizando lija de 400 grit al agua para retirar el plástico y dejar descubierto la superficie mineral a analizar.
 - Biselar a 90° Pulido la briqueta, a baja velocidad, utilizando lija de 600 grit al agua 90° hasta lograr una superficie libre de rayas a simple vista.

Obs: Entre cada etapa de biselado lavar la briqueeta con solución de detergente suave, no abrasivo, con la ayuda de un paño de franela suave y luego se enjuaga bajo el chorro de agua corriente. Secarla con papel absorbente de textura suave.

12) Pulido:

- Pulir la briqueeta con pasta diamante de 6 μm en paño pulidor a alta velocidad por 4 minutos.
- Pulir la briqueeta con pasta diamante de 1 μm en paño pulidor a alta velocidad por 6 minutos.
- Pulido Final: Terminar el pulido de la briqueeta frotando esta en paño pulidor impregnado con solución Alúmina Gamma 0,05 μm por 1 minuto.

Obs: En cada etapa adicionar aceite de pulido para refrigerar y lubricar el paño. Al final de cada pulido lavar y secar la briqueeta para retirar el aceite.









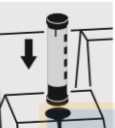
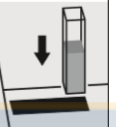
- 13) Finalmente lavar y secar la briqueeta, meter en estufa por 3 minutos para un mejor secado y minimizar la oxidación superficial de las especies presentes en la briqueeta quedando está en condiciones para ser analizada.









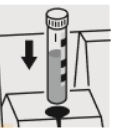


Figura 56: Briqueeta mineral de cabeza correa 10B.

8.2 Manual Spectroquant nova 60

(A)

Spectroquant		Aluminio		14825	
				Test con reactivos	
Intervalo	0,10 – 1,20 mg/l de Al cubeta de 10 mm				
de medida:	0,05 – 0,60 mg/l de Al cubeta de 20 mm				
	0,020 – 0,200 mg/l de Al cubeta de 50 mm				
	Es posible expresar los resultados también en mmol/l.				
					
Comprobar el valor del pH de la muestra, intervalo previsto: pH 3–10	En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sódico o de ácido sulfúrico.	Pipetear 5,0 ml de la muestra en un tubo de ensayo.	Añadir 1 microcuchara azul rasa de Al-1 al tubo de ensayo y disolver la sustancia sólida.	Añadir 1,2 ml de Al-2 con la pipeta y mezclar.	
					
Añadir 0,25 ml de Al-3 con la pipeta y mezclar.	Tiempo de reacción: 2 minutos	Añadir la solución en la cubeta correspondiente.	Seleccionar el método con el AutoSelector.	Colocar la cubeta en el compartimento para cubetas.	

(B)

Spectroquant		Calcio		00858	
				Test en cubetas	
Intervalo	10 – 250 mg/l de Ca				
de medida:	14 – 350 mg/l de CaO				
	25 – 624 mg/l de CaCO ₃				
	Es posible expresar los resultados también en mmol/l.				
					
Comprobar el valor del pH de la muestra, intervalo previsto: pH 3–9	En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sódico o resp. de ácido clorhídrico.	Pipetear 1,0 ml de la muestra en una cubeta de reacción y mezclar.	Añadir 1,0 ml de Ca-1K con la pipeta, cerrar con la tapa roscada y mezclar.		Tiempo de reacción: 3 minutos
					
Añadir 0,50 ml de Ca-2K con la pipeta, cerrar con la tapa roscada y mezclar.	Colocar la cubeta en el compartimento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.				

(C)

Spectroquant		Cloro		00597	
		Determinación de cloro libre y cloro (total)		Test en cubetas	
Intervalo	0,05 – 7,50 mg/l de Cl ₂				
de medida:	Es posible expresar los resultados también en mmol/l.				
Determinación de cloro (total)					
					
Pipetear 5,0 ml de la muestra en una cubeta redonda.	Añadir 1 microcuchara azul rasa de Cl ₂ -1, cerrar la cubeta con la tapa roscada.	Agitar intensamente la cubeta para disolver la sustancia sólida.	Añadir 2 gotas de Cl ₂ -2, cerrar con la tapa roscada y mezclar.	Tiempo de reacción: 1 minuto	
					
Colocar la cubeta en el compartimento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.					

(D)

Spectroquant		Cobre		14553	
				Test en cubetas	
Intervalo	0,05 – 8,00 mg/l de Cu				
de medida:	Es posible expresar los resultados también en mmol/l.				
					
Comprobar el valor del pH de la muestra, intervalo previsto: pH 4–10	En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sódico o resp. de ácido sulfúrico.	Pipetear 5,0 ml de la muestra en una cubeta de reacción y mezclar.	Añadir 5 gotas de Cu-1K, cerrar con la tapa roscada y mezclar.		Tiempo de reacción: 5 minutos
					
Colocar la cubeta en el compartimento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.					


Figura 57: Instructivo de trabajo para (A) aluminio, (B) calcio, (C) cloro y (D) cobre.

(A)

Hierro
Determinación de hierro(II) y hierro(III)
14896
Test en cubetas

Intervalo: 0,0–50,0 mg/l de Fe
de medida: Es posible expresar los resultados también en mmol/l en Fe(II) y Fe(III).

Determinación de hierro(II) e III



Comprobar el valor del pH de la muestra, intervalo previsto: pH 3–8.

En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sodico o resp. de ácido clorhídrico.

Pipetear 1,0 ml de la muestra en una cubeta de reacción y mezclar.

Añadir 1 dosis de Fe-OK con el diluclorador azul, cerrar con la tapa rosca.


Agitar intensamente la cubeta para disolver la sustancia sólida.

