



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

**DEPRESIÓN DE PIRITA UTILIZANDO UN ADITIVO DE ORIGEN BACTERIANO EN
EL PROCESO DE FLOTACIÓN DE MINERALES SULFURADOS DE COBRE**

**Tesis para optar al grado de Magister en Innovación en Biociencias y
Bioingeniería**

Profesor guía: Dr. Christian Canales Valenzuela
Estudiante: Rodrigo Ormeño Muñoz

© Rodrigo Ormeño.

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

Concepción, Chile

2023

DEDICATORIA

Dedicado a Ingrid y Matías

Quienes, con su amor infinito, paciencia e incondicional apoyo, me animaban a seguir adelante.

Ellos son el porqué de todo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios y a mis padres, que siempre están conmigo en espíritu. Su amor, enseñanzas y recuerdos me han convertido en la persona que soy hoy.

De forma especial agradezco a mis hermanos, cuñadas y sobrinos, siempre presentes en mi vida.

No puedo dejar de agradecer a Christian Peralta, quién con sus enseñanzas, paciencia y recomendaciones, me brindo siempre un apoyo cuando lo necesité. A Valeria y Amanda, con quienes he compartí innumerables buenos momentos y me daban ánimo en momentos de complejos.

A excelentes profesores que conocí en este periodo de vida universitaria: Gloria Bravo, Daniel Sandoval, Patricio Oyarzún, Iván Ñancucho y en particular a Christian Canales, quién me guío, corrigió y apoyó en todo el desarrollo de este trabajo.

Y finalmente a Rodrigo, Raúl y Juan Pablo, una generación especial, en medio de un mundo, aún más espacial.

Gracias totales.

HOJA DE CALIFICACIÓN

En Concepción, el 08 de septiembre de 2023 los abajo firmantes dejan constancia que el estudiante Rodrigo Alejandro Ormeño Muñoz ha aprobado la tesis para optar al grado académico de Magíster en Innovación en Bioingeniería y Biociencias con una nota de

Christian Canales Valenzuela
Profesor Evaluador

Daniel Sandoval Rivas
Profesor Evaluador

Gonzalo Recio Sánchez
Profesor Evaluador

FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA DIFUSIÓN DE TRABAJOS DE TÍTULO PROFESIONAL O GRADO ACADÉMICO

1. Identificación del autor.

Nombre: Rodrigo Alejandro Ormeño Muñoz

Dirección: General Cruz 372, Concepción

Teléfono: +56 992 135 136

Email: rormenom1@correo.uss.cl

2. Identificación del trabajo de Titulación

Título: Depresión de pirita utilizando un aditivo de origen bacteriano en el proceso de flotación de minerales de sulfurados de cobre

Facultad: Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Título o grado al que opta: Magister en Innovación en Biociencias y Bioingeniería

Profesor guía: Christian Canales Valenzuela

Fecha de entrega: viernes 08 de septiembre de 2023

3. A través del presente formulario se autoriza la difusión de esta obra con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

Autorizo su difusión desde la fecha de septiembre del 2023

Rodrigo A. Ormeño Muñoz

4. Fecha autorización: 08 de septiembre de 2023

1. INTRODUCCIÓN	10
<hr/>	
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	17
<hr/>	
2.1 EL PROCESO DE BIOFLOTACIÓN	17
2.2 DEPRESIÓN DE LA PIRITA	18
2.3 RELACIÓN ENTRE LA BIOFLOTACIÓN Y LA FLOTACIÓN CONVENCIONAL	21
2.4 MINERALES HIDROFÍLICOS E HIDROFÓBICOS	24
2.5 LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO Y SU RELACIÓN CON LA BIOFLOTACIÓN DE MINERALES	26
2.6 ANÁLISIS QEMSCAN	28
2.7 DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS	30
3. MATERIALES Y MÉTODOS	32
<hr/>	
3.1 MATERIALES	32
3.1.1 MINERAL	32
3.1.2 REACTIVOS QUÍMICOS	32
3.1.3 ADITIVO BIOLÓGICO	33
3.2 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL	33
3.2.1 ETAPA DE CHANCADO Y MOLIENDA.	33
3.2.2 ETAPA DE BIOFLOTACIÓN DE MINERALES	38
3.2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	46
4. RESULTADOS	48
<hr/>	
4.1 ESTUDIO DE MOLIENDA	48
4.2 ESTUDIO DE FLOTACIÓN	49
4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	52
5. CONCLUSIONES	66
<hr/>	
6. DISCUSIONES	68
<hr/>	
7. RECOMENDACIONES	69
<hr/>	
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
<hr/>	
9. ANEXOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<hr/>	
ANEXO 1. PROTOCOLO DE PREPARACIÓN DE BIOMASA BACTERIANA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO 2. ANÁLISIS QEMSCAN PMA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO 3. ANÁLISIS QUÍMICO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ANEXO 4. BALANCES METALÚRGICOS DISEÑO EXPERIMENTAL ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ANEXO 5. BALANCES METALÚRGICOS PRUEBAS DE FLOTACIÓN CONVENCIONAL ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ANEXO 6. BALANCES METALÚRGICOS PRUEBAS DE BIOFLOTACIÓN ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Porcentaje de participación de áreas mineras de uso de la cal en Chile -----	12
Figura 2 - Consumos de cal en cuatro escenarios (potencial, posible, probable y caso base)---	13
Figura 3 - Estimación de la oferta y demanda de cal -----	15
Figura 4 - Esquematación del proceso de flotación en una celda de flotación convencional empleada para bioflotación -----	23
Figura 5 - Rangos de tamaño de molienda por cada etapa -----	27
Figura 6 - Diagrama de funcionamiento del Qemscan -----	29
<i>Figura 7 - Maxisaco con mineral</i> -----	36
<i>Figura 8 - Chancador de mandíbula</i> -----	36
<i>Figura 9 - Chancador de cono</i> -----	36
Figura 10 - Muestreador rotatorio -----	36
Figura 11 - Muestras individuales -----	36
Figura 12 - Valor del índice granulométrico P_{80} en función del tiempo de molienda -----	38
Figura 13 - Celda de flotación automática Edemet -----	42
Figura 14 - Esquema de una celda de flotación-----	44
Figura 15 - Diagrama de flujo de las pruebas y ensayos realizados. -----	47
Figura 16 - Distribución granulométrica -----	49
Figura 17 - Gráfico normal de residuos -----	57
Figura 18 - Residuales versus predichos-----	58
Figura 19 - Gráfico 3D de superficie a PH 4-----	59
Figura 20 - Gráfico 3D de superficie a PH 5-----	59
Figura 21 - Gráfico 3D de superficie a PH 6-----	60
Figura 22 - Cubo del diseño experimental -----	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Similitudes entre flotación convencional y bioflotación	22
Tabla 2 Composición de la alimentación (de cabeza)	30
Tabla 3 Datos de la molienda del mineral	37
Tabla 4 Matriz experimental desarrollada en el software Design Expert 22	40
Tabla 5 Análisis granulométrico	48
Tabla 6 Masa y porcentaje de mineral de interés presente en el concentrado.	50
Tabla 7 Masa y porcentaje de mineral de interés presente en la cola.....	50
Tabla 8 Porcentaje de recuperación.....	51
Tabla 9 Resumen del ajuste del modelo.....	52
Tabla 10 Comparación entre modelos	53
Tabla 11 Análisis de varianza.....	54
Tabla 12 Estadística de ajuste	56
Tabla 13 Porcentaje de recuperación	62
Tabla 14 Prueba t-student para dos muestras de cobre suponiendo varianzas iguales	63
Tabla 15 Prueba t-student para dos muestras de hierro suponiendo varianzas iguales	64

1. INTRODUCCIÓN

La flotación de minerales es un proceso de relevancia en la industria minera, utilizado para la concentración y separación de minerales valiosos de la ganga (Castro, 2000). En el contexto de la minería chilena, este proceso adquiere una especial importancia debido a la alta presencia de minerales sulfurados, como la pirita, que contiene sulfuro de hierro. La abundancia de pirita en los minerales chilenos puede tener efectos significativos en la eficiencia de la flotación y en la recuperación de minerales valiosos, como el cobre, lo que representa un desafío para la industria minera en busca de mejorar sus procesos y maximizar la recuperación de recursos naturales.

La pirita, aunque carece de un alto valor económico por sí misma, se encuentra presente en muchos yacimientos minerales de cobre en Chile. Sin embargo, su presencia puede tener un impacto negativo en el proceso de flotación de minerales, ya que tiende a competir con los minerales de cobre por los colectores utilizados en la flotación (Ackerman et al., 1987). Además, la pirita forma una capa superficial en las partículas de cobre, disminuyendo su flotabilidad y complicando la separación eficiente durante el proceso de concentración.

Los efectos adversos derivados de la abundante pirita en los minerales chilenos se manifiestan en una disminución de la recuperación de cobre y en la calidad del concentrado final. Además, la presencia de pirita puede incrementar el consumo de reactivos y energía durante el proceso de flotación, lo que se traduce en mayores costos operativos para las compañías mineras y una menor eficiencia en la explotación de los recursos minerales (Mu et al., 2016).

Con el objetivo de mitigar los efectos negativos de la pirita en el proceso de flotación, la industria minera ha llevado a cabo numerosos esfuerzos para desarrollar estrategias y tecnologías innovadoras. Entre las más prometedoras se encuentra el uso de reactivos depresores específicos para la pirita, que inhiben su flotabilidad y permiten una mejor selectividad en la concentración de minerales de cobre, pero son costosos para su implementación. Asimismo, se han investigado ajustes en el pH de la pulpa para controlar la activación de la pirita y su interacción con los colectores, en particular

reduciendo el pH hacia valores más ácidos, donde la pirita es menos susceptible a la activación.

No obstante, una de las principales preocupaciones de la industria minera es el alto costo asociado con el consumo de cal, el cual es utilizado para elevar el pH de la pulpa mineral hacia valores alcalinos y optimizar la flotación de ciertos minerales de cobre. La cal representa el reactivo más costoso en las plantas de flotación, lo que ha llevado a buscar alternativas más económicas, eficientes y amigables con el medio ambiente para la depresión de la pirita (Castro, 2018).

La pirita (FeS_2) es el sulfuro metálico más abundante en Chile. Se encuentra asociado a sulfuros de metales base (Cu, Pb, Zn) y en los minerales de cobre tipo porfídico, por lo que es la ganga sulfurosa más abundante. Por ello, es deseable su depresión en la flotación y esto se logra a altos valores de pH, empleando para ello, lechada de cal, si bien, esta depresión también es posible usando reactivos inorgánicos como cianuros, sulfitos y ferrocianuros, estos son más caros y difíciles de tratar, tanto en laboratorio como en plantas de procesamiento (Castro, 2000).

Hay que tener en cuenta que, cuando la pirita se expone al oxígeno se oxida generando oxihidróxido de hierro en su superficie, afectando con ello, la flotabilidad del mineral y cuando la superficie de la pirita no está oxidada, flota naturalmente. Ambas condiciones son perjudiciales para el proceso y se deben evitar, sino disminuye la recuperación del mineral.

Es por lo anterior, que el principal uso de la cal en minería es como regulador de pH en los procesos de flotación de minerales de cobre sulfurados en Chile de acuerdo con lo que se aprecia en la Figura 1 (Cantalops & Monsalve, 2022) en donde la flotación ocupa más de un 80% del consumo.

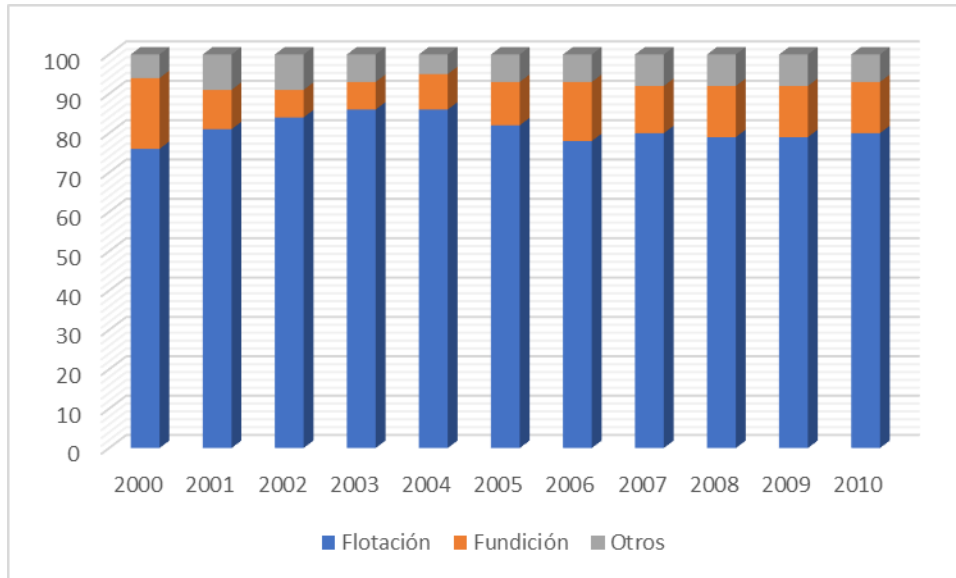


Figura 1 - Porcentaje de participación de áreas mineras de uso de la cal en Chile

(Fuente: Castro, S. H. (2018). Visión metalúrgica de la proyección y uso de la cal en la minería del cobre. Seminario Inacal.)

La cal se obtiene de la calcinación de la piedra caliza, a la temperatura de descomposición del carbonato de calcio. En ese estado se denomina cal viva (óxido de calcio) y si se apaga sometiéndola al tratamiento con agua, se le llama cal apagada (hidróxido de calcio).

La demanda total de CaO es la sumatoria de los consumos de los escenarios “Base”, “Probable”, “Posible” y “Potencial” de procesamiento de mineral de cobre sulfurado en el proceso de flotación y se asume que el consumo unitario promedio de cal viva en dicho proceso es de 1,6 kg/ton de mineral procesado (Cantallops & Monsalve, 2022) de acuerdo con la Figura 2.

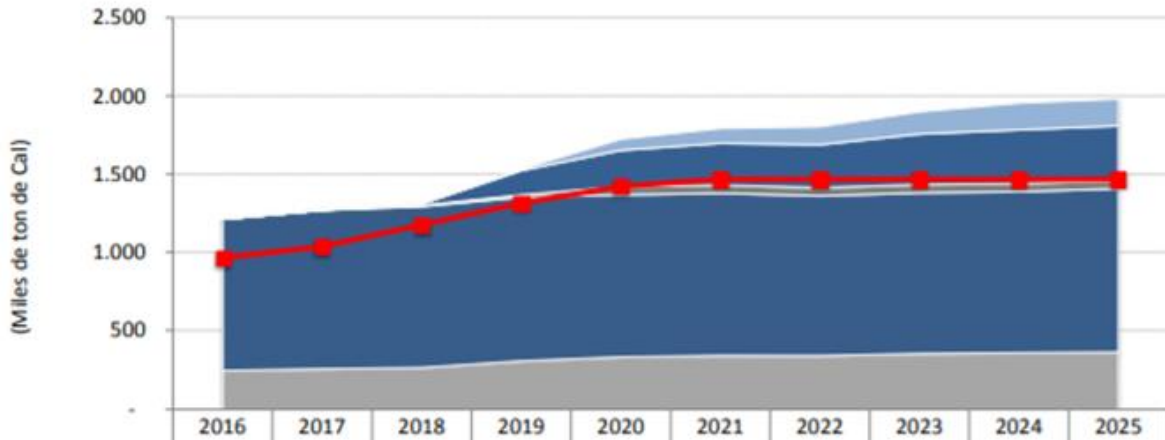


Figura 2 - Consumos de cal en cuatro escenarios (potencial, posible, probable y caso base)

(Fuente: Cantalops, J., & Monsalve, R. (2022). Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre).

