

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**OPTIMIZACIÓN DE LA TEMPERATURA, TAMAÑO
DE PARTÍCULA Y pH DE LA SOLUCIÓN ÁCIDA
EN COLUMNAS CON CALCOPIRITA PARA
MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE
COBRE POR BIOLIXIVIACIÓN,
TACNA- 2022**

TESIS

Presentada por:

Bach. Bianca Ruth Vega Baca

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO QUÍMICO

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**OPTIMIZACIÓN DE LA TEMPERATURA, TAMAÑO DE
PARTÍCULA Y pH DE LA SOLUCIÓN ÁCIDA EN
COLUMNAS CON CALCOPIRITA PARA
MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE
COBRE POR BIOLIXIVIACIÓN,
TACNA-2022**


Tesis sustentada por Bach. Bianca Ruth Vega Baca el día 23 de mayo del 2025,
estando integrado el jurado por:


Presidente:

Dr. Manuel de Jesús Sánchez Rosales

Secretario:

Dra. Zoila Luz Mendoza Rodas

Vocal:

Dr. Junior Soviet Miranda Gutiérrez

Asesor:

Dr. Walter Dimas Florez Ponce de León


CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Dr. Walter Dimas Florez Ponce de León en mi condición de asesor acreditado por Resolución de Facultad N° 07239-2022-FAIN/UNJBG con modificatoria Resolución de Facultad N° 07255-2022-FAIN/UNJBG de la tesis titulada: "OPTIMIZACIÓN DE LA TEMPERATURA, TAMAÑO DE PARTÍCULA Y pH DE LA SOLUCIÓN ÁCIDA EN COLUMNAS CON CALCOPIRITA PARA MAXIMIZAR LA RECUPERACIÓN DE COBRE POR BIOLIXIVIACIÓN, TACNA-2022".

Presentado por la Bachiller, Bianca Ruth Vega Baca para optar el título de Ingeniero Químico.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual Turnitin cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 6% (seis). Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis ésta de acuerdo al **nivel PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio Institucional**.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su obtención del título.



DNI:00506439
Dr. Walter Dimas Florez Ponce de León
Asesor



DNI: 72861131
Bianca Ruth Vega Baca
Bachiller

DEDICATORIA

A Dios

A mis padres Linley y Lucila

A Jorge Luis Cubas Mamani

A todos mis maestros y formadores

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por su constante presencia, fortaleza y guía a lo largo de este proceso.

Extiendo mi sincero reconocimiento y gratitud a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta tesis:

Al Dr. Walter Dimas Florez Ponce de León, mi asesor de tesis, por su valioso acompañamiento, compromiso y orientación constante en cada etapa del proyecto.

Al Dr. Daladier Miguel Castillo Cotrina, mi co-asesor, por brindarme generosamente el acceso a su laboratorio, así como su apoyo especializado en el manejo de microorganismos.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, en especial a los profesores Raúl Tolomeo y Joel Albares, por el respaldo técnico fundamental que proporcionaron para el desarrollo de esta investigación.

Al Vicerrectorado de Investigación de la UNJBG (ININ), por el financiamiento otorgado, y a la Unidad de Laboratorios y Talleres Académicos (ULTA), por facilitarme los insumos requeridos para la ejecución del proyecto.

Finalmente, expreso mi agradecimiento a la Escuela Profesional de Ingeniería Química, por la sólida formación académica y el acompañamiento brindado a lo largo de todos estos años de estudio.

ÍNDICE

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS	xviii
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xix
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Descripción del problema	3
1.1.1. Antecedentes del problema	3
1.1.2. Problemática de la investigación	5
1.2. Formulación del problema	7
1.2.1. Problema general	7
1.3. Justificación e importancia	8
1.4. Alcances y limitaciones	10
1.5. Objetivos	10

1.5.1. Objetivo General	10
1.5.2. Objetivos específicos	11
1.6. Hipótesis	12
1.6.1. Hipótesis específicas	12
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	14
2.1. Antecedentes del estudio	14
2.2. Bases teóricas	19
2.2.1. El cobre	19
2.2.2. Obtención del cobre	19
2.2.3. Calcopirita	20
2.2.4. Biolixiviación	21
2.2.5. Mecanismos de biolixiviación	31
2.2.6. Cinética de la biolixiviación	43
2.2.7. Propagación de microorganismo en biorreactores	47
2.2.8. Producción de biomasa	48
2.2.9. Factores que influyen en el crecimiento bacteriano	49
2.2.10. Optimización	55
2.3. Definición de términos	59

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO	61
3.1. Tipos y diseños de la investigación	61
3.1.1. Tipo de investigación	61
3.1.2. Diseño de investigación	61
3.2. Población y muestra	65
3.3. Operacionalización de variables	66
3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos	66
3.4.1. Equipos, instrumentos y materiales	67
3.4.2. Técnicas para recolección de datos	72
3.5. Metodos	73
3.5.1. Construcción de los equipos calefactores y de las columnas	73
3.5.2. Flujograma del procedimiento experimental	78
3.5.3. Operaciones unitarias para la preparación del mineral	79
3.5.4. Preparación del medio de cultivo y del inóculo bacteriano	88
3.5.5. Inoculación e inicio del riego para lixiviación	92
3.5.6. Recolección de muestras	95
3.5.7. Terminación de lixiviación y recolección de muestra de mineral	97
3.5.8. Análisis físicos-químicos a las muestras	98

3.6. Procesamiento y análisis de datos	101
3.6.1. Procesamiento de datos	101
3.61.1. Análisis de datos	102
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES	103
4.1. Resultados	103
4.1.1. Resultados de análisis físico-químicos del mineral calcopirita	103
4.1.2. Criterios y datos en el acondicionamiento del mineral, inoculación el consorcio, riego y aplicación de temperatur en Biolixiviación	106
4.1.3. Resultados del diseño experimental Box-Behnken con los factores codificados, factores y respuestas en la biolixiviación	112
4.1.4. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para recuperación de cobre mediante biolixiviación bacteriana	115
4.1.5. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para potencial redox en el proceso de bio lixiviación bacteriana	128
4.1.6. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para hierro total en el proceso de bio lixiviación bacteriana	134
4.1.7. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para acidez total en el proceso de bio lixiviación bacteriana	139

4.1.8. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para conductividad eléctrica en el proceso de bio lixiviación bacteriana	145
4.1.9. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para población población del consorcio bacteriano en el proceso de biolixiviación bacteriano	151
4.1.10. Resultados de la lixiviación química de mineral calcopirita a temperatura ambiente indicado como tratamiento en blanco	156
4.1.11. Comparación porcentual de la recuperación de cobre por cada columna codificada	157
4.1.12. Optimización mediante el método de Función Deseabilidad (FD) para máxima recuperación de cobre a partir de mineral calcopirita mediante biolixiviación de consorcio bacteriano	159
4.2. Discusión	164
CONCLUSIONES	169
RECOMENDACIONES	171
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	172
ANEXOS	184

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Principales especies microbianas relacionadas con la biolixiviación	25
Tabla 2	Codificación de las variables independientes de la investigación	63
Tabla 3	Diseño Box-Bhenken a escala codificada y a escala natural	64
Tabla 4	Operacionalización de variables	66
Tabla 5	Tabla de distribución de los tres P80	86
Tabla 6	Características físico-químicas de la muestra calcopirita	103
Tabla 7	Datos adicionales sobre las características físicas y químicas	104
Tabla 8	Espectroscopia de emisión atómica con plasma de acoplamiento (ICP-OES)	104
Tabla 9	Ensayos químicos realizados al mineral calcopirita	105
Tabla 10	Tabla de distribución de los tres P80	106
Tabla 11	Proporción de ácido y agua en el curado y aglomerado	107
Tabla 12	Datos para la solución de riego	109
Tabla 13	Cabinas, control de temperaturas y número de columnas	110
Tabla 14	Resultados para la recuperación de cobre, potencial redox, oxidación de hierro, conductividad eléctrica y población bacteriana	112
Tabla 15	Resumen del diseño Box-Behnken	113
Tabla 16	Resultados para recuperación de cobre, hierro (II) y hierro (III)	114
Tabla 17	Recuperación para población del consorcio bacteriano en el proceso de biolixiviación	151

Tabla 18	Resultado de la recuperación de Cu para lixiviación química	156
Tabla 19	Comparación en % de la recuperación de cobre por cada columna	157
Tabla 20	Restricciones de los factores y respuestas para maximización de recuperación de cobre	160
Tabla 21	Solución optimizada para máxima recuperación de cobre	160
Tabla 22	Solución optimizada para recuperación de cobre a partir de mineral calcopirita mediante columnas de bio lixiviación	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Celda unitaria de la estructura de la calcopirita	20
Figura 2	Modelos de Bio-columnas de lixiviación por gravedad	23
Figura 3	Fotografías microscópicas de algunas especies biolixiviantes	27
Figura 4	Ejemplos de consorcio bacteriano formado por diferentes cepas	28
Figura 5	Mecanismo directo, indirecto y por contacto en biolixiviación	33
Figura 6	Mecanismos de solubilización microbiana, vías tiosulfato y polisulfato	36
Figura 7	Esquema de la cadena de citocromos que participa en la oxidación Fe^{2+}	39
Figura 8	Metabolismo microbiano completo del <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	41
Figura 9	Fases del crecimiento microbiano a lo largo del tiempo	42
Figura 10	Curvas de crecimiento microbiana en la fase logarítmica	43
Figura 11	Variación con el tiempo de las concentraciones de un reactante (A) curva I y de un producto (X) curva II	44
Figura 12	Esquema de un biorreactor de propagación de inóculo bacteriano	47
Figura 13	Recuento bacteriano en cámara de Neubauer	48
Figura 14	Efecto de la temperatura diurna en la biolixiviación de mineral sulfurado	50
Figura 15	Desbroce del mineral mediante molienda para reducción de tamaño	51
Figura 16	Diagrama (Eh-pH) para $CuFeS_2$ - H_2O en la región ácida a $25^\circ C$	53
Figura 17	Puntos medios de los bordes del espacio experimental	57
Figura 18	Diseño experimental de optimización en proceso de Biolixiviación	62

Figura 19 Equipos calefactores para el control de temperatura	74
Figura 20 Diagrama eléctrico y partes del sistema del equipo calefactor	75
Figura 21 Construcción de las columnas para biolixiviación	76
Figura 22 Partes del sistema de goteo y recirculación por bombeo del equipo	77
Figura 23 Diagrama de flujo del experimento de la biolixiviación de calcopirita	78
Figura 24 Mineral calcopirita (CuFeS_2) de la mina de Toquepa- Tacna	79
Figura 25 Prueba de consumo de ácido en la mineral calcopirita (CuFeS_2)	81
Figura 26 Análisis granulométrico y separación por mallas del mineral- gruesos	83
Figura 27 Separación del material fino y pesado de todo el material	84
Figura 28 Preparación de los tres P80 artificiales	85
Figura 29 Aglomerado y curado del mineral con ácido sulfúrico	87
Figura 30 Cepas de <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> y <i>Leptospirillum ferriphilum</i>	88
Figura 31 Protocolo de preparación medio de cultivo 9k para 2,5 L de cultivo	90
Figura 32 Preparación de los inóculos en medio 9k en cabina de bioseguridad	91
Figura 33 Inoculación de las cepas bacterianas e inicio de riego de las columnas	92
Figura 34 Segunda inoculación de las columnas en el periodo de reposo	93
Figura 35 Riego en el equipo semiautomatizado para llixiviación bacteriana con calcopirita (CuFeS_2)	94
Figura 36 Muestras tomadas del lixiviado de las columnas	95
Figura 37 Muestras de la biolixiviación y su almacenamiento	96
Figura 38 Descarga de las columnas luego del proceso de lixivación bacteriana	97

Figura 39 Muestreo durante los 20 días y lectura del consorcio bacteriano para el para el conteo bacteriano diario	100
Figura 40 Curva de los P80 artificiales armadas para el diseño experimental	107
Figura 41 Curva de crecimiento del consorcio de <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> y <i>Leptospirillum ferriphilum</i>	108
Figura 42 Crecimiento del consorcio <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> y <i>Leptospirillum ferriphilum</i> en escala logarítmica	109
Figura 43 Cabinas con control de temperatura para biolixiviación en columnas	111
Figura 44 Recuperación de cobre en columnas de biolixiviación a 22°C	115
Figura 45 Recuperación de cobre en columnas de biolixiviación a 32°C	116
Figura 46 Recuperación de cobre en columnas de biolixiviación a 42 °C	117
Figura 47 Recuperación de cobre en cada una de las columnas de lixiviación	119
Figura 48 Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizada para recuperación de cobre	120
Figura 49 Contorno y superficie para la recuperación de cobre según temperatura (A) y tamaño P-80 (B) en diseño Box-Behnken cuando el pH (C) es óptimo	121
Figura 50 Contorno y superficie de respuesta para la recuperación de cobre, de temperatura (A) y pH (C) en diseño Box-Behnken para tamaño tamaño P-80 (B) de 5,3318	124

Figura 51 Contorno y superficie de respuesta para la recuperación de cobre según tamaño P-80 (B) y pH (C) en diseño Box-Behnken cuando la temperatura (A) es óptimo	126
Figura 52 Potencial redox en columnas de biolixiviación a 22°C	128
Figura 53 Potencial redox en columnas de biolixiviación a 32°C	129
Figura 54 Potencial redox en columnas de biolixiviación a 42 °C	130
Figura 55 Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizado para potencial redox en columnas de biolixiviación	131
Figura 56 Contorno y superficie de respuesta para potencial redox según temperatura y pH en diseño Box-Behnken	132
Figura 57 Recuperación de hierro total en columnas de biolixiviación	134
Figura 58 Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizada para hierro total	135
Figura 59 Contorno y superficie de respuesta para hierro total según temperatura y pH en diseño Box-Behnken	136
Figura 60 Acidez total en columnas de biolixiviación a 22°C	139
Figura 61 Acidez total en columnas de biolixiviación a 32°C	140
Figura 62 Acidez total en columnas de biolixiviación a 42°C	141
Figura 63 Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizada para acidez total	142

Figura 64 Contorno y superficie de respuesta para acidez total según temperatura y pH en diseño Box-Behnken	143
Figura 65 Conductividad eléctrica en columnas de biolixiviación a 22 °C	145
Figura 66 Conductividad eléctrica en columnas de biolixiviación a 32°C	146
Figura 67 Conductividad eléctrica en columnas de biolixiviación 42°C	147
Figura 68 Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizada para conductividad eléctrica (mS/cm)	148
Figura 69 Contorno y superficie de respuesta para conductividad eléctrica según temperatura y pH en diseño Box-Behnken	149
Figura 70 Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizada para población del consorcio bacteriano	152
Figura 71 Contorno y superficie de respuesta para población del consorcio bacteriano según temperatura y pH	153
Figura 72 Vista microscópica X1000 de conteo de bacterias en cámara Petroff Hausser	155
Figura 73 Comparación de la recuperación de cobre en porcentaje de la biolixiviación y de la lixiviación química	158
Figura 74 Criterios de optimización de recuperación de cobre	159
Figura 75 Superficie de respuesta para optimización de recuperación de cobre	161
Figura 76 Gráfico de barras de la función deseabilidad (Fd) para recuperación de cobre Cu, cuando se optimiza: temperatura, Tamaño P80 y pH	162

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 Cálculos matemáticos de la lixiviación	185
ANEXO 2 Análisis de laboratorio para el mineral, para el lixiviado Cu, Hierro y Sulfuros	219
ANEXO 3 Fichas de control de riego y recolección de datos	231
ANEXO 4 Preparación de medio de cultivo 9k modificada y conteo microbiano con cámara petroff hausser	236
ANEXO 5 Reporte del análisis de varianza para las respuestas del estudio	239
ANEXO 6 Planos de las columnas de biolixiviación, soportes	244

RESUMEN

La biolixiviación emplea microorganismos para extraer cobre, ofreciendo ventajas sobre la pirometalurgia en términos de sostenibilidad y eficiencia; reduce: emisiones contaminantes como (SO₂) y (NO_x), el consumo energético y el uso de reactivos químicos, mejorando la recuperación de cobre de minerales refractarios. La presente investigación tuvo como objetivo optimizar las variables de temperatura, tamaño de partícula P80 y pH de la solución ácida para maximizar la recuperación de cobre de la calcopirita (CuFeS₂), mediante el consorcio bacteriano (comunidad de 2 o más especies): *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum*, en la región de Tacna. Se empleó un diseño experimental Box-Behnken realizados en columnas de biolixiviación. Los resultados mostraron que la máxima recuperación de cobre fue de 5 088 mg/L con una temperatura de 32 °C, tamaño de partícula P80 de 5,24 mm y pH de 1,6. La mínima recuperación de cobre fue de 2 967 mg/L con una temperatura de 22 °C, tamaño de partícula P80 de 6,77 mm y pH de 2,8. Así mismo se calculó mediante cálculo numérico de optimización (Función Deseabilidad) que la óptima recuperación de cobre fue de 5 141 mg/L con una temperatura de 37,2°C, tamaño de partícula P80 de 5,24 mm y pH de 2,081.

Palabras clave: Biolixiviación, Calcopirita, Recuperación de cobre, Tamaño de partícula, pH, Temperatura, Consorcio bacteriano: *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum*.

ABSTRACT

Bioleaching employs microorganisms to extract copper, offering advantages over pyrometallurgy in terms of sustainability and efficiency; it reduces: polluting emissions such as (SO₂) and (NO_x), energy consumption and the use of chemical reagents, improving the recovery of copper from refractory minerals. The present research aimed to optimize the variables of temperature, particle size P80 and pH of the acid solution to maximize the recovery of copper from chalcopyrite (CuFeS₂), through the bacterial consortium (community of 2 or more species): *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Leptospirillum ferriphilum*, in the Tacna region. A Box-Behnken experimental design was used in bioleaching columns. The results showed that the maximum copper recovery was 5 088 mg/L with a temperature of 32 °C, particle size P80 of 5.24 mm and pH of 1.6. The minimum copper recovery was 2 967 mg/L at a temperature of 22°C, P80 particle size of 6.77 mm and pH of 2.8. Likewise, it was calculated by numerical optimization calculation (Desirability Function) that the optimal copper recovery was 5 141 mg/L at a temperature of 37.2°C, P80 particle size of 5.24 mm and pH of 2.081.

Keywords: Bioleaching, Chalcopyrite, Copper recovery, Particle size, pH, Temperature, Bacterial consortium: *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Leptospirillum ferriphilum*.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de cobre, impulsada por su relevancia en sectores tecnológicos e industriales, ha fomentado el desarrollo de métodos más sostenibles, como la biolixiviación (Brietley, 2008). Este enfoque es particularmente relevante para la calcopirita (CuFeS_2), el mineral de cobre más abundante pero también uno de los más refractarios debido a su baja reactividad química bajo condiciones ambientales estándar (Watling, 2006).

La efectividad de la biolixiviación depende de factores críticos, entre ellos la temperatura, el pH de la solución de riego y el tamaño de partícula, etc., los cuales afectan directamente la actividad de los microorganismos, la solubilización de los metales y las reacciones químicas asociadas (Rawling, 1999). Por ejemplo, la temperatura es fundamental, ya que influye en la actividad metabólica de los microorganismos y en las reacciones químicas que permiten la solubilización del cobre (Ahmadi et al., 2010). El pH de la solución afecta la actividad de los microorganismos y la estabilidad de los compuestos metálicos en solución. Mantener un pH controlado evita la formación de jarositas, precipitados que inhiben la lixiviación al cubrir la superficie del mineral (Bravo, 2016). Por otro lado, el tamaño de partícula del mineral afecta la superficie disponible para la acción microbiana, reportaron que partículas con un tamaño óptimo maximizaron la recuperación de cobre, mientras que partículas demasiado finas redujeron

significativamente la eficiencia del proceso debido a problemas como la compactación del lecho en sistemas de lixiviación por columnas (Dennis, 2016).

En este contexto, los consorcios bacterianos desempeñan también un papel fundamental en la biolixiviación. Especies como *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum* son ampliamente utilizadas debido a su capacidad para oxidar hierro y azufre, facilitando la solubilización del cobre. Estos microorganismos trabajan de manera sinérgica, adaptándose a condiciones extremas y aumentando la eficiencia del proceso (Johnson & Hallberg, 2023; Zea E. , 2023).

El presente estudio tiene como objetivo optimizar las condiciones de biolixiviación en columnas cargadas con calcopirita, evaluando el efecto combinado de la temperatura, el pH de la solución y el tamaño de partícula (P80) sobre variables dependientes como la recuperación de cobre, la biomasa bacteriana, el potencial redox, la oxidación de hierro y la conductividad eléctrica. Los resultados obtenidos permitirán identificar las condiciones óptimas para maximizar la eficiencia del proceso, aportando una solución sostenible y eficiente para la industria minera, especialmente en la región de Tacna, Perú.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. Antecedentes del problema

El cobre es uno de los metales más extraídos a nivel mundial y es empleado en diversas industrias en la transmisión de energía eléctrica; en la corteza terrestre es posible hallarlo en forma de mineral oxidado y sulfurado, para cada una de estas formas se conocen vías distintas de tratamiento, siendo tradicionalmente la hidrometalurgia y la pirometalurgia las más empleadas (Alafara et al., 2012).

En los últimos años el óxido de cobre de fácil extracción, tratado comúnmente por vía hidrometalúrgica, se vienen agotando; por ello la industria minera ha comenzado a emplear sulfuros secundarios en los procesos hidrometalúrgicos, esto hace unas décadas no se practicaba. Debido al incremento de la demanda mundial de cobre, la minería del cobre viene agotando también los sulfuros secundarios es por esto que solo queda iniciar con la explotación de los sulfuros primarios, que son los más abundantes en la corteza terrestre y quizá también los más difíciles y costosos de manejar (Soto, 2018).

El agotamiento de los óxidos de cobre y de los sulfuros secundarios ha conducido al desuso de las instalaciones hidrometalurgias, lo que fomenta la búsqueda de nuevos procesos para tratar los sulfuros primarios aprovechando las instalaciones ya existentes; el tratamiento tradicional a los sulfuros primarios es la flotación y pirometalurgia, por otra parte, la pirometalurgia implica una serie de problema como la formación de residuos de flotación, producción de gases de dióxido de azufre (SO₂) y Arsénico (As), alto consumo de energía y dificultad en el procesamiento de subproductos (Cochilco, 2017); los sulfuros pueden ser lixiviados químicamente, pero existen ciertas dificultades con su cinética, especialmente en sulfuros primarios, respecto de la tendencia a formar una capa de pasivación que impide que el lixivante reaccione con el mineral (Hong et al., 2021).

Existen varios métodos de lixiviación de sulfuros, uno de ellos es la lixiviación biológica o microbiana (biolixiviación), que provoca reacciones que son catalizadas por bacterias específicas. Las ventajas de este proceso son el bajo costo, la ausencia de emisiones tóxicas, el bajo consumo de agua y la ausencia de molienda fina; por otra parte, requiere de condiciones especiales para las bacterias y de un tiempo largo de biolixiviación (Cochilco, 2017).

1.1.2. Problemática de la investigación

En la actualidad la presencia de cada vez más cantidades de yacimientos con mineral sulfurado en el Perú en especial en la región sur de Tacna y Moquegua, así como la existencia de mineral aun presente en los relaves, impulsan a la investigación de nuevos medios de recuperación de cobre no solamente eficientes, si no también amigables con el ambiente, debido a que las tecnologías clásicas existentes como la flotación y pirometalurgia traen consigo cierto grado de contaminación es factible ir considerando cambios y mejoras a futuro en dichos procesos siendo la Biolixiviación una de las posibles respuestas.

La biolixiviación se realiza bajo diferentes formas, puede ser en biorreactores cilíndricos, de columna; en pilas o en botaderos; no obstante, la biolixiviación en columna es la que se viene estudiando y aplicando a nivel de investigación de manera usual por asemejarse a la biolixiviación en pilas o botaderos que son las que se aplican más a nivel de las plantas de biolixiviación de las empresas mineras; la biolixiviación es afectada por diferentes parámetros como son el pH de la solución ácida, la temperatura, la aireación, los tipos y poblaciones de microorganismos lixiviantes, la composición química y mineralógica del mineral, el tamaño del mineral, etc. Los efectos de todos estos factores varían según la procedencia del mineral y

las capacidades de cada microorganismo de acuerdo a las condiciones físicas y químicas en las que se encuentra.

No hay trabajos de investigación de optimización de parámetros físico-químicos para maximizar la recuperación de cobre en columnas con calcopirita de la mina de Toquepala por biolixiviación. Los parámetros físico-químicos pueden ser optimizados para una mayor recuperación de cobre en columnas con calcopirita de la mina de Toquepala. Conseguir una mayor recuperación de cobre bajo este proceso permitiría evaluar la aplicación de esta biolixiviación a nivel piloto y/o a nivel industrial para la obtención de múltiples beneficios, estos son el dar valor agregado a los residuos de calcopirita de baja ley, reducir el impacto ambiente de los residuos minerales, elevar las utilidades económicas y disminuir los costos elevados cuando se emplea otras tecnologías para recuperar el cobre.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿Cuáles son los valores óptimos de temperatura, tamaño de partícula y pH de solución ácida para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio?

a) Problema específico 1

¿Será posible determinar el valor óptimo de temperatura, para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas por gravedad con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio?.

b) Problema específico 2

¿Será posible determinar el valor óptimo de tamaño de partícula, para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas por gravedad con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio?.

c) Problema específico 3

¿Será posible determinar el valor óptimo de pH de solución ácida, para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un

consorcio microbiano biolixivante en columnas por gravedad con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio?.

d) Problema específico 4

¿Será posible reportar los valores de recuperación de cobre, población bacteriana, potencial redox, oxidación de hierro ferroso y conductividad eléctrica que intervienen en el proceso de la biolixiviación de la calcopirita?.

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Para la extracción de cobre se viene utilizando métodos tradicionales como el de la pirometalurgia por el cual los sulfuros son procesados en la fundición produciendo altos niveles de dióxido de azufre (SO₂) y toxinas con arsénico (As) que contaminan el ambiente de manera significativa. La emisión de gases (SO₂) y de polvo (As) puede ser evitada, como en Chile, haciendo uso de la biolixiviación que produce un muy bajo impacto negativo ambiental, bajos costos de energía y operación (en la fundición la temperatura de operación es de 1 500 °C, en la biolixiviación es menos de 100 °C), y aprovechamiento de minerales de baja ley, dando así valor agregado a estos minerales; asimismo, en la biolixiviación la selectividad bacteriana brinda una fácil separación de los subproductos como el hierro, abundante en la materia prima que precipita como jarosita que es fácil de separar por filtración, produce parte del ácido total haciendo que se reduzca el consumo

de ácido del proceso, y genera calor, producto de la oxidación de la pirita, aumentando en 7 °C el proceso que ayuda a que la biolixiviación sea más rápida (Cochilco, 2017; Soto, 2018).

Dada la importancia de la biolixiviación y la necesidad de investigar sobre la optimización de los parámetros temperatura, tamaño de partícula del mineral y pH de la solución ácida que se presentan en la biolixiviación en columna para la recuperación de cobre de la calcopirita procedente de la mina de Toquepala y considerando que sobre esto último no hay trabajos de investigación, en este proyecto se plantea que los resultados que se obtenga sean aprovechados conjuntamente con la de otras investigaciones complementarias para maximizar la recuperación de cobre por biolixiviación en columna a partir de la calcopirita de Toquepala con los menores costos; mayores utilidades; mayor producción, rendimiento y productividad de cobre; y mucho menor impacto negativo ambiental para efecto de su escalamiento a nivel de planta de lixiviación de Toquepala.

1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES

Los experimentos se realizaron en el laboratorio de Biotecnología microbiana, del proyecto de aislamiento y aplicación de microorganismo biolixiviantes para la recuperación de minerales provenientes de la actividad minera en la región Tacna, y en los laboratorios de Biolixiviación y Mineralurgia de la escuela de Metalurgia de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna.

La materia prima, reactivos, cepas bacterianas y materiales no poseen estacionalidad, por lo que pueden ser ejecutados en cualquier periodo del año. Respecto a los métodos de análisis físico-químicos y microbiológicos no existen limitaciones que dificulten su realización. Las limitaciones con relación al financiamiento estuvieron en el orden del presupuesto asignado. Con respecto al tiempo, la biolixiviación tomó 3 meses.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

Determinar los valores óptimos de temperatura, tamaño de partícula y pH de solución ácida para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas por gravedad con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio.