Si se desea diferenciar entre hierro(II) y hierro(III), medir por separado hierro(II) y luego hierro(III). Antes de la medición ajustar el fotómetro para mediciones por diferencia por descomposición de la muestra.

Tiempo de reacción: 5 minutos.

Colocar la cubeta en el compartimiento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.

Determinación de hierro(II)



Comprobar el valor del pH de la muestra, intervalo previsto: pH 3–8.

En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sodico o resp. de ácido clorhídrico.

Pipetear 1,0 ml de la muestra en una cubeta de reacción, cerrar con la tapa rosca y mezclar.

Tiempo de reacción: 5 minutos.

Colocar la cubeta en el compartimiento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.

(B)

Manganeso
00816
Test en cubetas

Intervalo: 0,10–5,00 mg/l de Mn
de medida: Es posible expresar los resultados también en mmol/l.



Comprobar el valor del pH de la muestra, intervalo previsto: pH 2–7.

En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sodico o resp. de ácido sulfúrico.

Pipetear 7,0 ml de la muestra en una cubeta de reacción, cerrar con la tapa rosca y mezclar.

Añadir 2 gotas de Mn-1K, cerrar con la tapa rosca y mezclar.

Tiempo de reacción: 2 minutos.



Añadir 3 gotas de Mn-2K, cerrar con la tapa rosca y mezclar.

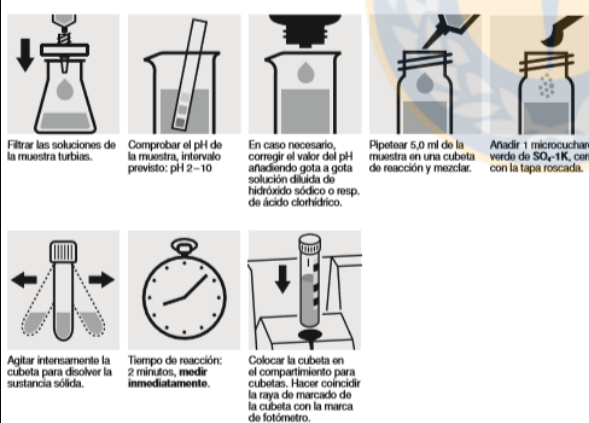
Tiempo de reacción: 5 minutos.

Colocar la cubeta en el compartimiento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.

(C)

Sulfatos
14548
Test en cubetas

Intervalo: 5–250 mg/l de SO₄
de medida: Es posible expresar los resultados también en mmol/l.



Filtrar las soluciones de la muestra turbias.

Comprobar el pH de la muestra, intervalo previsto: pH 2–10.

En caso necesario, corregir el valor del pH añadiendo gota a gota solución diluida de hidróxido sodico o resp. de ácido clorhídrico.

Pipetear 5,0 ml de la muestra en una cubeta de reacción y mezclar.

Añadir 1 microcucharda verde de SO₄-1K, cerrar con la tapa rosca.

Agitar intensamente la cubeta para disolver la sustancia sólida.

Tiempo de reacción: 2 minutos, medir inmediatamente.

Colocar la cubeta en el compartimiento para cubetas. Hacer coincidir la raya de marcado de la cubeta con la marca de fotómetro.

Figura 58: Instructivo de trabajo para (A) hierro, (B) manganeso y (C) sulfatos.

8.3 Estándares SIPP

SUPERINTENDENCIA INGENIERIA DE PROCESOS							
PARAMETROS OPERACIONALES FLOTACIÓN COLECTIVA							
F l o t a c i o n C o l e c t i v a	Planta de Flotación Colectiva					OBSERVACIONES:	
	Reactivos	Colector X-23	Diesel	Espumante MIBC			<p>* El flujo de agua en las columnas va de 160 a 180 m³/h con agua recuperada. En el caso de agua Fresca 140 a 160 m³/h</p> <p>El estándar de pH en la flotación rougher es 10.5, no obstante se deja un rango para que el operador pueda gestionar el proceso en función de aumento del %Fe que ingresa al sistema</p> <p>*El nivel de pulpa va en función del estándar de 1-1.2 m de nivel de espuma</p> <p>* La batería Vulco Vertimill 1 tiene un apex de 90 y vortex de 155 mm con un desgaste máximo de 10 mm</p> <p>* La batería Vulco Vertimill 2 tiene un apex de 80 y vortex de 140 mm con un desgaste máximo de 10 mm</p>
		[g/l]	[g/l]	[g/l]			
	22	10	13				
	Rougher	Concentrado		Cola		Alimentación	
		%Cu	%sólido	%Cu	%sólido	%sólido	
		6 a 8	26 a 34	< 0,09	38 a 44	38 a 42	
	pH	Molienda SAG y UN2	Molienda Conv.	Columnas			
		10.5 a 10.8	10.5 a 10.6	12.2 a 12.4			
	Columna	Agua de lavado C1-4	Aire C1-2	Aire C3-4	Nivel C1-2	Nivel C3-4	
[m ³ /h]		[m ³ /h]	[m ³ /h]	[%]	[%]		
160 a 180		550 a 650	450 a 550	54 a 60	48 a 56		
Agua de lavado C5-6		Aire C5-6	Nivel C5-6				
[m ³ /h]		[m ³ /h]	[%]				
100 a 130		460 a 530	45 a 54				
Alimentación		Concentrado		Cola			
%Cu	%Cu	%#325	%Cu				
6 a 8	28.5 a 30	70 a 75	2,5 a 4,5				
Vertimill	Potencia V1	Potencia V2	V1 -#325	V2 -#325	Presión BHCs 1-2		
	kW	kW	%P.A	%P.A	PSI		
	750	850	60 a 70	55 a 65	8 a 13		
Scavenger	Concentrado	Cola					
	%Cu	%Cu	%Mo				
	6 a 8	<0,15	<0,02				
Utilización Profit					Mayor a 90%		