Los consumos unitarios de cal por tonelada de mineral procesado varían entre los 1,5 y 1,7 kg/ton mineral procesado. El precio promedio es de 170 US\$/tonelada de cal.

Debido que la cal representa el costo de reactivo más alto y de mayor consumo en las plantas de flotación (Castro, 2000), es que se buscan alternativas que sean económicamente viables y respetuosas con el entorno para la depresión de la pirita. En este contexto, se vislumbra en el horizonte un proceso de desarrollo denominado bioflotación, proceso poco explorado hasta el momento, se erige como una opción emergente en contraposición al uso convencional de cal para la depresión de la pirita en el proceso de flotación de minerales sulfurados de cobre.

Además, la bioflotación es atractiva porque tiene una serie de potenciales ventajas como las siguientes:

- Reducción de costos de reactivos: La cal, siendo el reactivo más costoso en las plantas de flotación, representa un gasto significativo. Sin embargo, al emplear bacterias acidófilas en la bioflotación, se reduce o elimina la necesidad de grandes cantidades de cal. Esto se traduce en ahorros considerables en la adquisición y

manejo de este reactivo, lo cual tiene un impacto positivo en el costo total de operación de la planta.

- **Ahorro energético:** La producción de cal implica un proceso de calcinación a alta temperatura que consume una cantidad considerable de energía. Al disminuir la necesidad de cal en la bioflotación, se reduce también el consumo energético asociado a su producción y transporte. Esto contribuye a una mayor eficiencia energética de la planta y puede generar ahorros en los costos operativos.
- **Optimización de recursos hídricos:** La adición de cal en el proceso convencional de flotación requiere de grandes volúmenes de agua para asegurar una adecuada dispersión y mezcla de los reactivos. Al reducir la necesidad de cal en la bioflotación, se disminuye también el consumo de agua necesario. Esto implica beneficios económicos al reducir los costos de adquisición y tratamiento del agua, así como los costos asociados a su disposición adecuada.
- **Cumplimiento de regulaciones ambientales:** Cada vez existen regulaciones más estrictas relacionadas con el uso de reactivos químicos en la industria minera. La bioflotación, al reducir o eliminar la necesidad de cal, permite cumplir con estas regulaciones y evitar sanciones o costos adicionales.

La oferta que no alcanza a ser satisfecha por la producción local es suplida mediante importaciones de cal, como se aprecia en la Figura 3, la cual ha llegado a alcanzar más de un 45% y este déficit entre la oferta chilena y la demanda de cal es suplido por el óxido de calcio importado, principalmente proveniente desde Argentina.



Figura 3 - Estimación de la oferta y demanda de cal

(Fuente: Cantalops, J., & Monsalve, R. (2022). Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre).

La bioflotación se encuentra en una etapa temprana de su desarrollo y todavía no ha logrado establecerse como una práctica consolidada en la esfera industrial. Precisamente debido a esta condición incipiente de la bioflotación, se originan los objetivos propuestos en el presente trabajo:

Objetivo general:

Determinar si el aditivo bacteriano funciona como agente depresor de la pirita sin afectar el rendimiento de la recuperación de cobre.

Objetivos específicos:

1. Determinar las características del mineral sometido a los procesos de chancado y molienda, cumple con los requerimientos de la minera.
2. Determinar si existe algún efecto preferente de alguno de los factores estudiados en el experimento Box-Behnken.
3. Determinar si el aditivo de origen bacteriano tiene un efecto depresor en la pirita y no afecta la recuperación de cobre.

Para ello, se desarrollan pruebas experimentales a escala de laboratorio utilizando muestras de minerales chilenos ricos en pirita y cobre. Se realizan análisis químicos para determinar la recuperación de cobre y la presencia de pirita en el concentrado final y además se evalúa el rendimiento de la flotación empleando el aditivo bacteriano en comparación con condiciones de flotación convencional.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La bioflotación de minerales sulfurados de cobre es un campo de investigación dinámico y en constante progreso, con la finalidad de concebir una alternativa más sustentable y eficiente en comparación con los métodos de flotación convencionales. No obstante, su actual estado se circunscribe a una fase experimental, careciendo aún de una adopción generalizada en la esfera de la industria minera.

2.1 El proceso de bioflotación

La bioflotación es un proceso emergente, que al igual que la flotación tradicional, es selectivo y que se emplea para llevar a cabo separaciones específicas de minerales, basándose en las diferentes propiedades superficiales de cada uno de ellos. Esta técnica se fundamenta en la adhesión selectiva de los minerales, apoyadas por microorganismos, en el seno de una pulpa acuosa a unas burbujas de aire que se introducen en ella. Los minerales adheridos a las burbujas se separan en forma de espuma mineralizada constituyendo el concentrado, mientras que los demás se quedan en la pulpa y constituyen el estéril.

El uso de bacterias y reactivos bacterianos como sustitutos de los reactivos químicos en la flotación de minerales, además de ofrecer beneficios ambientales, puede ser prometedor en el aumento de la recuperación de cobre y la supresión de la flotabilidad de minerales no deseados, como la pirita.

La pirita, un mineral ampliamente distribuido en depósitos de sulfuros metálicos, representa un desafío en los procesos de flotación debido a su naturaleza hidrofóbica y su tendencia a activarse en presencia de iones de cobre. La depresión selectiva de la pirita ha ganado relevancia debido a su impacto significativo en la calidad de los concentrados de flotación y en la eficiencia global del proceso de recuperación de metales (Mu et al., 2016).

Se sabe que la presencia indeseable de pirita en los concentrados de flotación puede comprometer la calidad y valor del producto final, ya que este mineral conlleva un alto contenido de azufre, lo que podría resultar en la generación de emisiones de gases

tóxicos y ácidos, generando preocupaciones ambientales y dificultades en su procesamiento metalúrgico, aguas abajo en el proceso. La activación de la pirita en presencia de iones de cobre puede ocasionar una mayor afinidad por las burbujas de aire, lo que lleva a una mayor flotabilidad y mayor arrastre de pirita en el concentrado, afectando negativamente la selectividad y recuperación de otros minerales de valor presente en la mena (Castro, 2000).

2.2 Depresión de la pirita

Investigaciones recientes (Behera & Mulaba-Bafubandi, 2017) han demostrado que la *Acidithiobacillus ferrooxidans* muestra una mayor afinidad por la pirita y puede adherirse selectivamente a ella, incluso cuando está mezclada con otros minerales. Esta adhesión de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a la pirita reduce significativamente su flotabilidad en comparación con otros minerales, lo que sugiere que esta bacteria podría utilizarse para suprimir la flotabilidad de la pirita en procesos de flotación de minerales sulfurados.

Otra línea de investigación (Nagaoka et al., 1999) se enfoca en la flotación selectiva de sulfuros ferrosos, especialmente la separación de la pirita de otros minerales valiosos asociados. La pirita, debido a su contenido de azufre y su naturaleza hidrofóbica, puede afectar negativamente la recuperación de otros minerales valiosos y ser indeseable en procesos metalúrgicos. Se han explorado técnicas que involucran la interacción de células bacterianas y colectores orgánicos para lograr una mayor selectividad en la flotación, priorizando la depresión de la pirita sobre otros minerales como la calcopirita.

La flotación selectiva de la pirita reviste una importancia considerable debido a su influencia en la calidad y eficiencia del proceso de recuperación de metales en los concentrados de flotación. San Martín et al., 2018 en su investigación sobre el uso de *Acidithiobacillus ferrooxidans* como depresor de la pirita en la flotación en agua de mar, destacan la ventaja de esta técnica al no afectar la flotación de otros minerales como la molibdenita y la calcopirita.

En el mencionado estudio, también se indagan los mecanismos que subyacen a la biodepresión de la pirita mediante *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Se plantea que la

biodepresión se origina a partir de la adsorción de la bacteria en la superficie de la pirita, lo que conlleva a una reducción de la hidrofobicidad de la superficie y, por ende, una disminución en la recuperación de la pirita durante el proceso de flotación.

Estos hallazgos contribuyen significativamente al conocimiento de la interacción entre la *Acidithiobacillus ferrooxidans* y la pirita, lo que a su vez abre nuevas perspectivas en el desarrollo de técnicas de flotación selectiva para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del procesamiento de minerales en la industria minera.

Es en este contexto que la flotación selectiva de la pirita, la utilización de células bacterianas y colectores orgánicos ha sido objeto de investigación para mejorar la eficiencia y selectividad del proceso. La aplicación de células bacterianas en la flotación selectiva ofrece una vía promisorio para atenuar la adhesión y flotabilidad de la pirita en presencia de otros sulfuros valiosos. La selectividad mejorada obtenida mediante esta estrategia podría tener un impacto positivo en la calidad del concentrado final y en la eficiencia global del proceso de recuperación de metales (Chandraprabha et al., 2004).

El proceso de flotación selectiva propuesto anteriormente se llevó a cabo en un sistema de flotación de laboratorio utilizando una mezcla de minerales de sulfuros ferrosos que contenían pirita, calcopirita y otros sulfuros. El proceso se llevó a cabo a pH ácido y neutro, y se demostró que la secuencia de acondicionamiento con células bacterianas y colector afecta la selectividad del proceso. Cuando los minerales se acondicionaron juntos, la selectividad lograda fue pobre debido a la activación de la superficie de la pirita por los iones de cobre en solución. Sin embargo, la selectividad mejoró cuando se invirtió la secuencia de acondicionamiento con células bacterianas y colector, ya que las células bacterianas pudieron deprimir eficazmente la pirita interactuada con el colector, mientras que tenían un efecto insignificante en la calcopirita (Chandraprabha et al., 2005).

Los resultados muestran que la selectividad se mejora cuando los minerales se acondicionan primero con células y luego con colector. Además, se demostró que la selectividad mejoró aún más cuando se utilizó una mezcla de células bacterianas y colector en lugar de células bacterianas solas.

La unión de microorganismos a la pirita está mediada por sustancias poliméricas extracelulares (EPS), que son productos metabólicos de las bacterias que rodean la célula y tienen una influencia en sus propiedades superficiales como la carga superficial e hidrofobicidad (Luque Consuegra et al., 2020). Dado lo anterior, es posible lograr un reemplazo parcial, al uso de la cal como depresante de la pirita para procesos de flotación de minerales.

No existen registros conocidos de bioflotación que se utilizan a escala industrial, sin embargo, existen varios estudios sobre este tema a escala de laboratorio, donde los microorganismos utilizados son los mismos que se utilizan en la biolixiviación (Nagaoka et al., 1999).

Como bien se sabe, en la flotación convencional, se utilizan reactivos químicos, como la cal, para suprimir la flotabilidad de la pirita y mejorar la flotación del cobre. Sin embargo, estos reactivos pueden tener efectos ambientales negativos, hay poca disponibilidad y, en algunos casos, no son del todo efectivos en la depresión de la pirita.

Las bacterias acidófilas, como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, son capaces de oxidar la pirita y otros minerales sulfurosos presentes en la mena. Durante la oxidación, las bacterias liberan iones ferrosos y protones, lo que acidifica el medio y crea condiciones favorables para la flotación de los minerales de cobre.

Las bacterias pueden adherirse selectivamente a la superficie de la pirita y otros minerales de hierro, lo que disminuye su hidrofobicidad y, por lo tanto, su flotabilidad. Esto significa que la pirita tiende a hundirse en el proceso de flotación en lugar de flotar con los minerales de cobre, mejorando así la calidad del concentrado final de cobre.

Por otro lado, las bacterias también pueden aumentar la flotabilidad de los minerales de cobre. Durante la oxidación, las bacterias producen productos de oxidación que pueden alterar la composición superficial de los minerales de cobre, haciéndolos más hidrofóbicos y favoreciendo su adhesión a las burbujas de aire durante la flotación (Díaz-López et al., 2012).

Es importante tener en cuenta que el éxito de la bioflotación depende de varios factores, incluida la composición mineralógica de la mena, la presencia de otros

minerales, la selectividad de las bacterias hacia los minerales de cobre y la optimización de las condiciones de cultivo. La ventaja de la bioflotación es que las bacterias pueden tener las mismas funciones como reactivos convencionales lo cual le genera una ventaja adicional en relación con los productos químicos.

2.3 Relación entre la bioflotación y la flotación convencional

La bioflotación y la flotación convencional son dos técnicas utilizadas en el procesamiento de minerales para separar partículas valiosas de partículas no deseadas. Ambos métodos se basan en las diferencias en las propiedades superficiales de los minerales para lograr su separación. Existe una relación entre la flotación convencional y la bioflotación, especialmente en términos de los principios fundamentales de la separación de minerales y la generación de espuma. Ambos métodos se basan en la capacidad de ciertos minerales de volverse hidrófobos, es decir, repeler el agua, lo que permite su separación selectiva de los minerales hidrófilos que permanecen en la fase acuosa.

Por lo tanto, tanto en la flotación convencional como en la bioflotación, se busca lograr la adhesión selectiva de las partículas minerales a las burbujas de aire para su posterior recolección en forma de espuma. La diferencia radica en los mecanismos utilizados para lograr la hidrofobicidad de los minerales: los reactivos químicos en la flotación convencional y las bacterias y los exopolisacáridos en la bioflotación.

Aunque existen diferencias entre ellos, también comparten muchas similitudes importantes, como se puede apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1
Similitudes entre flotación convencional y bioflotación

Característica	Flotación convencional	Bioflotación
Principio de flotación	Mismo principio. Los minerales hidrofóbicos se adhieren a burbujas de aire y flotan hacia la superficie.	Mismo principio. Los minerales hidrofóbicos se adhieren a burbujas de aire y flotan hacia la superficie.
Uso de reactivos	Colector y espumante	Microorganismos como agentes modificadores de superficie
Selección de partículas	Separación selectiva de minerales	Separación selectiva de minerales
Control de pH	Importante	Importante
Proceso en etapas	Secuencial	Secuencial

Fuente: elaboración propia

A continuación, se presenta Figura 4, la cual representa un esquema de una celda de flotación empleada en el proceso de bioflotación. El propósito de dicha figura es ilustrar y explicar el funcionamiento de esta celda en particular, la cual juega un papel crucial en la separación y recuperación de minerales sulfurados de cobre mediante el uso de bacterias.