1.5.2. Objetivos Específicos

a) Objetivo específico 1

Determinar el valor óptimo de temperatura, para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas por gravedad con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio.

b) Objetivo específico 2

Determinar el valor óptimo de tamaño de partícula, para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas por gravedad con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio.

c) Objetivo específico 3

Determinar el valor óptimo de pH de solución ácida, para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas por gravedad con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio.

d) Objetivo específico 4

Reportar los valores de recuperación de Cu, población bacteriana, potencial redox, oxidación de hierro ferroso y conductividad eléctrica que intervienen en el proceso de la biolixiviación de la calcopirita.

1.6. HIPÓTESIS

Ho: No es posible determinar los valores óptimos de temperatura, tamaño de partícula y pH de la solución ácida para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio.

H1: Si es posible determinar los valores óptimos de temperatura, tamaño de partícula y pH de la solución ácida para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio.

1.6.1. Hipótesis específicas

a) Hipótesis específica 1

Si es posible determinar la temperatura óptima para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio.

b) Hipótesis específica 2

Si es posible determinar el tamaño óptimo de partícula para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio.

c) Hipótesis específica 3

Si es posible determinar valor de pH óptimo de la solución ácida para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio.

d) Hipótesis específica 4

Si es posible reportar los valores de recuperación de Cu, población bacteriana, potencial redox, oxidación de hierro ferroso y conductividad eléctrica que intervienen en el proceso de la biolixiviación de la calcopirita.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Existen varias investigaciones referentes a la biolixiviación y su viabilidad como herramienta en la minería moderna; para el presente trabajo se tomaron en cuenta los antecedentes de investigación a continuación:

Rodríguez, (2001) la biolixiviación es considerada como un método futuro de procesamiento de minerales sulfurados debido a sus ventajas, como la recuperación natural de metales a partir de minerales con bajos costos y sin daño ambiental. En la última década, se han realizado múltiples investigaciones a nivel básico del proceso, incluyendo desarrollos en aspectos bioquímicos, genéticos y moleculares con microorganismos involucrados, diseño e implementación del proceso, factores físico-químicos del rendimiento y catalizadores para mejorar la disolución de minerales.

A nivel industrial, la actividad de biolixiviación se realiza empleando una serie de consorcios de bacterianos altamente acidófilos que incluyen bacterias del género *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* y bacterias del género *Acidiphilium*, más aún de investigaciones se ha señalado que *T. ferrooxidans* es el más activo de los consorcios bacteriano de tipo mesófilo (Gomez, 1999).

De Barrios et al., (2011), en su artículo titulado: “Bioleaching of copper sulphide flotation concentrate in batch reaction system using mesophile and thermophile microorganisms” optimizó el uso de consorcios de microorganismos mesófilos y en la biolixiviación de concentrados de sulfuros de cobre, de un 30 % de contenido en bornita (Cu_5FeS_4) y un el 70 % de contenido en calcopirita (CuFeS_2), para extraer cobre. El objetivo principal fue el evaluar a los microorganismos y su desempeño, controlando parámetros tales como: La composición de la solución lixivante y la inoculación bacteriana. Además de ellos se controlaron factores tales como: valores de pH, valores de temperatura, y valores de velocidad de agitación. Finalmente, por la acción microbiana y empleo de fertilizante agrícola la extracción de cobre alcanzada fue superior a 85 %.

Martínez (2012), En su estudio de: “Calibración, validación y aplicación del modelo HeapSim para estimar la producción de cobre de los bronces y Collahuasi”. La calibración se realizó utilizando un método iterativo. Luego, se realizaron análisis de sensibilidad para la determinación del efecto del de los parámetros la recuperación de cobre. Los resultados fueron que los parámetros que más más influyeron en el proceso fueron la temperatura, afectando tanto al desarrollo de las bacteriano como a la cinética de disolución de sulfuros, y granulometría, que afectó al transporte de las especies microbianas dentro de las columnas.

Dennis (2016), En el informe titulado: “Biolixiviación de Cobre Por Bacterias ferrooxidantes a partir de Calcopirita en un sistema de columnas de lixiviación por gravedad”, se estudió la biolixiviación y lixiviación química de calcopirita de diferentes tamaños de partículas de la mina Chapi-Arequipa utilizando bacterias oxidantes de hierro, mediante columnas por gravedad. Los resultados mostraron que el crecimiento de bacterias oxidantes de hierro en calcopirita de 9,5 mm fue relativamente grande, alcanzando 3,39 millones de bacterias/mL después de 20 días de evaluación. Para partículas con un tamaño de partícula de 9,5 mm, la recuperación de cobre por biolixiviación fue del 86,07%, superior al 53,9% de recuperación después de la lixiviación química. En la biolixiviación se observó que el contenido de hierro total en la solución era alto y el valor del pH estaba por debajo de 2, alcanzando la concentración de sólidos disueltos totales 18,10 mg/L para la calcopirita de 9,5 mm de tamaño.

Zepeda (2018), En su tesis doctoral titulado: “Biolixiviación de minerales sulfurados de cobre de baja ley”, se investigaron los parámetros operativos y los cambios en la microbiología durante el proceso. Se estudió cómo factores como la disponibilidad de ácido, la temperatura y la actividad microbiana afectan el proceso industrial. Se evaluó el impacto de la temperatura y las concentraciones de hierro en la disolución de covelina y se monitorearon las transformaciones de los minerales sulfurados durante la

lixiviación. Los resultados mostraron que temperaturas controladas entre 25 y 52°C aumentaron la recuperación de cobre en un 13% más en comparación con las columnas en las que no se emplearon los microorganismos y el cloruro mejoró la recuperación, sugiriendo nuevas tecnologías para tratar minerales de baja ley.

Arteaga y Otiniano (2021), en su informe titulado: “Influencia de la temperatura y pH en el porcentaje de recuperación de cobre en la biolixiviación de un concentrado de calcopirita utilizando *Sulfobacillus acidophilus*”. Se realizó un estudio sobre la influencia de la temperatura y pH en la recuperación de cobre mediante biolixiviación de concentrado de calcopirita con *Sulfobacillus acidophilus*. Se utilizaron diferentes pH (1,0; 2,0; 3,0) y temperaturas (50°C, 55°C, 60°C) en el proceso. La concentración del mineral se logró a través de flotación y luego se inició la biolixiviación con microorganismos termófilos previamente identificados. Tras tres semanas de agitación y análisis, se determinó que la mejor recuperación de cobre se obtuvo a 60°C y pH 1,0, con un 22,36% de extracción y una concentración de Fe^{3+} de 91,77 ppm. La varianza demostró la influencia significativa de estas variables en la recuperación de cobre.

Zea (2023), En su informe de tesis titulado: “Evaluación de la capacidad biolixivante de cultivos microbianos puros y en consorcio sobre la calcopirita”. Este estudio evaluó la capacidad de biolixiviación de dos cultivos microbianos nativos extraídos de los botaderos de Toquepala: *Leptospirillum ferriphilum* (M1D-2020), *Leptospirillum sp.* (M3E-2020), y de además un cultivo microbiano adquirido *Acidithiobacillus ferrooxidans* (DSM 14882) de la colección microbiana del German Collection of Microorganisms and Cell Cultures-DSMZ. Se analizaron individualmente y en grupos para ver cómo oxidaban hierro y azufre en un medio de cultivo modificado. Se realizaron tres tratamientos con tres repeticiones utilizando calcopirita y un control. Esto en matraces de con 180 mL de cultivo 9k, 20 mL de inóculo microbiano y 10 % de calcopirita en porcentaje; se incubaron a 30 °C por 648 horas a 120 rpm. Los resultados mostraron que el consorcio de tres cultivos fue el más efectivo, recuperando 17,07mg de cobre equivaliendo a el 37,09 % de recuperación.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. *El Cobre*

El cobre (Cu) es un metal noble de color rojizo, con propiedades tales como: ductilidad, maleabilidad y conducción térmica y eléctrica; propiedades que hacen de este un metal sumamente valioso para la industria en general (Donoso, 2013). En la naturaleza lo hallamos principalmente como óxidos o sulfuros en minerales como: Cuprita (Cu_2O), Tenorita (CuO), calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4), calcosina (Cu_2S), covelita (CuS), etc., (Geologyscience, 2023).

2.2.2. *Obtención del cobre*

La obtención del cobre es compleja, depende en gran medida del estado en que se encuentre en el yacimiento (oxidado o sulfurado); siendo los sulfuros los más abundantes sobre la corteza terrestre y difíciles de tratar. Actualmente, existe 2 métodos o procesos comúnmente empleados en la recuperación de cobre conocidos como pirometalurgia e hidrometalurgia (Alafara et al., 2012).

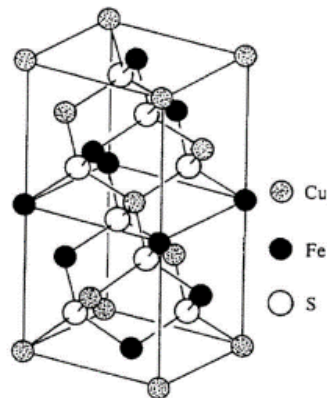
Aunque la hidrometalurgia convencional es más común para minerales oxidados, la biolixiviación permite procesar minerales sulfurados de baja ley, que no son económicamente viables para la pirometalurgia (Brierley & Brierley, 2001).

2.2.3. Calcopirita

La calcopirita (CuFeS_2) es un sulfuro de cobre covalente con una estructura cristalina similar a la de la esfalerita; cada celda unitaria de calcopirita contiene cuatro átomos de cobre, cuatro de hierro y ocho de azufre. Cada átomo de azufre está coordinado por un tetraedro de dos átomos de cobre y dos de hierro. Los átomos del metal están coordinados por un tetraedro de átomos de azufre (Khoshkhoo, 2016; Jones, 2006). (Ver Figura 1).

Figura 1

Celda unitaria de la estructura de la calcopirita.



Nota. Estructura cristalina de la calcopirita. Extraído de Bravo, (2016).

La calcopirita es uno de los minerales de cobre más abundantes, y representa más del 70 % de las reservas mundiales de este metal. Sin embargo, continúa siendo recalcitrante a la lixiviación mediante métodos hidrometalúrgicos, debido a la formación de una capa de pasivación,

especialmente en sistemas con sulfato férrico. Además, se sabe que la calcopirita se pasiva rápidamente en condiciones de alto potencial redox (Hong et al., 2021; Zhao et al., 2014; Zhao et al., 2019).

2.2.4. Biolixiviación

La biolixiviación es una técnica hidrometalúrgica que emplea microorganismos para la recuperación de metales en solución; adecuada para el procesamiento de minerales de baja ley en comparación con otras técnicas convencionales de procesamiento de minerales y se ha utilizado en la producción industrial en los últimos años (Rivera, et al., 2011; Chen et al., 2019; Xia et al., 2018).

La lixiviación en pilas, depósitos, tanques agitados, botaderos, in situ, etc., con microorganismos para la recuperación de minerales ofrece una serie de ventajas que abarcan equipos simples, inversión y costos de operación menores, y rendimientos aceptables (Rivera, et al., 2011) y aunque es un método eficaz y prometedor para la extracción de minerales refractarios de sulfuro de cobre con amplias ventajas, beneficios y respetuoso del ambiente, aún deben resolverse problemas que incluyen la baja tasa de lixiviación, la larga rutina de biolixiviación y la baja eficiencia (Bevilaqua et al., 2013; Klauber, 2008).

2.2.4.1. Técnicas de biolixiviación

La diferencia entre la tecnología de lixivante y biolixivante depende principalmente de la escala, área de aplicación, el método, la ley de cobre y el tamaño de partícula del mineral, etc. (Brietley, 2008). Algunas técnicas empleadas son:

a) A nivel de laboratorio

- Biolixiviación en microplacas (Microplate Bioleaching)
- Biolixiviación en frasco agitado (Shake Flask Bioleaching)
- Biolixiviación por percolación (Percolation Bioleaching)
- Biolixiviación en columnas por gravedad (Column Bioleaching)
- Biolixiviación en Biorreactores a escala laboratorio
- Biolixiviación en sistemas controlados de flujo continuo

b) Procesos biolixiviación a nivel industrial

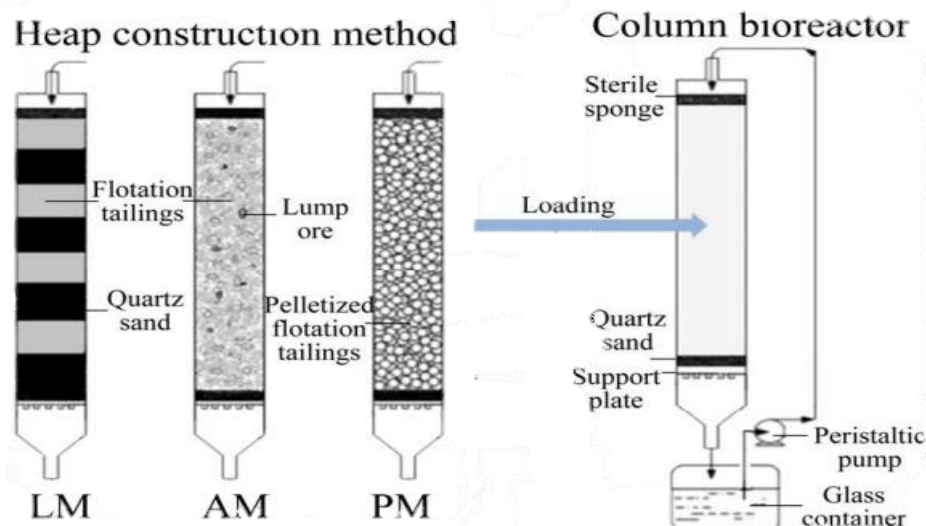
- Biolixiviación In situ (In situ Bioleaching)
- Biolixiviación en botaderos (Bioleaching in landfills)
- Biolixiviación en pilas (Heap bioleaching)
- Biolixiviación en tanques agitados (Bioleaching in stirred tanks)
- Biolixiviación indirecta (Indirect bioleaching)

2.2.4.2. Columnas de biolixiviación por gravedad

Las columnas de lixiviación son una herramienta común para investigar el comportamiento de lixiviación en perfiles geológico (Kalbe et al., 2014). Debido a que los datos y el conocimiento obtenidos de la biolixiviación en pilas y en columna suelen ser similares, la mayoría de los estudios exitosos a pequeña escala (matraces de agitación, reactores por lotes y reactores continuos) se amplían a pilas después de la interpretación de los resultados en los estudios de columna y la extrapolación, de aquí la importancia de la biolixiviación en columna (Srichandam et al., 2020). (Ver Figura 6).

Figura 2

Modelos de Bio-columnas de lixiviación por gravedad.



Nota. Diseño de posibles métodos de construcción de montones y configuración del biorreactor de columna. Fuente: Hao et al., (2020).

2.2.4.3. Bacterias implicadas en la Biolixiviación

Según Misari (2016), los microorganismos que se adaptan a la minería para el tratamiento de los yacimientos pueden tener la siguiente clasificación:

1. **Autotróficas:** Capaces de obtener su sustento nutricional y energético de un entorno inorgánico.
2. **Heterotróficas:** No realizan la oxidación de metales, pero desempeñan un papel complementario al mejorar el rendimiento.
3. **Bacterias oxidantes de hierro:** Esenciales en la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} , el cual es un agente oxidante clave en la biolixiviación.
4. **Bacterias oxidantes de azufre:** Juegan un papel importante en la oxidación de azufre o compuestos de azufre, liberando ácido sulfúrico.
5. **Bacterias termófilas:** Son fundamentales en procesos de biolixiviación a altas temperaturas en minerales refractarios.
6. **Bacterias acidófilas:** Adecuadas para la biolixiviación de minerales en ambientes altamente acidificados
7. **Bacterias de consorcios mixtos:** Diferentes tipos de bacterias trabajan juntas para optimizar el rendimiento del proceso.

Existen además otra clasificación para estos microorganismos. Una de las más empleadas es aquella que considera la temperatura óptima del crecimiento y el pH, en la (Tabla 1) se muestran las principales especies biolixiviantes (Zepeda, 2018).

Tabla 1*Principales especies microbianas relacionadas con la biolixiviación.*

Espece	pH óptimo	pH mínimo- máximo	T° C Optima	T ° C mínima
Bacteria mesófilas y termófilas moderadas				
<i>Acidiferrobacter thiooxidans</i>	2	>1,2	38	>5-47
<i>Acidimicrobium ferrooxidans</i>	~2	na	45-50	<30-55
<i>Acidithiobacilis albertensis</i>	3,5-4,0	2,0-4,0	25-30	na
<i>Acidithiobacilis caldus</i>	2,0-2,5	1,0-3,5	45	32,52
<i>Acidithiobacilis ferrooxidans</i>	2,5	1,3-4,5	30,35	10-37
<i>Acidithiobacilis ferrivornas</i>	2,5	1,9-3,4	27-32	4-37
<i>Acidithiobacilis thiooxidans</i>	2,0-3,0	0,5-5,0	28-30	10-37
<i>Ferrimicrobium acidiphilum</i>	2	>1,4	35	<37
<i>Leptosporillum ferriphilum</i>	1,3-1,8	na	30-37	na-45
<i>Leptosporillum ferrooxidans</i>	1,5-3,0	1,3	28-30	na
<i>Sulfobacillus acidophilus</i>	~2	na	45-50	<30-55
<i>Sulfobacillus sibiricus</i>	2,2-2,5	1,1-3,5	55	17-60
<i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>	~2	1,5-5,5	45-48	20-60
<i>Sulfobacillus thermtolerans</i>	2,0-2,5	1,2-5,0	40	20-60
<i>Thiobacillus prosperus</i>	~2	1,0-4,5	33-37	23-41
<i>Ferroplasma acidiphilum</i>	1,7	1,3-2,2	35	15-45
Arqueas termófilas extremas				
<i>Acidianus brierleyi</i>	1,5-2,0	1,0-6,0	~70	45-75
<i>Acidianus infernus</i>	~2	1,0-5,5	~90	65-96
<i>Acidianus sulfidivorans</i>	0,35-3,0	0,8-1,4	74	45-83
<i>Metallosphaera hakonensis</i>	3,0	1,0-4,5	70	50-80
<i>Metallosphaera sedula</i>	2,0-3,0	1,0-4,5	75	50-80
<i>Sulfolobus metallicus</i>	2,0-3,0	1,0-4,5	65	50-75

Nota. Extraído de (Schippers et al., 2013).

Los microorganismos comúnmente encontrados en pilas de lixiviación-biolixiviación y drenaje ácido de mina son mesófilos, distinguiéndose entre diferentes especies de *Thiobacillus ferrooxidans* y *Leptospira* (Galleguillos et al., 2008). (Ver Figura 3).

A continuación, se indican las características principales de algunos de los microorganismos relevantes en los procesos de biolixiviación.

Acidithiobacillus ferrooxidans. Es un organismo Gram negativo, acidófilo, mesófilo, autótrofo y que obtiene energía a partir de la oxidación de hierro ferroso, hidrógeno, azufre y compuestos reducidos de azufre (tales como sulfuros metálicos, tetratiónato y tiocianato, entre otros). Posee una temperatura de crecimiento óptima de 28-30 °C (Zepeda , 2018).

Acidithiobacillus thiooxidans. Es Gram negativo, acidófilo, mesófilo autótrofo, que obtiene energía a partir de la oxidación de azufre y compuestos reducidos de este generando ácido sulfúrico. Posee una temperatura óptima de crecimiento de 28-30 °C, con tolerancias límites cercana a los 18 y 37 °C (Zepeda , 2018).

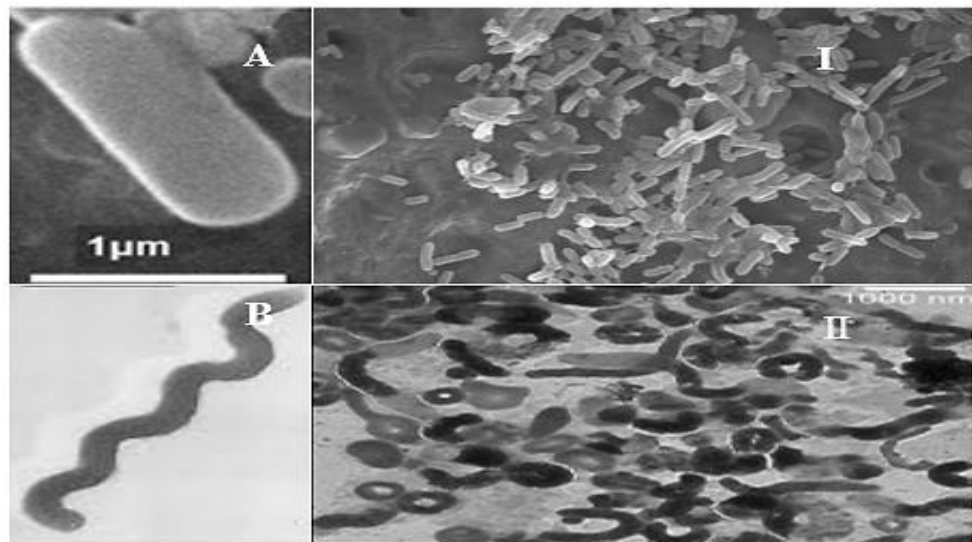
Leptospirillum ferriphilum. Es un microorganismo Gram negativo, acidófilo, autótrofo, moderadamente termófilo con temperatura óptima de crecimiento de 35-38 °C. Su única fuente de energía descrita hasta ahora es el hierro ferroso (Zepeda , 2018).

Sulfobacillus thermosulfidooxidans. Es un organismo acidófilo, moderadamente termófilo, Gram positivo y capaz de formar esporas. Rango de temperatura óptimos de 50-55 °C y rango de pH óptimo de 1,9-2,4. Puede utilizar Fe ferroso o compuestos de S como energía (Zepeda , 2018).

Ferromicrobium acidiphilum. Es un organismo Gram negativo, acidófilo, mesófilo y obligadamente heterotrófico; es capaz de reducir y oxidar Fe y de oxidar pirita. Su temperatura óptima es de 35-37 °C; su pH óptimo es 2,0 (mínimo 1,4); es anaerobio (Zepeda , 2018).

Figura 3

Fotografías microscópicas de algunas especies biolixiviantes



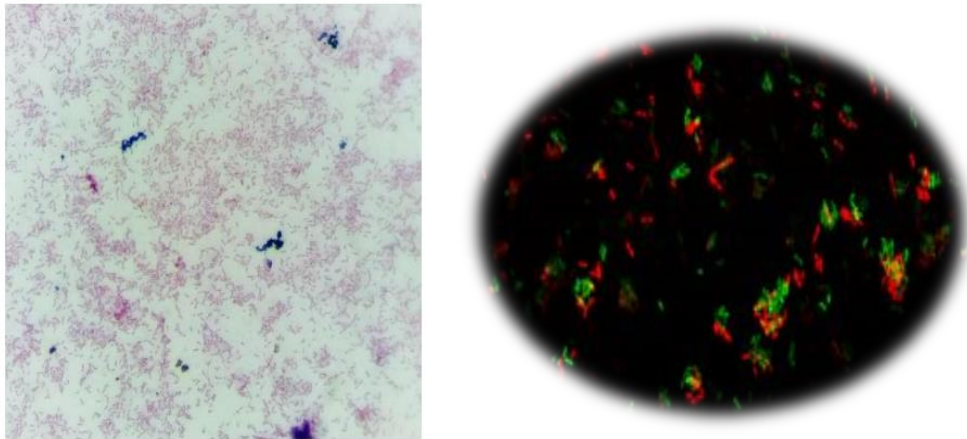
Nota. En A) se muestra la forma de bacilo del *Acidithiobacillus ferrooxidans* y I) una colonia de la misma, B) muestra la forma espiralada del *Leptospirillum ferriphilum* y II) muestra una colonia de la misma. Extraído de Sand et al. (1992) y de Jimenez et al. (2021).

2.2.4.4. Consorcios Bacterianos

Los consorcios bacterianos son asociaciones simbióticas entre dos a más poblaciones microbianas, de especies distinta (López et al., 2007); se tiene evidencia de microorganismos presentes en la naturaleza conformando consorcios que participan de forma activa en el proceso de lixiviación de minerales sulfurados, (Kennedy & Gewin, 1997); entre los cuales se pueden destacar bacterias heterótrofas acidófilas que catalizan la oxidación de hierro y compuestos de azufre reducido (Johnson & Ginnes, 1991). (Ver Figura 4).

Figura 4

Ejemplos de consorcio bacteriano formado por diferentes cepas.

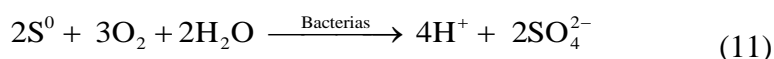
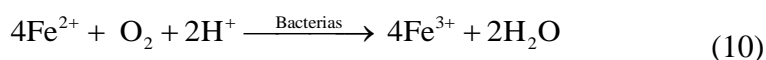


Nota. Tinción Gram de un consorcio bacteriano en medio 9k y consorcio bacteriano formado por diferentes cepas. Fuente: De Pairazamán et al. (2019) y de Lorenzo, (2020).

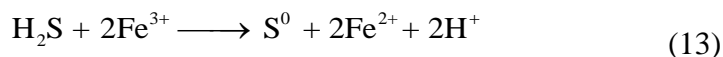
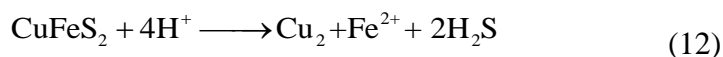
2.2.4.5. Biolixiviación de la calcopirita

Las bacterias facilitan la oxidación de sulfuros metálicos, como la calcopirita y regeneran el agente oxidante: Fe^{2+} a Fe^{3+} , manteniendo la reacción activa. Luego, la fórmula química de la calcopirita (CuFeS_2) es $\text{Cu}^+ \text{Fe}^{3+} \text{S}_2^{2-}$, el cobre está en estado cuproso y el hierro en estado férrico (Córdoba et al., 2008).

Se evidencia que la oxidación de ion ferroso y del azufre elemental puede ser llevada a cabo por los microorganismos (Bravo, 2016).



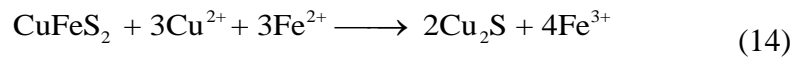
En el mecanismo de polisulfuros, el sulfuro de cobre es atacado por un ácido, lo que desestabilizándose la estructura del mineral antes de que el sulfuro sea oxidado, generándose así iones metálicos y un polisulfuro. Éste último luego es oxidado a azufre elemental (Bravo, 2016).



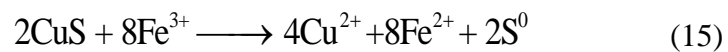
La lixiviación química de calcopirita, se favorece en medio de condiciones de Eh por debajo de un valor crítico, es decir, a una razón apropiada de $[\text{Fe}^{3+}]/[\text{Fe}^{2+}]$ (Hiroyoshi et al., 2001).

Es posible que exista un rango potencial optimo redox referente a la oxidación de la calcopirita con el *S. thermosulfidooxidans* (termófilo moderado), y que a un potencial redox por sobre un valor critico se suprime la lixiviación (Xia et al., 2010).

En la presencia de iones ferrosos y cobre, la calcopirita puede ser reduce a calcosita conforme a:



Según Xia et al, (2010) Luego el intermediario calcosita (Cu_2S), quien es mucho más susceptible a la lixiviación que la calcopirita, es oxidada por los iones de férricos:



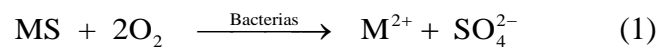
Las reacciones anteriores pueden suceder solo y cuando el potencial redox está lo suficiente bajo para la formar calcosita (entre 420 a 470 mV) y lo suficientemente alto para la oxidación posterior de calcosita (Xia et al., 2010).