Figura 59: Nota Interna: Definición de Estándares Operacionales GPLA 27-07-2016

8.4 Diseño experimental procedimiento

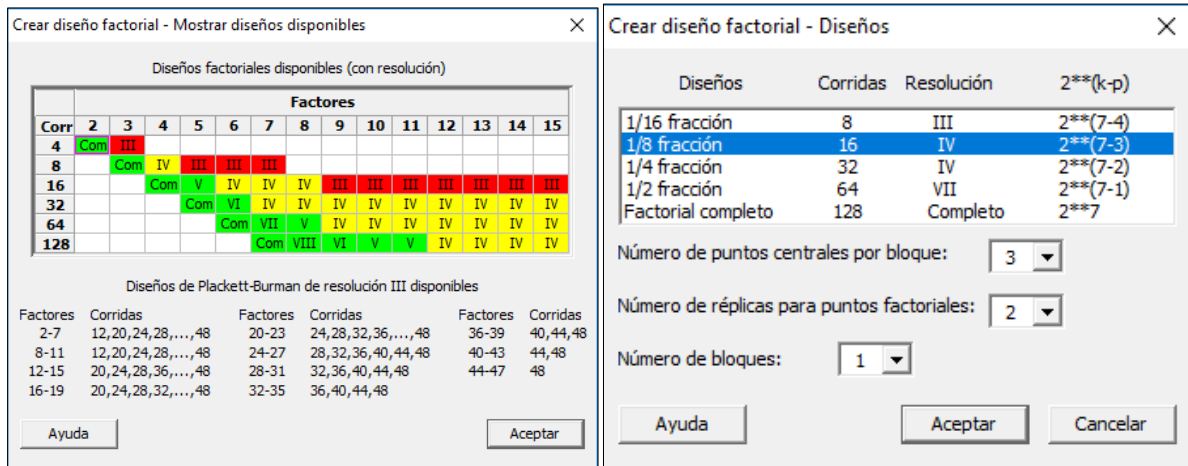


Figura 60: Selección diseño factorial software Minitab 16

Tabla 21: Respuesta para cada prueba del diseño de experimentos

N° Prueba	ESCALA REAL							Rec. Mo (%)
	Colector 1rio (g/t)	Colector 2rio (g/t)	Espumante (g/t)	P80 (µm)	pH	%Cp	Flujo de aire (L/min)	
1	18	6	7,0	220	9,5	34	3	71,08
2	18	6	19,0	260	9,5	42	9	67,35
3	26	6	19,0	220	11,5	42	3	72,24
4	26	6	7,0	260	9,5	42	3	69,19
5	22	10	13,0	240	10,5	38	6	68,15
6	18	6	19,0	260	11,5	34	3	64,02
7	26	6	7,0	260	11,5	34	9	59,99
8	18	14	19	220	9,5	42	3	71,52
9	18	6	7,0	220	11,5	42	9	70,23
10	18	14	7,0	260	9,5	34	9	68,90
11	22	10	13,0	240	10,5	38	6	69,99
12	26	14	19,0	260	9,5	34	3	70,04
13	26	14	19,0	260	11,5	42	9	72,03
14	26	14	7,0	220	11,5	34	3	72,76
15	18	14	19,0	220	11,5	34	9	70,68
16	22	10	13,0	240	10,5	38	6	67,37
17	18	14	7,0	260	11,5	42	3	67,65
18	26	14	7,0	220	9,5	42	9	73,43
19	26	6	19,0	220	9,5	34	9	69,29
	Receta actual DAND							

8.5 Mineralogía

8.5.1 Modelo geometalúrgico de flotación de molibdeno

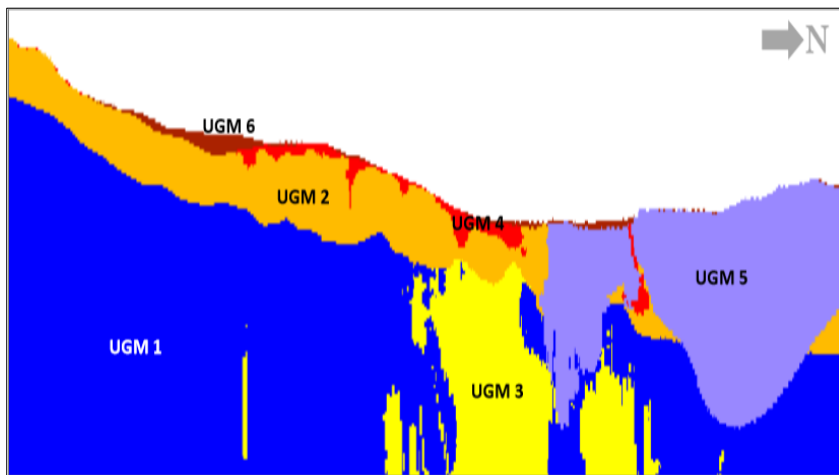


Figura 61: Sección longitudinal NE-SW esquemática definición de Unidades para RecMo

Tabla 22: Características principales de cada UGM

UGM-1: Roca Primaria. Esta unidad no presenta efecto de alteración supérgena.
UGM-2: Roca Secundaria con bajo efecto de alteración supérgena con contenidos de limonitas < 0,5% del total de la roca. Presenta fracturas abiertas
UGM-3: Pórfidos en Roca Primaria. Esta unidad, asociada a zonas de bajas leyes de cobre
UGM-4: Roca Secundaria con mayor efecto de alteración supérgena. Su alteración principal es cuarzo-sericítica
UGM-5: Incluye las unidades de roca Chimeneas Riolítica y Chimenea Dacítica (CHRIOL y CHDAC), unidades estériles o de muy baja ley.
UGM-6: Incluye el material no consolidado denominado sobrecarga y que cubre la roca in situ, corresponde a una unidad estéril o de muy baja ley