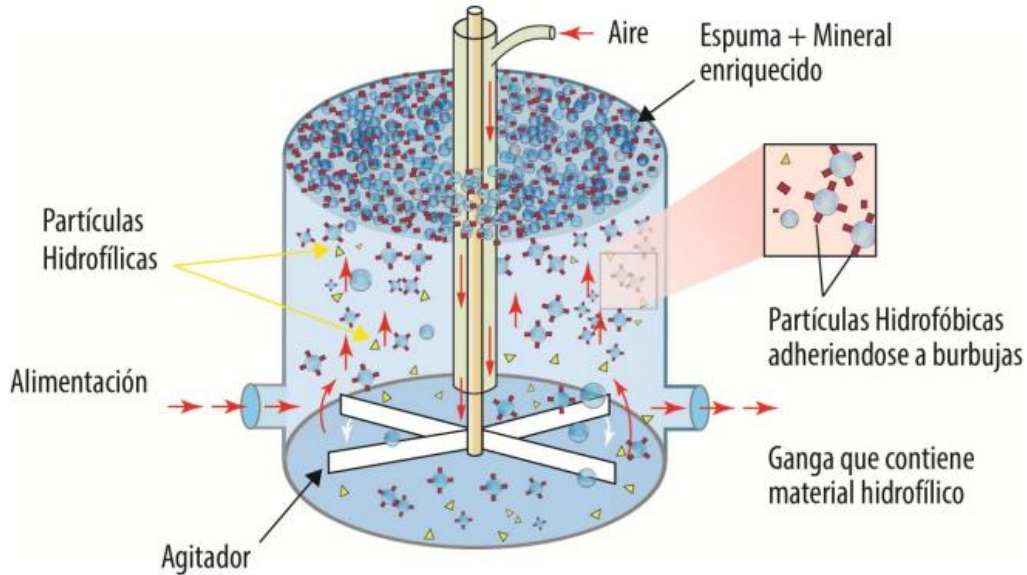


Figura 4 - Esquematación del proceso de flotación en una celda de flotación convencional empleada para bioflotación

(Fuente: Cinética del proceso de flotación, Linares, N, 2011)

La principal fuerza del proceso de bioflotación es la hidrofobicidad de las partículas minerales valiosas. Un mineral hidrofóbico tiende a repeler y desplazar el agua desde su superficie.

Por otro lado, las burbujas de aire también repelen el agua que produce al acercarse una burbuja a una partícula de mineral hidrofóbico, en el cual, el filme líquido que las separa tiende a disminuir de espesor y desaparecer (Castro, 2000). Esto produce la adhesión partícula-burbuja que es una de las etapas fundamentales del proceso de flotación.

La relación entre la bioflotación y la flotación convencional radica en su objetivo común de separar minerales con base en sus propiedades superficiales. Ambas técnicas buscan aprovechar las diferencias en la hidrofobicidad de los minerales para lograr su separación efectiva.

En la flotación convencional, se utilizan reactivos químicos conocidos como colectores, modificadores y espumantes para alterar las propiedades superficiales de los minerales. Los colectores se adhieren selectivamente a la superficie de los minerales de interés, convirtiéndolos en hidrofóbicos y permitiendo su flotación. Los modificadores se utilizan para ajustar las propiedades superficiales de los minerales y mejorar la selectividad de la flotación. Los espumantes, por su parte, generan una capa de espuma estable que atrapa los minerales flotados, permitiendo su recolección como concentrado.

Es importante destacar que, si bien la bioflotación muestra prometedores resultados en estudios a nivel de laboratorio, todavía se encuentra en etapas de investigación y desarrollo. No se ha implementado a escala industrial como la flotación convencional, que ha sido ampliamente utilizada en la industria minera durante décadas.

Dada las similitudes entre los procesos, es importante conocer que el proceso de flotación se basa sobre las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de las materias sólidas a separar. Se trata fundamentalmente de un fenómeno de comportamiento de los sólidos frente al agua, o sea, mojabilidad de las materias.

Para que el proceso tenga lugar, debe existir una fracción de partículas, que, debido a sus enlaces químicos, muestre una baja afinidad superficial con el agua, es decir, que no se moje; propiedad que se denomina hidrofobicidad. Por otra parte, deben existir partículas que tengan una alta afinidad superficial con el agua, es decir, que se mojen completamente, propiedad llamada hidrofiliidad.

En la flotación de minerales sulfurosos, se utilizan reactivos de flotación que tienen la capacidad de hacer que los minerales sulfurosos se vuelvan hidrófobos, y por lo tanto, se separen de los minerales hidrófilos.

2.4 Minerales Hidrofílicos e Hidrofóbicos

Según sea su afinidad con el agua, los minerales presentan propiedades hidrofóbicas (sin afinidad) e hidrofílicas (con afinidad), que determinan su flotabilidad natural.

Cuando dos fluidos están en contacto con un sólido, se puede definir la mojabilidad del sólido respecto a cada uno de los fluidos mediante el ángulo de contacto, el cual relaciona las propiedades hidrofóbicas de un mineral con su flotabilidad. Si el mineral es hidrofóbico, la película del líquido retrocede hasta una posición en la que las tensiones superficiales se encuentran en equilibrio y ese ángulo que se genera, se denomina ángulo de contacto (Castro, 2000)

Cuando se introduce una burbuja de aire en una pulpa que contiene partículas hidrofóbicas, las partículas hidrofóbicas se adhieren a la burbuja de aire y forman un par partícula-burbuja. Este par partícula-burbuja tiene una densidad menor que la del agua, por lo que flota hacia la superficie de la pulpa.

Las partículas hidrofílicas, por su parte, no se adhieren a las burbujas de aire y permanecen en la pulpa.

La flotación de minerales es un proceso industrial importante para la recuperación de metales valiosos de los minerales.

Si se tiene una pulpa que contiene partículas hidrofílicas e hidrofóbicas y se introduce en ella burbujas de una fase gaseosa, estas burbujas colisionarán con las partículas, dando origen a fenómenos diferentes. Las partículas hidrofóbicas chocarán y se unirán a las burbujas conformando pares partícula-burbuja, los cuales tendrán una densidad menor que la del agua y por la acción de la fuerza de ellos, flotarán.

Del mismo modo, las partículas hidrofílicas colisionarán con las burbujas, pero al tener una alta afinidad por el agua, no se adherirán a ellas y permanecerán en suspensión (Castro, 2000).

Los reactivos de flotación más comúnmente utilizados en la flotación de minerales sulfurosos son los colectores, los modificadores y los espumantes. Los colectores son los reactivos de flotación que se adsorben selectivamente en la superficie del mineral sulfuroso, mientras que los modificadores son los reactivos que modifican las propiedades superficiales del mineral para mejorar la adsorción del colector. Los espumantes son los reactivos que crean una capa de espuma estable en la superficie de la pulpa de mineral, lo que permite la separación selectiva de los minerales sulfurosos de

otros minerales. Cuando se insufla aire en esta mezcla, se forma una espuma en la superficie, que se mezcla con el sulfuro, pero no con la ganga. Esta última se va al fondo, y el sulfuro se recoge de la espuma.

Por otro lado, a reducción de tamaño es un paso fundamental y previo en el proceso de flotación para minerales sulfurados de cobre. Este proceso tiene como objetivo reducir el tamaño de las partículas de mineral para facilitar la liberación de los minerales de interés y permitir una interacción más efectiva con los reactivos de flotación.

2.5 La reducción de tamaño y su relación con la bioflotación de minerales

La relación entre la bioflotación y la molienda se basa en la liberación de las partículas minerales valiosas durante el proceso de molienda. En la mayoría de los casos, los minerales se encuentran finamente diseminados y asociados con la ganga, lo que dificulta su separación. Por lo tanto, es necesario moler el mineral a un tamaño adecuado para facilitar la liberación de las partículas minerales valiosas y mejorar la eficiencia del proceso de bioflotación.

La molienda tiene como objetivo principal reducir el tamaño de las partículas minerales y exponer la mayor cantidad posible de superficie de las partículas al entorno de bioflotación. Al reducir el tamaño de las partículas, se mejora la cinética de flotación y se optimiza la interacción entre las partículas y los microorganismos, lo que facilita la adhesión selectiva de las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* a los minerales sulfurados de cobre.

Además, la molienda controla la granulometría del material, como se observa en la Figura 5, por lo que es importante para lograr un procesamiento eficiente. Es importante mencionar que la molienda puede afectar la calidad de la pulpa de alimentación para el proceso de bioflotación. La granulometría adecuada y la distribución de tamaño de partícula uniforme pueden mejorar la eficacia de la bioflotación al proporcionar una superficie de contacto más favorable entre las partículas minerales y los microorganismos.



Figura 5 - Rangos de tamaño de molienda por cada etapa

(Fuente: Ensayos de conminución para evaluar el efecto de la aplicación de microondas a muestras minerales, Olmos, B, 2018)

Como se aprecia en la Figura 5, esta operación se lleva a cabo en varias etapas y con diferentes equipos, dependiendo del tamaño inicial de las partículas y del tamaño final deseado. Las etapas principales de este proceso son las siguientes:

1. Chancado: En esta etapa, se reduce el tamaño de las partículas mediante la aplicación de fuerza mecánica. Se emplean equipos como chancadoras (de mandíbulas, giratorias o de cono), molinos de rodillos y molinos de impacto. El chancado se realiza en condiciones de material seco, y el mecanismo de reducción de tamaño puede ser compresión o impacto.
2. Molienda: Una vez que el material ha sido triturado, se procede a la etapa de molienda, que consiste en reducir aún más el tamaño de las partículas. En esta etapa, se utilizan equipos como molinos de bolas, molinos de barras y molinos SAG. Durante la operación de molienda, el material se alimenta al molino y se añade el medio de molienda (bolas, barras u otros elementos). El molino gira a

una velocidad determinada, generando una fuerza centrífuga que hace que el medio de molienda golpee y reduzca el tamaño de las partículas.

3. Homogeneización: En esta etapa, se busca lograr una distribución uniforme del tamaño de las partículas para obtener una homogeneidad en el material. Se emplean equipos como mezcladoras y molinos de bolas.

Dado que los minerales se encuentran finamente dispersos y asociados íntimamente con la ganga, es necesario liberarlos antes de someterlos a un proceso de separación. Además, en el caso de la flotación, se busca alcanzar un tamaño específico del material, una superficie particular o un grado determinado de liberación. La molienda a un tamaño adecuado es crucial en el proceso de flotación, ya que facilita la liberación de las partículas minerales valiosas, mejora la cinética de flotación, optimiza la interacción entre las partículas y los reactivos, y contribuye al control de la granulometría del concentrado final. Estos aspectos son fundamentales para maximizar la recuperación de los minerales valiosos y mejorar la eficiencia del proceso de flotación.

2.6 Análisis Qemscan

El Qemscan (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy) es un sistema automatizado que permite realizar análisis químicos y mapas minerales de alta resolución. Funciona gracias a un SEM (Scanning Electron Microscope) y cuatro espectrómetros de rayos X (EDS: energy-dispersive X-ray spectrometers). Al incidir el haz de electrones del SEM sobre la muestra se generan backscattered electrons (BSE) que son medidos para localizar las partículas individuales dentro de la muestra. Posterior a esto, se realiza un barrido sobre la superficie en una grilla de espaciamiento definida por el usuario, con una resolución comúnmente entre 0.2 μm y 25 μm . El haz de electrones genera la emisión de rayos X producto de la liberación de energía, emitida, por los electrones de alta energía dentro del elemento, que ocupan los espacios dejados por electrones de niveles energéticos más bajos, que son sacados fuera de su posición. Los espectros de rayos X obtenidos son comparados con una base de datos y de esta forma se identifican todas las fases minerales presentes en la muestra en cada espacio de la grilla (Contreras, 2015). Un esquema del proceso se observa en la Figura 6.

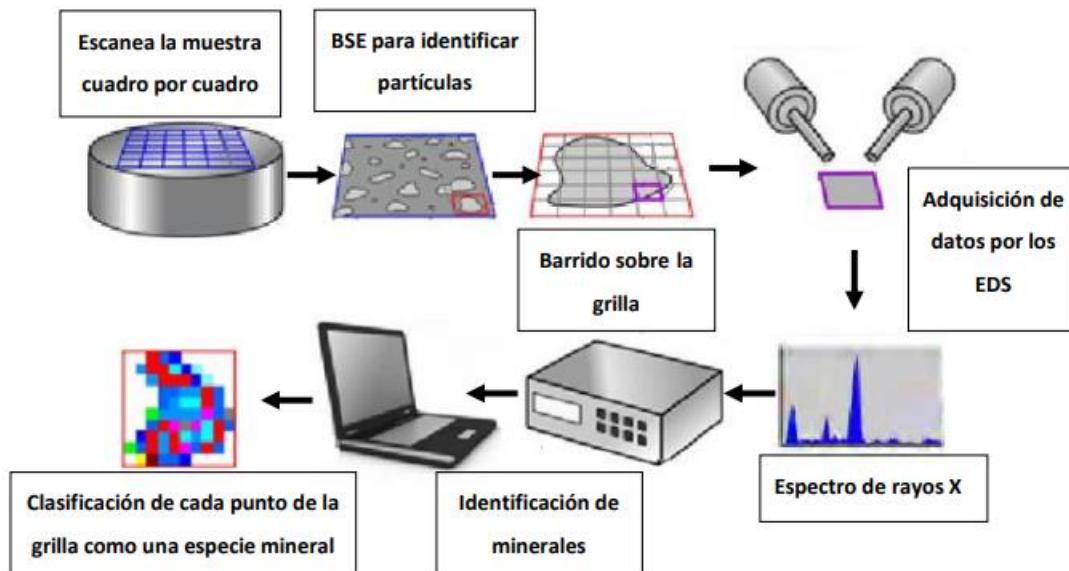


Figura 6 - Diagrama de funcionamiento del Qemscan

(Fuente: Contreras, L. (2015). Caracterización mineralógica del proceso metalúrgico y su impacto en la producción de concentrados de Cu y Mo en CMDIC).

El Qemscan tiene distintos modos de análisis, en particular el análisis mineralógico de partículas con el que realizaremos el estudio es el *Particle Mineral Analysis* o PMA, el cual es un análisis de mapeo bi-dimensional donde se mide el área de cada partícula, se realiza mediante un espaciamiento predefinido como se puede apreciar en la Figura 6. Permite determinar imágenes de las partículas, mineralogía modal cuantitativa, estimación del tamaño de grano e información de asociación mineral (Contreras, 2015).

El análisis realizado por el quemscan entrega en la Tabla 2 como resultados la siguiente composición del mineral, el cual nos sirve para comparar nuestros balances.

Tabla 2
Composición de la alimentación (de cabeza)

Mineral	Ley Cu (%)	Ley Mo (%)	Ley Fe (%)
	0,6	13,57	4,03

(Fuente: elaboración propia)

2.7 Diseño estadístico de experimentos

El objetivo principal de un diseño de experimento es determinar el efecto de varios factores, en algunas características de la variable de interés. Los principios básicos del diseño experimental son (a) la realización de réplicas y (b) la aleatorización. Por realización de réplicas se entiende la repetición del experimento básico y posee dos propiedades importantes: (i) permite al investigador obtener una estimación del error experimental y (ii) si se usa la media muestral para estimar el efecto de un factor en el experimento, la realización de réplicas permite al experimentador obtener una estimación más precisa de ese efecto (Ormeño & Álvarez, 2013).