2.2.5. Mecanismos de biolixiviación

Existen diversos mecanismos propuestos para la descripción de la interacción de las bacterias y el mineral a la hora de la biolixiviación, dichos mecanismos son (Saavedra, 2018):

a) Mecanismo Directo

El mecanismo directo sugiere que la acción de las bacterias, la reacción química catalizada en forma enzimática, se da directamente sobre la superficie en contacto con el mineral, produciéndose la oxidación enzimática del mineral por transporte de electrones (Saavedra, 2018):

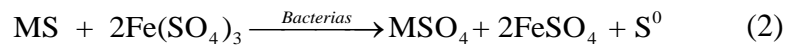


La adherencia bacteriana a los minerales, constituye un requerimiento del mecanismo directo siendo esta teoría avalada por diversos estudios que aceptan la adherencia de las bacterias a la superficie expuesta del mineral (Acebedo & Gentina, 2005).

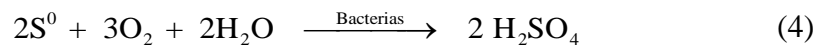
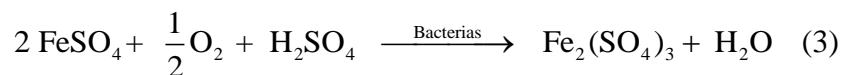
b) Mecanismo Indirecto

El mecanismo indirecto sugiere que la bacteria que nadan libre en la solución produce las reacciones químicas, enzimáticas y no enzimáticas sin que la bacteria esté en contacto con el mineral; más a pesar de la falta de contacto, juegan un papel importante en el proceso (Acebedo & Gentina, 2005).

Las ecuaciones que intervienen son:



Paralelamente la presencia de bacterias cataliza la oxidación del ion ferroso y azufre elemental según:



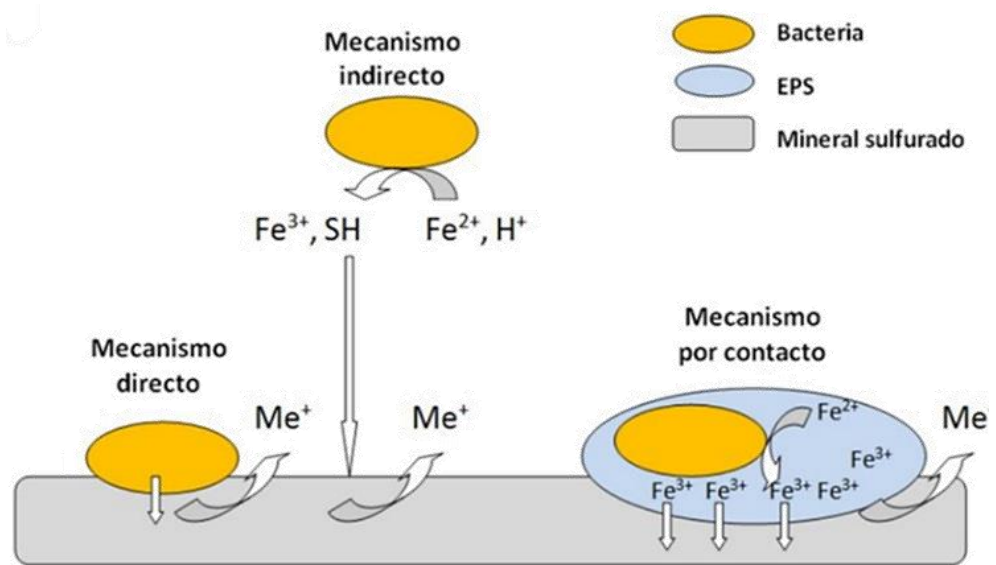
Además, en base a sustancia intermedias detectadas se han propuesto 2 mecanismos indirectos propuestos por Schippers y Sand, (1999): conocidos como, vía **tiosulfato** y vía **poli sulfato**.

c) Mecanismo por contacto o cooperativo

Si bien el mecanismo indirecto, es el que cuenta con mayor aceptación, se ha propuesto un tercer mecanismo denominado por contacto o cooperativo, este propone que los microorganismos adheridos liberan (EPS), sustancias poliméricas extracelulares, con especies oxidables, que son importantes en la formación del biofilm y las cuales representa una fuente de energía para los microorganismos que están en solución (Saavedra, 2018). (Ver Figura 5).

Figura 5

Mecanismo directo, indirecto y por contacto en biolixiviación.



Nota. Imagen extraída de Biotecnología microbiana aplicada a la minería, por Saavedra (2018).

2.2.5.1. Características y formación de biofilm en procesos biomineros

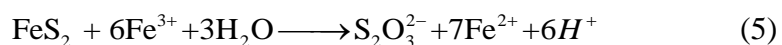
Las bacterias excretan sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que forman un biofilm al unirse al mineral. En la pirita (FeS_2), estas bacterias la oxidan, generando ácido sulfúrico e iones Fe^{3+} , que se combinan con el EPS, creando una carga positiva que interactúa con la superficie negativa del mineral. Sin EPS, las bacterias no pueden oxidar la calcopirita. El EPS facilita la biolixiviación al mantener condiciones óptimas y concentra hierro, lo que previene la precipitación de sólidos (Arumí, 2020).

2.2.5.2. Vías tiosulfato y polisulfato

La biolixiviación por vía tiosulfato y vía polisulfato describe rutas químicas específicas mediante las cuales los microorganismos facilitan la disolución de minerales sulfurados, como la pirita (FeS_2) o la calcopirita (CuFeS_2). Estas rutas están relacionadas con la oxidación de los compuestos sulfurados presentes en los minerales y su conversión en formas solubles mediante intermediarios específicos (Tributsh, 2001; Watling, 2006). (Figura 6).

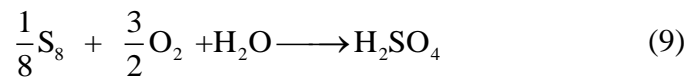
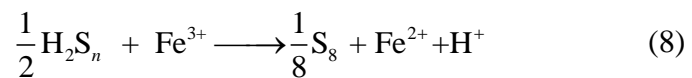
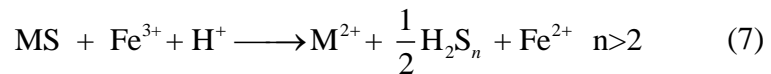
a) Vía tiosulfato

La vía tiosulfato se da por la oxidación de sulfuros insolubles en ácido, como la calcopirita. En este proceso, los sulfuros ceden electrones, y la oxidación por iones férricos genera tiosulfato como producto intermedio. Este se transforma en tetratiónato, politiónatos y finalmente en sulfato, siendo todo el proceso facilitado por bacterias ferro-oxidantes (Tributsh, 2001).



b) Vía polisulfato

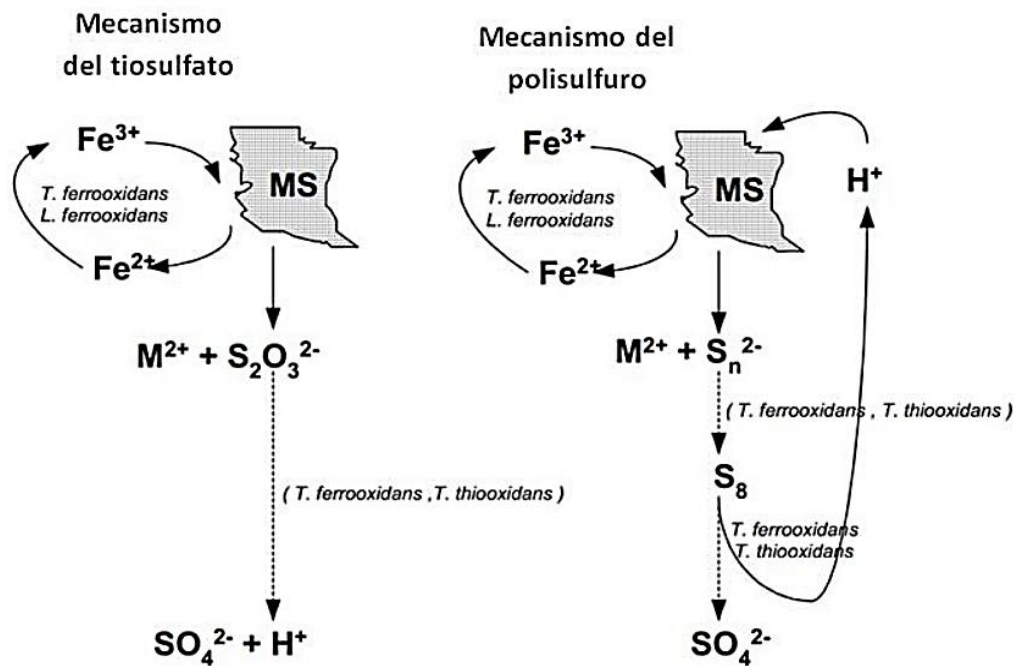
La vía polisulfato consiste en la oxidación de sulfuros insolubles en ácido, como la piritita y calcopiritita, mediante iones férricos. Este proceso genera tiosulfato como producto intermedio, que tras varias etapas de oxidación se convierte en tetratiónato, politiónatos y finalmente en sulfato, con la ayuda de bacterias oxidantes de hierro (Tributsh, 2001).



Mientras que los mecanismos de biolixiviación describen cómo los microorganismos facilitan la extracción de metales (directamente o mediante agentes oxidantes), las vías sulfato y polisulfato detallan rutas químicas específicas en la oxidación del azufre del mineral. Ambos conceptos están interrelacionados y permiten comprender los procesos que ocurren a nivel microbiológico y químico en la biolixiviación (Watling, 2006).

Figura 6

Mecanismos de solubilización microbiana, vías tiosulfato y poli sulfato



Nota. Imagen extraída de Biotecnología microbiana aplicada a la minería, por Saavedra (2018).

2.2.5.3. Metabolismo microbiano

Las bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* tienen metabolismos especializados que les permiten sobrevivir en condiciones extremas y participar en la lixiviación de metales. Sus vías metabólicas incluyen procesos aeróbicos y anaeróbicos (Ver Figura 7 y 8).

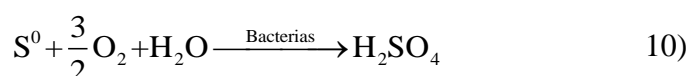
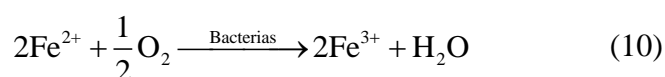
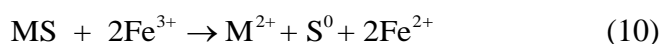
a) Tipos de metabolismo

- ✓ **Quimiolitotrofia:** Utilizan compuestos inorgánicos como fuente de electrones y energía.
- ✓ **Autotrofia:** Usan CO₂ como fuente de carbono para la síntesis de biomasa.

b) Procesos metabólicos claves

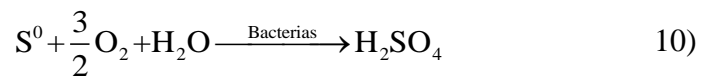
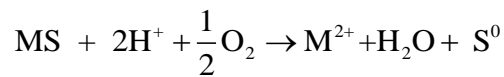
- ✓ **Oxidación de sulfuros**

La oxidación de sulfuros es el proceso clave mediante el cual las bacterias biolixiviantes extraen metales de los minerales sulfurados, como la calcopirita (CuFeS₂), la pirita (FeS₂), y otros. Este proceso implica reacciones químicas en las que las bacterias facilitan la transformación de los sulfuros metálicos en formas solubles, liberando metales útiles y generando compuestos secundarios (De Barros et al., 2012). La lixiviación del hierro se produce mediante la regeneración de iones Fe³⁺, manteniendo la concentración de ácido y mejorando la difusión debido al consumo de S⁰.



Donde M es un metal (Cu, Fe, Zn, etc.).

Lixiviación ácida con regeneración bacteriana del ácido consumido y mejoramiento de la difusión por consumo de S⁰

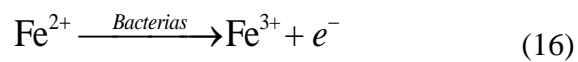


Acción bacteriana directa (hipotética)



✓ Oxidación de hierro ferroso

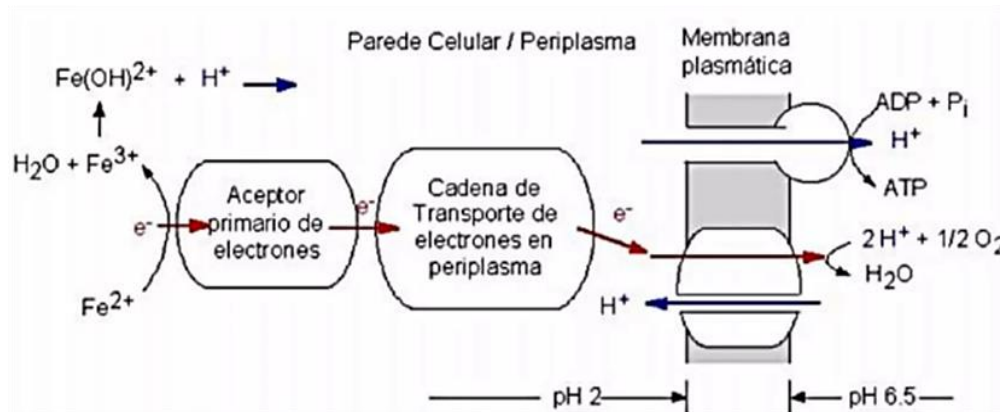
Los microorganismos utilizados en la biolixiviación obtienen energía oxidando compuestos reducidos de azufre y/o iones ferrosos, facilitando la extracción de cobre al generar iones férricos y protones que crean un ambiente oxidante en minerales sulfurados (De Barros et al., 2012). En *T. ferrooxidans*, la oxidación de Fe²⁺ ocurre en la membrana celular, donde el Fe²⁺ se compleja con oxígeno o sulfato y se une a la membrana citoplasmática. Allí, la enzima Fe²⁺ citocromo c reductasa cataliza su conversión a Fe³⁺ (Misari, 2016). Ecuación de oxidación del hierro ferroso:



Donde un electrón ingresa a reducir la cadena transportadora de electrones formada por citocromos c, a y la enzima citocromo-oxidasa, los que realizan los ciclos de oxido-reducción sintetizando ATP por cada electrón que sigue dicho ciclo (Figura 6).

Figura 7

Esquema de la cadena de citocromos que participa en la oxidación de Fe^{2+} .



Nota. Imagen extraída del libro “Biolixiviación” por Misari, (2016). La energía formada en la fosforilación oxidativa almacenada como ATP se emplea para llevar a cabo todos aquellos procesos del microorganismo que requiera de energía química, en especial los que llevan a la síntesis de los nuevos componentes celulares (Misari, 2016).

c) Ciclo del carbono

Las bacterias biolixiviantes necesitan fuentes de carbono para su crecimiento y metabolismo. Pueden obtener de diferentes maneras:

- ✓ **Autótrofas:** Utilizan (CO_2) como única fuente de carbono, fijándolo mediante el ciclo de Calvin-Benson-Bassham (CBB), impulsado por la energía obtenida de la oxidación de Fe^{2+} o S^0 .
- ✓ **Oxidación de Fe^{2+} :** Genera energía necesaria para la fijación de CO_2 .
- ✓ **Oxidación de compuestos de azufre:** Similar, proporciona energía para procesos biosintéticos.

d) Ciclo del nitrógeno

Las bacterias biolixiviantes emplean estrategias específicas para obtener nitrógeno:

- ✓ **Asimilación de nitrógeno inorgánico:**

Pueden usar nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+) como fuente de nitrógeno. En condiciones específicas, pueden reducir nitratos a nitritos o directamente a amonio.

- ✓ **Fijación de nitrógeno molecular (N_2):**

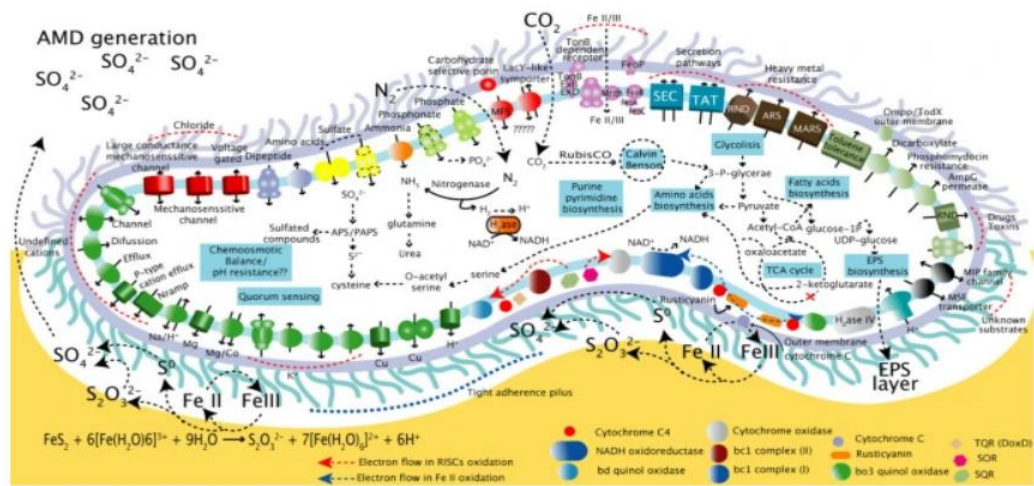
Aunque es menos común en bacterias biolixiviantes, algunos microorganismos en ecosistemas asociados con estos procesos pueden fijar nitrógeno atmosférico a amonio.

e) Adaptaciones metabólicas

- ✓ **Resistencia a ambientes ácidos:** Poseen mecanismos para mantener el equilibrio intracelular de protones y evitar daños por acidez extrema.
- ✓ **Tolerancia a metales pesados:** Sistemas de expulsión y detoxificación de metales como cobre y arsénico.
- ✓ **Metabolismo aeróbico:** Requieren oxígeno como receptor final de electrones en su cadena respiratoria.

Figura 8

Metabolismo microbiano completo del *Acidithiobacillus ferrooxidans*



Nota. Modelo de células completas para *A. ferrooxidans* ATCC 23270. Modelo basado en el genoma del metabolismo celular de *A. ferrooxidans*, incluidos los sistemas de transporte previstos; componentes quimiolitotóxicos; metabolismo del carbono, nitrógeno y azufre; y ciclos biogeoquímicos. Extraído de (Valdés et al., 2008).

2.2.5.4. Modelo de crecimiento bacteriano

Las etapas de crecimiento de las bacterias en un cultivo determinado se expresan de forma general de la siguiente manera. (Ver Figura 9).

Figura 9

Fases del crecimiento microbiano a lo largo del tiempo



Nota. Etapas de crecimiento de las bacterias en función del tiempo. Extraído de (Misari, 2016).

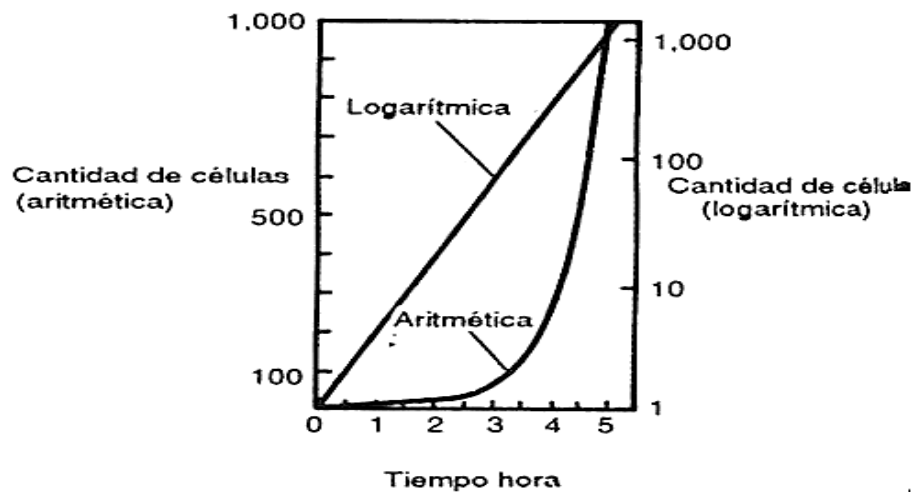
Se puede observar que las bacterias pasan inicialmente por un período de adaptación, tras el cual su reproducción aumenta de forma logarítmica. Su alta tasa reproductiva y las condiciones ambientales limitan las características de su hábitat. Por tanto, en un determinado momento cesa su reproducción y permanece estacionario hasta que los subproductos de su propia actividad lo envenenan (Microbiología, 2014).

El entorno provoca su inhibición y posterior muerte. Esto sugiere que

el punto apropiado para pasar de un cultivo a otro es exactamente durante la fase de crecimiento logarítmico. A continuación, se muestra curvas de la cinética de crecimiento. (Ver Figura 10)

Figura 10

Curvas de crecimiento microbiana en la fase logarítmica



Nota. Curva logarítmica del crecimiento microbiano. El crecimiento de las bacterias biolixivantes sigue típicamente una cinética de tipo Monod. Extraído de (Microbiología, 2014).

2.2.6. Cinética de la biolixiviación

La cinética de biolixiviación describe las tasas a las que los microorganismos oxidan minerales y liberan metales en solución. Se basa en principios de bioquímica, catálisis y transferencia de masa, ya que los microorganismos catalizan las reacciones químicas clave involucradas.

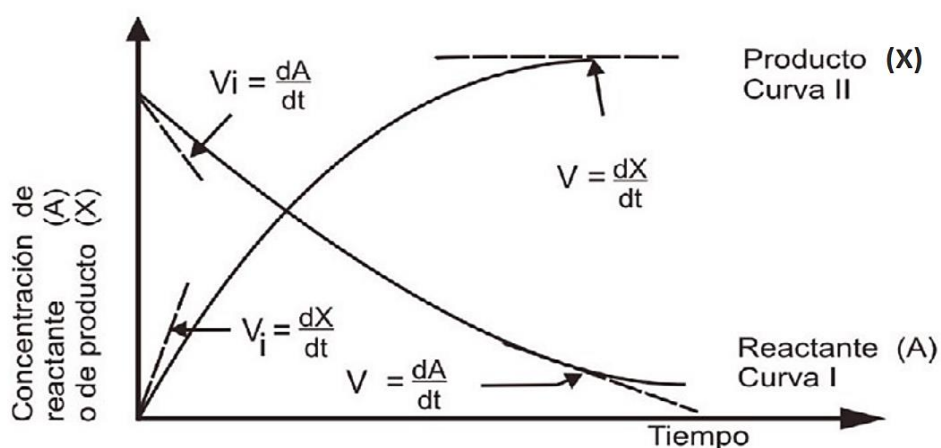
Luego, la velocidad de una reacción química generalmente se expresa

como la velocidad de cambio de la concentración de un reactante o producto (Ver Figura 11).



Figura 11

Variación con el tiempo de las concentraciones de un reactante (A) curva I y de un producto (X) curva II.



Nota. Mecanismos directos e indirectos de biolixiviación. Tomado de (Misari, 2016).

Las variaciones en las concentraciones del reactante A y del producto X en función del tiempo permiten calcular la velocidad de reacción trazando la tangente a la curva en cualquier instante; la pendiente de esta tangente (siempre positiva) representa la velocidad de desaparición de A. En particular, la pendiente en $t=0$ corresponde a la velocidad inicial del experimento (Misari, 2016).

2.2.6.1. Ecuaciones cinéticas básicas

La cinética de la biolixiviación se describe utilizando modelos basados en los principios de la cinética enzimática y de procesos microbianos (Rawling, 1999).

A. Modelo de Monod (cinética microbiana)

El crecimiento de las bacterias biolixiviantes sigue típicamente una cinética de tipo Monod:

$$r = r_{\max} \cdot \frac{[S]}{K_s + [S]}$$

Donde:

r = Velocidad específica de reacción

μ_{\max} = Tasa máxima de crecimiento

$[S]$ = Concentración del sustrato limitante (como Fe^{3+} o S^0)

K_s = Concentración de saturación (concentración en la que la tasa es la mitad de μ_{\max})

B. Cinética de biolixiviación

La velocidad de biolixiviación está influida por factores como la concentración de oxígeno, el pH, la temperatura, la disponibilidad de microorganismos y la geometría del mineral (Brietley, 2008).

Modelo cinético general:

$$r = k \cdot [C]^n \cdot [O]^m$$

Donde:

r = Velocidad de reacción (biolixiviación)

k = Constante de velocidad (dependiente de la temp., ecuación de Arrhenius).

$[C]$ = Concentración de sustrato (por ejemplo, Fe^{2+} , azufre elemental, etc).

$[O_2]$ = Concentración de oxígeno (limitante en medios líquidos)

n y m = Ordenes de reacción respecto a los reactivos.

C. Factores adicionales que afectan la cinética

- **Difusión de oxígeno:** La velocidad de difusión de oxígeno puede limitar la biolixiviación en sistemas de lecho fijo o agitado.
- **Temperatura:** Influye en k , descrito por la ecuación de Arrhenius:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

Donde:

A = Factor pre-exponencial

E_a = Energía de activación

R = Constante universal de los gases

T = Temperatura absoluta

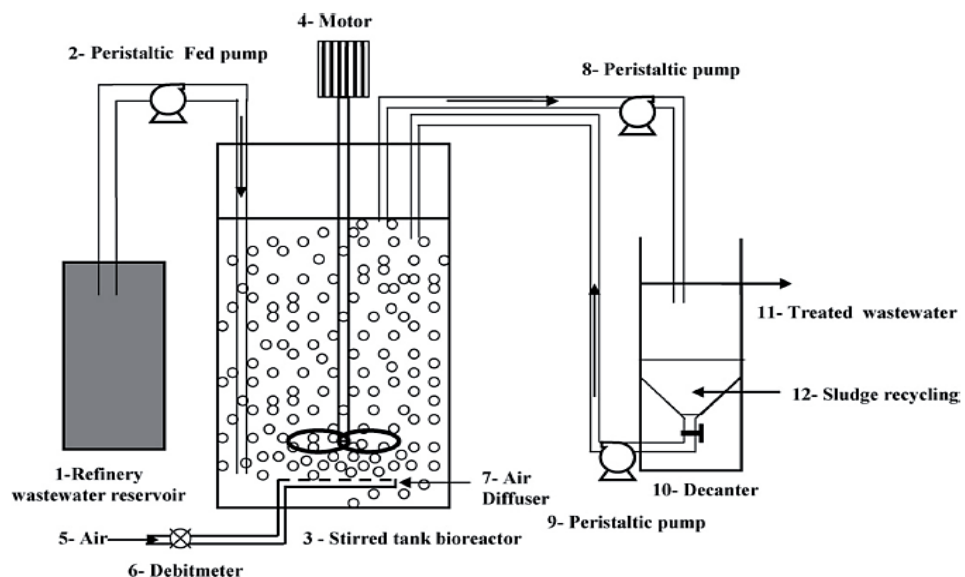
pH = Afecta tanto la actividad microbiana como la solubilidad de especies químicas

2.2.7. Propagación de microorganismo en biorreactores

El uso de biorreactores microbianos es muy eficiente debido a que ofrecen un ambiente controlado donde es posible controlar parámetros críticos para optimizar los procesos y propagar microorganismos, además de que cuentan con una gran flexibilidad a la hora de realizar un diseño (Tekere, 2019). Para ayudar la propagación de microorganismos en biorreactores es necesaria la formación de biofilms, que además permiten mejorar el metabolismo y la supervivencia de los microorganismos (Davis et al., 1998). (Ver Figura 12).

Figura 12

Esquema de un biorreactor de propagación de inoculo bacteriano.



Nota. Diagrama esquemático del biorreactor aeróbico de tanque de agitación continua (CSTR). **Fuente:** Imagen de Tekere, (2019).

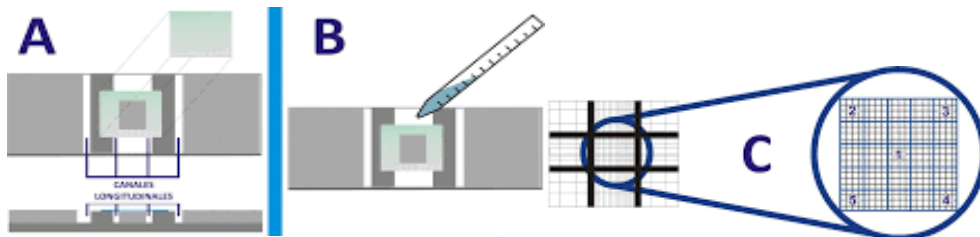
2.2.8. Producción de Biomasa

Biomasa es un término referente a los microorganismos presentes en un sistema, también puede referirse al número de células o masa de los seres vivos (Sánchez, 2012); la determinación de biomasa es una variable importante en todo bioproceso, ya que la determinación de la biomasa permite la comprensión de la eficiencia del bioproceso (Arnáiz et al., 2000). Para llevar a cabo la acción oxidativa sobre el hierro, por parte de los microorganismos, durante la biolixiviación de sulfuros, es necesario un incremento poblacional bacteriano; para ello, los cambios en la concentración de sustrato y la medición de la biomasa son los medios indicativos de la estimación de la tasa de crecimiento microbiano (Eyzaguirre, 2015).