Rec. Mo según UGM

UGM1>UGM3>UGM2>UGM4>UGM5>UGM6

8.5.2 Zonas de extracción mina Rajo

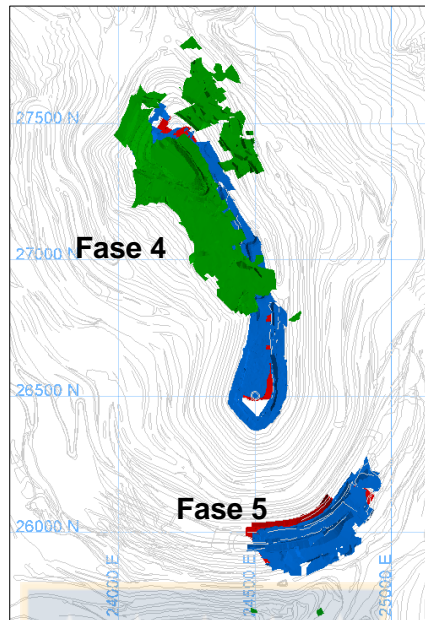


Figura 62: Fases mina Rajo (Geometalúrgia DAND).

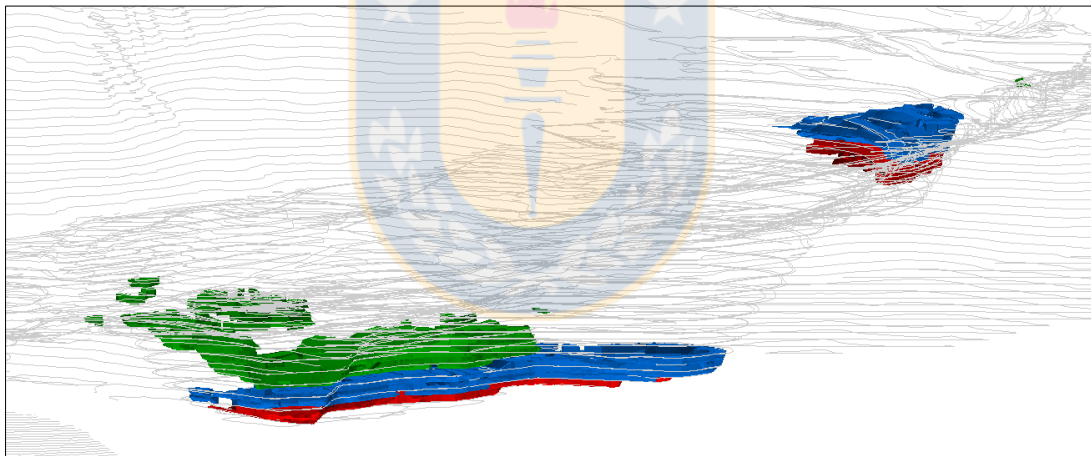


Figura 63: Vista 3D mina Rajo y zonas de extracción por periodo (Geometalúrgia DAND).

8.5.3 Zonas de extracción mina Subterránea

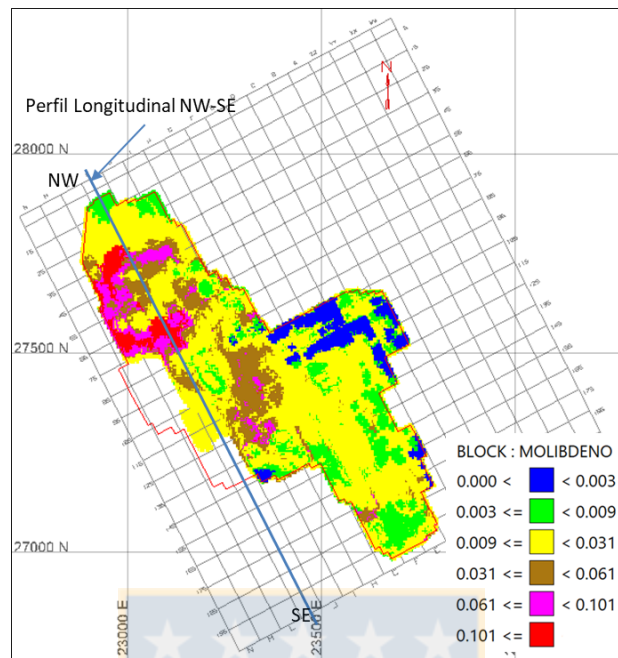


Figura 64: Distribución de molibdeno en la mina subterránea (III Panel) según modelo de bloque 2017 y considerando la altura teórica al mes de octubre 2018 (Geometalúrgia DAND).