La aleatorización es la piedra angular en la que se fundamenta el uso de los métodos estadísticos en el diseño experimental, y por aleatorización se entiende que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizan los ensayos del experimento se determinan al azar, para que las observaciones (o los errores) sean variables aleatorias con distribuciones independientes (Montgomery, 2004).

Además, el diseño estadístico de experimentos se hace necesario cuando como resultado de una investigación experimental, disponemos de una gran cantidad de datos y resultados que debemos interpretar, por lo que primeramente debemos planificar las experiencias iniciales, con el fin de observar cómo se muestra el proceso, ante la presencia o ausencia de ciertas variables y sus niveles (Louzada et al., 2012).

Posteriormente, se realiza el análisis de resultados, usando métodos estadísticos, teniendo presente el error experimental del método.

El diseño experimental de puntos centrales es una técnica de Box-Behnken utilizada en experimentos para determinar la respuesta óptima de un proceso, con un número relativamente bajo de experimentos. Este diseño se basa en la metodología de diseño de superficie de respuesta y se utiliza para explorar el espacio de diseño de variables independientes continuas. Posteriormente, se obtiene la mejor respuesta a través del diseño experimental utilizando el método de cubo. En esta etapa, se llevan a cabo tres pruebas de flotación empleando el aditivo biológico, las cuales son comparadas con tres pruebas de flotación estándar utilizando el análisis de t-student.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

Los materiales que se usaron en la presente investigación lo dividiremos en tres categorías: (a) mineral, (b) reactivos químicos y (c) aditivo biológico.

3.1.1 Mineral

Para llevar a cabo la investigación, se utilizó una muestra de 100 kg mineral suministrada por Minera Coemin exclusivamente para fines académicos. Esta muestra se obtuvo de los depósitos de cobres porfíricos, que son utilizados en los procesos de concentración de la planta principal de la empresa.

3.1.2 Reactivos químicos

Los reactivos de flotación se dividen en: colectores, espumantes y modificadores.

- **Colectores:** Para el presente estudio, se utiliza el reactivo MC-CIPXS (Xantato Isopropílico de Sodio) de Molycop Chile S.A., cuyo código es 01-CIPXS. Este reactivo ha sido empleado en la planta concentradora de la cual se obtuvo el mineral objeto de análisis. La empresa proveedora del reactivo ha proporcionado una muestra de 50 ml para llevar a cabo pruebas de laboratorio, previa solicitud realizada a su área técnica. Para estas pruebas se agregaron 0,044 g.
- **Espumante:** En el presente estudio, se emplea el reactivo Dowfroth-250 (Glicol) de Dow Chemical, identificado con el código 01-DOWFROTH-250-C. Este reactivo ha sido previamente utilizado en la planta concentradora de origen del mineral objeto de investigación. La empresa proveedora del reactivo ha suministrado una muestra de 50 ml específicamente para realizar pruebas de laboratorio, conforme a la solicitud realizada a su área técnica. Para estas pruebas se agregaron 0,022 g.

- Modificador de pH: la cal, se usa para regular la alcalinidad de la pulpa y se emplea en forma de lechada de cal, ósea una suspensión de partículas de hidróxido de calcio en una solución acuosa saturada. La cal evita los efectos adversos de las sales solubles sobre la flotación, precipitándolas como hidróxidos metálicos.

3.1.3 Aditivo biológico

En el presente estudio, se utiliza un aditivo biológico consistente en el microorganismo ATCC 2039: *Acidithiobacillus ferrooxidans Medium*. La concentración de bacterias a emplear es de $2,2 \times 10^8$ bacterias/ml. La empresa proveedora ha facilitado la muestra con el objetivo de realizar los experimentos y análisis pertinentes en el marco de la presente investigación. El protocolo de desarrollo se encuentra en el Anexo 1.

3.2 Estrategia experimental

La estrategia experimental consta de tres etapas. En primer lugar, se llevan a cabo el proceso metalúrgico de reducción de tamaño. En segundo lugar, el proceso de bioflotación toma un rol fundamental. Por último, se aplican métodos estadísticos para analizar los resultados del diseño experimental. Estas tres etapas forman el enfoque integral utilizado en el desarrollo y análisis de los experimentos en el contexto de la presente investigación.

3.2.1 Etapa de chancado y molienda.

En el contexto de pruebas de laboratorio en el ámbito minero, el proceso de reducción de tamaño adquiere una importancia significativa. Mediante el uso de equipos especializados, como chancadoras y molinos, con lo cual se logra fragmentar y moler las muestras de minerales con el objetivo de obtener partículas de tamaño controlado.

Se debe tener en consideración que se tiene que contar con los siguientes materiales:

- Muestra representativa del mineral.
- Equipos de chancado y molienda de laboratorio (trituradora de mandíbulas, molino de bolas, molino de barras, entre otros).
- Tamices de laboratorio para clasificar el mineral según su tamaño.
- Equipos de seguridad personal (guantes, gafas protectoras, bata de laboratorio, etc.).

Este procedimiento permite obtener muestras representativas para análisis detallados y evaluaciones de las propiedades de los minerales. Es por ello, que se detallará a continuación los pasos realizados para el proceso de reducción de tamaño:

1. Preparación de muestras:

- Tomar el mineral y asegurarse de que esté libre de impurezas y contaminantes.
- Homogenizar la muestra de 100 kg de mineral proveniente de una minera de la localidad de Tierra Amarilla de la región de Atacama, el cual viene en un maxisaco sin marcas ni descripción alguna desde la minera.

2. Chancado:

- Alimentar la muestra al chancador de mandíbulas para reducir su tamaño inicial. Esta máquina tiene sus marcas borradas por la oxidación y la pintura para protegerla
- Seleccionar la abertura de la trituradora en función del tamaño de partícula objetivo para las pruebas, que en este caso reduciremos el mineral a un tamaño de $\frac{3}{4}$ de pulgada.
- Luego se alimenta el material a un chancador de cono, sin marca, con un motor de 3 HP, con un setting de abertura de $\frac{3}{8}$ " llegando con ella hasta tamaño de 2 mm.

3. Clasificación del mineral chancado:

- Utilizar cribas o tamices de laboratorio para clasificar el mineral chancado en diferentes fracciones según su tamaño.

- Descartar los tamaños que no cumplan con las especificaciones requeridas para volver a pasar en el chancador de cono y dirigir el material adecuado para el siguiente paso.
4. Muestreador rotatorio:
- El material se introduce en el buzón de un alimentador vibratorio, el que descarga en un sistema rotatorio de depósitos denominados capachos.
 - Recoger el material final en las fracciones adecuadas para su posterior estudio y caracterización.
5. Molienda:
- Alimentar la muestra chancada en el molino de bolas de laboratorio de acero inoxidable tipo Marcy de 5.2 L con carga y collar estándar de bolas de marca EDEMET. Se llevará a cabo con cargas de mineral de acuerdo con la siguiente indicación:
6. Limpieza y mantenimiento:
- Realizar la limpieza adecuada de los equipos después de cada operación para evitar contaminación cruzada.
 - Verificar y mantener en óptimas condiciones los equipos para un rendimiento óptimo en las próximas pruebas.

Todos estos pasos se pueden apreciar en las *Figura 7, Figura 8, Figura 9, Figura 10 y Figura 11*, que se muestran a continuación.



Figura 7 - Maxisaco con mineral
Fuente: Fotografía propia



Figura 8 - Chancador de mandíbula
Fuente: Fotografía propia



Figura 9 - Chancador de cono
Fuente: Fotografía propia



Figura 10 - Muestreador rotatorio
Fuente: Fotografía propia



Figura 11 - Muestras individuales
Fuente: Fotografía propia

Carga del molino para la molienda

La determinación de la carga del molino es importante para optimizar el proceso de molienda en la industria minera.

En el estudio se analizó los factores tales como el tamaño del material a moler, la capacidad del molino, la velocidad de rotación y la distribución de tamaños de partículas deseados. Utilizando datos proporcionados por el laboratorio de flotación de la minera, como el porcentaje de sólidos y peso del mineral, así como la densidad del mineral medida por pícnometría en el laboratorio, pude determinar la carga adecuada del molino.

Al ajustar la carga del molino, se busca lograr un equilibrio entre la eficiencia de molienda y la capacidad de procesamiento. Una carga óptima asegura que el molino funcione de manera eficiente, evitando condiciones de sobrecarga o subcarga que podrían afectar el rendimiento y la calidad del producto final. Esto se puede apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3
Datos de la molienda del mineral

Carga del Molino	
% Sólidos	32
Densidad del mineral, g/cm ³	2,85
Peso mineral, g	1.134
Volumen de agua, cm ³	533
P80, μm	180

(Fuente: elaboración propia)

Determinación del índice granulométrico P₈₀

La determinación del índice granulométrico P₈₀ es de gran importancia en el procesamiento de minerales, ya que proporciona información sobre la distribución de tamaños de partículas en el material molido. El índice P₈₀ se define como el tamaño de partícula en el cual el 80% del material pasa a través de la malla de la prueba.

El valor específico de P₈₀ se observa en la Figura 12, que en este caso 180 μm. Esta información es utilizada para ajustar los parámetros operativos del molino, con el

objetivo de obtener la granulometría deseada y cumplir con los requisitos del producto final, que en este caso se demorará 5 minutos en el molino para obtener el P_{80} utilizado en la minera.

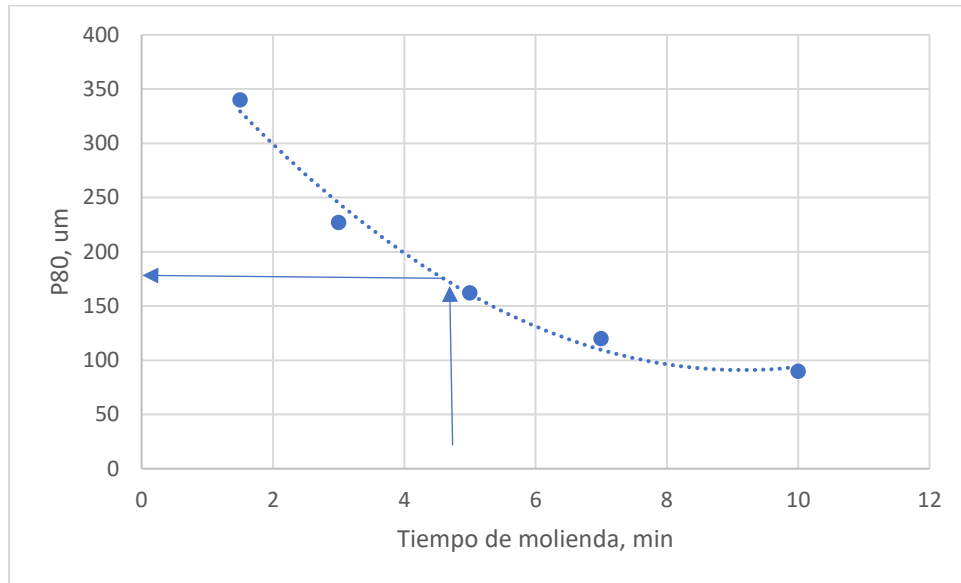


Figura 12 - Valor del índice granulométrico P_{80} en función del tiempo de molienda
(Fuente: elaboración propia)

3.3.2 Etapa de bioflotación de minerales

El diseño experimental de puntos centrales es una técnica de Box-Behnken utilizada en experimentos para determinar la respuesta óptima de un proceso, con un número relativamente bajo de experimentos. Este diseño se basa en la metodología de diseño de superficie de respuesta y se utiliza para explorar el espacio de diseño de variables independientes continuas.

La técnica de Box-Behnken es utilizada en esta investigación para evaluar los efectos de varias variables independientes (factores) sobre una o varias variables de respuesta en el proceso o sistema bajo estudio. En lugar de llevar a cabo todas las combinaciones posibles de los factores, lo cual sería costoso y requeriría mucho tiempo,

el diseño Box-Behnken permite realizar un número reducido de experimentos que proveen información valiosa sobre la influencia de los factores en el resultado deseado. Esta metodología estadística es empleada con el propósito de optimizar y estudiar procesos complejos de manera más eficiente, identificando los factores clave que afectan significativamente el resultado buscado en el proceso o sistema analizado.

El diseño experimental de estas pruebas se evalúa con las variables: (a) Número de bacterias totales, (b) tiempo de acondicionamiento (min) y (c) pH, para encontrar su mejor rendimiento.

La primera variable, (a) el número de bacterias totales se determinará a partir de la concentración inicial de bacterias en una solución madre, que se establece en $2,2 \times 10^8$ bacterias/ml (la mayor concentración de bacterias que obtuvo). Esta variable será estudiada en tres niveles diferentes: 30 ml, lo cual corresponde a un número total de $6,6 \times 10^9$ bacterias; 60 ml, que equivale a un número total de $1,32 \times 10^{10}$ bacterias; y 90 ml, que representa un número total de $1,98 \times 10^{10}$ bacterias. Estos niveles se han determinado teniendo en cuenta la relación entre la cantidad de bacterias según lo indicado por San Martín et al., 2018. Este rango de concentración de bacterias es relevante para el estudio de la bioflotación y se utilizará como referencia en el análisis de los resultados obtenidos.

La segunda variable (b) que se analizará, es el tiempo de acondicionamiento. Esta variable se explorará en tres niveles diferentes: 5, 10 y 15 minutos. Se llevarán a cabo experimentos con el objetivo de investigar el efecto del tiempo de acondicionamiento en el proceso de bioflotación. Estos niveles de tiempo se seleccionaron considerando los tiempos máximos que se utilizan típicamente en el proceso de flotación. La evaluación de esta variable permitirá comprender la influencia del tiempo de acondicionamiento en la eficacia y selectividad del proceso de bioflotación.

Finalmente, la tercera variable (c), se refiere al pH y se establecerá en tres niveles distintos: pH 4, pH 5 y pH 6. El objetivo de esta variable es examinar el impacto del pH en la eficacia del proceso de bioflotación de minerales sulfurados de cobre. Estos niveles de pH se seleccionaron considerando valores máximos dentro de los cuales la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* muestra un comportamiento adecuado. El análisis de esta

variable permitirá evaluar la influencia del pH en la interacción entre las bacterias y los minerales sulfurados durante el proceso de bioflotación, y proporcionará información relevante para la optimización de las condiciones operativas de este proceso.

Estas variables serán cuidadosamente controladas y estudiadas en el marco de la investigación, con el objetivo de comprender su influencia en el rendimiento y los resultados de la bioflotación. Se realizan 17 corridas para que este modelo funcione.

Estos datos se evaluarán en el software Design Expert 22, con lo que se podrá saber a través de una superficie de respuesta, con lo que se podrá saber la mejor variable para poder comparar la depreciación de la pirita, según la Tabla 4.