Los métodos para el conteo de microorganismos presentes en la biomasa contemplan la cantidad de células, masa celular y actividad celular. Los métodos que cuantifican el número de células son principalmente útiles para enumerar los organismos, (Arnáiz et al., 2000). (Ver Figura 13)

Figura 13

Recuento bacteriano en cámara de Neubauer.



Nota. Extraído de Moreno et al., (2012).

2.2.9. Factores que influyen en el crecimiento bacteriano

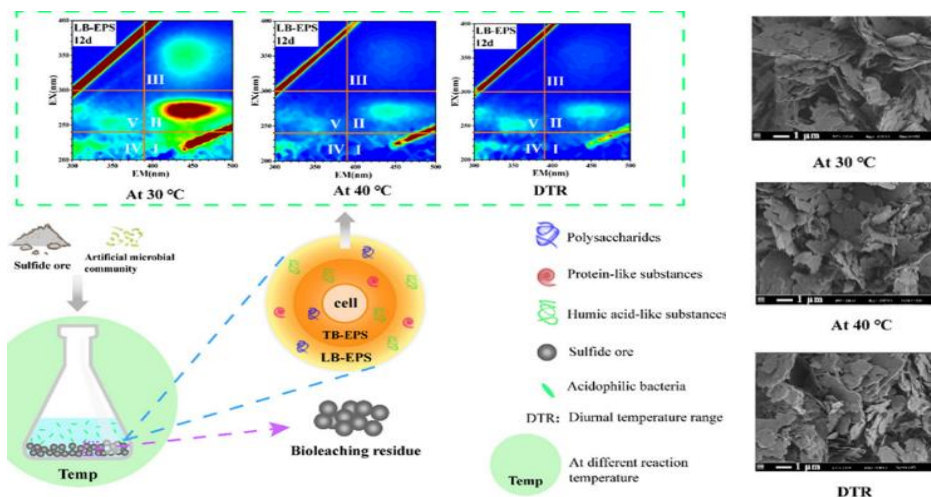
2.2.9.1. Influencia de la temperatura

Los microorganismos dependiendo del rango de temperatura en que se desarrollen y tengan un crecimiento óptimo pueden ser psicrófilos, desde 4 °C a 20 °C, mesófilos de 20 °C a 44 °C, termófilos moderados de 45 °C a 55 °C y termófilos con temperaturas superiores a los 56 °C (Khoshkhoo, 2016); Se conoce que la extracción de cobre a partir de calcopirita (CuFeS_2) la temperatura varía con el rendimiento de la biolixiviación de dos maneras. En primer lugar, el incremento de la temperatura aumenta la velocidad de reacción y, en segundo lugar, la temperatura más alta aumenta el grado de solubilización del metal de ciertos minerales como la calcopirita (CuFeS_2) (Watling et al., 2020).

La temperatura juega un papel clave en la biolixiviación en columna para extraer el metal (Yang, 2013). En estudios sobre la recuperación de cobre a través de columna mediante *A. ferrooxidans* y *Acidiphilium* sp. se observó una mayor recuperación a medida que la temperatura de la solución de lixiviación se incrementó de 23 °C a 26 °C, pero la recuperación se hizo más lenta cuando la temperatura se redujo de 18°C a 26 °C; más el crecimiento, así como la actividad de oxidación se incrementó apreciablemente en el crecimiento óptimo temperatura de 30 °C. (Watling et al., 2020). (Ver Figura14).

Figura 14

Efecto de la temperatura diurna en biolixiviación de mineral sulfurado



Nota. Imagen de extraída de Xiaodi et al., (2021).

2.2.9.2. Influencia del pH

El pH juega un papel importante en la biolixiviación de minerales sulfurados (Zhao-jing et al., 2016); Los microorganismos lixiviantes se desarrollan mejor en ambientes ácidos con pH de entre 1 a 3 y altas concentraciones de iones metálicos, estos rangos de pH favorecen su incremento poblacional utilizando el ion ferroso o los compuestos de azufre reducido como fuente de energía (Rawling, 1998; Suzuki et al., 1999); estas bacterias se presentan como bacilos Gram-negativos, aunque se ha descrito que algunas bacterias termófilas exhiben tinción Gram-positiva (Suzuki et al., 1999). La disolución de sulfuros minerales solubles en ácido como la esfalerita y, en menor medida, la calcopirita, se produce mediante una

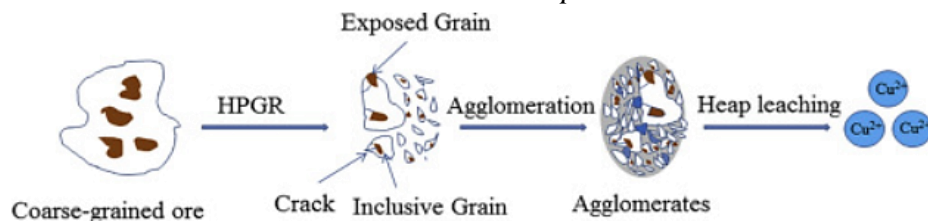
combinación de hierro férrico y ataque de protones a través de la vía del polisulfuro por tanto, una fuente abundante de protones es esencial (Rohwerder et al, 2003); No obstante se debe considerar distintos factores que puedan afectar el pH sobre la calcopirita, como la formación de jarositas, que son precipitados generados con pH mayores a 2 y que muchas veces dificulta la oxidación de los sulfuros de mineral (Suzuki et al., 1999).

2.2.9.3. Influencia del tamaño de partícula

El área superficial de las partículas es un factor importante en la oxidación bacteriana. Por lo general, en los minerales, los sulfuros de interés ocupan una pequeña fracción de la superficie y se espera que las tasas de lixiviación sean proporcionales a los pocos sitios activos de estos sulfuros (Suzuki et al., 1999); La baja eficiencia de extracción se explica por el hecho de que la canalización de líquidos o lixiviados es extremadamente difícil de penetrar en minerales de gran tamaño (Ghorbani et al., 2013). (Ver Figura 15).

Figura 15

Desbroce de un mineral mediante molienda para reducción de tamaño.



Nota. Imagen extraída de (Yin & Chen, 2020).

A medida que disminuye el tamaño de partícula, aumenta el área superficial y, por tanto, el número de sitios activos, y se espera que aumente la eficiencia del proceso (Pradhan et al., 2008).

2.2.9.4. Potencial redox

El proceso de disolución de la calcopirita durante la biolixiviación implica complicadas reacciones de oxidación-reducción, que varía con los cambios composición de solución. Los iones férricos actúan como el principal oxidante tanto en la lixiviación química como en la biolixiviación (Zhao et al., 2014). Se sabe que el potencial redox es un factor importante, incluso dominante, en la lixiviación de la calcopirita por sulfato férrico. Petersen & Dixon (2006) afirmaron que un alto potencial redox favorece la biolixiviación de pirita, mientras que un bajo potencial redox favorece la biolixiviación de calcopirita. Utilizando un electro-biorreactor encontró que la calcopirita se puede extraer de forma efectiva controlando el potencial redox a 400-425 mV (Ahmadi et al., 2010).

El potencial redox está relacionado con la relación iones férricos/ferrosos por la ecuación de Nernst:

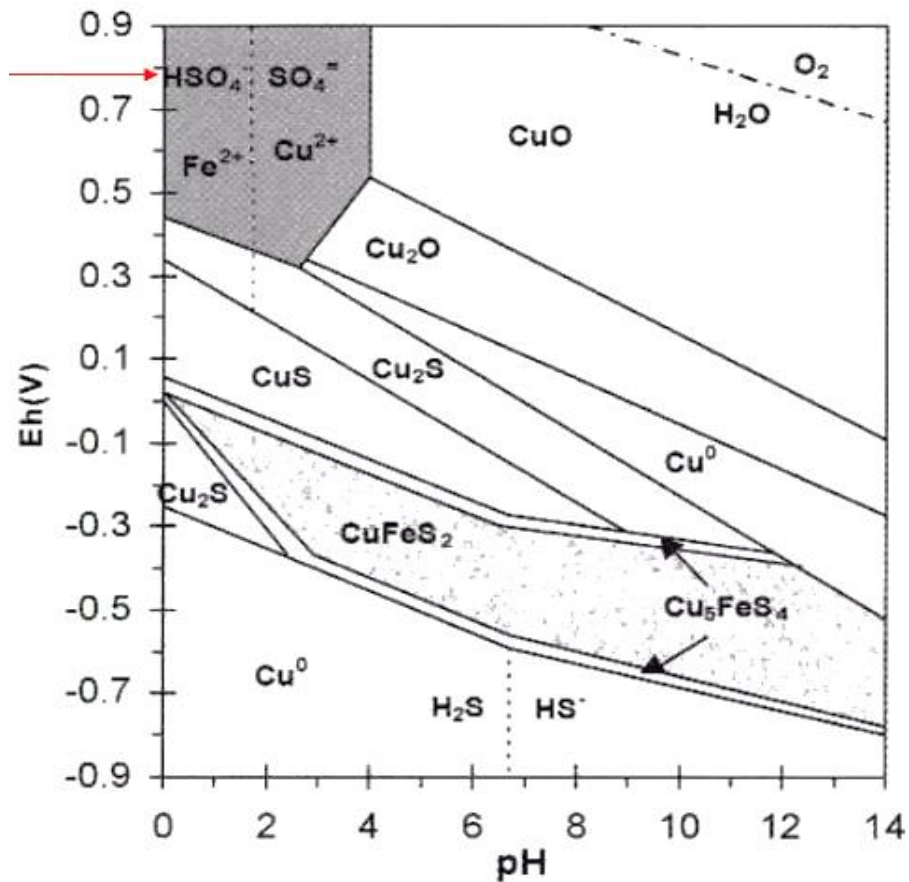
$$E = E_{Fe^{2+}, Fe^{3+}}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Fe^{3+}]}{[Fe^{2+}]} \quad (12)$$

a) Diagramas de Eh – pH de la pirita y calcopirita

La termodinámica de un sistema acuoso puede ser representada por diagramas Eh – pH ó de Pourbaix. Estos diagramas permiten la visualización de las zonas de solubilidad y/o estabilidad de las especies presentes en sistemas de lixiviación, prediciendo de este modo el comportamiento del sistema (Burkin, 2001). (Ver Figura 16)

Figura 16

Diagrama (Eh-pH) para $\text{CuFeS}_2\text{-H}_2\text{O}$ en la región ácida a 25°C



Nota. Extraído de Córdoba et al., (2008).

El diagrama de Pourbaix para el sistema $\text{CuFeS}_2\text{-H}_2\text{O}$, evidencia que para lograr la disolución completa de la calcopirita se requieren altos potenciales de solución y un pH inferior a 2,0. Se pueden formar sulfuros intermedios como bornita (Cu_5FeS_4), covelita (CuS) y calcosita (Cu_2S) a lo largo del camino de disolución (Álvarez, 2012).

2.2.9.5. Conductividad eléctrica

La conductividad del líquido de biolixiviación se determina mediante la conductividad eléctrica, que al igual que la conductividad de cualquier líquido, depende del número de iones por unidad de volumen y de su velocidad de deriva (Semat et al., 1958). Se ha visto que la pirita posee un efecto catalítico en la disolución de la calcopirita, debido a que la conductividad eléctrica de ambos minerales permite formar el par galvánico $\text{FeS}_2/\text{CuFeS}_2$. La calcopirita posee un menor potencial que la pirita por lo que actúa como un ánodo y es preferencialmente solubilizado (Misari, 2016).

2.2.9.6. Oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2).

Las bacterias lixiviantes, en su mayoría son aeróbicas, requieren oxígeno para desarrollarse, el oxígeno es usado como agente oxidante; así mismo el CO_2 es para ellas la fuente de carbono necesaria en la formación de su estructura celular y en la generación de la biomasa (Delgado, 2015).

2.2.9.7. Nutrientes para microorganismos.

Estos microorganismos requieren nutrientes para su desarrollo, que obtienen del mineral como el amonio, el fosfato, el azufre, los iones metálicos (como Mg^+), etc. El magnesio, es útil en la fijación del CO_2 y el fósforo se requiere en el metabolismo energético (Monroy et al., 2003).

2.2.9.8. Luz

La luz puede inhibir a algunas especies de bacterias, no obstante, el hierro puede representar una forma de protección con los rayos de luz (Delgado, 2015).

2.2.10. Optimización

2.2.10.1. Metodología de respuesta (MSR)

El origen de la MSR se remonta al trabajo de Box y Wilson, pero estos últimos 20 años, gracias a las computadoras, el método experimentó un desarrollo considerable, en la teoría y en la aplicación. Esto se refleja el número de publicaciones relacionadas tema, incluidas Myers y Montgomery, Box y Draper, Khuri y Cornell y Cornell. MSR es una estrategia experimental y analítica que permite encontrar las condiciones óptimas de operación de un proceso, es decir, aquellas que llevan a encontrar el "mejor valor" de una o varias características de calidad del producto. (Gutierrez & De La Vara, 2012).

2.2.10.2. Modelos

Las superficies de respuesta ajustan los modelos a los datos experimentales.

Los modelos utilizados en MSR son en su mayoría polinómicos. Así, si hay k factores, el modelo de primer orden viene dado por:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (13)$$

modelo de segundo orden:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{<l=1}^k \beta_{il} x_i x_l + \varepsilon \quad (14)$$

La forma exacta de la superficie depende del signo y la magnitud de los coeficientes del modelo, 3 formas básicas son: b) superficie máxima (montaña), c) superficie mínima (valle) y d) superficie de silla (minimax) (Gutierrez & De La Vara, 2012).

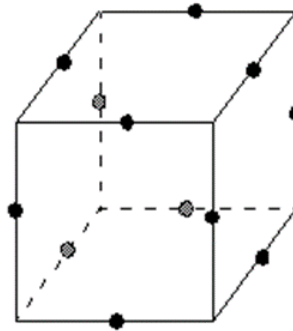
2.2.10.3. Diseños de superficie de respuesta

Un diseño de Box-Behnken es un diseño de superficie de respuesta sin factores incrustados o un diseño factorial fraccionado que se aplica cuando hay tres o más factores presentes (Gutierrez & De La Vara, 2012); el diseño incorpora tratamientos en puntos medios en los bordes del espacio experimental y requiere al menos tres factores continuos. La (Figura 17) muestra un diseño tipo Box-Behnken con tres factores. Los puntos en el

gráfico representan las corridas realizadas en el experimento (Minitab, 2022):

Figura 17

Puntos medios de los bordes del espacio experimental



Nota. Extraído de Minitab, (2022).

Esta estructura permite efectivamente estimar coeficientes de primer y segundo orden. Debido a que los diseños de Box-Behnken suelen tener menos puntos de diseño, suelen ser menos costosos de realizar que los diseños compuestos centrados con la misma cantidad de factores. Sin embargo, debido a que estos diseños no tienen diseños factoriales incorporados, no son adecuados para experimentos secuenciales (Minitab, 2022).

2.2.10.4. Optimización por la función deseabilidad

Es la técnica más utilizada en la industria hoy en día porque está programada en varios softwares comerciales, originalmente era una transformada exponencial propuesta por (Harrinton, 1965), y luego Derringer y Suich (1980) y Derringer (1994) la mejoraron. la función nueva es más flexible; Aktek et al., (2015) muestran un ejemplo de su aplicación:

Paso 1. Después de ajustar el modelo, transforme cada respuesta Y_i en una función deseada D_i , (maximizar o minimizar).

Paso 2. Combinar voluntades individuales utilizando la voluntad global de la media geométrica. Considere un vector de peso w que pondera la importancia de cada respuesta.

Paso 3. Maximizar la conveniencia global mediante algoritmos como Levenberg-Marquardt o Nelder-Mead, teniendo en cuenta las restricciones de control de cada variable.

Paso 4. Finalmente localizar el vector óptimo global de las variables de control que se usa para predecir las respuestas óptimas.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

a) Calcopirita (CuFeS₂)

Mineral de azufre de cobre y hierro, considerada como una de las principales fuentes de cobre en el mundo. Su biolixiviación es un desafío debido a su baja reactividad química y la formación de capas pasivadoras (Donoso, 2013).

b) Biolixiviación

La biolixiviación es una tecnología que emplea bacterias específicas para lixiviar, disolver o extraer, un metal de valor. contenido en un mineral. El producto final de la biolixiviación es una solución ácida que contiene el metal en forma soluble (Guerrero Rojas, 2012).

c) Bacterias Bio-lixiviantes

Los microorganismos involucrados en los procesos de lixiviación son mayoritariamente aeróbicos, autótrofos y quimiosintéticos; este último atributo, les permite realizar un proceso de oxidación de minerales que conlleva a la producción del ion férrico, que es fuertemente oxidante y permite oxidar el mineral de sulfuro a sulfato de cobre soluble; por ello, también son llamados microorganismos sulfo y ferro-oxidantes (Ballester, 2005).

d) Optimización

Proceso de ajustar y mejorar las variables operativas de un sistema o proceso para alcanzar el máximo rendimiento, eficiencia o posible. En este caso, se busca optimizar la recuperación de cobre mediante la biolixiviación (Gutierrez & De La Vara, 2012).

e) Temperatura

Medida del calor en un sistema, que influye directamente en la actividad metabólica de los microorganismos y en las reacciones químicas involucradas en la biolixiviación. La temperatura es un factor crítico para el rendimiento del proceso (Yang, 2013).

f) Tamaño de partícula

Dimensión promedio de las partículas de mineral después de la trituración. Este parámetro afecta la superficie específica disponible para las reacciones químicas y microbiológicas en el proceso de biolixiviación (Rodríguez et al., 2017).

g) Solución ácida

Líquido con un pH bajo, generalmente compuesto por ácidos fuertes como el ácido sulfúrico, utilizado para disolver los minerales y liberar los metales valiosos en el proceso de biolixiviación (Rawling, 1998).

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPOS Y DISEÑOS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de investigación

Según su propósito corresponde a una investigación básica-aplicada, ya que genera conocimientos básicos y a su vez busca resolver un problema práctico mejorando los procesos industriales según su alcance, corresponde a una investigación experimental ya que manipula y controla variables independientes para medir su impacto en la recuperación de cobre en el laboratorio.

3.1.2. Diseño de investigación

El diseño experimental que se empleo fue de tipo DOE (Desing optimal experimental) correspondiente al diseño Box-Behnken, para la manipulación de 3 variables (X1: Temperatura, X2: pH y X3:Tamaño de partícula) y la observación de su influencia en las respuestas (Y1: Recuperación de cobre, mg/mL; Y2: Población bacteriana Cel/mL; Y3: Potencial redox, mV; Y4: Producción de Fe³⁺, mg/mL y Y5: Conductividad eléctrica mS/cm); con el fin de establecer las mejores combinaciones de dichos valores para la obtención de un modelo predictivo que determine las condiciones óptimas en la recuperación de cobre. (Ver Figura 18) y (Ver Tabla 3).

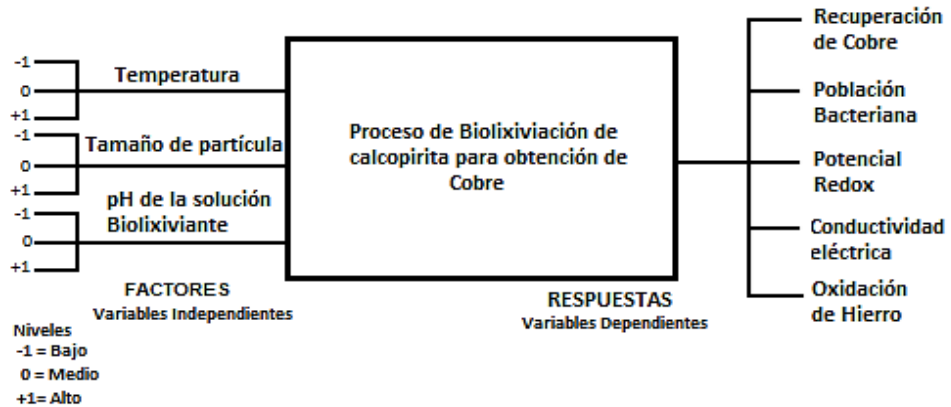
El modelo Box-Behnken es adecuado para esta investigación porque permite optimizar tres factores cuantitativos (temperatura, pH y tamaño de partícula) en un proceso de biolixiviación de calcopirita, buscando maximizar la recuperación de cobre. Este diseño se basa en un enfoque de superficie de respuesta y resulta más eficiente que un diseño factorial completo 3^3 , el cual requeriría 27 ensayos, ya que el Box-Behnken solo necesita 13 más puntos centrales, reduciendo tiempo y recursos.

A diferencia del diseño compuesto central (CCD), el modelo Box-Behnken evita combinaciones extremas de los factores, lo cual es crucial en procesos con riesgo físico o químico como la lixiviación ácida en columnas, donde condiciones extremas de temperatura o acidez pueden ser inseguras o poco representativas. Además, permite modelar interacciones y términos cuadráticos, necesarios para capturar la naturaleza no lineal del proceso. Su estructura simétrica mejora la precisión del modelo y minimiza la necesidad de extrapolación. En comparación con diseños más simples como las factoriales fraccionadas, ofrece mayor capacidad para encontrar condiciones óptimas reales.

Por estas razones, el diseño Box-Behnken representa la mejor opción metodológica para optimizar este tipo de proceso metalúrgico complejo de manera segura, eficiente y estadísticamente robusta.

Figura 18

Diseño experimental de optimización en proceso de Biolixiviación.



Nota. Elaboración propia.

La Tabla 2 muestra la codificación de las variables independientes y los niveles de investigación para el diseño experimental.

Tabla 2

Codificación de las variables independientes de la investigación.

Factores	Temperatura			Tamaño de la partícula (P80)			pH Solución Biolixivante (pH)			
	Niveles	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
Valor real		22 °C	32 °C	42 °C	5,24	6,77	8,30	1,6	2,2	2,8

Nota. Elaboración propia.

Donde:

X1: Temperaturas de operación de las cabinas [=] °C

X2: Tamaño de partícula del mineral [=] mm

X3: pH de la solución lixivante [=] pH

Tabla 3 muestra la distribución de tratamientos en función de los niveles conforme a la codificación de factores y según el diseño box-behnken.

Tabla 3*Diseño Box-Bhenken a escala codificada y a escala natural*

Tratamiento	ESCALA CODIFICADA			ESCALA NATURAL			RESPUESTAS				
	X1	X2	X3	Temperatura (°C)	Tamaño de partícula (P80)	pH de sol. Biolixivante	R.1	R.2	R.3	R.4	R.5
1	-1	-1	0	22	5,24	2,2					
2	0	-1	+1	32	5,24	2,8					
3	0	0	0	32	6,77	2,2					
4	-1	+1	0	22	8,30	2,2					
5	0	0	0	32	6,77	2,2					
6	+1	-1	0	42	5,24	2,2					
7	0	+1	+1	32	8,30	2,8					
8	0	0	0	32	6,77	2,2					
9	-1	0	+1	22	6,77	2,8					
10	-1	0	-1	22	6,77	1,6					
11	+1	0	-1	42	6,77	1,6					
12	+1	0	+1	42	6,77	2,8					
13	0	-1	-1	32	5,24	1,6					
14	+1	+1	0	42	8,30	2,2					
15	0	+1	-1	32	8,30	1,6					

Nota. Design Expert V.13.*Leyenda de la tabla codificada*

Variables independientes	Variables dependientes
Temperatura Tamaño pH de solución biolixivante	R.1: Recuperación de cobre (mg/mL); R.2: Biomasa bacteriana (Cel/mL); R.3: Potencial redox (mV), R.4: Oxidación de hierro (mg/mL) y R5: Conductividad eléctrica

Nota. Elaboración propia.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población está compuesta por todas las combinaciones existentes de las interacciones de las 3 variables independientes propuestas sobre los 73 kg del mineral calcopirita (ley aproximada de 0.66% de Cu), extraído del centro minero de Toquepala-Tacna.

La muestra corresponde a las combinaciones elegidas mediante el modelo experimental de optimización box-behnken, que da lugar a 15 tratamientos o unidades muestrales un software especializado en diseño de experimentos, los cuales corresponden a columna de bio-lixiviación, a las cuales se les agregó un inóculo conformado por un consorcio bacteriano definido.

Adicionalmente, se prepararon 3 muestras o columnas en blanco, con el único fin de equipar la extracción de cobre sin la presencia del consorcio bacteriano en dichas columnas. Esto, muy aparte del modelo experimental de optimización y con un único fin comparativo.

3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 4

Operacionalización de variables

VARIABLES		CARACTERÍSTICAS DE LAS VARIABLES	
VARIABLES independientes	Indicadores	Escala de Medición	Tipo de variable
X1: Temperatura	Calor	Grados Celsius	Cuantitativa continua
X2: Tamaño de partículas	Masa	P80	Cuantitativa continua
X3: pH de Sol. Lixiviante.	Concentración iones Hidrógeno	0 - 14	Cuantitativa continua
VARIABLES Dependientes	Indicadores	Escala de Medición	Tipo de variable
Y1: Recuperación de cobre	Masa	% p/p respecto a Ley del mineral	Cuantitativa continua
Y2: Biomasa microbiana	Presencia	Cel/mL	Cuantitativo discreto
Y3: Potencial Redox	ORP	mV	Cuantitativa continua
Y4: Producción de Fe ³⁺	Concentración de iones Fe ³⁺	mg/mL	Cuantitativa continua
Y5: Conductividad eléctrica	Conductividad	mS/cm	Cuantitativa continua
Otros Intervinientes	Indicadores	Escala de Medición	Tipo de variable
Población bacteriana	Presencia	NMP	Cuantitativa discreto
Acidez Sol. Enriquecida (PLS)	Concentración de ácidos	g/L	Cuantitativa continua
Densidad	Relación masa/volumen	g/mL	Cuantitativa continua
Peso	Masa	g	Cuantitativa continua
Tiempo	Periodo	Horas	Cuantitativa continua

Nota. Elaboración propia.

3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1. Equipos, instrumentos y materiales

3.4.1.1. Equipos

- 01 Agitador magnético modelo AREX marca VELP
EQ147
- 01 Autoclave con secado ALP CL-40LDP, 117 Litros
- 01 Bomba de vacío LIFE SCIENCE 923910-0110
- 01 Cabina de bioseguridad CLASS II, TYPE A2 marca
LOGIC
- 01 Incubadora digital con agitación NCU-SHAKER
BENCHMARK 115 V capacidad 1L
- 01 Estufas de laboratorio-VENTICELL-111-STANDARD
BLUE LINE
- 01 Ro-Tap o tamizador de laboratorio RX-30-16
- 01 Mezclador eléctrico de agitador aéreo VEVOR 0-3000
RPM
- 01 Equipo de valoración ácido-base.
- 03 Cabina de calefacción para columnas de lixiviación
semi-automatizado (construcción propia).