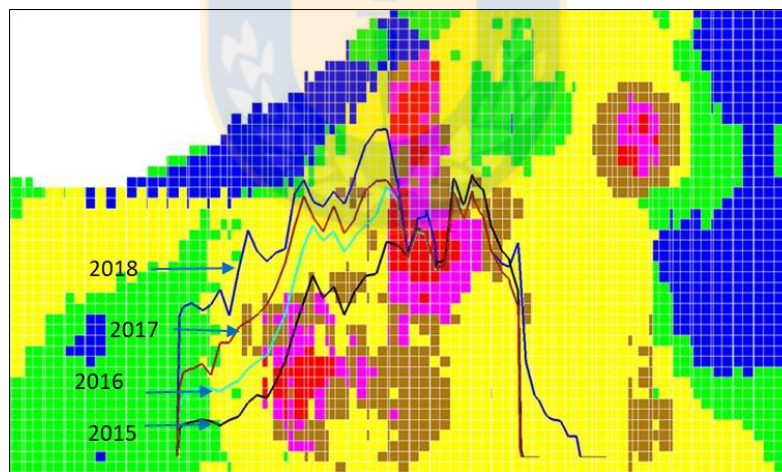


Figura 65: Perfil Longitudinal NW-SE con la estimación del %Molibdeno en el sector que actualmente está en producción (Geometalúrgia DAND).

8.6 Informe de compuestos mensuales

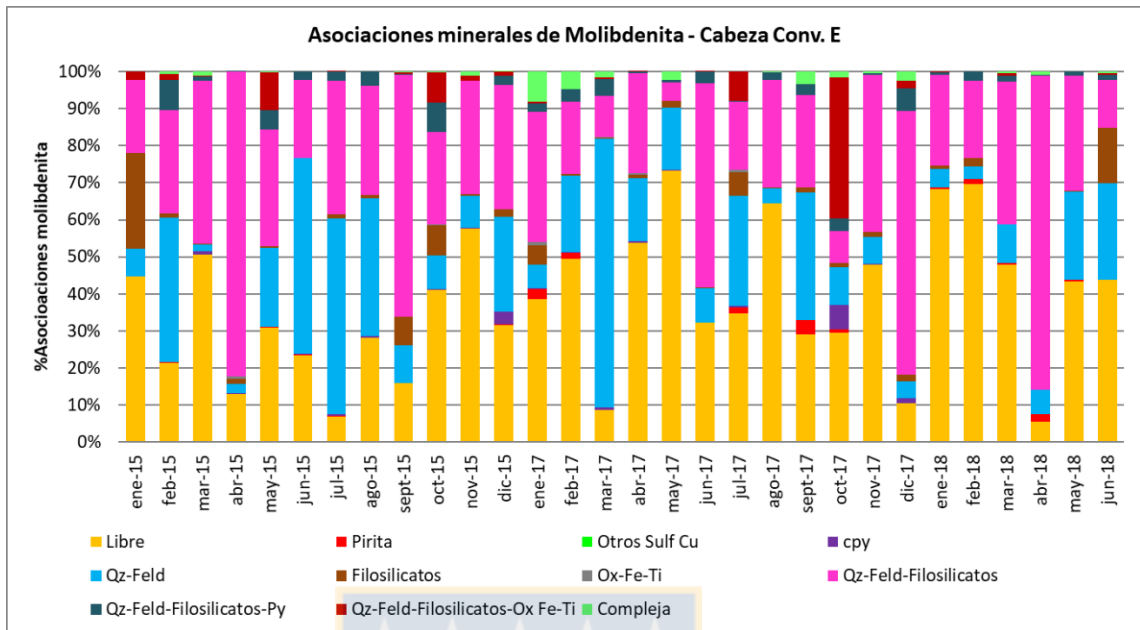


Figura 66: Asociaciones minerales 2015, 2017 a Junio 2018 (Geometalúrgia DAND).

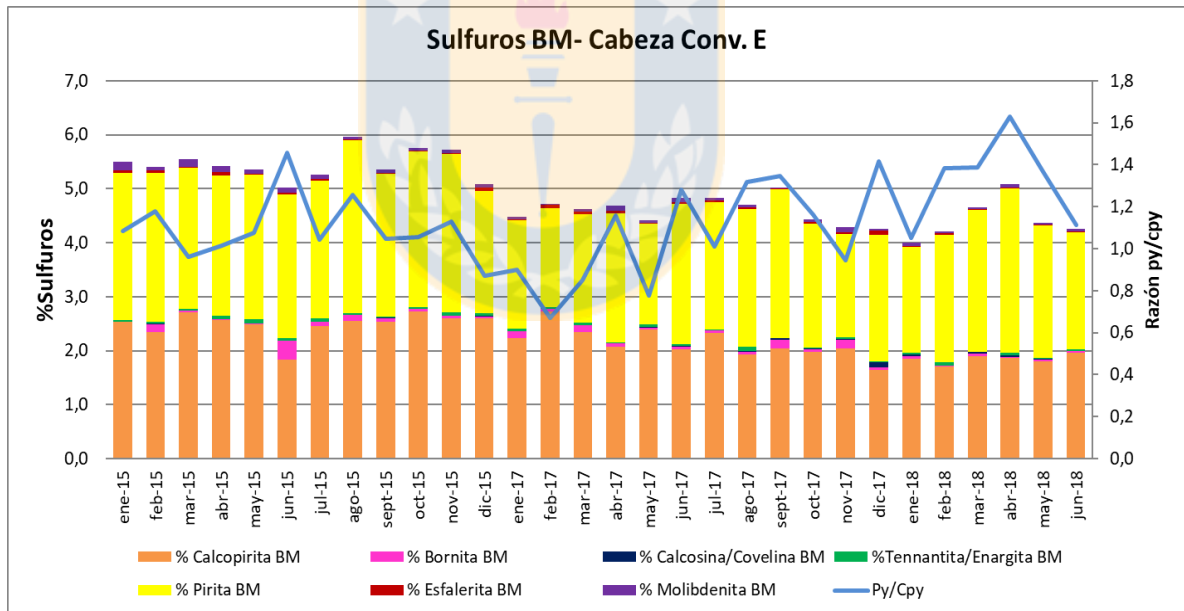


Figura 67: Composición mineralógico modal 2015, 2017 a Junio 2018 (Geometalúrgia DAND).