Tabla 4
Matriz experimental desarrollada en el software Design Expert 22

STD	Corrida	Factor 1 Número de bacterias totales	Factor 2 Tiempo de acondicionamiento (min)	Factor 3 pH	Respuesta Recuperación Cu (%)
1	3	1,98x10 ¹⁰	10	4	89,85
2	14	1,32x10 ¹⁰	10	5	87,64
3	17	1,98x10 ¹⁰	5	5	83,26
4	15	6,60x10 ⁹	10	6	85,71
5	5	1,98x10 ¹⁰	10	6	91,38
6	11	1,32x10 ¹⁰	15	4	87,09
7	13	1,98x10 ¹⁰	15	5	91,83
8	8	1,32x10 ¹⁰	10	5	88,51
9	10	1,32x10 ¹⁰	10	5	88,26
10	7	6,60x10 ⁹	15	5	84,76
11	1	6,60x10 ⁹	5	5	84,52
12	9	1,32x10 ¹⁰	15	6	88,89
13	6	1,32x10 ¹⁰	10	5	86,75
14	4	1,32x10 ¹⁰	10	5	85,32
15	16	1,32x10 ¹⁰	5	4	86,82
16	2	6,60x10 ⁹	10	4	84,10
17	12	1,32x10 ¹⁰	5	6	88,32

Las pruebas de flotación se llevaron a cabo con los siguientes materiales y procedimientos:

Materiales:

- Muestra de mineral de interés
- Agua
- Reactivos de flotación (colectores, espumantes, reguladores de pH, bacterias)
- Celda de flotación de laboratorio
- Cajas de colectores de muestras

Procedimiento:

1. Determinación de la granulometría:
 - Se realiza un análisis granulométrico de la muestra utilizando tamices de diferentes tamaños para obtener la distribución del tamaño de partícula hasta malla #500.
2. Preparación de la pulpa:
 - Se prepara la carga del molino con 1.134 g de mineral y 1.768 ml de agua.
 - Tiempo de flotación: 10 minutos
 - pH: 4, 5 o 6, según lo indique el diseño experimental
 - Celda Edemet CFLE 3.3 de 2.7L
 - Sólidos, %: 33
 - Agitación de la celda, rpm: 900
 - Flujo de aire, L/min: 7
3. Adición de reactivos:
 - Se agrega en primer lugar las bacterias y se realizará un acondicionamiento según el diseño experimental previamente establecido. Posteriormente se agrega los reactivos tales como colectores, espumantes y reguladores de pH de ser necesario.
4. Acondicionamiento:

- La pulpa se someterá a un acondicionamiento final adecuado en una celda de flotación para permitir que los reactivos interactúen con las partículas de mineral.
5. Flotación:
- Se realizará el proceso de flotación en la celda de flotación como en la Figura 13, permitiendo que las partículas de interés se adhieran a las burbujas de aire y floten hacia la superficie para formar la espuma.



Figura 13 - Celda de flotación automática Edemet
(Fuente: fotografía propia)

6. Recolección de concentrados:
- Se recolectarán los concentrados formados en la parte superior de la celda de flotación en cajas de colectores de muestras. Estos concentrados representan la fracción enriquecida del mineral de interés y también se recolectará la cola de estos.
7. Análisis de concentrados:

- Se realizarán análisis químicos de los concentrados para determinar las leyes de los elementos o minerales de interés. Se contempla la realización de análisis químicos por Cu, Mo y Fe. Las muestras deben estar adecuadamente roleadas y cuarteadas, para luego ser pulverizadas para enviar a análisis químicos. Se enviarán a análisis químico a los Laboratorio de Moly-Cop.
8. Cálculo de recuperación:
- Se calculará la recuperación de cada concentrado en función de las leyes obtenidas.
9. Análisis de resultados:
- Se analizarán los resultados obtenidos para evaluar la eficiencia del proceso de flotación.

Al finalizar el proceso de flotación, se separó el concentrado y la cola (relave) resultantes y se procedió a secar ambos productos antes de realizar su análisis químico. Los análisis se llevaron a cabo para determinar los contenidos de cobre, molibdeno y hierro en el concentrado y la cola.

Las muestras obtenidas de estas flotaciones fueron enviadas a un laboratorio químico para su análisis. Una vez obtenidos los resultados de los análisis, se realizarán los balances de masa correspondientes, y posteriormente se introducirán los datos en el modelo para llevar a cabo los análisis y evaluaciones correspondientes luego de realizar los balances metalúrgicos.

Los análisis químicos desempeñan un papel fundamental en la caracterización de los minerales obtenidos durante el proceso de flotación. Estos análisis proporcionan datos precisos y detallados sobre la composición química de los minerales presentes en la alimentación, el concentrado y las colas (relaves).

La información obtenida a partir de los análisis químicos se utiliza para calcular las cantidades de los minerales de interés presentes en cada una de estas fracciones. Estos cálculos son fundamentales para realizar los balances metalúrgicos, que son una

herramienta clave en el análisis del rendimiento y la eficiencia del proceso de flotación, de acuerdo a la Figura 14.

Si tenemos el siguiente esquema:

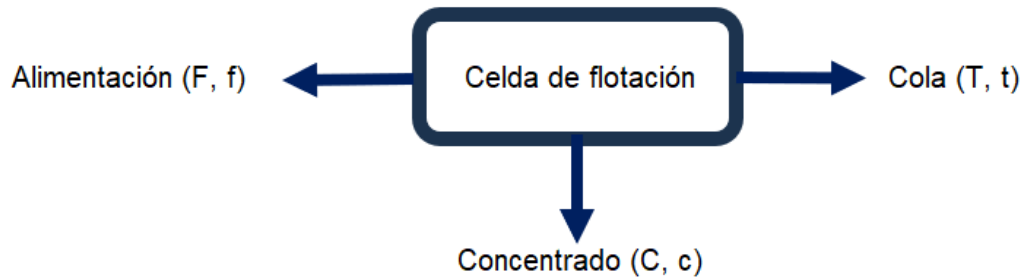


Figura 14 - Esquema de una celda de flotación
(Fuente: elaboración propia)

Balance de sólidos $F = C + T$, siendo las masas de la alimentación, concentrado y cola respectivamente.

Balance de finos $Ff = Cc + Tt$, siendo f, c y t los finos (ley) de la alimentación, concentrado y cola respectivamente.

$$Ff = Cc + Tt$$

$$(C + T)(f) = Cc + Tt$$

$$Cf + Tf = Cc + Tt$$

$$Tf - Tt = Cc - Cf$$

$$T(f - t) = C(c - f)$$

$$C = \frac{T(f - t)}{c - f}$$

Y el porcentaje de recuperación en un balance metalúrgico se calcula comparando la cantidad de un componente valioso que se recupera en el proceso con la cantidad inicialmente presente en la alimentación.

Los resultados de los balances metalúrgicos proporcionan información sobre el porcentaje de recuperación de cobre, molibdeno y fierro en el proceso de concentración. El porcentaje de recuperación se calcula dividiendo la cantidad recuperada de un componente o mineral valioso entre la cantidad inicialmente presente en la alimentación y luego multiplicando el resultado por 100.

La fórmula general para calcular el porcentaje de recuperación se representa en la ecuación 1:

Ecuación 1 - Cálculo del porcentaje de recuperación

$$\%Recuperación = \left(\frac{\text{cantidad recuperado}}{\text{Cantidad inicial}} \times 100 \right)$$

Donde:

Cantidad recuperada: Es la cantidad del componente valioso que se ha recuperado en el proceso.

Cantidad inicial: Es la cantidad inicial del componente valioso que estaba presente en la alimentación al proceso.

Los balances metalúrgicos permiten determinar la distribución y la recuperación de los elementos o minerales de interés en el proceso de flotación. Estos cálculos cuantifican la cantidad de mineral valioso que se está recuperando en comparación con la cantidad total presente en la alimentación. De esta manera, los balances metalúrgicos proporcionan información importante para evaluar la eficiencia del proceso y optimizar su desempeño.

Además, los balances metalúrgicos también son utilizados para realizar análisis comparativos entre diferentes condiciones operativas o variaciones en el proceso. Estos análisis permiten identificar oportunidades de mejora, detectar posibles problemas o desviaciones en la recuperación de minerales y proporcionar una base sólida para la toma de decisiones en la optimización del proceso de flotación. Estos balances se basan en el principio de conservación de la masa, donde se establece que la cantidad de masa

que entra a un proceso debe ser igual a la cantidad de masa que sale del mismo. Permiten evaluar la eficiencia de cada etapa y determinar la recuperación de los componentes valiosos.

3.2.3 Análisis estadístico

Se realizaron tres (3) flotaciones estándar y tres (3) flotaciones utilizando el aditivo bacteriano, de acuerdo a lo óptimo encontrado en el diseño. La inclusión de estas flotaciones adicionales fue de gran relevancia, ya que permitió evaluar de manera más exhaustiva el impacto del aditivo bacteriano en el proceso de flotación y su efecto en la recuperación de minerales. Al comparar las respuestas obtenidas en las flotaciones estándar con las flotaciones utilizando el aditivo bacteriano, fue posible identificar cualquier mejora o diferencia significativa en los resultados.

Se llevan a cabo tres pruebas de flotación empleando el aditivo biológico, las cuales son comparadas con tres pruebas de flotación convencional utilizando el análisis de t-student. El propósito de esta comparación es evaluar si el aditivo cumple con los objetivos establecidos, incluyendo la determinación de si el aditivo no afecta la recuperación de cobre y si tiene un efecto depresor en la pirita, lo cual puede influir en la recuperación de cobre. Estas pruebas son de vital importancia para analizar el rendimiento del aditivo y su impacto en el proceso de flotación, permitiendo tomar decisiones fundamentadas sobre su implementación en futuras operaciones.

A continuación, en la Figura 15, presentamos un esquema de los procesos involucrados:

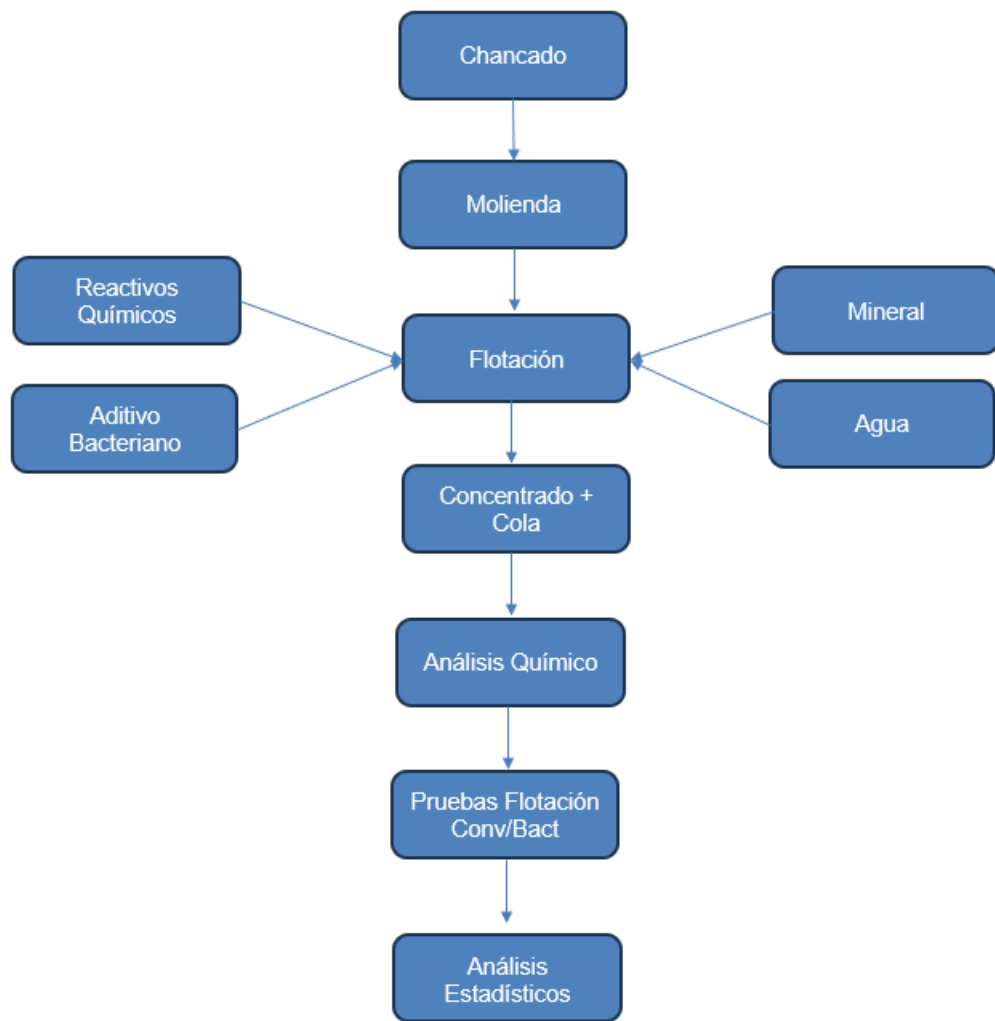


Figura 15 - Diagrama de flujo de las pruebas y ensayos realizados.

(Fuente: elaboración propia)

4. RESULTADOS

4.1 Estudio de molienda

Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se utiliza para determinar la distribución de tamaños de partículas en una muestra de material. Es una herramienta en la caracterización de minerales. La granulometría de las muestras de arena se obtiene a partir del tamizado del material por mallas estandarizadas según la norma ASTM C-136, hasta un tamaño de 25 μm (malla #500). En la Tabla 5 y Figura 16 podemos observar que se cumple el P_{80} solicita de alrededor de 150 μm , cumpliendo con una de las especificaciones de la planta, antes de iniciar el proceso de flotación.