- 01 Espectroscopia de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES)

3.4.1.1. Instrumentos

- 01 pH metro modelo HI 322 pH/ORP/ISE marca HANNA
- 01 Multiparámetro BT WATER TESTER modelo BT789
- 01 Microscopio electrónico LEICA ICC50 E
- 01 Microscopio electrónico de barrido FESEM Thermo Scientific modelo Quattro ESEM
- 01 Cámara de Petroff-hauser SCIENTIFIC HS3900
- 01 Balanza electrónica CAS ER- JR de 30 kg x 5g
- 01 Equipo de valoración ácido-base.
- 01 Termómetro digital

3.4.1.2. Reactivos

- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado 95-97% p.a.
EMSURE® ISO 2L
- Ácido clorhídrico (HCl) 0,1 N
- Hidróxido de sodio (NaOH) en lentejas puro EMPLURA®
- Carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- Biftalato de potasio ($\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$)

- Sulfato de hierro (II) ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) $\geq 99\%$ Sulfato de Magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) p.a. EMSURE ACS, Reag. Ph Eur 500 G
- Sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) p.a. EMSURE ACS, Reag. Ph Eur 500 G
- Fosfato dipotásico (K_2HPO_4) p.a. EMSURE ACS, Reag. Ph Eur 500 G
- Fenolftaleína 0,5 %
- Naranja de metilo 0,5 %
- Alcohol medicinal 70° 1L

3.4.1.3. Materiales

- 01 Vasos de precipitado 250 mL
- 01 vaso de precipitado de 1000 mL
- 01 Fiola de vidrio 100 mL
- 01 Fiola de vidrio 1L
- 21 Placas petri
- 21 Matraces erlenmeyer de vidrio 250 mL
- 01 Matraces erlenmeyer de vidrio 3000 mL
- 02 Buretas de 50 mL
- 02 Embudo de vidrio

- 03 Pipetas de vidrio de 1mL, 5 mL y 10 mL
- 15 Pipetas paster de 3mL
- 01 Micropipetas de laboratorio 100 μ l y 1000 μ l
- 01 Caja de laminas cubre y porta objetos x100
- 02 Soportes metálico
- 01 Pobretas de vidrio de 250 mL
- 01 Probeta de plástico 50 mL
- 02 Pesetas de laboratorio
- 01 Bombilla de succión
- 630 botellas de 150 mL para muestra
- 45 botellas de plástico de 3 L
- 30 pliegos Papel Kraft
- 01 kg de Algodón hidrófilo
- 03 pliegos de papel filtro
- Otros
- 18 Tubos de PVC (Policloruro de vinilo) de 3" de diámetro y 1 m de largo
- 15 Bombas de acuario SOBO Wp-3500
- 01 Metro de manguera de polipropileno flexible de 16 mm
- 18 Embudos de plástico
- 04 Baldes de 20 L

- 18 Baldes de 5 L
- 18 Tapones de plástico para tubo de 3" de PVC
- 20 Canaletas rectangulares
- 01 metro de alambre mellizo
- 18 Llaves de paso
- 03 cajas de paso y relés
- 05 filtros de malla millipore
- 06 Tomacorrientes
- 01 pegamento para tubos de PVC
- 03 interruptores simples
- 03 Switch on/off
- 01 Par de guantes especiales para ácido
- 01 Mascarilla con respirador
- 18 Embudos de plástico
- 36 Focos de 100 Watts
- 06 Soportes metálicos para las columnas de acero galvanizado
- 03 Controladores de temperatura digital W3230
- 03 Sensor de temperatura

3.4.2. Técnicas para recolección de datos

Las técnicas para la recolección de datos se realizaron de acuerdo a lo requerido en los objetivos de la investigación. Para los análisis físico-químicos de las muestras de mineral como de las muestras de lixiviado se tuvieron en cuenta las siguientes:

- ASTM E1024 Análisis químico de metales y minerales que Contienen Metales mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS)
- ISO 22036:2024 (ICP-OES) técnica que utiliza radiofrecuencia para atomizar e ionizar los analitos en una muestra líquida.
- ISO 6332:1988 Determinación del hierro. Método espectrométrico utilizando 1,10-fenantrolina.
- NTP 339.089 1998. Cuarteo. Procedimiento para obtener en el laboratorio muestras representativas (cuarteo) de suelos.
- UNE 22144: 1990 Determinación de hierro metálico en minerales de hierro reducidos. Método volumétrico.
- NTP 339.128 1999 Método de ensayo para el análisis granulométrico.
- ISO 7888:1985 Conductividad. Determinación de conductividad eléctrica en líquidos.
- ME-29-2007 Determinación de pH por Método Electrométrico
- APHA. Capítulo 2310 (Acidez). Métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales (SMWW)

3.5. METODOS

3.5.1. Construcción de los equipos calefactores y de las columnas

Los equipos construidos fueron pensados para el control de parámetros tales como: Temperatura, pH y tamaño de partícula de la molienda de mineral calcopirita, mediante un diseño de experimento Box- Behnken en un proceso de biolixiviación con un consorcio bacteriano; los planos del equipo completo se encuentran en el (Anexo 6) y el dimensionamiento en el (Anexo 1D).

Las partes que las conforman dichos equipos son:

a) Sistema semiautomático de calentamiento y control de temperatura

Para la construcción del sistema de calentamiento se construyeron armarios de melamina de 160 cm x 70 cm x 90 cm; que cuentan con 2 pares de puertas externas (esto con el fin de facilitar la manipulación y toma de muestras), para efectos de la investigación se construyeron 03 armarios con una capacidad de almacenaje de 2 estructuras metálicas de 8 columnas por cada uno.

Para la generación del calor se instalaron 7 focos de filamento de 100 Watts y un sensor de temperatura en la parte interna de cada armario; en la parte externa de cada armario se instaló un controlador o termostato que se encarga de regular la temperatura interior, todo este sistema es controlado por un swicth on/off que sirven de encendido y apagado en

cada equipo. Los armarios y el diagrama eléctrico con el que se hizo toda la parte cada equipo calefactor se pueden ver en la (Figura 19 y 20).

Figura 19

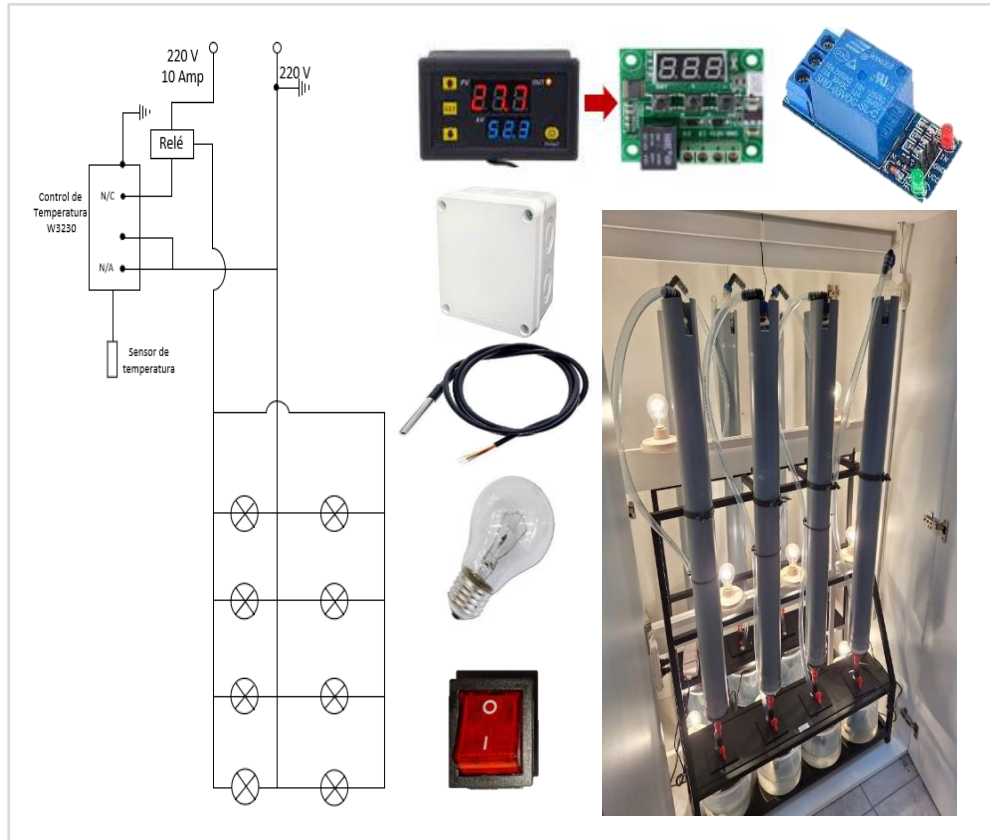
Equipos calefactores para el control de temperatura



Nota. Equipos calefactores para la biolixiviación de calcopirita. Elaboración propia

Figura 20

Diagrama de eléctrico y partes del sistema del equipo calefactor



Nota. Sistema eléctrico de los equipos de calefacción. Elaboración propia

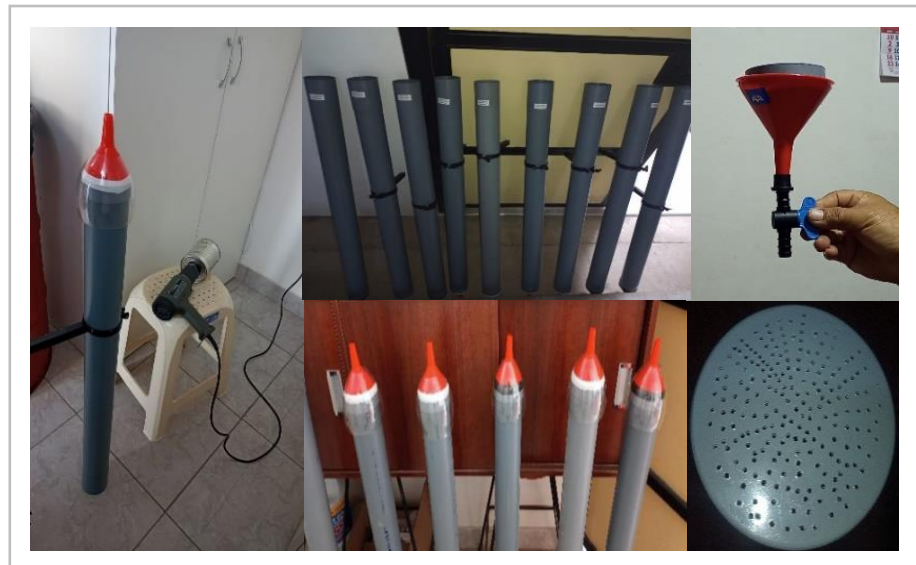
b) Columnas de PVC y de soportes

Se fabricaron las columnas a partir de tubos de PVC (cloruro de polivinilo) de 3 pulgadas de diámetro. Estas fueron cortadas a una altura de 1 m y en su base se colocó un tapón con agujeros de 2mm, se unió con la ayuda de un pegamento especial para PVC, de tal forma de permitan el paso del lixiviado y retengan el mineral.

Luego, a la zona donde se pegó el tapón, se agregó un embudo con una llave, dicha unión se realizó con pegamento, cinta aislante y con trozos de botellas de plástico que se calentaron con una secadora de calor industrial. Finalmente se agregó un filtro por dentro de los tubos hecho a medida con tela (drill) a fin de que los finos del mineral no escapen por los agujeros del tapón. (Ver Figura 21).

Figura 21

Construcción de las columnas para biolixiviación



Nota. Elaboración propia

c) Riego y recirculación

El riego consiste en colocar, dentro de un recipiente en la parte inferior de los tubos que se hallan en el soporte, una bomba individual del modelo que se muestra en la figura 7 y que va conectado mediante un

tubo al dispositivo de riego de la figura 8. Este sistema funciona mediante un interruptor simple de encendido que se encuentra dentro de los cubículos; a su vez, para que la bomba pueda funcionar éstas están conectadas mediante sus enchufes a los tomacorrientes que se instalaron dentro de cada cubículo. (Ver Figura 22).

Figura 22

Partes del sistema de goteo y recirculación por bombeo del equipo



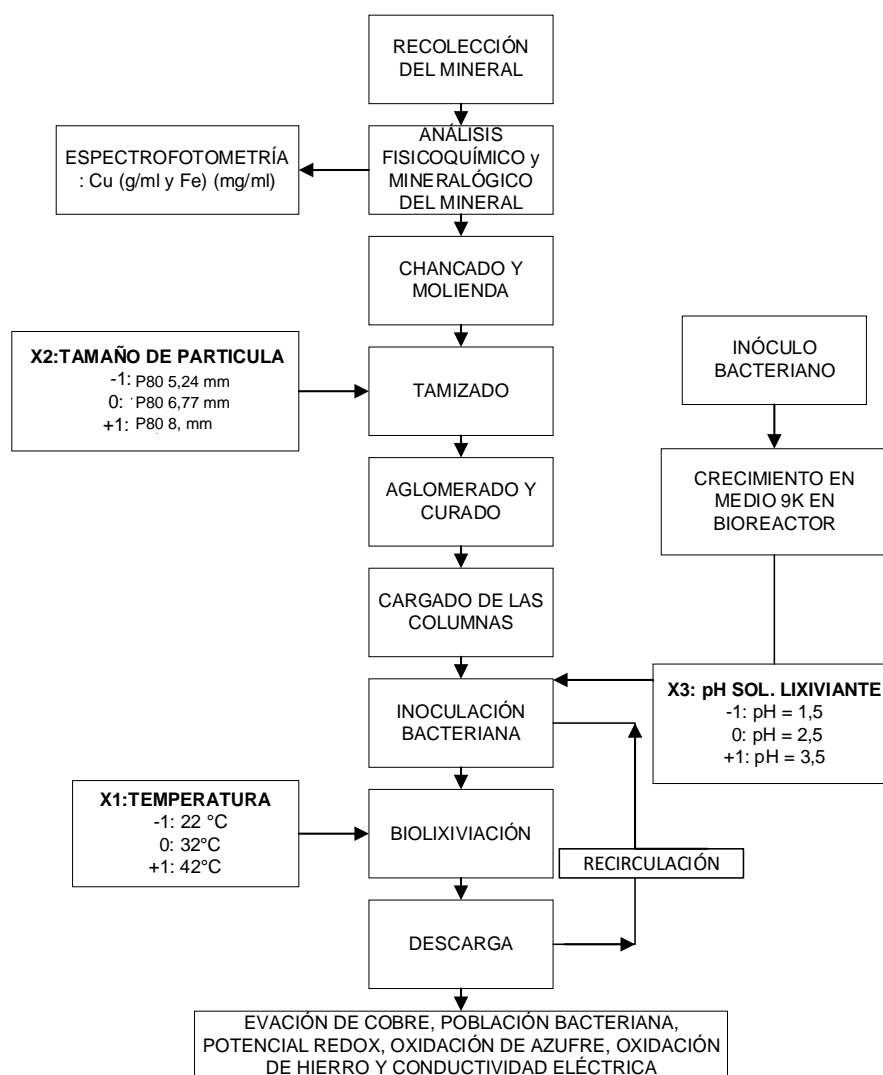
Nota. Elaboración propia

3.5.2. Flujograma del procedimiento experimental

En la figura 23, se muestra el diagrama de flujo del experimento

Figura 23

Diagrama de flujo del experimento de la biolixiviación de calcopirita



Nota. Elaboración propia.

3.5.3. Operaciones unitarias para la preparación del mineral

3.5.3.1. Adquisición del mineral

Se trabajó con un aproximado de 60 kg de mineral calcopirita (CuFeS_2) de la mina de Toquepala en Tacna de la empresa Southern Copper Corporation; este mineral corresponde al excedente de un proyecto anterior con la universidad. (Ver Figura 24).

Figura 24

Mineral calcopirita (CuFeS_2) de la mina de Toquepa- Tacna



Nota. Mineral calcopirita. Fotografía propia

3.5.3.2. Análisis físico-químicos del mineral (análisis del gasto)

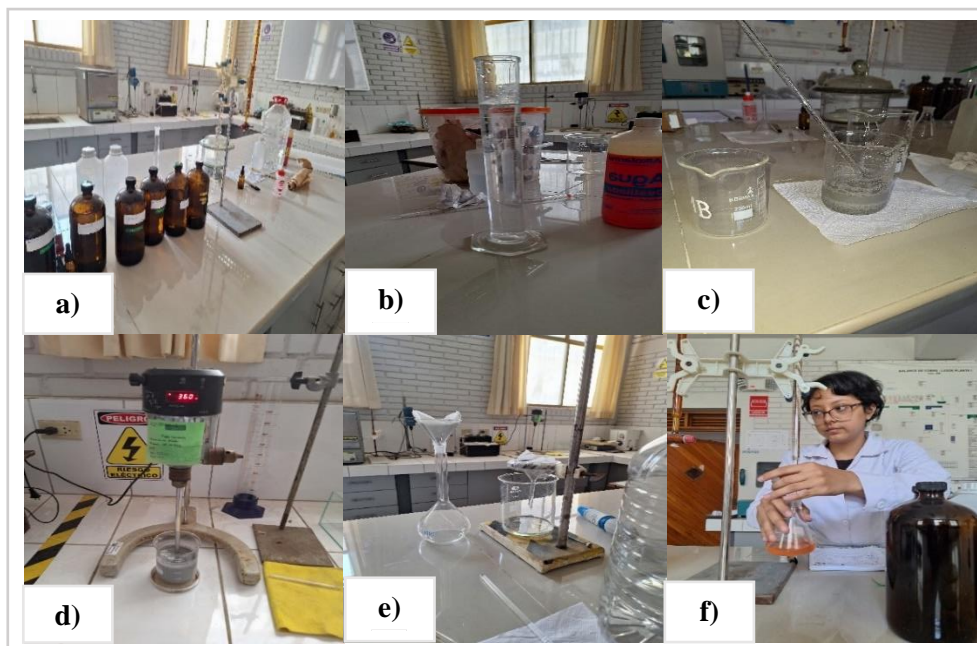
Algunos de los análisis que se realizaron al mineral calcopirita (CuFeS_2), fueron los siguientes:

- Espectroscopia de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) Barrido de metales ICP. Todos los metales fundamentalmente: Hierro y Cobre. (Lab. Actlabs Skyline Perú).
- Determinación del consumo de ácido
- Determinación de la humedad del mineral
- Determinación de la densidad del mineral
- Análisis granulométrico
- Análisis complementarios: Ensayo para cobre soluble en ácido sulfúrico por absorción atómica, ensayo para cobre claurable secuencial por absorción atómica, ensayo para carbonatos como carbonatos de calcio retro titulación ácido-base, ensayo para hierro por digestión multi ácida- absorción atómica, ensayo para hierro oxidado por absorción atómica, ensayo para cobre por absorción atómica. (Lab. Analíticos del sur).

3.5.3.3. Prueba del consumo de ácido del mineral

Una de las pruebas más importantes que se realizó al mineral calcopirita (CuFeS_2), fue la prueba de consumo de ácido, esta prueba se realizó a una concentración de 1,03M. Esto debido a que este dato nos permite conocer la cantidad de ácido que será necesaria para todo el proceso de lixiviación el cual incluye: El curado, aglomerado y riego. Para la prueba se tomó 100 g de muestra del mineral calcopirita, se molió y pasó por malla # 200 para su análisis. (Ver Figura 25) y (Anexo 1A).

Figura 25 Prueba de consumo de ácido en la mineral calcopirita (CuFeS_2)



Nota. Prueba de consumo de ácido en los laboratorios de la UNJBG. a) Preparación de soluciones de hidróxido de sodio (NaOH): 1L de 1N, 2L de 0,1 N y 2 L de 0,001 N; soluciones de ácido clorhídrico (HCl) de 0,1 N de 1L y solución de carbonato de

sodio (Na_2CO_3) 0,1 N de 1L. **b)** Preparación de dilución de 14 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado con 250 mL de agua destilada es decir a una concentración de 1,03M, para la prueba de consumo **c)** Mezclado de los 100 g de mineral calcopirita (CuFeS_2) más el ácido diluido que se preparó en un vaso de precipitado de 400 mL. **d)** El vaso de precipitado con el mineral y la dilución ácida fue llevado a un agitador magnético modelo a 360 rpm por 24 h a temperatura ambiente. **e)** Filtrado del mineral, transcurridas las 24h, con papel filtro. **g)** Valoración del líquido filtrado con el NaOH de 1N y naranja de metilo 0,5% y por triplicado. Elaboración propia.

A su vez también se determinó la densidad y humedad del mineral, para determinar la humedad se pesó otra muestra, pero esta vez de 160 g de mineral calcopirita, para ellos también fue pasado por malla #200. Para esto, se colocó la muestra en una placa Petri, se pesó y luego fue sometida a secado en una estufa a 110°C por 24h y se colocó en un desecador con naftalina para retirar la humedad restante, finalmente se volvió a pesar. Para la determinación de la densidad se empleó una muestra del mineral y un picnómetro. Los los cálculos de esta sección se encuentran en el (Anexo 1B).

3.5.3.4. Chancado, molienda y análisis granulométrico

Se realizó un análisis granulométrico del mineral calcopirita (CuFeS_2), y se observó que la granulometría con la que ya contaba el mineral era adecuada, por lo que no fue necesaria la etapa de chancado y molienda. Por ello se procedió directamente a la separación por mallas Tyler primero del

material grueso y luego del material fino a fin de poder armar los 3 tamaño requeridos por el modelo box Box-Behnken. (Ver Figura 26) Y (Anexo 1C).

Figura 26

Análisis granulométrico y separación por mallas del mineral- gruesos

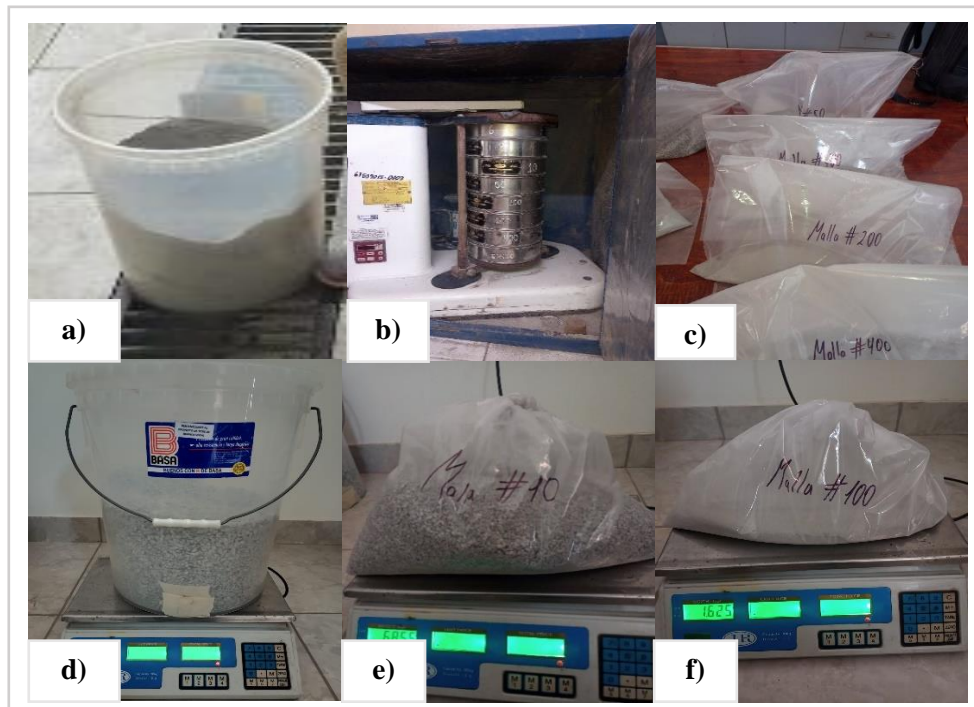


Nota. Separación granulométrica del mineral grueso. a) Se trasladó los 60 kg del mineral a baldes de 20 L que fueron llevados al laboratorio de mineralurgia de la UNJBG. b) Las mallas empleadas para el material grueso fueron: 1/4", 3/8", 1/2", 3/4" y el ciego. c) Separación del mineral mediante zarandeo de las mallas. d) Bandeja recolectora del material pasante. e) Recolección del material pasante en baldes de 20 L. f) Resultado final de la separación. Fuente: Elaboración propia.

Luego de tratar el material grueso, se procedió a tratar el material fino restante y se tomó nota del peso total de finos y gruesos. (Ver Figura 27).

Figura 27

Separación del material fino y pesado de todo el material



Nota. Separación del mineral finos y pasado. a) Balde de material fino resultante de la etapa anterior. b) Mallas para el material fino: mallas: #10, #50, #100, #200, #400, #-400 y ciego. c) Resultado de la separación. d) Pesado de los baldes del material grueso. e) Pesado de las bolsas del material intermedio f) pesado las bolsas del material fino. Elaboración propia.

3.5.3.5. Armado de los P80 requeridos para la experimentación

Para asegurarse que la experimentación se asemeje lo más posible a la realidad que hay en las minas se hicieron tres P80 artificiales (P80 8,30, P80 6,77 y P80 5,24) a partir de la granulometría que ya se tenía del mineral original. En total fueron 18 columnas de 4kg cada una. (Ver Figura 28).

Figura 28

Preparación de los tres P80 artificiales (P80 8,30; P80 6,77 y P80 5,24)



Nota. Armado de los tres P80. **a)** y **b)** Cuarteo de cada una de los pasantes gruesos y finos del mineral para su distribución. **c)** Pesado y armado de las 18 bolsas de mineral que irán a las columnas de un peso de 4 kg cada una, según los tres P80 de acuerdo al diseño Box-Behnken. **d)** Etiquetado de cada bolsa según su distribución de malla.

e) Bolsas listas para el curado, aglomerado y carguío del mineral. f) Fotografía de una de las distribuciones armadas. Elaboración propia.

La distribución armada de los tres P80 en la tabla 5 para su aplicación en las columnas de lixiviación fue la siguiente:

Tabla 5

Tabla de distribución de los tres P80

Apertura ó malla	P80 8,30 Composición (g)	P80 6,77 Composición (g)	P80 5,24 Composición (g)
15 mm	65,12	0,00	0,00
12 mm	132,98	3,38	0,00
9 mm	506,19	12,86	152,38
6 mm	913,61	23,22	346,32
3 mm	883,23	22,45	380,95
# 10	375,13	9,53	923,52
# 50	650,39	16,53	750,36
# 100	88,93	2,26	394,81
# 200	117,38	2,98	519,48
# 400	195,36	4,96	380,95
# - 400	71,69	1,82	151,23
Total	4000,00	4000,00	4000,00

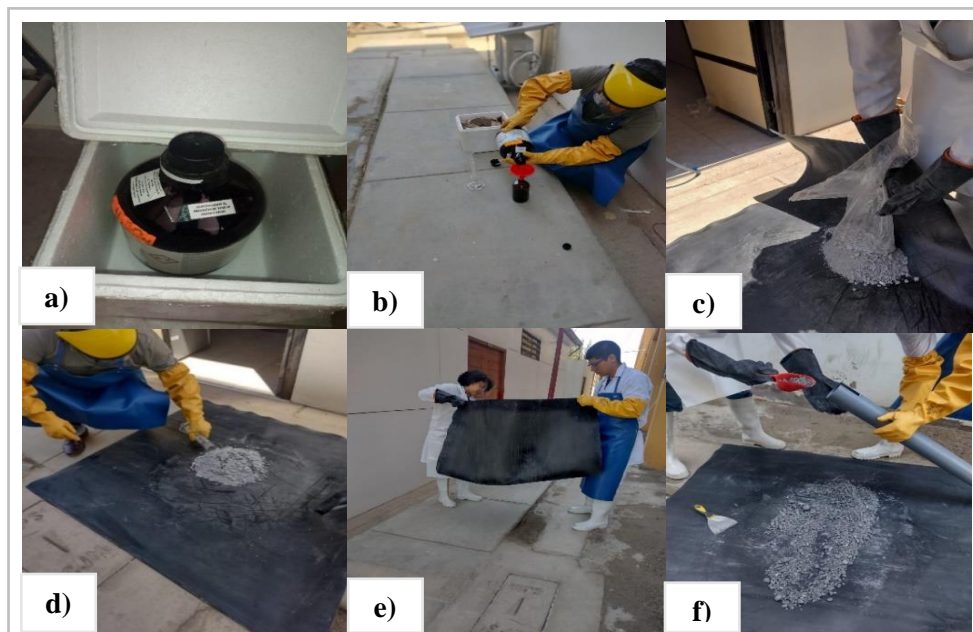
Nota. Elaboración propia.

3.5.3.6. Curado, aglomerado y carguío del mineral

El curado consiste en un pretratamiento químico que busca impregnar con una solución ácida al mineral y el aglomerado busca formar glómeros, esto con el fin de sulfatar el mineral, estabilizar la sílice, homogenizar el tamaño de las partículas, mejorar el lecho y mejorar las características mecánicas de mineral (Ver Figura 29).

Figura 29

Agglomerado y curado del mineral con ácido sulfúrico



Nota. Aglomerado, curado y carguío de las columnas. **a)** ácido sulfúrico concentrado. **b)** Preparación de la solución ácida: se mezcló 60 mL de ácido sulfúrico concentrado con 100 mL de agua destilada por cada 4 kg de mineral. **c)** Mineral calcopirita (CuFeS₂) en la manta de PVC. **d)** Agregado de la solución ácida al mineral sobre la manta, etapa de curado. **e)** Aglomerado del mineral mediante movimientos vibratorios en la manta para formar los

glómeros. f) Carguío del mineral curado y aglomerado en las 18 columnas de lixiviación las cuales se dejaron reposando por 2 días. Elaboración propia.