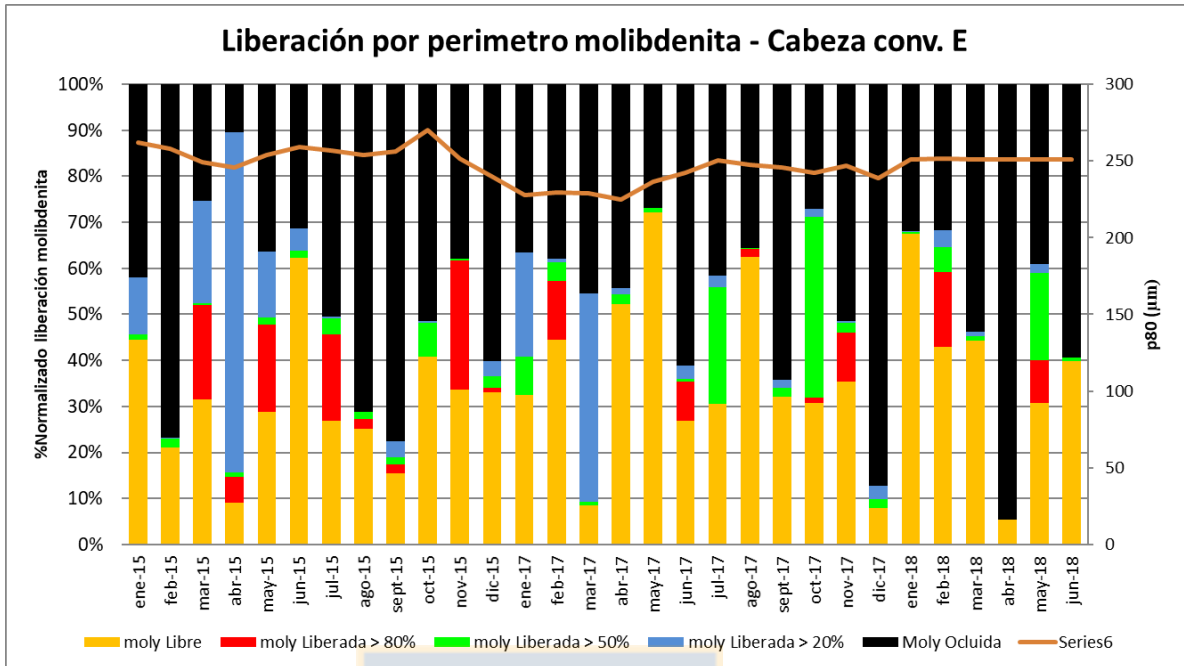


Figura 68: Liberación por perímetro Cabeza convencional E 2015, 2017 a Junio 2018 (Geometalúrgia DAND).



8.7 Ecuaciones diseño de experimentos

8.7.1 Decodificación del modelo matemático a escala natural.

El modelo natural tiene la siguiente forma:

$$Y = a_0 + \sum a_i Z_i + \sum a_{ij} Z_i Z_j + \sum a_{ii} Z_i^2 \varepsilon_i^2 \quad (7)$$

Las fórmulas que permiten la decodificación son:

Para el término independiente:

$$a_0 = b_0 - \sum b_i \varepsilon_i + \sum b_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j + \sum b_{ii} \varepsilon_i^2 \quad (8)$$

Para el término lineal:

$$a_i = \frac{b_i}{\Delta Z_i} - \frac{2b_{ii}\varepsilon_i}{\Delta Z_i} - \frac{b_{ij}\varepsilon_j}{\Delta Z_i} \quad (9)$$

Para el término interacción:

$$a_{ij} = \frac{b_{ji}}{\Delta Z_j \Delta Z_i} \quad (10)$$

Para el término cuadrático:

$$a_{ii} = \frac{b_{ii}}{\Delta Z_i^2} \quad (11)$$

Además,

Z_i^0 : Centro del diseño para la variable j.

$$Z_i^0 = \frac{Z_i^{\max} + Z_i^{\min}}{2} \quad (12)$$

ΔZ_i : Radio del diseño para a variable j.

$$\Delta Z_i = \frac{Z_i^{\max} - Z_i^{\min}}{2} \quad (13)$$

ε_i : Relación entre el centro y radio del diseño.

$$\varepsilon_i = \frac{Z_i^0}{\Delta Z_i} \quad (14)$$

8.7.2 Análisis de máximos y mínimos

Identificar si el modelo de segundo orden posee un máximo, un mínimo o un valor extremo es relevante, ya que se podrá entender de qué manera las variables investigadas afectan en el proceso.

Si para corroborar la existencia de un extremo relativo en un modelo de segundo orden se hace uso de la matriz Hessiana. La ecuación ajustada a escala codificada y la determinación de sus coeficientes por medio de la matriz Hessiana son:

$$y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_{11} * X_1^2 + b_{22} * X_2^2 + b_{12} * X_1 * X_2 \quad (15)$$

$$b_{11} = \frac{\partial^2 y}{\partial X_1^2} \quad (16)$$

$$b_{22} = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 y}{\partial X_1^2} & \frac{\partial^2 y}{\partial X_1 \partial X_2} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial X_2 \partial X_1} & \frac{\partial^2 y}{\partial X_2^2} \end{vmatrix} \quad (17)$$

Los modelos matemáticos de segundo orden son fácilmente derivables; al igualar a cero las derivadas parciales es posible encontrar los puntos críticos en su escala codificada.

Los signos de los coeficientes cuadráticos, b_{11} o b_{22} , son los que determinarán si la ecuación tendrá un máximo, un mínimo al momento de evaluarlos en el punto crítico. En la Tabla 21, se presentan los criterios para establecer el tipo de punto y la forma de la curva según los signos de los coeficientes (Palacios, 2008).