Tabla 5
Análisis granulométrico

Malla ASTM		Retenido		Ret. Acum.	Pas. Acum.
#	μm	g	%	%	%
				0	100
10	2.000	0,07	0,03	0,03	99,97
40	425	0,05	0,02	0,05	99,95
60	250	10,00	4,23	4,28	95,72
100	150	31,80	13,46	17,74	82,26
140	106	20,46	8,66	26,40	73,60
200	75	21,29	9,01	35,41	64,59
270	53	22,17	9,38	44,79	55,21
325	45	12,99	5,50	50,29	49,71
400	38	11,10	4,70	54,99	45,01
500	25	10,77	4,56	59,54	40,46
-500		3,21	1,36		

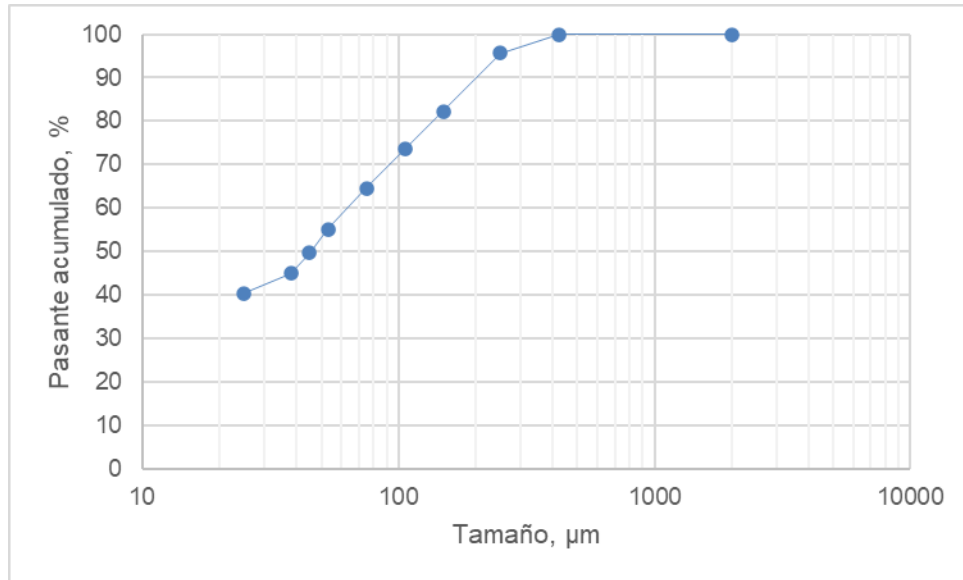


Figura 16 - Distribución granulométrica

Fuente: Elaboración propia

4.2 Estudio de flotación

4.2.1 Resultados de la prueba de flotación

La determinación de la masa se realiza a partir de los gramos recuperados durante el proceso de flotación, que corresponde a la cantidad de material valioso obtenido como producto final. Esta masa recuperada se obtiene mediante el pesaje preciso y cuidadoso de los concentrados obtenidos en la etapa de flotación. Por otro lado, los porcentajes de mineral se obtienen a través de los resultados de pruebas químicas realizadas en laboratorio. Estas pruebas químicas permiten determinar la composición y contenido de los minerales de interés presentes en la muestra.

En la Tabla 6 se muestran las masas y porcentajes de mineral de interés en el concentrado del mineral.

Tabla 6
Masa y porcentaje de mineral de interés presente en el concentrado.

	Masa (g)	Cu%	Mo%	Fe%
Concentrado 1	176,4	3,20	70,80	20,70
Concentrado 2	176,8	3,50	72,00	17,90
Concentrado 3	200,3	3,40	72,70	17,30
Concentrado 4	196,0	3,40	71,60	18,60
Concentrado 5	184,4	3,50	73,20	20,50
Concentrado 6	200,4	3,60	74,20	18,30
Concentrado 7	192,7	3,20	71,90	17,20
Concentrado 8	201,5	3,40	66,80	18,00
Concentrado 9	177,5	3,00	68,50	19,30
Concentrado 10	192,5	3,50	75,20	19,20
Concentrado 11	187,9	3,20	69,70	18,90
Concentrado 12	191,5	3,40	70,50	20,10
Concentrado 13	189,2	3,50	72,10	20,80
Concentrado 14	187,5	3,40	70,60	19,70
Concentrado 15	194,1	3,50	69,90	20,90
Concentrado 16	189,9	3,20	72,40	20,70
Concentrado 17	179,4	3,00	67,90	19,90

La determinación de la masa se realiza a partir de los gramos de material que quedaron en la celda de flotación después del proceso de flotación, conocido como relaves o cola. Estos gramos corresponden al material que no se ha podido recuperar como producto final y que se descarta como residuo.

Para obtener los porcentajes de mineral, se llevan a cabo pruebas químicas en el laboratorio. Estas pruebas permiten determinar la composición y contenido de los minerales presentes en los relaves como se aprecia en la Tabla 7.

Tabla 7
Masa y porcentaje de mineral de interés presente en la cola

	Masa (g)	Cu%	Mo%	Fe%
Cola 1	1044,6	0,10	3,30	1,10
Cola 2	1034,2	0,11	3,20	2,00
Cola 3	1020,7	0,12	2,60	1,70
Cola 4	1005,0	0,06	2,90	1,90
Cola 5	1016,6	0,12	2,90	1,20
Cola 6	1044,6	0,08	3,00	1,90
Cola 7	1038,3	0,10	2,50	1,30
Cola 8	994,5	0,07	2,90	1,10
Cola 9	998,0	0,08	2,30	1,90
Cola 10	1008,5	0,10	2,70	0,50
Cola 11	1060,4	0,08	2,60	1,20
Cola 12	1017,6	0,08	2,80	1,60
Cola 13	1011,9	0,09	2,60	1,90
Cola 14	998,6	0,09	2,90	2,10
Cola 15	1004,1	0,09	3,10	1,10
Cola 16	1031,5	0,09	2,80	1,90
Cola 17	1028,9	0,09	3,50	1,80

A continuación, en la Tabla 8, se presentan los porcentajes de recuperación obtenidos:

Tabla 8
Porcentaje de recuperación

	% Recuperación		
	Cu %	Mo %	Fe %
Prueba 1	84,52	78,37	76,06
Prueba 2	83,26	79,37	60,47
Prueba 3	84,76	84,58	66,63
Prueba 4	91,83	82,80	65,63
Prueba 5	84,10	82,07	75,60
Prueba 6	89,85	82,59	64,88
Prueba 7	85,71	84,22	71,06
Prueba 8	91,38	82,35	76,83
Prueba 9	86,82	84,12	64,38
Prueba 10	87,09	84,17	87,99
Prueba 11	88,32	82,61	73,62
Prueba 12	88,89	82,58	70,28
Prueba 13	88,51	83,83	67,18
Prueba 14	87,64	82,05	63,78
Prueba 15	88,26	81,34	78,60
Prueba 16	86,75	82,64	66,73
Prueba 17	85,32	77,18	65,84

La importancia de estos resultados es que reflejan la efectividad del proceso de concentración en la recuperación de los minerales de interés. Además, permiten evaluar la eficiencia global del proceso y determinar si se cumplen los objetivos metalúrgicos establecidos.

4.3 Análisis estadístico

Los resultados del análisis de varianza proporcionan información valiosa sobre la influencia de los factores en la recuperación de minerales. Se evalúan las significancias estadísticas de los factores individuales, así como las interacciones entre ellos. Esto permitió identificar aquellos factores que tenían un impacto significativo en la recuperación y comprender cómo interactuaban entre sí.

Tabla 9
Resumen del ajuste del modelo

Fuente	Valor P secuencial	falta de ajuste Valor P	R² ajustado	R² predicho	
Lineal	0,0126	0,2035	0,4505	0,1321	Sugerido
2FI	0,1491	0,2741	0,5709	-0,1005	
Cuadrático	0,4690	0,2131	0,5636	-1,0582	
Cúbico	0,2131		0,7240		

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con datos entregados por el Design Expert 22

La Tabla 9 proporciona una evaluación de qué tan bien se ajusta el modelo a los datos observados. Se utilizan medidas como el coeficiente de determinación (R^2) y los p-valores para evaluar la calidad y la adecuación del modelo.

Al examinar los datos, se observa que el resultado óptimo pronosticado por el software corresponde a una condición sin curvatura. Esta ausencia de curvatura sugiere que la región de estudio se caracteriza por ser plana, lo cual probablemente indique que se está dentro de la zona de operación óptima. Cabe destacar que estos procedimientos se encuentran altamente estandarizados, lo que implica que muchos de los reactivos involucrados ya han sido objeto de optimización respectiva y sus respuestas en muchos casos son máximas.

Tabla 10
Comparación entre modelos

Fuente	Suma de cuadrado	df	Cuadrado medio	Valor F	Valor P	
Media vs Total	1,29x10 ⁸	1	1,29x10 ⁸			
Lineal vs Media	53,93	3	17,98	5,37	0,0126	Sugerido
2FI vs Lineal	17,37	3	5,79	2,22	0,1491	
Cuadrática vs 2FI	7,53	3	2,51	0,9446	0,469	
Cúbica vs Cuadrática	11,88	3	3,96	2,36	0,2131	
Residual	6,72	4	1,68			
Total	1,30x10 ⁸	17	7615,83			

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con datos proporcionados por el Design Expert
22

La comparación de diferentes modelos de la Tabla 10, como el lineal, el de 2FI, el cuadrático y el cúbico, se basa en su capacidad para ajustarse a los datos y capturar la relación entre las variables independientes y la respuesta en un diseño experimental.

El modelo lineal asume una relación lineal, el modelo de 2FI considera interacciones, el modelo cuadrático incluye efectos no lineales y el modelo cúbico permite capturar efectos no lineales más complejos. La elección del modelo dependió de la naturaleza del problema y se evaluó mediante análisis de varianza y medidas de ajuste como el coeficiente de determinación y el error estándar residual, con la información entregada por el software.

Se seleccionó el modelo que proporciona la mejor descripción de los datos y una mayor capacidad predictiva, que en este caso sería el modelo lineal.

Tabla 11
Análisis de varianza

Fuente	Suma de cuadrado	df	Cuadrado medio	Valor F	Valor P	
Modelo	53,93	3	17,98	5,37	0,0126	Significativo
A-Bacterias totales	37,11	1	37,11	11,09	0,0054	
B-Tiempo de acondicionamier	11,64	1	11,64	3,48	0,0849	
C-pH	5,18	1	5,18	1,55	0,2352	
Residual	43,5	13	3,35			
Falta de ajuste	36,78	9	4,09	2,43	0,2035	No significativo
Error Puro	6,72	4	1,68			

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con datos proporcionados por el Design Expert
22

El análisis de varianza (ANOVA) es una herramienta estadística utilizada para determinar si existen diferencias significativas entre grupos y evaluar el efecto de variables independientes en una variable de interés.

Como se puede ver en la Tabla 11, el valor F obtenido para el modelo, que es de 5,37, indica que el modelo es estadísticamente significativo. Esto significa que existe una baja probabilidad, aproximadamente del 1,26%, de que un valor F tan alto se deba únicamente al azar o al ruido.

Al analizar los valores P de los términos del modelo, aquellos inferiores a 0,0500 indican que los términos son estadísticamente significativos. En este caso, se observa que el término A es significativo en el modelo. Por otro lado, los valores P superiores a 0,1000 indican que los términos no son estadísticamente significativos. Si se identifican muchos términos no significativos en el modelo (a excepción de aquellos necesarios para mantener la estructura jerárquica del modelo), es posible que se pueda mejorar el modelo mediante una reducción de términos.

En cuanto al valor F de falta de ajuste, que es de 2,43, se concluye que la falta de ajuste no es estadísticamente significativa en comparación con el error puro. Esto implica que existe una probabilidad del 20,35% de que un valor F de falta de ajuste tan alto se deba únicamente al azar o al ruido. En general, una falta de ajuste no significativa es deseable, ya que indica que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos observados.

Tabla 12
Estadística de ajuste

Desv. Stan.	1,83 R²	0,5535
Media	87,24 R² ajustado	0,4505
C.V. %	2,1 R² Predicho	0,1321
	Precisión Adecuada	75,731

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con datos proporcionados por el Design Expert
22

De acuerdo a la Tabla 12, el valor del R² en el modelo que es de 0,5535 se acerca al R² ajustado de 0,4505 como se esperaría normalmente. La medida de Precisión adecuada se utiliza para evaluar la relación señal/ruido en el modelo se considera deseable una relación superior a 4 para garantizar una señal adecuada en comparación con el ruido. En el caso del modelo analizado, se obtuvo un valor de 75,731 para esta medida, lo cual indica que la señal en el modelo es suficientemente fuerte. Por lo tanto, este modelo puede utilizarse de manera efectiva para explorar el espacio de diseño y obtener información valiosa sobre las variables y su impacto en la respuesta.

Ecuación 2 - Ecuación final en términos de factores reales

$$\text{Recuperación de Cobre} = 76.49088 + (3.2632E - 10 * \text{Bacterias totales}) + (0.241250 * \text{Tiempo de acondicionamiento}) + (0.805000 * \text{pH})$$

La ecuación 2 representa los términos de los factores reales del modelo puede ser utilizada para realizar predicciones sobre la respuesta en función de los niveles específicos de cada factor. Es importante tener en cuenta que los niveles de los factores deben especificarse en las unidades originales correspondientes a cada factor.

Sin embargo, es importante destacar que esta ecuación no debe utilizarse para determinar el impacto relativo de cada factor en la respuesta. Esto se debe a que los coeficientes de la ecuación están escalados para acomodar las unidades de medida de

cada factor y la intersección de la ecuación no se encuentra en el centro del espacio de diseño. La ecuación en términos de factores reales permite realizar estimaciones y predicciones para configuraciones específicas de los niveles de los factores.

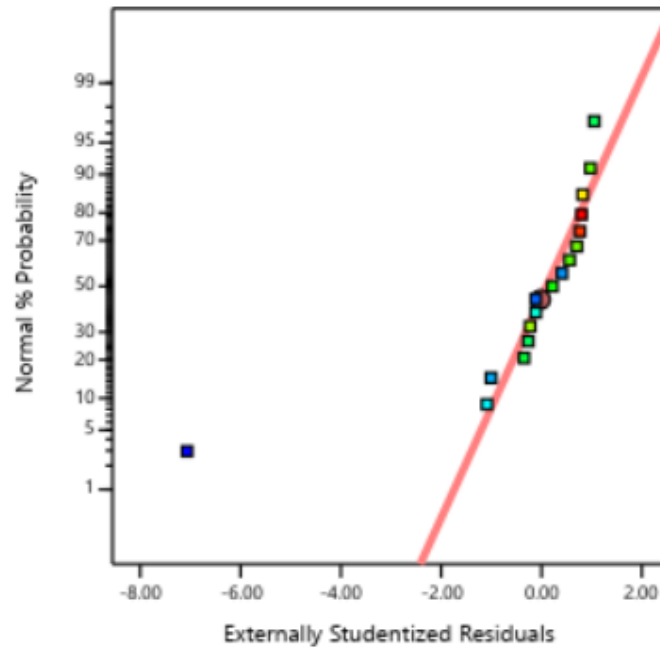


Figura 17 - Gráfico normal de residuos

Fuente: Design Expert 22

El gráfico Half Normal Plot de la Figura 17 es una herramienta útil para identificar los efectos significativos en los experimentos factoriales.

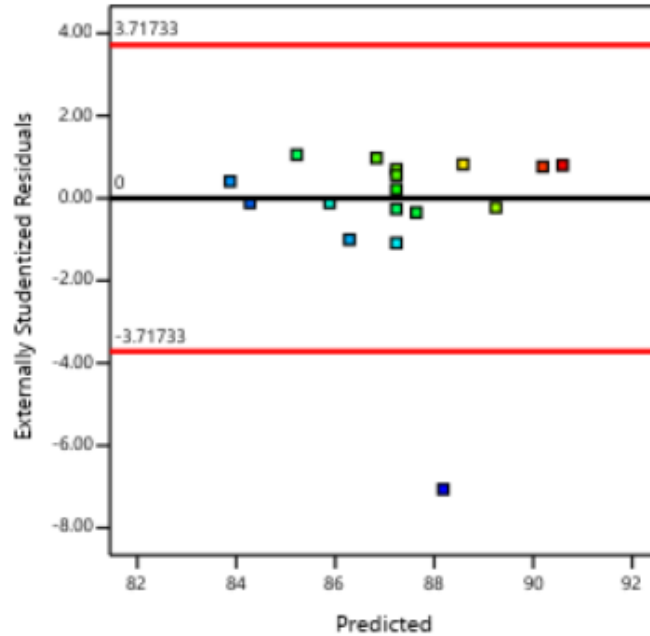


Figura 18 - Residuales versus predichos

Fuente: Design Expert 22

La Figura 18 de Residuales versus Predichos es una herramienta valiosa para evaluar la calidad del ajuste del modelo de regresión y detectar patrones, valores atípicos o problemas de no linealidad en los residuos. Si la relación entre los datos y el modelo es lineal, los residuos deberían estar distribuidos aleatoriamente a ambos lados de la línea central.