3.5.4. Preparación del medio de cultivo y del inóculo bacteriano

El consorcio bacteriano con el que se trabajó constó de 2 cepas: *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum*, las mismas que se encuentran aisladas y almacenadas en el laboratorio de Investigación de Biotecnología Microbiana de la UNJBG. Estas cepas, para un mejor manejo poseen una codificación especial llamándose M1D y A. Ferro respectivamente (Ver Figura 30).

Figura 30

Cepas de Acidithiobacillus ferrooxidans y Leptospirillum ferriphilum



Nota. Cepas puras de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum*, del laboratorio Investigación de Biotecnología Microbiana de la UNJBG.

Código de laboratorio MID y A. ferro respectivamente. Fuente: Fotografía propia.

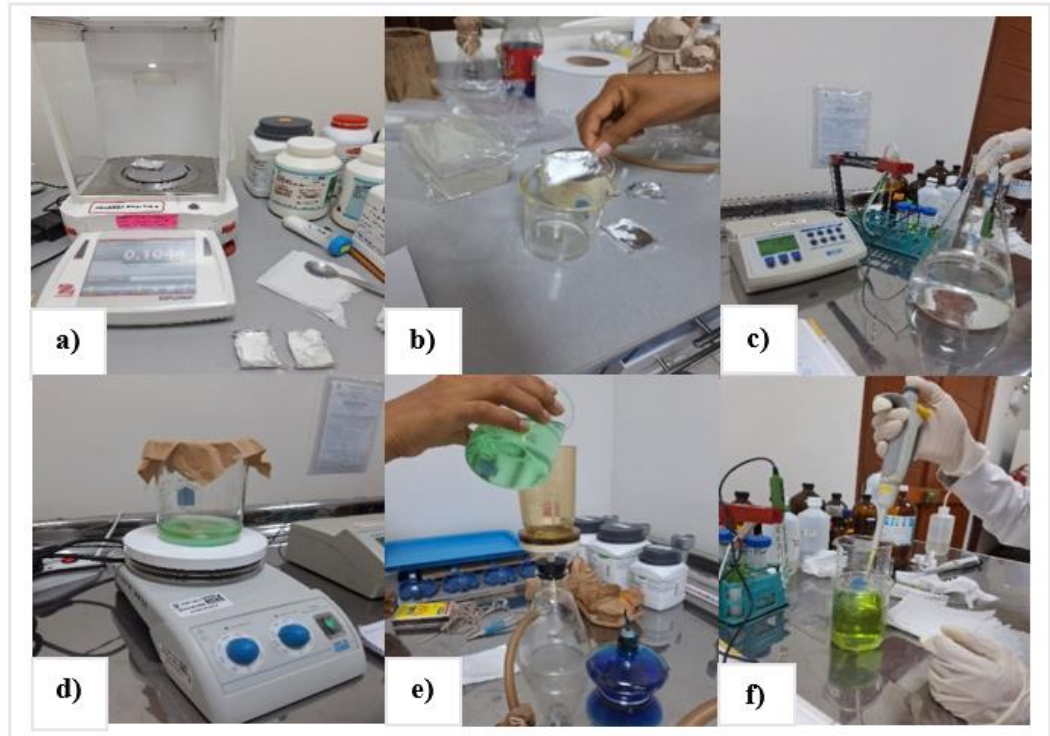
Este tipo de bacterias requieren de un medio de cultivo selectivo y diferencial para estimular su crecimiento. El medio de cultivo que se empleó para el crecimiento y desarrollo de dichas cepas fue el medio 9K líquido que consta en la mezcla de 2 fases: fase I y fase II (Ver anexo 4).

Para la preparación de los inóculos bacterianos que se emplearon en las columnas de biolixiviación, se necesitaron 16 matraces con 150 mL de medio de cultivo 9k líquido (caldo de cultivo estandarizado utilizado para el crecimiento de bacterias acidófilas y oxidantes de hierro/azufre) a los cuales se les agregó 15 mL de cepas activas por cada matraz (8 fueron inoculados con *Acidithiobacillus ferrooxidans* y 8 fueron inoculados con *Leptospirillum ferriphilum*), para este fin se usaron matraces de 250 mL esterilizado, que luego de la inoculación dentro de la cabina de bioseguridad fueron llevados al incubador a una temperatura de 32°C y con agitación constante por un lapso de 10 días en los cuales se multiplicará el número de bacteria. (Ver Figura 31).

En la imagen también se puede apreciar la preparación de los 2,5 L del medio 9k necesarios para los 16 matraces que se empleará en las columnas.

Figura 31

Protocolo de preparación de medio de cultivo 9k para 2,5 L de cultivo

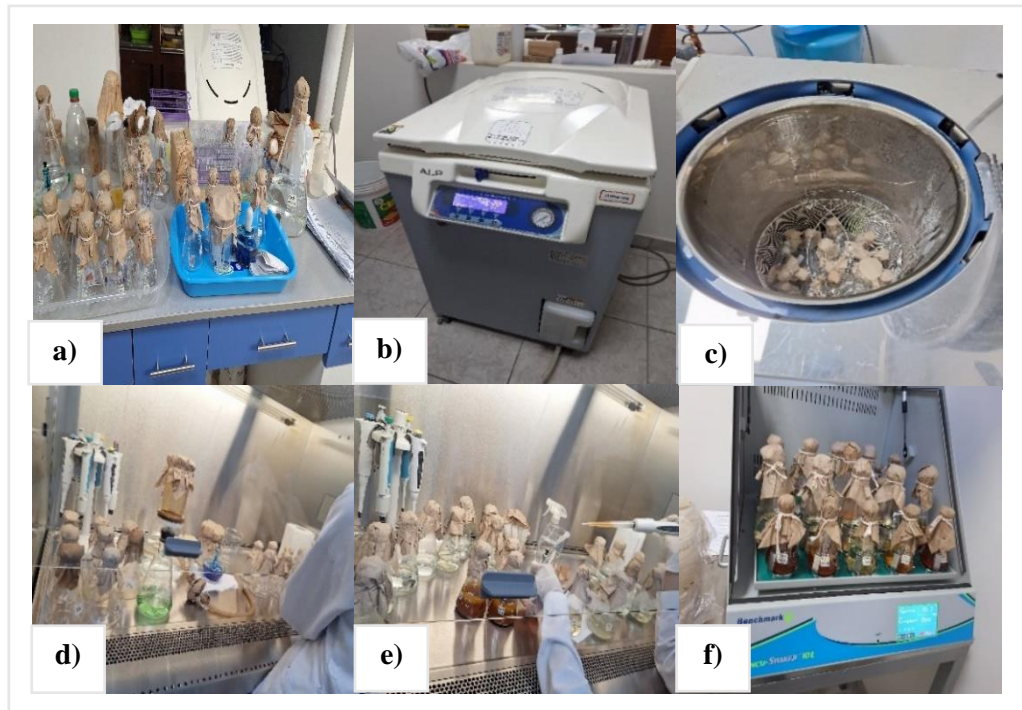


Nota. Protocolo de (Silverman & Lundgren, 1959). Preparación del medio 9k para 2,5 L de medio de cultivo. **a)** Pesado de insumos de la fase I: 1 g de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,25 g de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; 2 0,1 g de KH_2PO_4 y fase II: 83,25 g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. **b)** Disolución, mezclado y aforado de insumos de la fase I en una fiola de 100 mL y trasvasado a un matraz de 3L con 2200 mL de agua destilada. **c)** Disminución de PH de la solución anterior a pH 2. **d)** Preparación de la fase II mediante disolución de su único componente en 200 mL de agua destilada mediante un agitador magnético. **e)** Filtrado de la solución de anterior, uso de un filtro de malla millipore y bomba de vacío. **f)** Ajuste de pH de la solución anterior también a pH 2. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se preparó el material de vidrio incluyendo los 16 matraces contenedores de los inóculos; se autoclavó todo el material junto con el matraz de 3L de la fase II. Luego se llevó todo a la cabina de bioseguridad y procedió a la inoculación. (Ver Figura 32).

Figura 32

Preparación de los inóculos en medio 9k en cabina de bioseguridad



Nota. Protocolo de (Silverman & Lundgren, 1959). **a)** Preparación del material de vidrio y del matraz de 3L con la fase I para el autolavado. **b)** Autolavado del material a 160 °C por 1h 30 min. **c)** Retirado y enfriado del material de la autoclave. **d)** Mezclado de la fase I y fase II dentro de la cabina de bioseguridad. **e)** Inoculación de los 16 matraces con las cepas *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum* s.p a cada matraz. **f)**

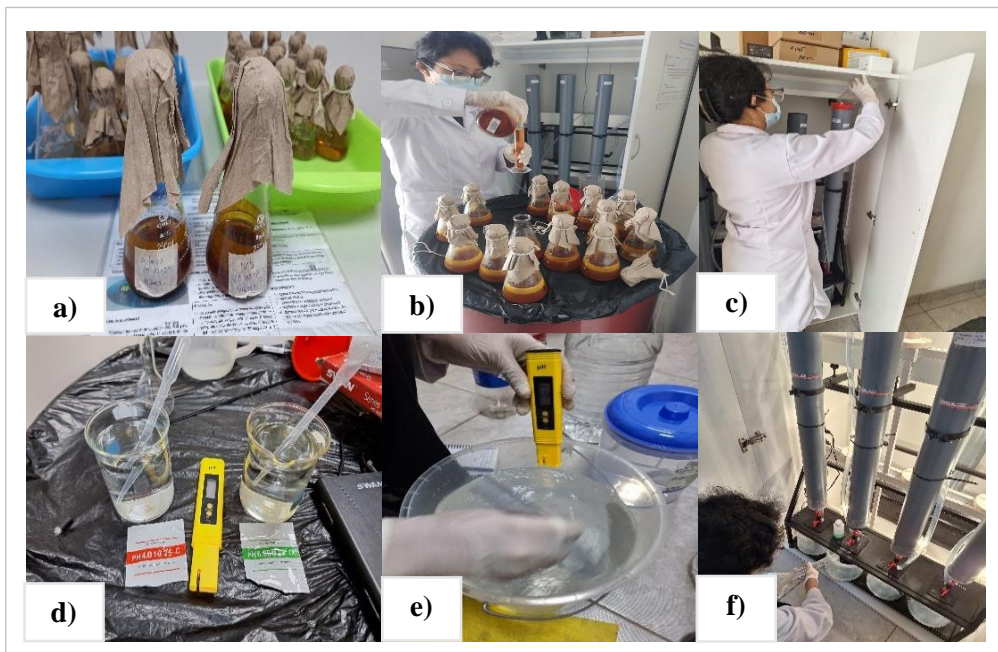
Almacenamiento de los matraces en la incubadora digital con agitación a 32 °C por un lapso de 10 días. Fuente: Elaboración propia.

3.5.5. *Inoculación e inicio del riego para lixiviación*

Una vez transcurridos los 10 días de crecimiento de las bacterias, se procedió a la inoculación de las columnas mezclando 75 mL de cada cepa por cada columna. (Ver Figura 33).

Figura 33

Inoculación de las cepas bacterianas e inicio de riego de las columnas



Nota. Inoculación bacteriana de las columnas y posterior riego. **a)** Inóculos bacterianos de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum*, luego de 10 días de incubación. **b)** Mezcla de 75 mL de M1D y 75 mL A. ferro. **c)** Inoculación del consorcio a cada columna y reposo de 2 días. **d)** Calibración del pH-metro con soluciones buffer de pH 4,01 y pH 6,86. **e)** Preparación de las soluciones de riego (pH 1,6; pH 2,2 y pH 22,8) según el modelo box-

behnken para cada columna. f) Carguío de las columnas con 1500 mL de solución de riego.

Fuente: Elaboración propia.

Se debe acotar que el proceso de inoculación se llegó a realizar luego del riego hasta en 2 ocasiones con las mismas cantidades de la primera vez, 75 mL *Acidithiobacillus ferrooxidans* y 75 mL de *Leptospirillum ferriphilum* para las 15 columnas del diseño experimental, al comienzo y a la mitad del proyecto aprovechando para esto los 7 días de reposo del equipo. Mas adelante se explicará el riego y sus parámetros (Ver Figura 34).

Figura 34

Segunda inoculación de las columnas en el periodo de reposo



Nota. Segunda inoculación del consorcio bacteriano. Esta segunda inoculación se realizó a mitad del proyecto. Fuente: Fotografía propia

Todo el proceso del riego se realizó respetando un periodo de 15 días de riego x 7 de descanso, con una tasa de riego de 2,5 mL/min ó 0,0417 cm³/s y una capacidad de recirculación de hasta 1,5 L (Ver Figura 35) y (Anexo 3).

Figura 35

Riego en el equipo semiautomatizado para lixiviación bacteriana con calcopirita (CuFeS₂)



Nota. Riego en el equipo semi-automático con control de temperatura. Fuente: Fotografía propia.

3.5.6. Recolección de muestras

Las muestras de la bio-lixiviación fueron tomadas cada 2 ciclos de riego y almacenadas en envases de plástico de 115 mL. En total se obtuvieron 120 muestras de los 7 ciclos de recirculación, las cuales fueron tomadas por triplicado para efecto de los diferentes análisis que se realizarían. (Ver Figura 36).

Figura 36

Muestras tomadas del lixiviado de las columnas

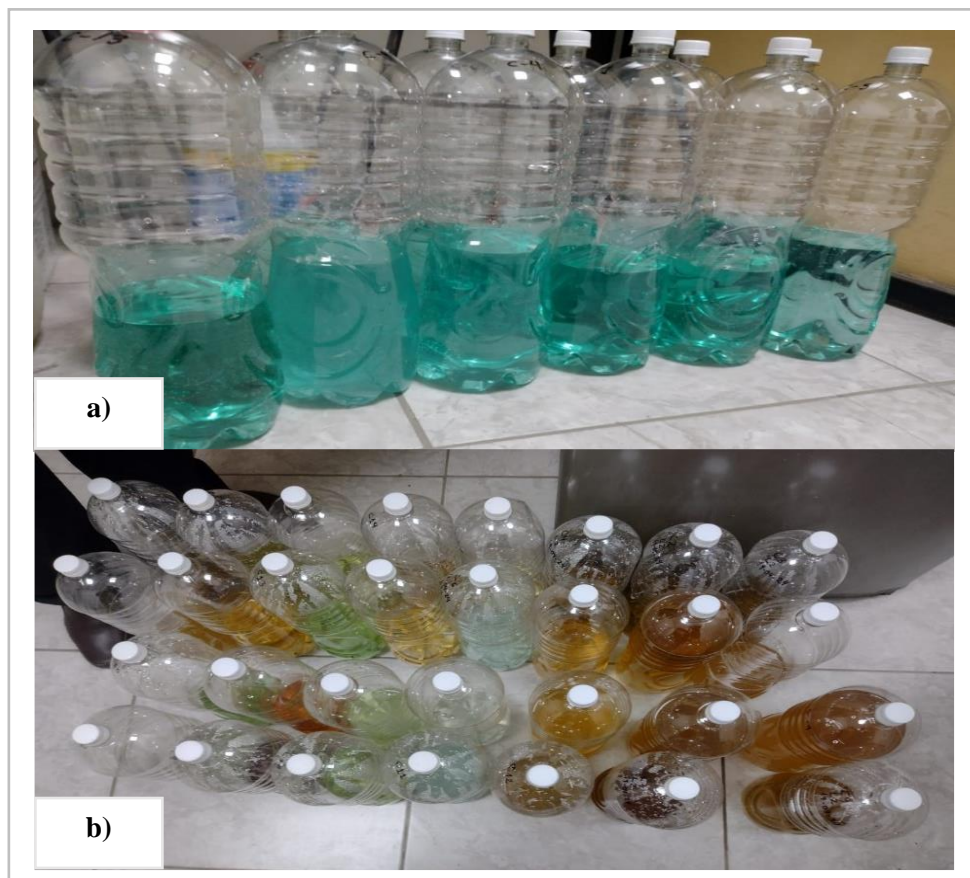


Nota. Muestras recolectadas durante los ciclos de riego de la lixiviación bacteriana del mineral calcopirita tomada por triplicado (CuFeS_2). Fuente: Fotografía propia.

El líquido excedente del lixiviado, fue pesado y almacenado en botellas de 3L. (Ver Figura 37).

Figura 37

Muestras de la biolixiviación y su almacenamiento



Nota. Muestras del lixiviado bacteriano almacenadas en el laboratorio. Es posible apreciar el cambio de coloración de las etapas del lixiviado. **a)** por la coloración posible presencia de sulfuro de cobre. **b)** por la coloración presencia de hierro

Fuente: Fotografía propia

3.5.7. *Termino de lixiviación y recolección de muestra de mineral*

Luego de terminado el proceso de biolixiviación, se procedió a retirar el mineral de las columnas vertiéndolo en la manta de PVC en la que se procedió a realizar un cuarteo y tomar muestras de cada uno de ellas para su posterior análisis; que consistieron en la determinación de hierro y cobre que quedó en el mineral y también para fotografía mediante microscopía electrónica. (Ver Figura 38).

Figura 38

Descarga de las columnas luego del proceso de lixiviación bacteriana



Nota. Descarga del mineral calcopirita (CuFeS_2) y tomado de muestras luego del proceso de biolixiviación. Fuente: Fotografía propia.

Las pequeñas muestras tomadas durante la descarga de las columnas fueron de 400 g aproximadamente y fueron tomadas por triplicado; esto para los análisis físico-químicos y para la microscopía electrónica.

El resto del material fue embolsado y rotulado con el código de cada columna y almacenado dentro del barril de acero en el que se trajo el mineral inicialmente. Para la determinación de biomasa, se tomó 10 g de mineral de cada columna, se realizó el cuarteo previamente y se guardó este mineral con su respectiva codificación en frascos pequeños estériles, a estos se agregó 9 mL de solución salina al 9%, posteriormente se tomó 1 mL y se volvió a realizar una dilución 1:10 que luego se llevaron al microscopio para su conteo en cámara Petroff Hausser.

3.5.8. Análisis físicos-químicos a las muestras

3.5.8.1. Análisis de cobre y hierro de las muestras líquidas

Uno de los triplicados de las muestras fue usados para el análisis de los (g/mL) de cobre mediante Análisis químico de metales y minerales mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS).

El otro triplicado se empleó para el análisis de la determinación del método de ensayo para hierro total (Fe) por absorción atómica en soluciones ácidas mediante el método espectrométrico utilizando 1,10-fenantrolina y en la ddeterminación de hierro metálico en minerales de hierro reducidos hierro (II) mediante el método volumétrico empelando. Finalmente, el último triplicado se empleó en la lectura de la conductividad eléctrica, medición de pH, medición de mV y determinación de acidez mediante la valoración acido base.

3.5.8.2. pH de muestra, potencial redox, conductividad y acidez de las muestras líquidas

La medición de los parámetros como potencial redox, conductividad eléctrica y la medición de pH de la muestra de lixiviación bacteriana obtenidas durante el proceso, fueron evaluadas con un multiparámetro, el cual fue calibrado para cada una de las mediciones antes de su uso empleando soluciones de calibración:

- Para el la medición de pH se empleó buffer de calibración: pH 4,01 y pH 6,87.
- Para la medición de la conductividad eléctrica (Scm/cm): solución de calibración para conductividad 12880 $\mu\text{S/cm}$ y 1413 $\mu\text{S/cm}$.
- Para la medición del potencial redox (mV): Solución de calibración de 240 mV y solución de calibración de 475 mV.

Para la determinación de la acidez tanto de la solución de riego como de las muestras de lixiviado bacteriano obtenidas se empleó la valoración ácido-base, para la cual se preparó una solución de 1 L de NaOH 1N y otra de 1L de NaOH 0,01 N y como indicador se empleó fenolftaleína 0,5%.

3.5.8.3. Biomasa microbiana

Se realizó la curva de crecimiento del consorcio bacteriano empleado conformado por *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum*. por un periodo de 20 días a pH 2 y 32 °C. (Ver Figura 39).

Figura 39

Muestreo durante los 10 días y lectura del consorcio bacteriano para el conteo bacteriano diario



Nota. Toma de muestra con micropipeta para observación al microscopio óptico con cámara Petroff Hausser. Fuente: Fotografía propia.

Para la determinación de la biomasa microbiana se realizó el conteo en cámara de recuento Petroff Hausser, a muestras de 10 μ l de cada una de las columnas diluidas 1:10 con solución salina al 9%.

3.6. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.6.1. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos consistió en la recopilación, codificación, depuración y organización de la información obtenida de los experimentos.

Para ello, se realizaron los siguientes pasos:

- Se recolectaron datos experimentales de recuperación de cobre bajo diferentes condiciones de temperatura, tamaño de partícula y pH en columnas de biolixiviación. Los datos fueron organizados en tablas de frecuencia y bases de datos estructuradas para facilitar su análisis.
- Se empleó el software de Design Expert V.13 para el diseño experimental, modelado y optimización de parámetros, así como gráficas de contorno y superficies de respuestas y el software Statgraphics V.17 para el análisis estadístico, gráficas de Pareto estandarizado, etc.
- Se establecieron tablas de frecuencias para cada conjunto de condiciones experimentales, facilitando la visualización de tendencias en la recuperación de cobre.

3.6.2. *Análisis de datos*

Para el tratamiento de los datos obtenidos se aplicaron los siguientes tipos de análisis estadísticos:

- ✓ Distribución de frecuencias
- ✓ Análisis de varianza y métodos relacionados (Anova)
- ✓ Gráficos descriptivos y análisis de gráficos.
- ✓ Análisis de diagrama de Pareto
- ✓ Función Deseabilidad (FD) un método de optimización numérica.

Los efectos significativos del modelo se manejaron mediante análisis de varianza (ANOVA). El Modelo para ser considerado predictivo para describir determinada característica en la región analizada debe presentar regresión significativa al nivel del 95% de confianza (p -valor $< 0,05$), falta de ajuste no significativo en el mismo nivel de confianza y alto valor de R^2 (más próximo de 1 a 100). Cabe señalar que, según Montgomery (1991), para que la regresión no solo sea estadísticamente significativa, sino también útil para fines de producción, el valor de F_c , la relación entre el modelo QM y los residuos Q, debe ser mucho mayor que el valor del pie. Para determinar la mezcla óptima, se aplicará el método de superficie de respuesta (RSM), y será mejor una optimización numérica (FD) con un criterio de valor de función más cercano a 1.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 RESULTADOS

4.1.1. Resultados de análisis físicos-químicos del mineral calcopirita

Se muestra a continuación la (Tabla 6) con las características físicas indicadas en hoja de seguridad del mineral con la que llegó el mineral.

Tabla 6

Características físico-químicas de la muestra calcopirita

Identificación	Características físico-químicas	
Nombre: Muestra de mineral de cobre (mineral seco).	% Cu	0,55 -0,75
	% Mo	0,001 – 0,003
	Gravedad específica	2,75
	Color	Gris
	Humedad	1,0 – 2,0 %
Origen: Muestra de Chalcopirita	Inflamabilidad	Nula
	Corrosividad	Nula
	Radiactividad	Nula

Nota. Extraído de hoja de seguridad de Mineral, Concentradora Toquepala.

Southern Copper Corporation, (2021).

Datos adicionales sobre las características físicas y químicas hallados en el laboratorio se pueden ver en (Tabla 7).

Se realizó también, un análisis de espectroscopia de emisión atómica (ICP-OES) al mineral calcopirita (Tabla 8). El análisis de laboratorio completo se encuentra en el (Anexo 2).

Tabla 7*Datos adicionales sobre las características físicas y químicas.*

Características físicas y químicas	Resultados
Estado físico a 20 °C	Sólido
Apariencia	Forma no definida, menor a 9 pulg. de diámetro
Densidad aparente	1,7 -1,9 Kg/L
Densidad real	4,2 g/mL
Humedad hallada	<5%
Punto de inflamación	N. A
Punto de ebullición	N. A

Nota. Datos del hallado en el laboratorio de biotecnología microbiana.**Tabla 8***Espectroscopia de emisión atómica con plasma de acoplamiento (ICP-OES)*

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LD	Resultados
S-1281	Cobre, Cu	mg/Kg	0,50	4889,37
	Hierro, Fe	mg/Kg	0,50	26736,10
	Aluminio, Al	mg/Kg	0,50	1300,50
	Calcio, Ca	mg/Kg	0,50	14315,71
	Potasio, K	mg/Kg	0,50	1088,89
	Sodio, Na	mg/Kg	0,50	658, 44
	Magnesio, Mg	mg/Kg	0,50	545,49
	Fosforo, P	mg/Kg	0,50	979,77
	Estroncio, Sr	mg/Kg	0,50	100,65

Nota. Informe de ensayo LAS 01-MN-AC-24-00211.

Adicionalmente se realizaron ensayos químicos como cobre soluble en ácido sulfúrico por absorción atómica, ensayo para cobre censurable secuencial por absorción atómica, ensayo para carbonatos como carbonato de calcio retro titulación ácido-base, entre otros (Tabla 9).

Tabla 9

Ensayos químicos realizados al mineral calcopirita

Código Interno L.A.S.	Nombre de la muestra	*505	*507	*519	*522	*523	502
		CuAcS	CuCNsEC	CaCO3	Fe	FeOx	Cu
		%	%	%	%	%	%
MN24001947	Muestra de mineral chancado (Calcopirita)	a<0,0040	0,1176	0,72	3,55	0,554	0,525

Nota. Informe de ensayo LAS 01-MN-AC-24-00211. Ensayos: * 505 Método de Ensayo para cobre soluble en ácido sulfúrico por absorción atómica. * 507 Método de ensayo para cobre censurable secuencial por absorción atómica. * 519 Método de ensayo para carbonatos como carbonato de calcio retro titulación ácido-base * 522 Método de ensayo para hierro por digestión multi ácida – absorción atómica * 523 Método de ensayo para hierro oxidado por absorción atómica* 519 Método de ensayo para cobre por absorción atómica

4.1.2. Criterios y datos en el acondicionamiento del mineral, inoculación del consorcio, riego y aplicación de temperatura en biolixiviación

4.1.2.1. Tamaño particular del mineral

La Tabla 10, resume las proporciones en peso y porcentaje que se necesitaran de cada malla para la preparación de tres P80 diferenciados. Los cálculos detallados se encuentran en el (Anexo 1C).

Tabla 10

Tabla de distribución de los tres P80

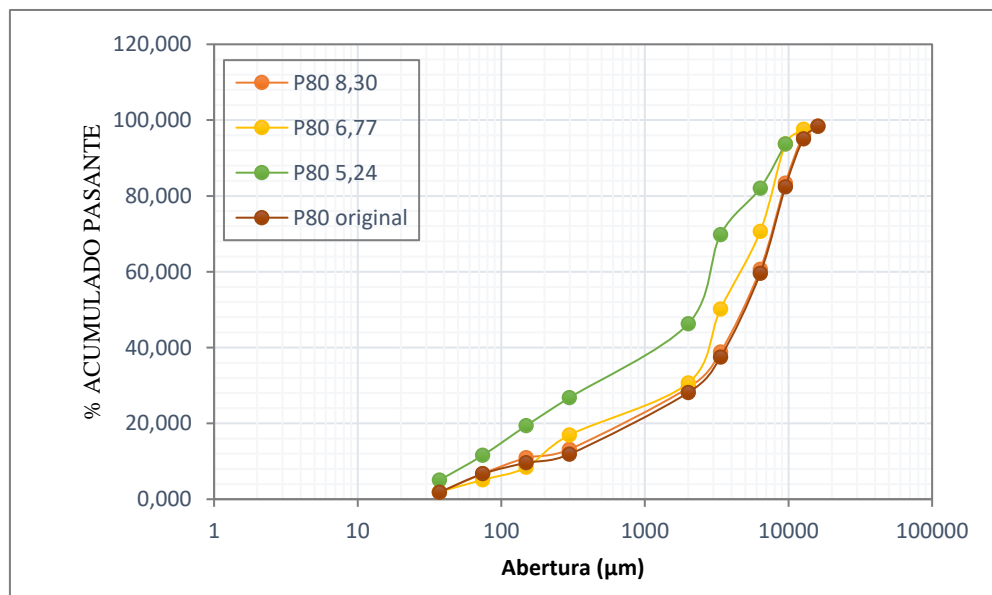
Apertura o malla	P80 8,30		P80 6,77		P80 5,24	
	Peso (g)	Porcentaje (%)	Peso (g)	Porcentaje (%)	Peso (g)	Porcentaje (%)
15 m	65,12	1,603	-	-	-	-
12 mm	132,98	2,525	3,38	2,46	-	-
9 mm	506,19	12,505	12,86	3,86	152,38	6,305
6 mm	913,61	22,765	23,22	23,09	346,32	11,651
3 mm	883,23	21,831	22,45	20,42	380,95	12,274
# 10	375,13	9,378	9,53	19,51	923,52	23,513
# 50	650,39	16,260	16,53	13,75	750,36	19,509
# 100	88,93	2,223	2,26	8,51	394,81	7,370
# 200	117,38	4,185	2,98	3,28	519,48	7,837
# 400	195,36	4,934	4,96	3,14	380,95	6,549
# - 400	71,69	1,792	1,82	1,96	151,23	4,993
Total	4000,00 g	100 %	4000,00 g	100 %	4000,00 g	100 %

Nota. Elaboración propia

La Figura 40 muestra las curvas de los tamaños de P80 artificiales armados a partir de la curva original del P80 del mineral.