Tabla 23: Tipo de punto y forma de la curva según los signos de los coeficientes cuadráticos.

b_{11}	b_{22}	Tipo de punto	Forma de la curva
+	+	Mínimo relativo	Paraboloide invertido
+	-	No presenta	Silla de montar
-	+	Máximo relativo	Paraboloide

8.8 Cinética de flotación pruebas a diferentes reactivos

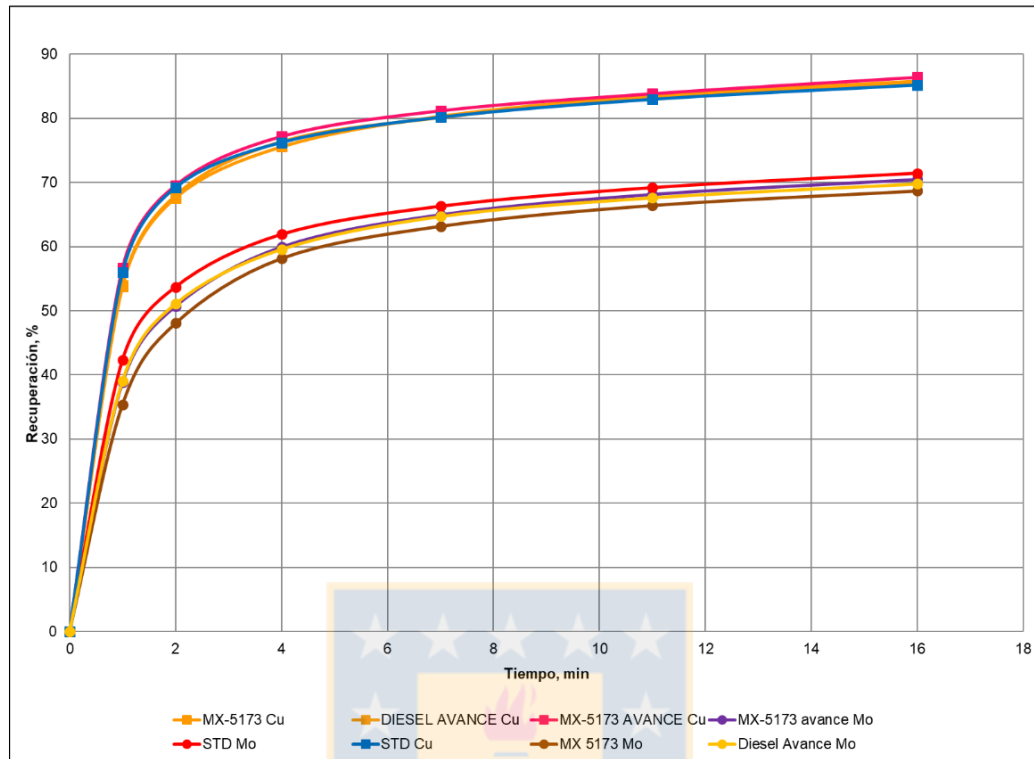


Figura 69: Recuperación de Cu-Mo-Fe variando el colector secundario.

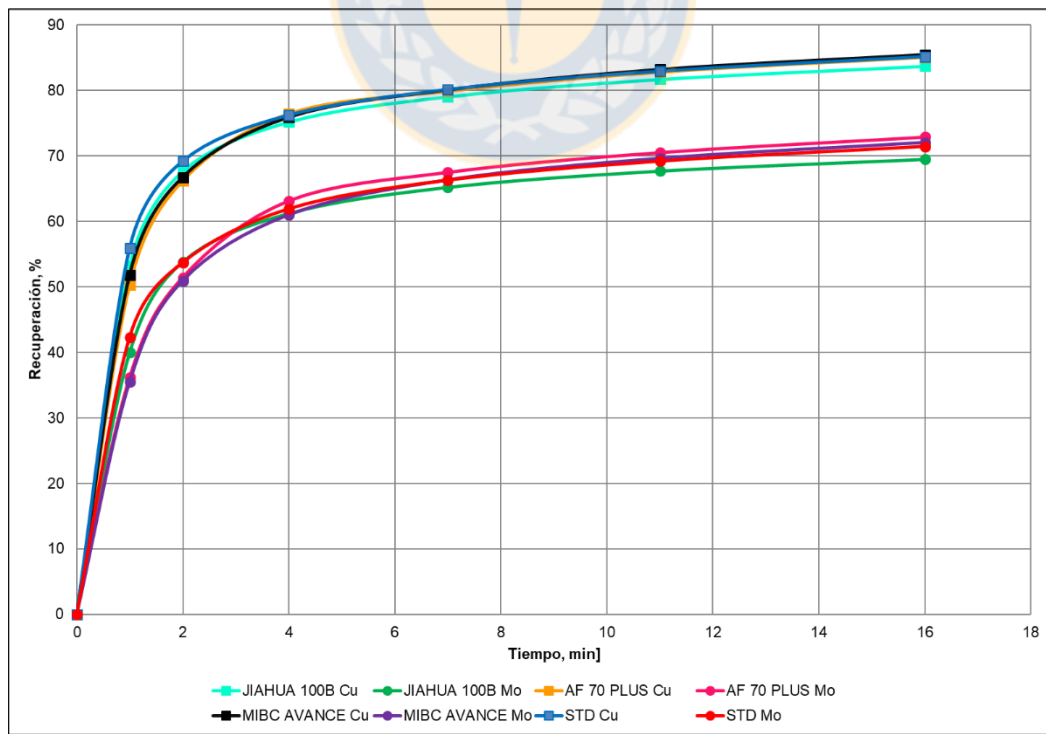


Figura 70: Recuperación de Cu-Mo-Fe variando espumante.