Los gráficos 3D de superficie son representación visual que muestra cómo una respuesta o variable dependiente cambia en función de dos variables independientes. Es una herramienta útil en el análisis de datos para visualizar patrones complejos y relaciones entre variables en un espacio tridimensional.

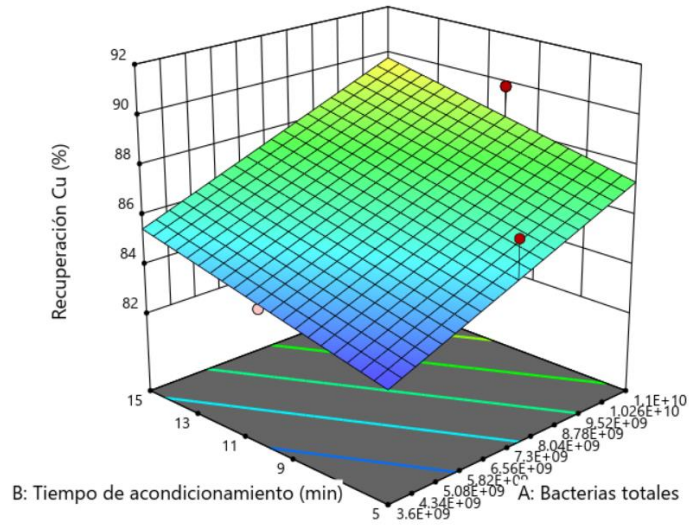


Figura 19 - Gráfico 3D de superficie a PH 4

Fuente: Design Expert 22

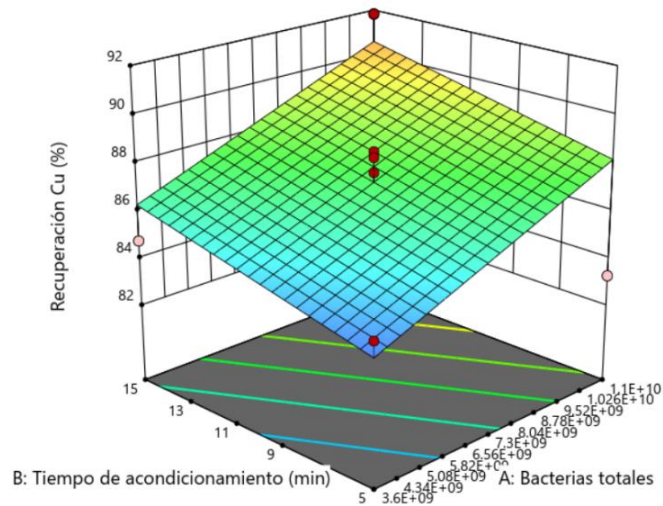


Figura 20 - Gráfico 3D de superficie a PH 5

Fuente: Design Expert 22

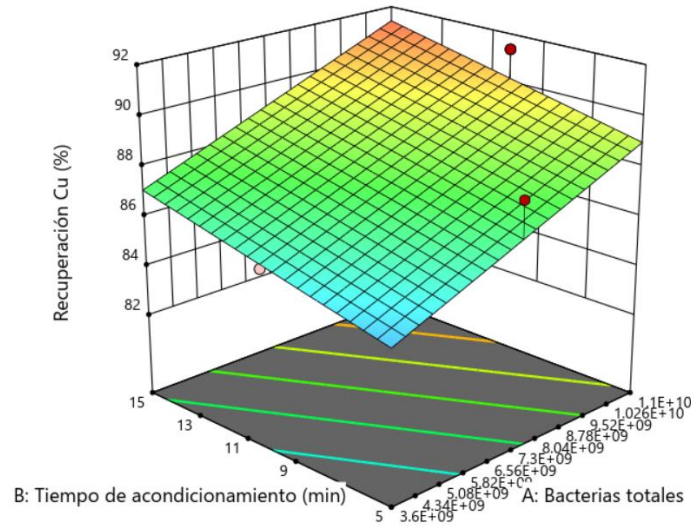


Figura 21 - Gráfico 3D de superficie a PH 6

Fuente: Design Expert 22

El análisis de las Figura 19, Figura 20 y Figura 21 del gráfico 3D de superficie revela que para diferentes valores de pH, la respuesta de recuperación exhibe cambios mínimos. Estos resultados están en concordancia con la falta de significancia estadística asignada al pH, como se evidencia por el p-value obtenido en el análisis de varianza (ANOVA).

Esto sugiere que el pH no tiene un impacto sustancial en la respuesta de recuperación en estos tres valores, y cualquier variación observada puede atribuirse a la variabilidad natural de los datos en lugar de una influencia significativa del pH en el proceso.

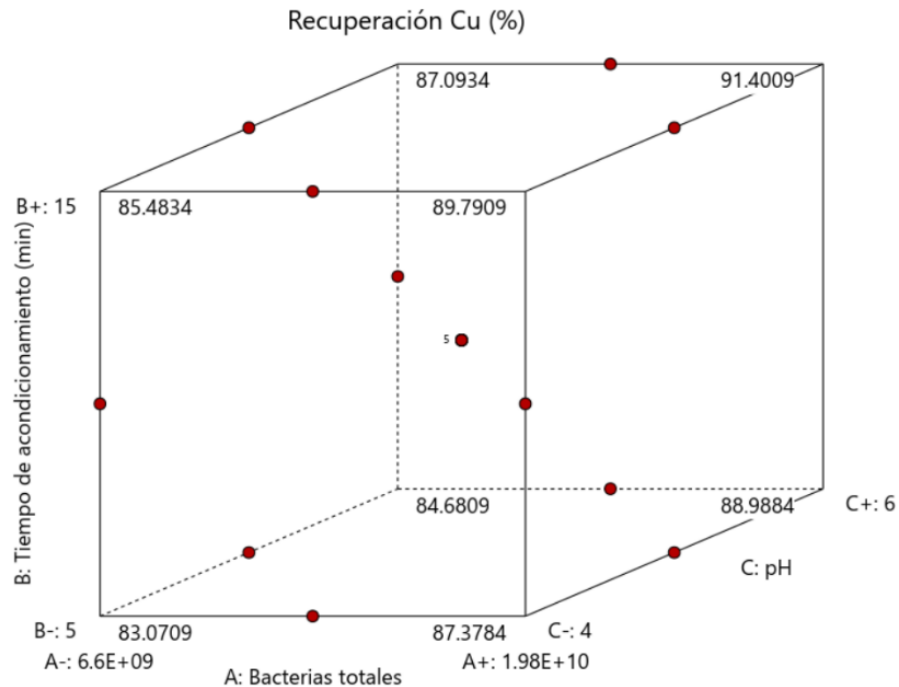


Figura 22 - Cubo del diseño experimental

Fuente: Design Expert 22

El cubo es una representación gráfica de un diseño factorial completo. El cubo muestra todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores y se utiliza para visualizar los efectos de los factores en la respuesta. La observación del cubo de la Figura 22, permite inferir que la combinación óptima para lograr la mejor recuperación se encuentra en un tiempo de acondicionamiento de 15 minutos, una dosis de $1,98 \times 10^{10}$ bacterias y un pH de 6, con ello obtenemos una recuperación de 91,4%.

Además, se destaca que utilizar un pH de 6 requiere una menor cantidad de cal en comparación al valor estandar de pH para estas pruebas que se encuentran en pH 9, lo que puede resultar en beneficios económicos al reducir el uso de este reactivo.

Por otro lado, si uno observa que a un tiempo de acondicionamiento de 15 minutos, una dosis de $1,98 \times 10^{10}$ bacterias y un pH de 4, se obtiene una recuperación de 89,79% de cobre, es posible que disminuir el uso de cal manteniendo una buena recuperación de cobre.

Si bien este punto es beneficio y va en línea con el objetivo de este trabajo, se debe estudiar si la disminución de la recuperación en 1,6 puntos compensa económicamente esa disminución de pH.

Después de analizar los resultados obtenidos, se optó por trabajar con pH 6 y la mejor recuperación de cobre, ya que es el factor más importante en la planta de concentrado de cobre.

Posteriormente se llevarón a cabo pruebas de flotación convencionales utilizando métodos químicos tradicionales, así como pruebas de flotación utilizando el proceso bacteriano. El propósito de estas pruebas fué evaluar y comparar los resultados de ambos métodos en términos de eficiencia de recuperación, variando sólo el número total de bacterias. Y sus resultados los podemos ver la Tabla 13.

Tabla 13
Porcentaje de recuperación

	PRUEBA CONVENCIONAL				PRUEBA BACTERIANA			
	% RECUPERACIÓN GLOBAL			% REC COLA	% RECUPERACIÓN GLOBAL			% REC COLA
	Cu %	Mo %	Fe %	Fe %	Cu %	Mo %	Fe %	Fe %
	86,52	79,34	67,50	32,50	86,73	79,64	69,47	30,53
	85,76	80,14	68,72	31,28	84,29	81,15	65,72	34,28
	87,87	84,81	68,71	31,29	84,67	82,92	65,32	34,68
Promedio	86,72	81,43	68,31	31,69	85,23	81,24	66,84	33,16
Desv. Standard	1,07	2,95	0,70	0,70	1,32	1,64	2,29	2,29

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de llevar a cabo una comparación objetiva y estadísticamente fundamentada entre los métodos de flotación convencionales y el proceso bacteriano, se realizará un análisis de prueba t.

Este análisis se llevará a cabo tanto para el porcentaje de cobre como para el porcentaje de hierro obtenidos en ambas pruebas de flotación.

Este análisis se realizará para ver si existen diferencias significativas en los porcentajes de cobre y hierro entre los dos métodos de flotación. Se utilizará el test t, que es una prueba estadística utilizada para comparar medias de dos grupos independientes.

Prueba de porcentaje de cobre:

- Hipótesis nula (H0): No hay diferencias significativas en el porcentaje de cobre entre los métodos de flotación convencionales y el proceso bacteriano.
- Hipótesis alternativa (H1): Existen diferencias significativas en el porcentaje de cobre entre los métodos de flotación convencionales y el proceso bacteriano.

Tabla 14
Prueba t-student para dos muestras de cobre suponiendo varianzas iguales

	<i>Cu conv %</i>	<i>Cu bact %</i>
Media	86,7169846	85,2299538
Varianza	1,13450011	1,73049825
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	1,43249918	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	1,52166274	
P(T<=t) una cola	0,10137243	
Valor crítico de t (una cola)	2,13184679	
P(T<=t) dos colas	0,20274486	
Valor crítico de t (dos colas)	2,77644511	

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los datos obtenidos en la Tabla 14, no hay diferencias significativas en el porcentaje de cobre entre los métodos de flotación convencionales y el proceso bacteriano.

Prueba de porcentaje de hierro:

- Hipótesis nula (H0): No hay diferencias significativas en el porcentaje de hierro entre los métodos de flotación convencionales y el proceso bacteriano.
- Hipótesis alternativa (H1): Existen diferencias significativas en el porcentaje de hierro entre los métodos de flotación convencionales y el proceso bacteriano.

Tabla 15
Prueba t-student para dos muestras de hierro suponiendo varianzas iguales

	<i>Fe conv %</i>	<i>Fe bact %</i>
Media	68,3070349	66,8370858
Varianza	0,49218772	5,23710754
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	2,86464763	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	1,06368326	
P(T<=t) una cola	0,17371143	
Valor crítico de t (una cola)	2,13184679	
P(T<=t) dos colas	0,34742286	
Valor crítico de t (dos colas)	2,77644511	

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 15, no hay diferencias significativas en el porcentaje de hierro entre los métodos de flotación convencionales y el proceso bacteriano

La evaluación de los porcentajes de recuperación de cobre en presencia y ausencia del aditivo de origen bacteriano se llevó a cabo mediante pruebas t, que permitieron realizar una comparación estadística de los resultados.

Los análisis realizados no revelaron diferencias significativas entre los porcentajes de recuperación de cobre en ambos casos, lo cual indica que la presencia del aditivo bacteriano no tiene un impacto significativo en la eficiencia de recuperación del cobre

durante el proceso de concentración. Estos resultados son alentadores, ya que demuestran que la adición del aditivo bacteriano no afecta negativamente la recuperación de cobre, lo que es fundamental para garantizar la viabilidad del proceso de concentración. Estos resultados son relevantes desde el punto de vista metalúrgico, ya que proporcionan información sobre la selectividad del proceso de concentración en presencia del aditivo bacteriano.

Pero, al profundizar los resultados obtenidos, se observó que la presencia del aditivo bacteriano condujo a un incremento del 4,6% en el porcentaje de recuperación de hierro en la cola. Este hallazgo sugiere que el aditivo bacteriano puede tener un efecto selectivo en la distribución de los minerales durante el proceso de concentración, promoviendo una mayor retención de hierro en la cola. Es importante destacar que este incremento en la recuperación de hierro no es significativo en términos porcentuales.

Además, se observó una ligera disminución del 1,7% en el porcentaje de recuperación de cobre en presencia del aditivo bacteriano. Aunque esta disminución no fue estadísticamente significativa, por lo que pudo deberse a un error experimental.

5. CONCLUSIONES

A lo largo de la investigación, se llevaron a cabo una serie de ensayos y análisis para evaluar el objetivo general y para alcanzar los objetivos específicos establecidos.

En primer lugar, sobre el primer objetivo específico, que es determinar si las características del mineral cumplen con las características del mineral utilizado en la minera para su proceso de flotación, el cual era un P_{80} de 150 μm . Este valor se obtuvo correctamente de acuerdo con el análisis granulométrico realizado. Este valor es importante de obtener para lograr replicar de buena manera el tamaño de partícula que se utiliza en planta.

Con respecto al segundo objetivo específico, de si existe algún efecto preferente de alguno de los factores estudiados en el experimento Box-Behnken, se encontró que al analizar los valores P de los términos del modelo, aquellos inferiores a 0,0500 indican que los términos son estadísticamente significativos. En este caso, se observa que sólo el número de las bacterias totales es significativo en el modelo.