Figura 40

Curva de los P80 artificiales armadas para el diseño experimental



Nota. Elaboración propia

- **Acondicionamiento y formación de aglomerado del mineral**

Para el acondicionamiento del mineral se tuvo en cuenta lo siguiente:

Tabla 11

Proporción de ácido y agua en el curado y aglomerado

Columnas	Peso del mineral (g)	ácido (mL)	ácido en (g)	% Peso de ácido	Agua (mL)	% Peso Agua
C-X	4 000,00	60	110	2,76%	100	2,5 %

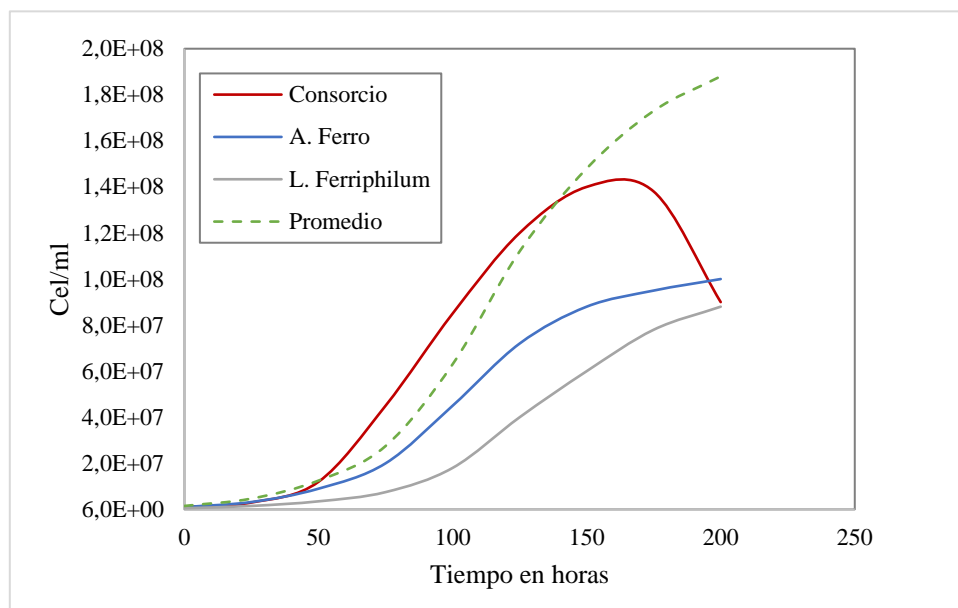
Nota. Elaboración propia.

4.1.2.2. Curva de crecimiento del consorcio bacteriano

El consorcio bacteriano empleado constó de 2 cepas conformadas por: *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum*, codificadas como: (M1D) y (A. Ferro) respectivamente. (Ver Figura 41 y 42).

Figura 41

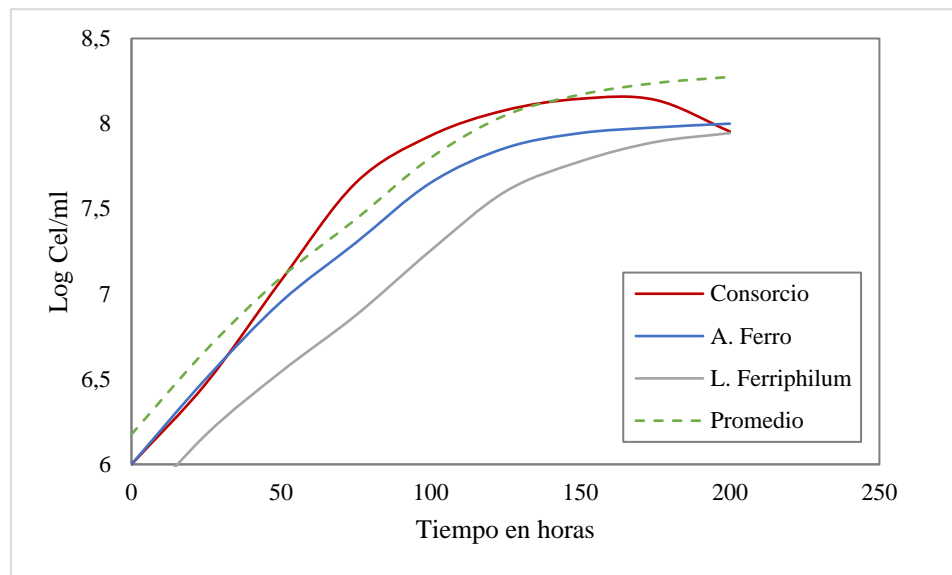
Curva de crecimiento del consorcio de Acidithiobacillus ferrooxidans y Leptospirillum ferriphilum s.p.



Nota. Evolución de la población microbiana del consorcio conformado por *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum s.p.*, se aprecia también las curvas de crecimiento de las cepas por separado y una curva promedio. Elaboración propia.

Figura 42

Crecimiento del consorcio Acidithiobacillus ferrooxidans y Leptospirillum ferriphilum en escala logarítmica



Nota. Elaboración propia.

4.1.2.3. Aplicación de solución bio lixivante (Riego)

El riego se dio a 3 diferentes pH: 1,6;1,5 y 2,8, con un volumen de 1,5 L de agua destilada por ciclo, con ciclos de 15 día riego x 7 días de descanso y con un caudal de riego por goteo de 1,51 mL/ min. (Ver tabla 12)

Tabla 12

Datos para la solución de riego

pH de riego	Cantidad de agua empleada (L)	% Acidez	g/L de acido
1,6	1,5	0,126	1,26
2,2	1,5	0,0316	0,316
2,8	1,5	0,00774	0,0791

Nota. Elaboración propia.

Los cálculos para determinar el caudal de riego se hallan en el (Anexo 1D), junto con los cálculos de dimensionamiento de las columnas y cabina de calentamiento.

4.1.2.4. Aplicación de temperatura

La aplicación de la temperatura que se realizó al interior de 3 cabinas (cabina 1, cabina 2 y cabina 3), fue con la aplicación de control automatizado mediante focos y un termostato, las cabinas fueron programadas a: 22°C, 32°C y 42°C respectivamente y la distribución de las columnas se dieron a partir del modelo Box-Behnken según la siguiente tabla (Ver Tabla 13).

Tabla 13

Cabinas, control de temperaturas y número de columnas

Cabina	Temperatura			Número de columnas	Variación de temperatura
	mínima	máxima	Control automático		
1	22 °C	24 °C	Termostato Digital W3230	4	+ 2°C
2	32 °C	34 °C	Termostato Digital W3230	7	+ 2 °C
3	42 °C	44 °C	Termostato Digital W3230	4	+ 2 °C

Nota. Elaboración propia.

Es posible observar en la (Tabla 14) el resultado de la aplicación de todos los parámetros anteriormente mencionados sobre la mineral calcopirita. En la figura 43 se puede apreciar el color verde turquesa característica del sulfato de cobre, producto del proceso de biolixiviación.

Figura 43

Cabinas con control de temperatura para biolixiviación en columnas.



Nota. Cabina de calefacción a 32 °C. Donde es posible apreciar la presencia de sulfato de cobre por el color característico.

En la Tabla 14 se muestra el arreglo experimental del diseño Box-Behnken, con las variables independientes (Factores): temperatura (X1), tamaño particular (X2) y pH (X3) y los resultados obtenidos para las variables dependientes (Respuestas): Recuperación de cobre (Y1), potencial redox (Y2), Hierro total (Y3), Conductividad eléctrica (Y4) y biomasa bacteriana (Y5).

4.1.3. Resultados del diseño experimental Box-Behnken con los factores codificados, factores y respuestas en la biolixiviación.

Tabla 14

Resultados para la recuperación de cobre, potencial redox, oxidación de hierro, conductividad eléctrica y población bacteriana

Tratamientos	VARIABLES A ESCALA CODIFICADA			VARIABLES A ESCALA NATURAL							
	FACTORES CODIFICADOS			FACTORES			RESPUESTAS				
	X1	X2	X3	Factor 1 Temperatura (°C)	Factor 2 Tamaño de partícula P80 (mm)	Factor 3 pH de sol. Biolixivante	R1 Recuperación de cobre (mg/mL)	R2 Biomasa bacteria (Cel/mL)	R3 Potencial Redox (mV)	R4 Oxidación de hierro (mg/mL)	R5 Conductividad eléctrica (mS/cm)
1	-1	-1	0	22	5,24	2,2	3843,5	6,25E+08	570,43	1700,0	29,40
2	0	-1	+1	32	5,24	2,8	4642,2	7,55E+08	562,86	1600,0	28,60
3	0	0	0	32	6,77	2,2	4494,8	6,05E+08	593,86	1700,0	21,20
4	-1	+1	0	22	8,30	2,2	3215,7	4,47E+08	590,00	1300,0	27,30
5	0	0	0	32	6,77	2,2	4718,9	9,17E+08	609,14	1800,0	25,40
6	+1	-1	0	42	5,24	2,2	4692,9	6,22E+08	566,57	1200,0	27,10
7	0	+1	+1	32	8,30	2,8	3957,0	5,27E+08	596,29	1100,0	25,20
8	0	0	0	32	6,77	2,2	4940,3	7,80E+08	584,14	1900,0	31,10
9	-1	0	+1	22	6,77	2,8	2967,8	3,75E+08	568,86	1000,0	28,50
10	-1	0	-1	22	6,77	1,6	3284,7	6,92E+08	571,71	1200,0	41,10
11	+1	0	-1	42	6,77	1,6	3567,1	6,79E+08	541,86	820,0	36,80
12	+1	0	+1	42	6,77	2,8	3003,6	5,26E+08	579,29	590,0	29,80
13	0	-1	-1	32	5,24	1,6	5088,8	1,06E+09	582,29	1600,0	34,90
14	+1	+1	0	42	8,30	2,2	4594,9	5,64E+08	573,57	1400,0	30,90
15	0	+1	-1	32	8,30	1,6	4529,7	6,16E+08	593,57	1400,0	38,00

Nota. Elaboración propia con ayuda del programa Design Expert V.13.

4.1.3.1. Resumen del diseño Box-Behnken factores Temperatura (A), Tamaño particular P-80 (B) y pH de solución Biolixivante (C) para respuestas: Recuperación de cobre, potencial redox, oxidación de hierro, conductividad eléctrica y población bacteriana.

En la Tabla 15 se muestra un resumen de las condiciones del experimento para el diseño experimental Box-Behnken

Tabla 15

Resumen del diseño Box-Behnken

CARACTERISTICAS	INFORMACIÓN
Versión de Software	Design Expert Versión 13.0.1.0
Tipo de estudio	Superficie de respuesta
Sub. tipo	Aleatorizado
Tipo de diseño	Box-Behnken
Modelo del diseño	Cuadrático
Corridas (tratamientos)	15
Bloques	No bloque
Factor A	Temperatura (°C)
Factor B	Tamaño P80 (mm)
Factor C	pH solución biolixivante (pH)
Respuesta R1	Recuperación de cobre (mg/L)
Respuesta R2	Potencial Redox (mV)
Respuesta R3	Hierro total (mg/L)
Respuesta R4	Conductividad (mS/L)
Respuesta R5	Biomasa (Células/ mL)

Nota. Desing Expert V.13

4.1.3.2. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para recuperación de cobre, hierro total, hierro (II) y hierro (III) mediante biolixiviación bacteriana

En las Tabla 16 se muestran los valores promedios de la recuperación de cobre, hierro total, hierro (II), hierro (III) para cada uno de los 15 tratamientos.

Tabla 16

Resultados para recuperación de cobre, hierro (II) y hierro (III)

Columna ó tratamientos	Cu mg/L	Fe mg/L	Fe ²⁺ mg/L	Fe ³⁺ mg/L
C-1	3843,5	1700	3,8	1696,2
C-2	4642,2	1600	3,8	1596,2
C-3	4494,8	1700	5,7	1694,3
C-4	3215,7	1300	5,7	1294,3
C-5	4718,9	1800	5,7	1794,3
C-6	4692,9	1200	3,0	1197,0
C-7	3957,0	1100	3,0	1097,0
C-8	4940,3	1900	3,0	1897,0
C-9	2967,8	1000	3,0	997,0
C-10	3284,7	1200	3,0	1197,0
C-11	3567,1	820	190	630,0
C-12	3003,6	590	3,8	586,2
C-13	5088,8	1600	3,8	1596,2
C-14	4594,9	1400	3,8	1396,2
C-15	4529,7	1400	5,7	1394,3

Nota. Elaboración propia.

Los datos completos de recuperación, por cada ciclo de riego y mediante análisis de laboratorio, se muestra en el (Anexo 2) y (Anexo 3).

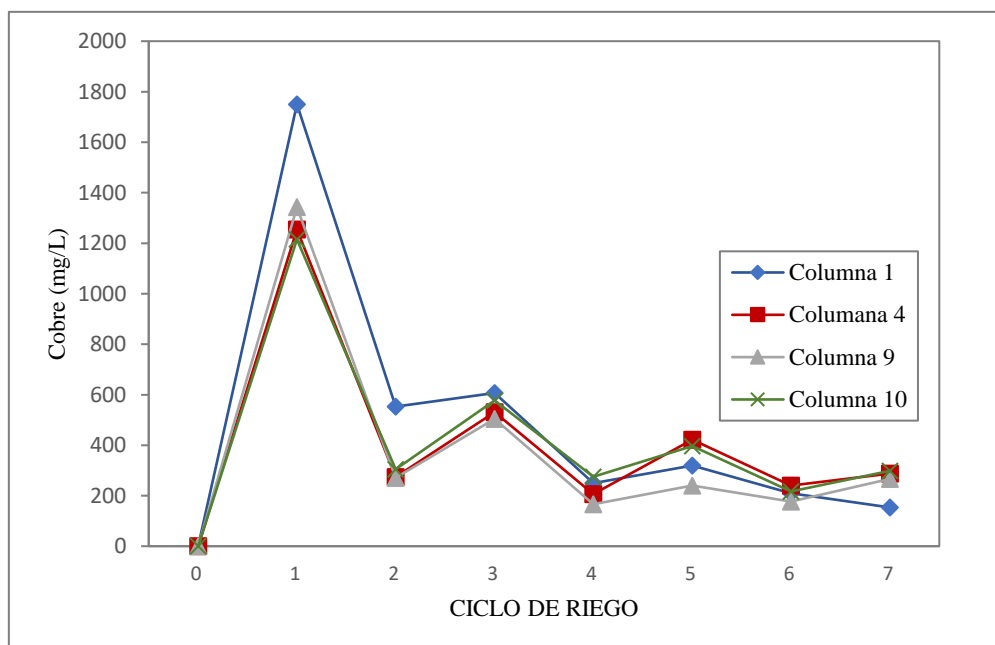
4.1.4. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para recuperación de cobre mediante biolixiviación bacteriana

4.1.4.1. Recuperación de cobre mediante biolixiviación bacteriana a 22°C, 32°C y 42°C de temperaturas de operación.

En la figura 44 se muestra los valores promedios de la recuperación de cobre para la cabina 1 a 22 °C. donde se hallan 4 de los 15 tratamientos, según el diseño Box-Behnken, columnas: C-1, C-4, C-9 y C-10. Cada ciclo de riego es de 15 x 7 días.

Figura 44

Recuperación de cobre en columnas de biolixiviación a 22°C



Nota. Los ciclos de riego están conformados por 15 días de riego x 7 de descanso.

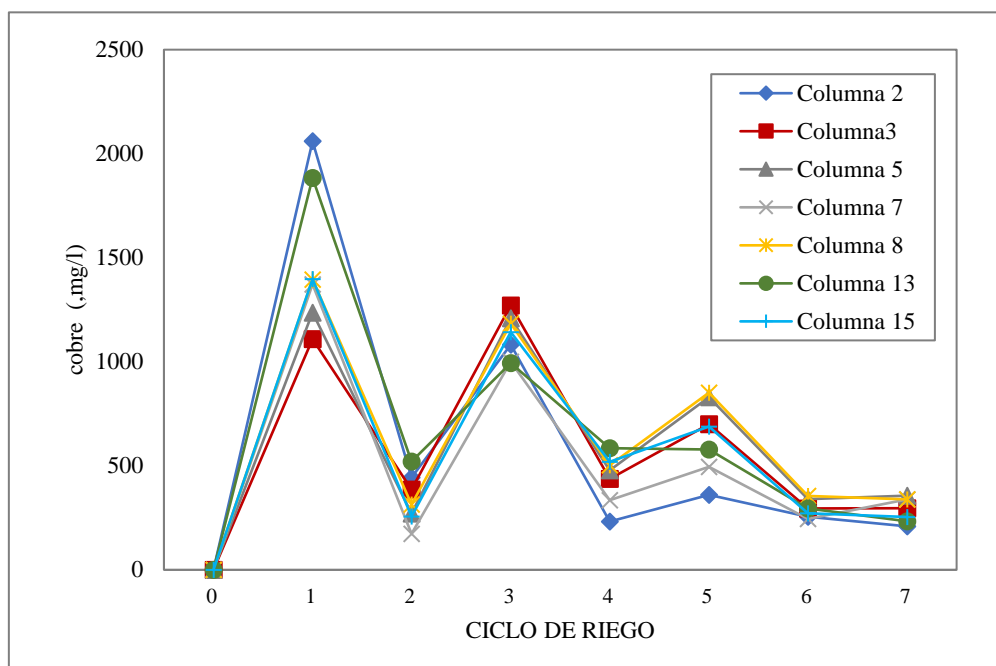
Fuente. Elaboración propia.

Interpretación:

Se aprecia que en la recuperación de cobre de las 4 columnas pertenecientes a la cabina 1 a 22 °C: C-1, C-4, C-9 y C-10, se obtuvo una mayor recuperación durante el primer ciclo de riego, esto posiblemente asociado a la lixiviación química que se da en primera instancia; posteriormente se aprecian picos en el segundo y quinto ciclo para luego disminuir, estos picos posiblemente asociados a la biolixiviación bacteriana.

Figura 45

Recuperación de cobre en columnas de biolixiviación a 32°C



Nota. Recuperación de cobre para la cabina 2 a 32 °C. Los ciclos de riego de 15 días de riego x 7 de descanso. Fuente. Elaboración propia.

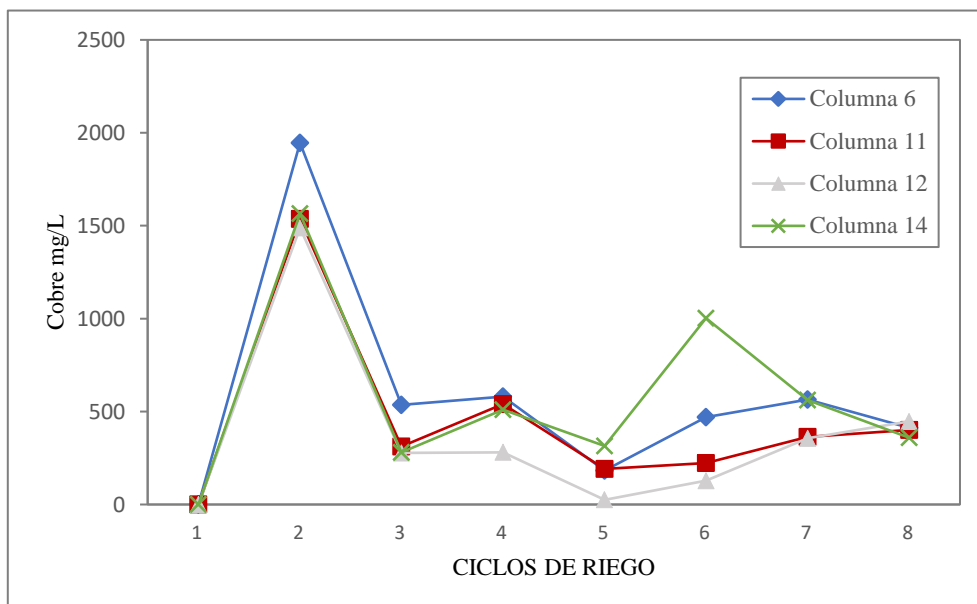
Interpretación:

En la figura 45 se aprecia que en la recuperación de cobre de las 7 columnas pertenecientes a la cabina 2 a 32 °C: C-2, C-3, C-5, C-7, C-8, C-13 y C-15 existen picos, posteriores a la primera recuperación, en el tercer y quinto ciclo, estos picos posiblemente asociados a la biolixiviación bacteriana. Es posible apreciar una mayor recuperación a esta temperatura a comparación de la cabina 1.

En la figura 46 se muestra los valores promedios de la recuperación de cobre para la cabina 3 a 42 °C.

Figura 46

Recuperación de cobre en columnas de biolixiviación a 42 °C.



Nota. Recuperación de cobre para la cabina 3 a 42 °C. Fuente. Elaboración propia.

Interpretación:

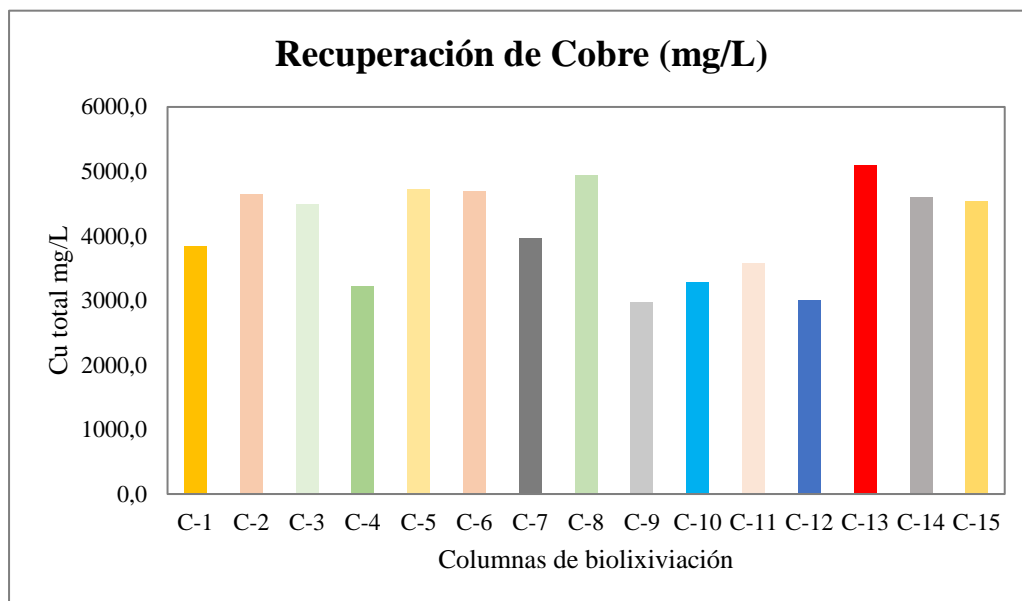
Se aprecia que en la recuperación de cobre de las 4 columnas pertenecientes a la cabina 3 a 42 °C: C-6, C-11, C-12 y C-14, se obtuvo una mayor recuperación durante el primer ciclo de riego, esto posiblemente asociado a la lixiviación química que se da en primera instancia; posteriormente se aprecian picos en el cuarto y sexto ciclo para luego disminuir, estos picos posiblemente asociados a la biolixiviación bacteriana. Es posible también decir que la recuperación de cobre se vio favorecida por el incremento de temperatura logrando una ligera elevación de la recuperación de cobre en el sexto ciclo en comparación a la cabina 2.

4.1.4.2. Recuperación de cobre por columnas mediante graficas de barras, determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizado y presentación de graficas de contorno y superficie

En la figura 47 se muestra los valores de la recuperación de cobre total en mg/L obtenidos para cada columna codificada.

Figura 47

Recuperación de cobre en cada una de las columnas de lixiviación.

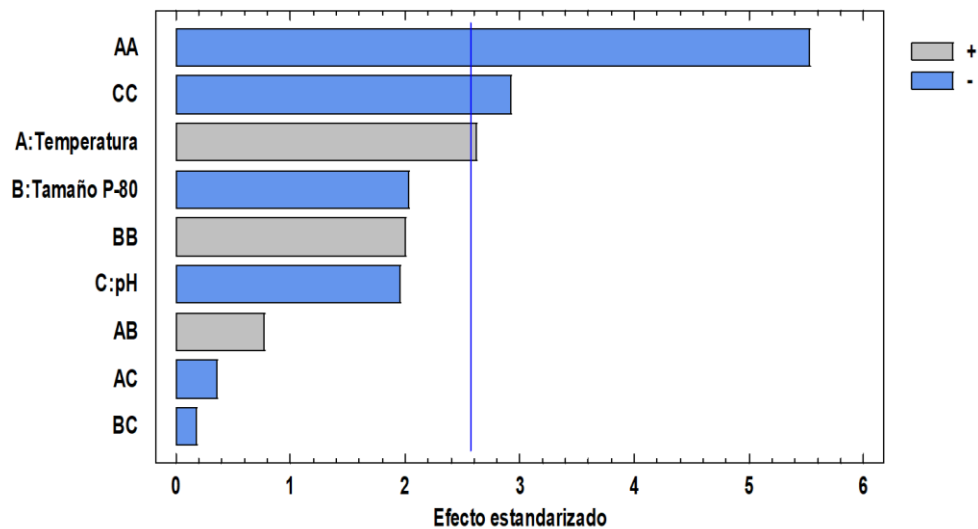


Nota. Elaboración propia.

La grafica muestra el cobre en cada una de las columnas al final del proceso de bio lixiviación, se observa que la columna C13 presenta el mayor valor con 5088,8 mg/L y la columna C9 presentó el mínimo valor 2967,8 mg/L.

Figura 48

Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizada para recuperación de cobre



Nota. Statgraphics V.17

Interpretación:

Los análisis de los coeficientes del modelo ajustado para la recuperación de cobre en columnas de biolixiviación, según la prueba de Pareto, (Figura 48), mostró que el efecto cuadrático de temperatura (AA), efecto cuadrático de pH (CC) y el efecto lineal de la temperatura (A) fueron significativos (p valor $< 0,05$); es decir, las cantidades de recuperación de cobre en los 15 tratamientos varían ampliamente, según esté en mayor o menor concentrado el cobre en el líquido de lixiviado, y la función de respuesta también fue significativa de acuerdo al análisis de varianza aplicada a la recuperación de cobre (0,0258).

Figura 49

Contorno y superficie para la recuperación de cobre según temperatura (A) y tamaño P-80 (B) en diseño Box-Behnken cuando pH (C) es óptimo.