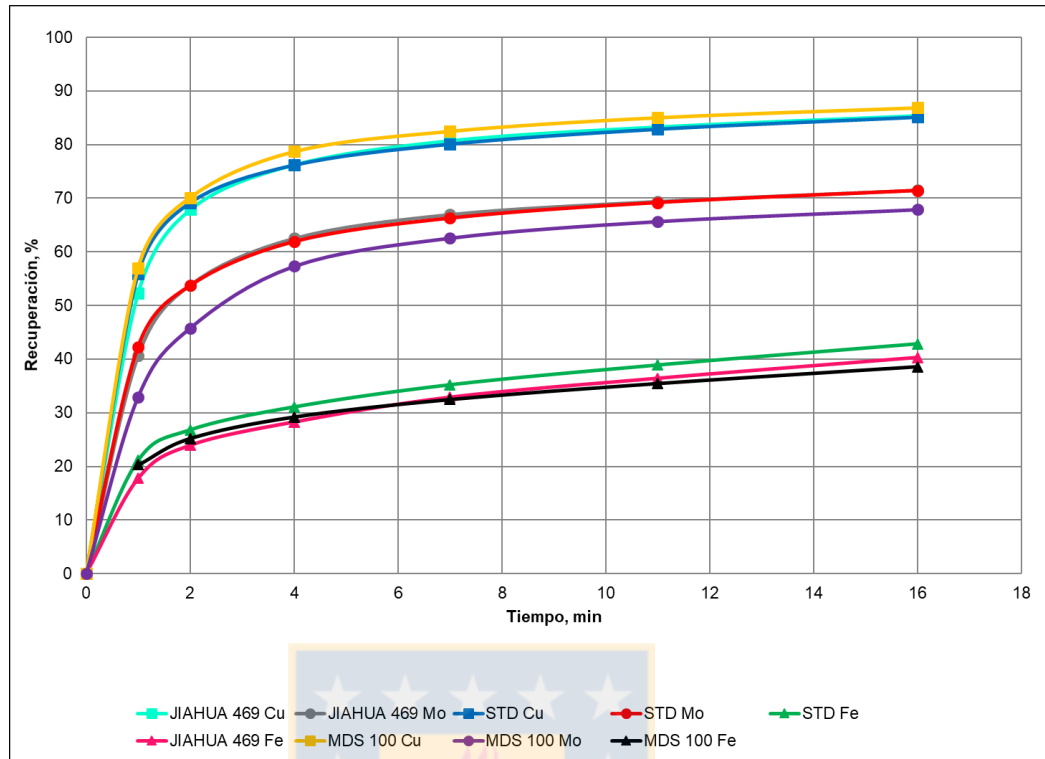


Figura 71: Recuperación Cu-Mo-Fe variando el depresor de Fe

8.9 Balance global planta Agosto 2018

Tabla 24: Resumen balance global planta Agosto 2018

Sección	Alimentación			Concentrado			Colas			Recuperación			Cu-Mo fino concentrado			Cu-Mo fino colas		
	TPH	%Cu	%Mo	TPH	%Cu	%Mo	TPH	%Cu	%Mo	%Cu	%Mo	TPH Cu	KgPH Mo	TPH Cu	KgPH Mo	TPH Cu	KgPH Mo	
Ro-A	1920	0.779470486	0.016	186	7.252	0.132	1733	0.078	0.004	99.92%	78.86%	13.50	245	1.349	69			
Ro-B	1571	0.779470486	0.017	108	10.208	0.192	1463	0.080	0.004	90.33%	78.33%	10.98	207	1.172	58			
Ro-E	920	0.761617037	0.020	72	7.958	0.173	848	0.155	0.008	83%	66.09%	5.69	124	1.314	64			
Rougher	4410	0.771	0.017	365	8.261	0.158	4045	0.095	0.005	88.72%	75.14%	30.17	575	3.835	190			
Sección	TPH	%Cu	%Mo	TPH	%Cu	%Mo	TPH	%Cu	%Mo	Recuperaciones			TPH Cu	KgPH Mo	TPH Cu	KgPH Mo	TPH Cu	KgPH Mo
Col-1	109	7.77	0.520	21	28.748	0.454	165	2.742	0.545	71.54%	16.87%	6.07	95.89	2.42	472.48			
Col-2	103	9.54	0.545	26	29.325	0.518				78.81%	24.90%	7.76	137.07	2.11	427.00			
Col-3	109	9.81	0.524	32	26.932	0.555	162	2.734	0.477	80.69%	31.89%	8.72	183.15	2.10	385.34			
Col-4	109	8.66	0.446	24	29.947	0.429				75.33%	20.86%	7.13	102.11	2.33	384.97			
Col-5												0.00						
Col-6	144	9.61	0.531	34	28.939	0.500	110	3.684	0.541	70.64%	22.05%	9.75	168.43	4.05	595.33			
Columnas	575	9.13	0.51	137	29.695	0.499	437	2.658	0.519	77.84%	23.23%	40.83	686.66	11.63	2289.12			
Sección	TPH	%Cu	%Mo	TPH	%Cu	%Mo	TPH	%Cu	%Mo	Recuperaciones			TPH Cu	KgPH Mo	TPH Cu	KgPH Mo	TPH Cu	KgPH Mo
Scavenger	437.35	3.22	0.51	209.67	6.41	1.04	227.68	0.29	0.02	%Cu	%Mo	13.43	2177.96	0.67	52.65			
										0.95	0.98							