Y en relación al tercer objetivo específico, de los resultados de las pruebas t-student, se observó que al comparar los porcentajes de recuperación de cobre obtenidos en presencia y ausencia del aditivo bacteriano, los resultados de estas pruebas no mostraron diferencias significativas entre los porcentajes de recuperación, lo que indica que el aditivo de origen bacteriano no afecta de manera significativa la recuperación de cobre en el proceso de concentración, conociendo eso, podemos observar una depresión de la pirita en presencia del aditivo bacteriano, en torno a un 4,6%, sin embargo, los análisis estadísticos no proporcionaron evidencia significativa que respaldara numéricamente esta observación. Estos resultados sugieren que el aditivo de origen bacteriano tiene una leve capacidad para deprimir la pirita;

Por lo tanto, sobre nuestro objetivo En relación con el objetivo de determinar si el aditivo bacteriano funciona como agente depresor de la pirita sin afectar el rendimiento de la recuperación de cobre se puede afirmar que se ha logrado de manera parcial. Se ha encontrado que el aditivo de origen bacteriano no tiene un impacto significativo en la recuperación de cobre, lo cual es congruente con los resultados obtenidos en las pruebas

de flotación. Sin embargo, si bien se observó una cierta depresión de la pirita en presencia del aditivo bacteriano, aproximadamente del 4,6%, los análisis estadísticos no proporcionaron evidencia concluyente que respaldara de manera significativa esta observación.

6. DISCUSIONES

Si bien los objetivos específicos de este estudio no se alcanzaron en su totalidad, es fundamental resaltar un logro de gran importancia que emergió durante la investigación: la capacidad de reducir significativamente el nivel de pH en el proceso de flotación, disminuyendo el valor desde un pH inicial de 9 a un pH final de 6, y, lo que es aún más notable, sin que esta modificación tuviera un impacto negativo en la eficiencia de la recuperación del cobre.

Este hito es de particular interés por varias razones. En primer lugar, la reducción del pH representa una reducción sustancial en la cantidad de cal requerida en el proceso de flotación de minerales. La cal, un reactivo químico ampliamente utilizado en la industria minera, no solo es costosa, sino que también puede tener impactos ambientales significativos. Por lo tanto, la capacidad de reducir su uso tiene implicaciones económicas y ambientales positivas.

En segundo lugar, la reducción del pH ha demostrado ser efectiva en la depresión de la pirita. La pirita, un mineral de hierro y azufre, a menudo se encuentra junto con minerales de cobre en las menas minerales. Sin embargo, su presencia puede ser perjudicial en los procesos metalúrgicos, ya que puede interferir con la recuperación eficiente del cobre y reducir la calidad del concentrado final. Por lo tanto, la capacidad de deprimir selectivamente la pirita mediante la modificación del pH es un avance significativo en la optimización de los procesos de flotación de minerales.

Este hallazgo también destaca la importancia de comprender las interacciones complejas entre los factores del proceso, como el pH, los colectores, espumantes y la adición de microorganismos como *A. ferrooxidans*. La capacidad de controlar estas interacciones de manera efectiva puede llevar a mejoras sustanciales en la eficiencia y la sostenibilidad de los procesos de procesamiento de minerales.

7. RECOMENDACIONES

A partir de estos resultados, se pueden realizar algunas recomendaciones para futuras investigaciones. En primer lugar, se sugiere llevar a cabo estudios adicionales utilizando diferentes concentraciones y condiciones de operación para evaluar el potencial del aditivo en otros minerales de interés. En segundo lugar, sería recomendable realizar una evaluación económica para complementar los resultados obtenidos en este estudio. Una evaluación económica permitirá analizar los costos y beneficios asociados al uso del aditivo de origen bacteriano en comparación con la cal como agente depresor en la concentración de minerales. Un tercer punto sería estudiar diferentes concentraciones de cal y aditivo bacteriano para determinar las condiciones óptimas que maximicen la recuperación de cobre y la depresión de la pirita.

Estos hallazgos resaltan la importancia de continuar investigando y desarrollando estrategias más efectivas para la depresión de la pirita en el proceso de concentración de minerales.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd El-Rahiem, F. H. (2014). Recent Trends in Flotation of Fine Particles. *Journal of Mining World Express*, 3(0), 63. <https://doi.org/10.14355/mwe.2014.03.009>
- Ackerman, P. K., Harris, G. H., Klimpel, R. R., & Aplan, F. F. (1987). Evaluation of Flotation Collectors for Copper Sulfides and Pyrite, I. Common Sulfhydryl Collectors. In *International Journal of Mineral Processing* (Vol. 21).
- Amini, E., Oliazadeh, M., & Kolahdoozan, M. (2009). Kinetic comparison of biological and conventional flotation of coal. *Minerals Engineering*, 22(4), 344–347. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.09.008>
- Behera, S. K., & Mulaba-Bafubiandi, A. F. (2017). Microbes Assisted Mineral Flotation a Future Prospective for Mineral Processing Industries: A Review. In *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* (Vol. 38, Issue 2, pp. 96–105). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1262861>
- Botero, A. E. C., Torem, M. L., & Souza de Mesquita, L. M. (2007). Fundamental studies of *Rhodococcus opacus* as a biocollector of calcite and magnesite. *Minerals Engineering*, 20(10), 1026–1032. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.03.017>
- Botero, C., Elisa, A., Leonardo, T. M., Luciana, M., & De, S. (n.d.). *Bioflotación de barita, calcita y magnesita usando la bacteria Rhodococcus. opacus como bioreactivo*.
- Cantallops, J., & Monsalve, R. (2022). *Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre (2021)*.
- Castellón, C. I., Toro, N., Gálvez, E., Robles, P., Leiva, W. H., & Jeldres, R. I. (2022). Froth Flotation of Chalcopyrite/Pyrite Ore: A Critical Review. In *Materials* (Vol. 15, Issue 19). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma15196536>
- Castro, S. H. (2000). *Flotación. Fundamentos y aplicaciones*.
- Castro, S. H. (2018, August 30). Visión metalúrgica de la proyección y uso de la cal en la minería del cobre. *Seminario Inacal*.
- Chandraprabha, M. N., Natarajan, K. A., & Modak, J. M. (2004). Selective separation of pyrite and chalcopyrite by biomodulation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 37(3–4), 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2004.06.011>
- Chandraprabha, M. N., Natarajan, K. A., & Somasundaran, P. (2005). Selective separation of pyrite from chalcopyrite and arsenopyrite by biomodulation using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *International Journal of Mineral Processing*, 75(1–2), 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.08.014>

- Contreras, L. (2015). *Caracterización mineralógica del proceso metalúrgico y su impacto en la producción de concentrados de Cu y Mo en CMDIC.*
- Cooper, D. G., & Goldenberg, B. G. (1987). Surface-Active Agents from Two Bacillus Species. In *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY.*
- Díaz-López, C. V., Pecina-Treviño, E. T., & Orrantia-Borunda, E. (2012). A study of bioflotation of chalcopyrite and pyrrhotite mixtures in presence of *L. Ferrooxidans*. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 51(2), 118–125. <https://doi.org/10.1179/0008443312Z.00000000025>
- Govender, Y., & Gericke, M. (2011). Extracellular polymeric substances (EPS) from bioleaching systems and its application in bioflotation. *Minerals Engineering*, 24(11), 1122–1127. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.02.016>
- Grano, S. (2009). The critical importance of the grinding environment on fine particle recovery in flotation. *Minerals Engineering*, 22(4), 386–394. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.10.008>
- Holmes, P. R., & Crundwell, F. K. (2000). *The kinetics of the oxidation of pyrite by ferric ions and dissolved oxygen: An electrochemical study.*
- Hosseini, T. R., Kolahdoozan, M., Tabatabaei, Y. S. M., Oliazadeh, M., Noaparast, M., Eslami, A., Manafi, Z., & Alfantazi, A. (2005). Bioflotation of Sarcheshmeh copper ore using *Thiobacillus Ferrooxidans* bacteria. *Minerals Engineering*, 18(3), 371–374. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.005>
- Kim, G., Choi, J., Silva, R. A., Song, Y., & Kim, H. (2017). Feasibility of bench-scale selective bioflotation of copper oxide minerals using *Rhodococcus opacus*. *Hydrometallurgy*, 168, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.06.029>
- Kim, G., Park, K., Choi, J., Gomez-Flores, A., Han, Y., Choi, S. Q., & Kim, H. (2015). Bioflotation of malachite using different growth phases of *Rhodococcus opacus*: Effect of bacterial shape on detachment by shear flow. *International Journal of Mineral Processing*, 143, 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.09.012>
- Li, Y., Chen, J., Kang, D., & Guo, J. (2012). Depression of pyrite in alkaline medium and its subsequent activation by copper. *Minerals Engineering*, 26(1), 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.11.001>
- Lopez, L. Y., Merma, A. G., Torem, M. L., & Pino, G. H. (2015). Fundamental aspects of hematite flotation using the bacterial strain *Rhodococcus ruber* as bioreagent. *Minerals Engineering*, 75, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.12.022>
- Louzada, J., Hacha, R., Monte, M., & Cassola, M. (2012). Experimental Design to evaluate a reagent system for a nickel ore flotation. *Procemin* .

- Luque Consuegra, G., Kutschke, S., Rudolph, M., & Pollmann, K. (2020). Halophilic bacteria as potential pyrite bio-depressants in Cu-Mo bioflotation. *Minerals Engineering*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106062>
- Merma, A. G., & Torem, M. L. (2015). Bioflotation of apatite and quartz: Particle size effect on the rate constant. *Revista Escola de Minas*, 68(3), 343–350. <https://doi.org/10.1590/0370-44672014680239>
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (Segunda edición). Limusa.
- Mu, Y., Peng, Y., & Lauten, R. A. (2016). The depression of pyrite in selective flotation by different reagent systems – A Literature review. In *Minerals Engineering* (Vols. 96–97, pp. 143–156). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.018>
- Nagaoka, T., Ohmura, N., & Saiki, H. (1999). A Novel Mineral Flotation Process Using *Thiobacillus ferrooxidans*. In *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY* (Vol. 65, Issue 8). <https://journals.asm.org/journal/aem>
- Nagaraj, D. R., & Farinato, R. S. (2016). Evolution of flotation chemistry and chemicals: A century of innovations and the lingering challenges. *Minerals Engineering*, 96–97, 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.019>
- Niu, X., Chen, J., Li, Y., Xia, L., Li, L., Sun, H., & Ruan, R. (2019). Correlation of surface oxidation with xanthate adsorption and pyrite flotation. *Applied Surface Science*, 495. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.153>
- Ohmura, N., Kitamura, K., & Saiki, H. (1993). Mechanism of microbial flotation using *Thiobacillus ferrooxidans* for pyrite suppression. In *Biotechnology and Bioengineering* (Vol. 41, Issue 6, pp. 671–676). <https://doi.org/10.1002/bit.260410611>
- Ormeño, R. (2013). Estudio de flotación diferencial de un mineral de Pb-Zn, aplicando diseño experimental y una máquina de flotación de laboratorio con automatización. In *Tesis de pregrado - Universidad de Concepción*. Universidad de Concepción.
- Ormeño, R., & Álvarez, J. (2013). Importancia de la reproducibilidad de resultados en experiencias de flotación a nivel de laboratorio. *V Congreso de Flotación - Flotamin*.
- Pecina-Treviño, E. T., Ramos-Escobedo, G. T., Gallegos-Acevedo, P. M., López-Saucedo, F. J., & Orrantia-Borunda, E. (2012). Bioflotation of sulfide minerals with *Acidithiobacillus ferrooxidans* in relation to copper activation and surface oxidation. *Canadian Journal of Microbiology*, 58(9), 1073–1083. <https://doi.org/10.1139/w2012-072>
- Pollmann, K., Kutschke, S., Matys, S., Raff, J., Hlawacek, G., & Lederer, F. L. (2018). Bio-recycling of metals: Recycling of technical products using biological applications. In *Biotechnology Advances* (Vol. 36, Issue 4, pp. 1048–1062). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.03.006>

- Ramos-Escobedo, G. T., Pecina-Treviño, E. T., Bueno Tokunaga, A., Concha-Guerrero, S. I., Ramos-Lico, D., Guerra-Balderrama, R., & Orrantia-Borunda, E. (2016). Bio-collector alternative for the recovery of organic matter in flotation processes. *Fuel*, *176*, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.018>
- Rao, K. H., Vilinska, A., & Chernyshova, I. V. (2010). Minerals bioprocessing: R & D needs in mineral biobeneficiation. *Hydrometallurgy*, *104*(3–4), 465–470. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.01.016>
- Reyes-Bozo, L., Godoy-Faúndez, A., Herrera-Urbina, R., Higuera, P., Salazar, J. L., Valdés-González, H., Vyhmeister, E., & Antizar-Ladislao, B. (2014). Greening Chilean copper mining operations through industrial ecology strategies. *Journal of Cleaner Production*, *84*(1), 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.088>
- San Martín, F., Kracht, W., & Vargas, T. (2018). Biodepression of pyrite using *Acidithiobacillus ferrooxidans* in seawater. *Minerals Engineering*, *117*, 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.11.005>
- Sanwani, E., Chaerun, S., Mirahati, R., & Wahyuningsih, T. (2016). Bioflotation: Bacteria-Mineral Interaction for Eco-friendly and Sustainable Mineral Processing. *Procedia Chemistry*, *19*, 666–672. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.068>
- Sarquís, P. E., Menéndez-Aguado, J. M., Mahamud, M. M., & Dzioba, R. (2014). Tannins: The organic depressants alternative in selective flotation of sulfides. *Journal of Cleaner Production*, *84*(1), 723–726. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.025>
- Somasundaran, P., Deo, N., & Natarajan, K. A. (n.d.). *Utility of bioreagents in mineral processing*.
- Valdivieso, A. L., Cervantes, T. C., Song, S., Cabrera, A. R., & Laskowski, J. S. (2004). Dextrin as a non-toxic depressant for pyrite in flotation with xanthates as collector. *Minerals Engineering*, *17*(9–10), 1001–1006. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.04.003>
- Vasanthakumar, B., Ravishankar, H., & Subramanian, S. (2012). A novel property of DNA - as a bioflotation reagent in mineral processing. *PLoS ONE*, *7*(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039316>
- VILINSKA, A., & RAO, K. H. (2008). *Leptosirillum ferrooxidans*-sulfide mineral interactions with reference to bioflotation and bioflocculation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, *18*(6), 1403–1409. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60016-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60016-9)
- Yu, R. L., Ou, Y., Tan, J. X., Wu, F. D., Sun, J., Miao, L., & Zhong, D. L. (2011). Effect of EPS on adhesion of *Acidithiobacillus ferrooxidans* on chalcopyrite and pyrite mineral surfaces. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, *21*(2), 407–412. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60729-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60729-2)

- Zhao, H., Niu, X., Dong, B., Jia, X., & Ruan, R. (2022). Investigation on the correlation between ferrous ion and the floatability of pyrite with different oxidation degrees. *Minerals Engineering*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107636>
- Zhu, J., Li, Q., Jiao, W., Jiang, H., Sand, W., Xia, J., Liu, X., Qin, W., Qiu, G., Hu, Y., & Chai, L. (2012). Adhesion forces between cells of *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* or *Leptospirillum ferrooxidans* and chalcopyrite. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 94, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.01.022>