Fig 49a

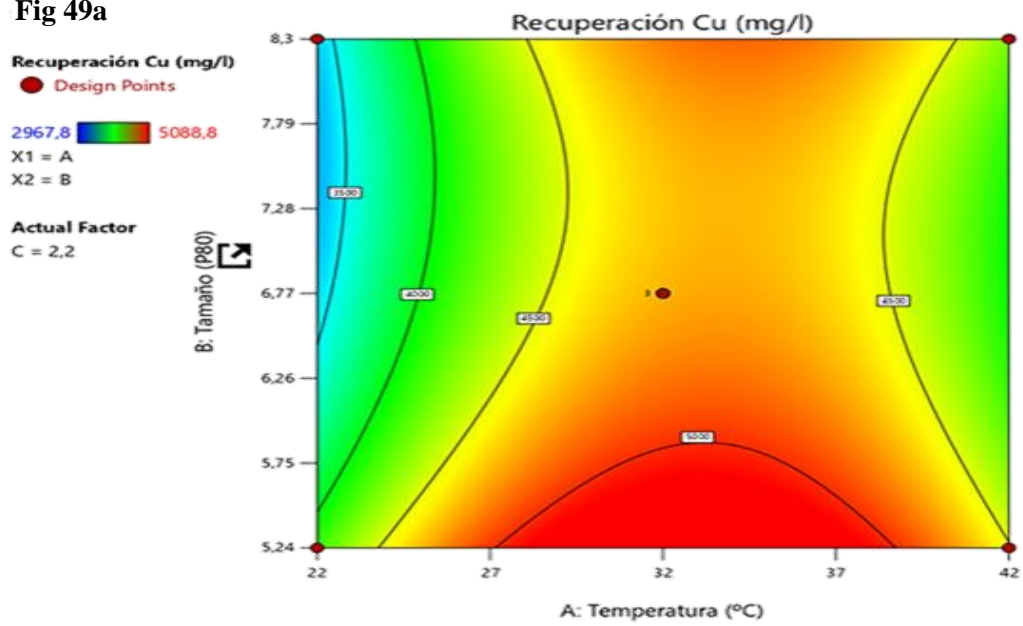
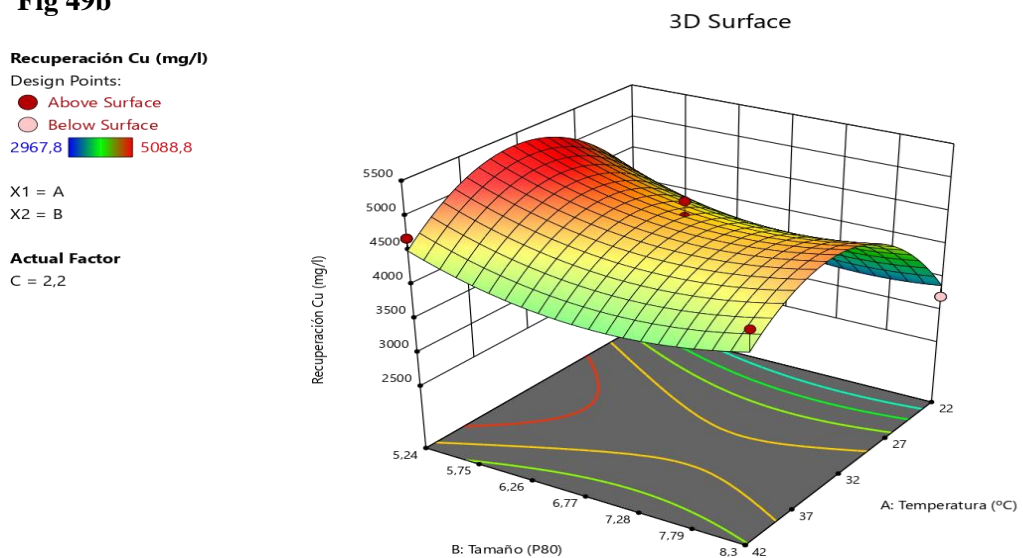


Fig 49b



Nota. Desing Expert V.13

Interpretación:

Utilizando un modelo de regresión desarrollado para la recuperación de cobre, se construyeron las curvas horizontales o de contorno y superficies de respuesta.

La Figura 49a se muestra la gráfica de contorno para la recuperación de cobre (R1), para los efectos del factor A= temperatura y B= tamañoP80, cuando se mantiene constante el factor C= pH a un valor de 2,2.

Se aprecia que la mayor recuperación de cobre, superior a 5 000 mg/L, ocurre cuando A=Temperatura se encuentra entre 27 °C y 37 °C y B= Tamaño P80 es menor a 5,75 correspondiendo a la zona de color rojo.

En la gráfica 49b de superficie de respuesta en tres dimensiones (3D Surface), se puede ver el efecto cuadrático de los factores A y B para la recuperación de cobre (R1) cuando se mantiene constante el factor C (pH) en un valor de pH=2,2. En esta gráfica se aprecia que la mayor recuperación de cobre (R1) presenta una curvatura máxima en 5 088 mg/L cuando A (temperatura) esta alrededor de 33 °C y B está entre un valor cercano a 5,24. Indicando una zona roja para el máximo valor de recuperación de cobre. Fuera de esta zona los valores de recuperación de cobre son menores.

- *Ecuación final en términos de componentes actuales*


$$\begin{aligned} \text{Recuperación de cobre} = & -3.835,45 + 629,393 * A + -2.437,11 * B + 6.548,73 \\ & * C + 8,65686 * AB + -10,275 * AC + -34,341 * BC + -9,89937 * A^2 + \\ & 153,226 * B^2 + -1.450,73 * C^2. \end{aligned}$$

La ecuación en términos de factores actuales se puede utilizar para hacer predicciones sobre la respuesta para niveles de cada factor. De forma predeterminada, los niveles altos de los factores se codifican como +1 y los niveles bajos se codifican como -1. La ecuación codificada es útil para identificar el impacto relativo de los factores comparando los coeficientes de los factores.

Figura 50

Contorno y superficie de respuesta para la recuperación de cobre, temperatura (A) y pH (C) en diseño Box-Behnken para tamaño P-80 (B) de 5,3318.

Fig 50a

Recuperación Cu (mg/l)
 ● Design Points
 2967,8  5088,8
 Recuperación Cu (mg/l) = 4494,8
 Std # 13 Run # 12
 X1 = A = 32
 X2 = C = 2,2
Actual Factor
 B = 6,77

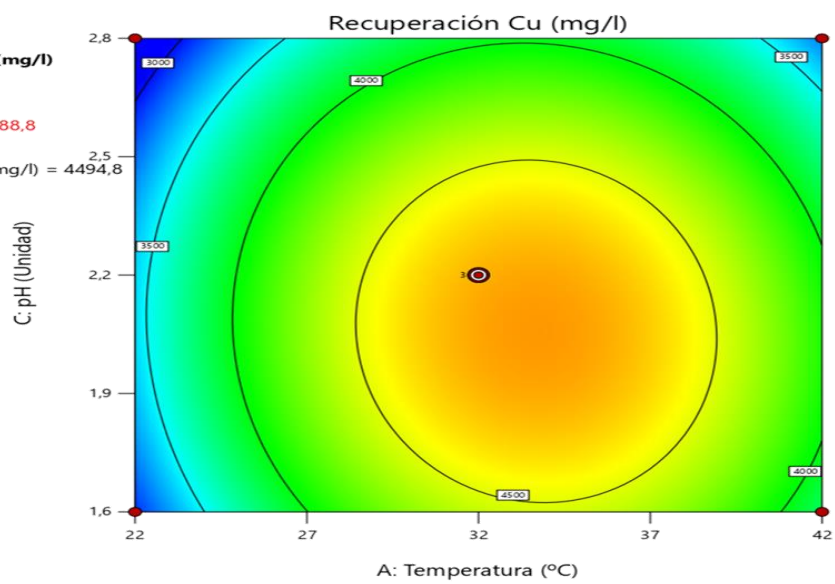

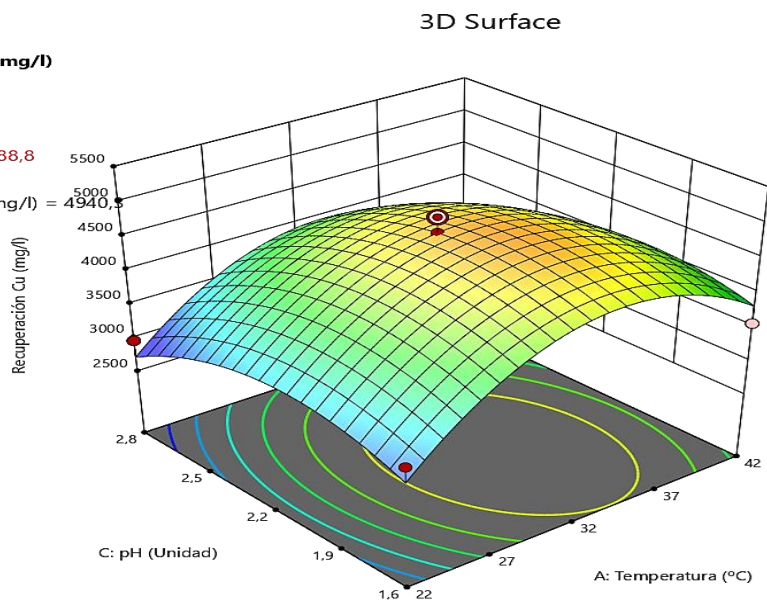


Fig 50b

Recuperación Cu (mg/l)
 Design Points:
 ● Above Surface
 ○ Below Surface
 2967,8  5088,8
 Recuperación Cu (mg/l) = 4940,5
 Std # 15 Run # 10
 X1 = A = 32
 X2 = C = 2,2
Actual Factor
 B = 6,77



Nota. Design Expert V.13

Interpretación:

En la Figura 50a, se puede apreciar en el gráfico de contorno que los mayores valores para la recuperación de cobre, cuando el factor B (Tamaño P80) es igual a 6,77 se encuentra cuando los factores A (Temperatura) está entre 30°C y 37°C y el factor C (pH) se encuentra entre 1,9 y 2,1. Así mismo se presenta en esta área el tratamiento 3 (Columna 3).

En la Figura 50b. Gráfica de superficie de respuesta en tridimensional (3D), se aprecia que el área donde existe mayor rendimiento para la recuperación de cobre está comprendida para factor A, entre 31°C y 36°C; para el factor C, entre 1,9 y 2,3; cuando el factor B (Tamaño P80) en un valor de 6,77. Se observa que el mayor valor de recuperación de cobre corresponde a la columna C5 (tratamiento 10), área de color rojo. Y la menor recuperación de cobre (zona de color azul) se presenta cuando pH= 1,6 y temperatura de 22°C.

Figura 51

Contorno y superficie de respuesta para la recuperación de cobre según tamaño P-80 (B) y pH (C) en diseño Box-Behnken cuando la temperatura (A) es óptimo.

Fig 51a

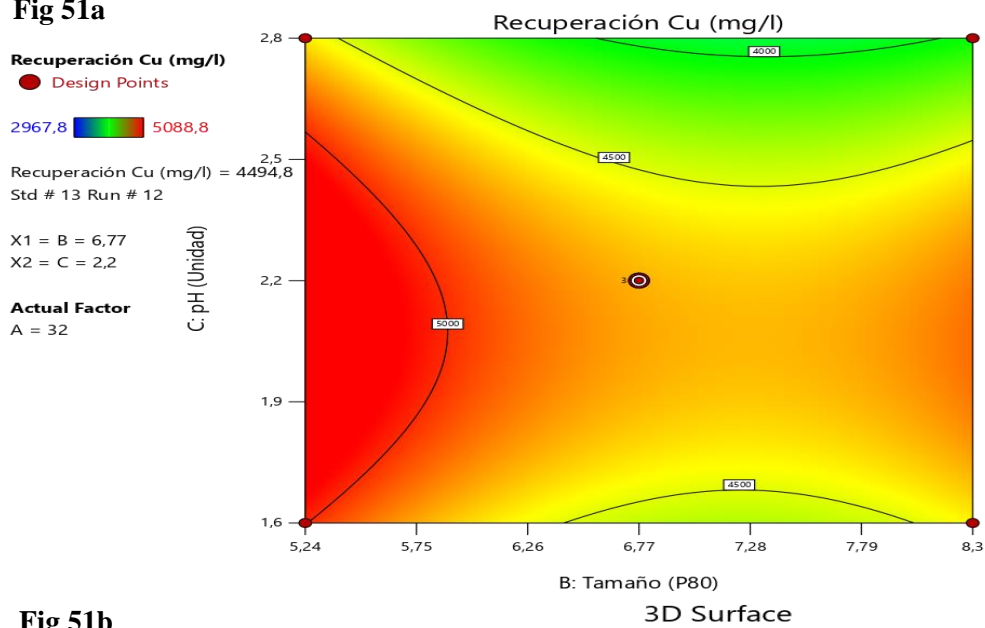
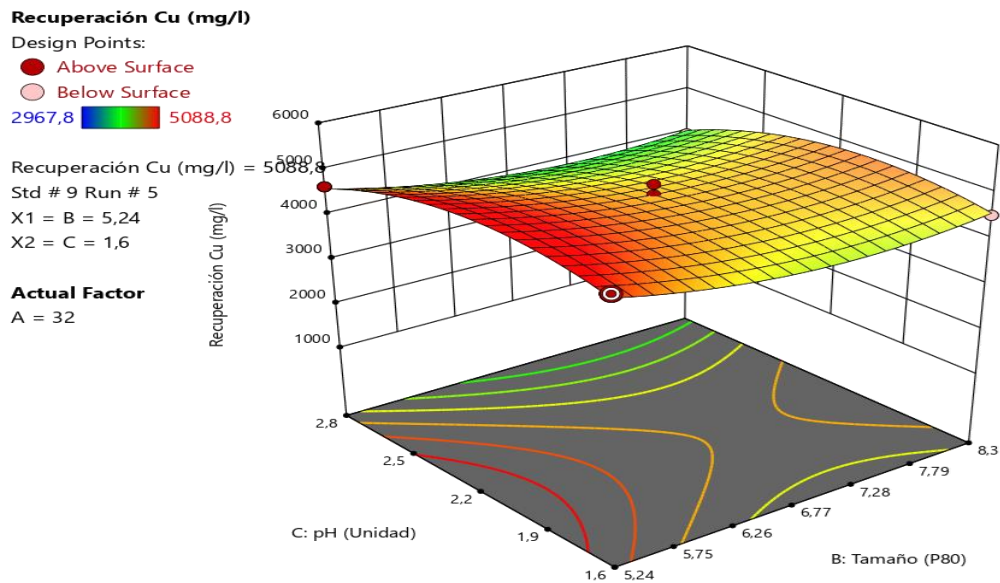


Fig 51b



Nota. Design Expert V.13

Interpretación:

En la gráfica 51a, superficie de contorno, se aprecia que la mayor recuperación de cobre se obtiene cuando el factor B (Tamaño P80): 5,24 y factor C (pH) = 1,6 para una recuperación de 5 088 mg/L, correspondiente a la columna 13. La menor recuperación de cobre se da cuando el factor B (Tamaño P80): 8,3 y factor C (pH) = 2,8 para una recuperación de 3 957 mg/L, correspondiente a la columna 7.

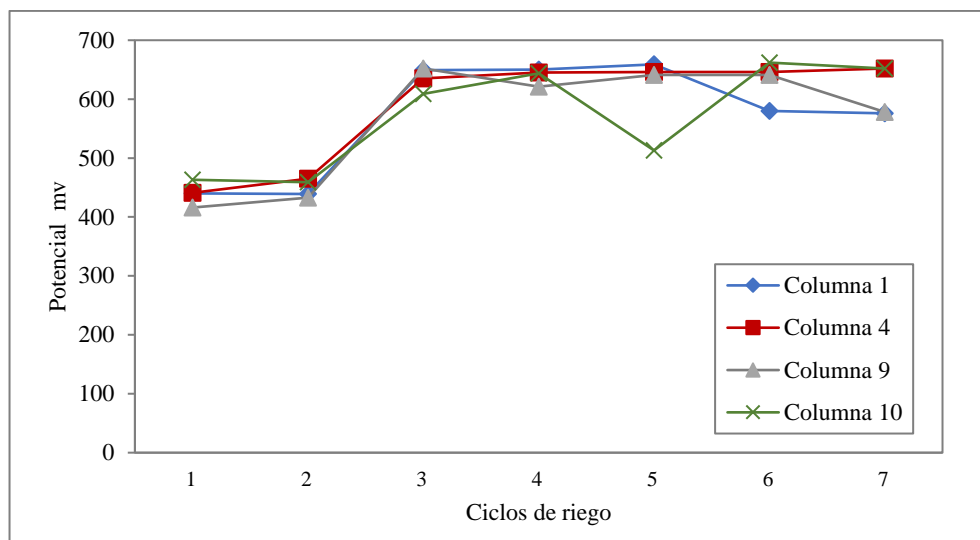
En la Figura 51b, gráfica de superficie de respuesta en tridimensional (3D), se aprecia que la zona de color rojo es donde existe mayor rendimiento para la recuperación de cobre y está comprendida cuando factor C (pH) está entre 1,6 y 2,8; y cuando el factor B (Tamaño particular P80) esta con un valor de 5,24 mm.

4.1.5. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para respuesta: potencial redox en el proceso de bio lixiviación bacteriana.

En las figuras 52, 53 y 54, se presenta el desarrollo de la respuesta: potencial redox para las cabinas 1, 2 y 3 temperaturas de 22°C, 32°C y 42°C.

Figura 52

Potencial redox en columnas de biolixiviación a 22°C



Nota. Fuente. Elaboración propia.

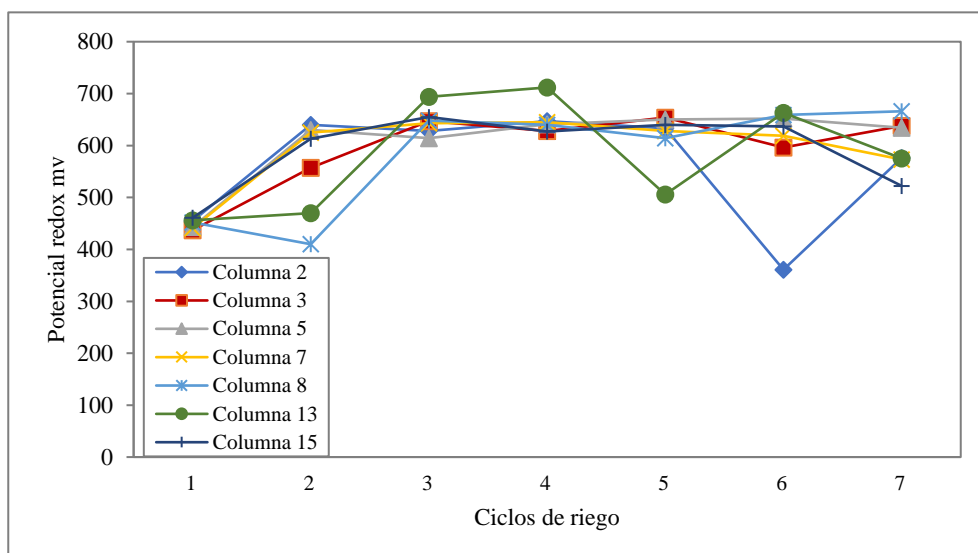
Interpretación:

El potencial redox durante la semana 1-2 se mantiene en un valor de 400 mV a 500 mV. Durante la semana 2-3 sube el potencial entre 500 mV a 700 mV. Este ascenso indica un aumento de la actividad microbiana, de la semana 4 a la semana 7 se ha mantenido constante en casi todas las columnas

en un valor comprendido entre 600 mV a 700mV, indicando una sostenida actividad microbiana durante este periodo.

Figura 53

Potencial redox en columnas de biolixiviación a 32°C



Nota. Fuente. Elaboración propia.

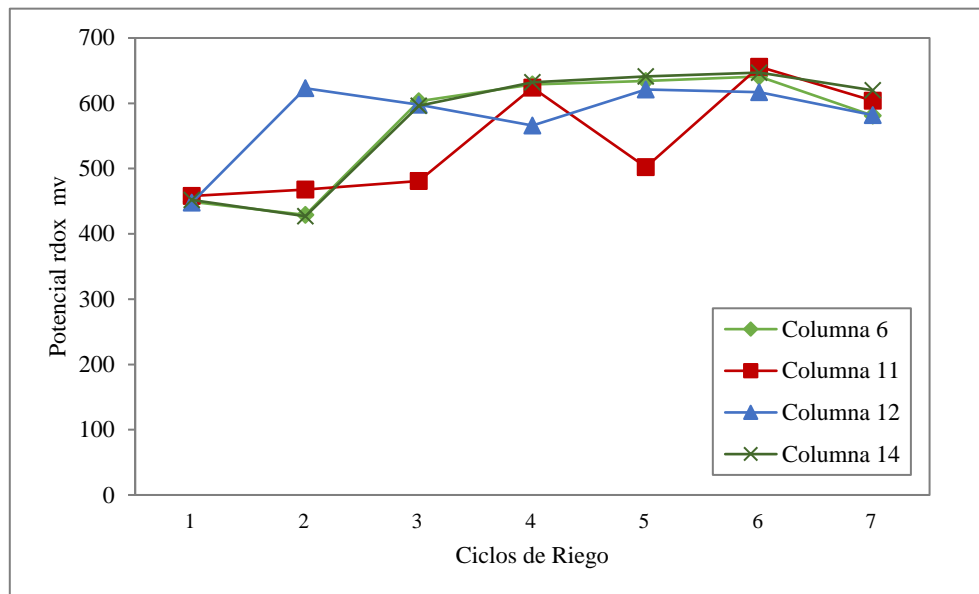
Interpretación:

En la Figura 53, se presenta el desarrollo de la respuesta: potencial redox durante los 7 ciclos para las columnas que se sometieron a 32°C. El potencial redox durante la semana 1-2 asciende de manera heterogénea en cada columna desde un valor inicial de 400 mV para todas las columnas, hasta un valor máximo de 620 mV (columna 2) y un mínimo de 400 mV (columna 8). Durante la semana 3 todas las columnas alcanzan un valor de 600 mV, Durante los ciclos siguientes, desde la semana 4-7 el potencial se

mantiene dentro de los 600 mV, para todas las columnas; excepto para la columna 2, cuyo valor de potencial redox, descendió hasta el valor inicial indicando una disminución de la actividad microbiana para esta columna.

Figura 54

Potencial redox en columnas de biolixiviación a 42 °C



Nota. Fuente. Elaboración propia.

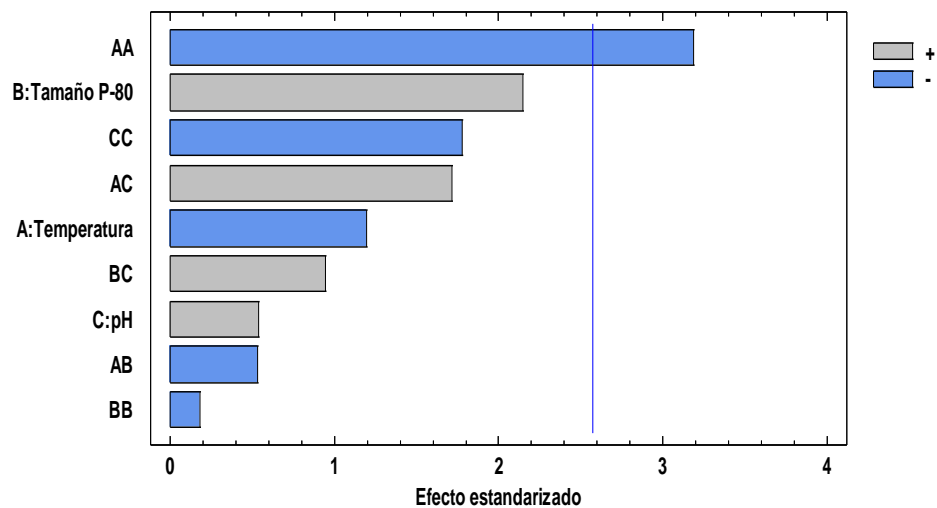
Interpretación:

En la Figura 54, se presenta el desarrollo de la respuesta: potencial redox durante los 7 ciclos para las columnas que se sometieron a una temperatura de 42°C. El potencial redox al inicio fue de 420 mV para todas las columnas sometidas a 42 °C. Durante la semana 1-2 la única columna C-12 alcanza el valor de 600 mV, indicando actividad microbiana. Sin

embargo, el resto de columnas no asciende el potencial redox. Solo a partir de la semana 4, se aprecia que todas las columnas logran tener un potencial promedio de 600 mV hasta la última semana, semana 7.

Figura 55

Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizada para potencial redox en columnas de biolixiviación.



Nota. Statgraphics V.17

Interpretación:


El análisis de los coeficientes del modelo cuadrático que ajusta la respuesta potencial redox según la prueba de Pareto (figura 55) muestra que sólo el efecto cuadrático del factor Temperatura (AA) = (0,0244) resultó significativo para un p-valor < 0,05. Es decir, varía de manera importante los potenciales redox, en las columnas, según estén en mayor o menor

temperatura, además no fue significativo el modelo, según el análisis de varianza (Anexo 5) aplicada al potencial redox (0,1569).

Figura 56

Contorno y superficie de respuesta para potencial redox según temperatura y pH en diseño Box-Behnken.

Fig 56a

Redox (mV)
 ● Design Points
 541,86  609,14
 Redox (mV) = 593,86
 Std # 13 Run # 12
 X1 = A = 32
 X2 = C = 2,2
Actual Factor
 B = 6,77

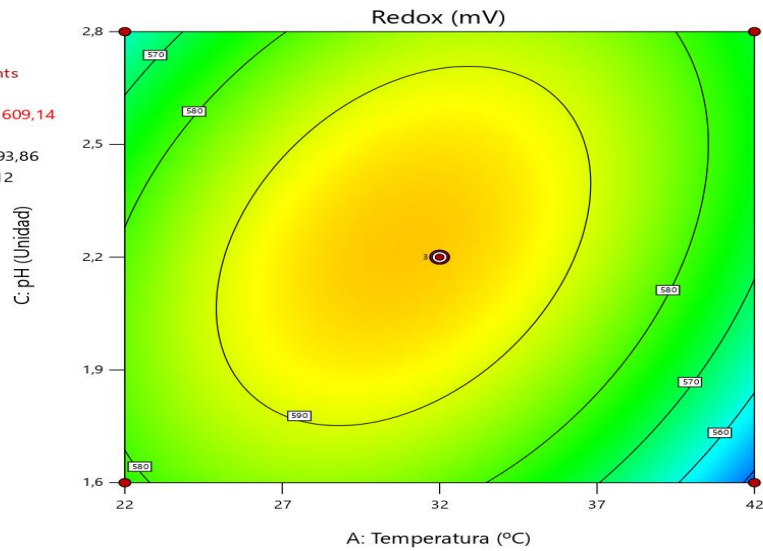

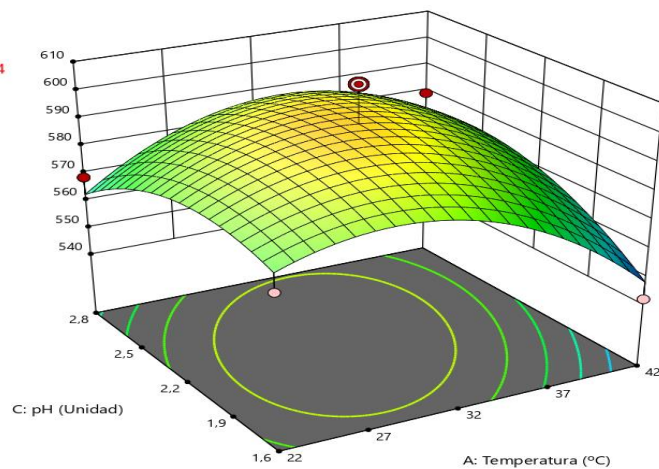


Fig 56b

Redox (mV)
 Design Points:
 ● Above Surface
 ○ Below Surface
 541,86  609,14
 Redox (mV) = 609,14
 Std # 14 Run # 2
 X1 = A = 32
 X2 = C = 2,2
Actual Factor
 B = 6,77



Nota. Design expert V.13

Interpretación:

La figura 56 a muestra la superficie de contorno para los efectos de la temperatura (A) y pH (C) cuando se mantiene constante el factor B (Tamaño P80). Se aprecia una zona central de color anaranjado con un centro rojo indicando valores máximos para la respuesta potencial redox para las columnas 12, 2 y 10 cuando redox toma valores de: 583,86 mV; 609,14 mV y 584,14 mV respectivamente.

En la figura 56 b se muestra la superficie de respuesta en 3D para los efectos de la Temperatura (A) y pH (C) cuando se mantiene constante el factor B (Tamaño P80) a un valor medio de 6,77. Se aprecia una curvatura máxima (montaña) de color rojo en la zona elevada indicando la máxima respuesta para el potencial redox. Se presenta un punto de indicación en la cumbre para el tratamiento 2 o columna 2 con un valor de 609,14 mV y un punto mínimo para potencial redox con un valor de 541,86 mV representado en la zona de color azul correspondiente a 42 °C de temperatura y 1,5 de pH.

- **Ecuación final en términos de componentes actuales**

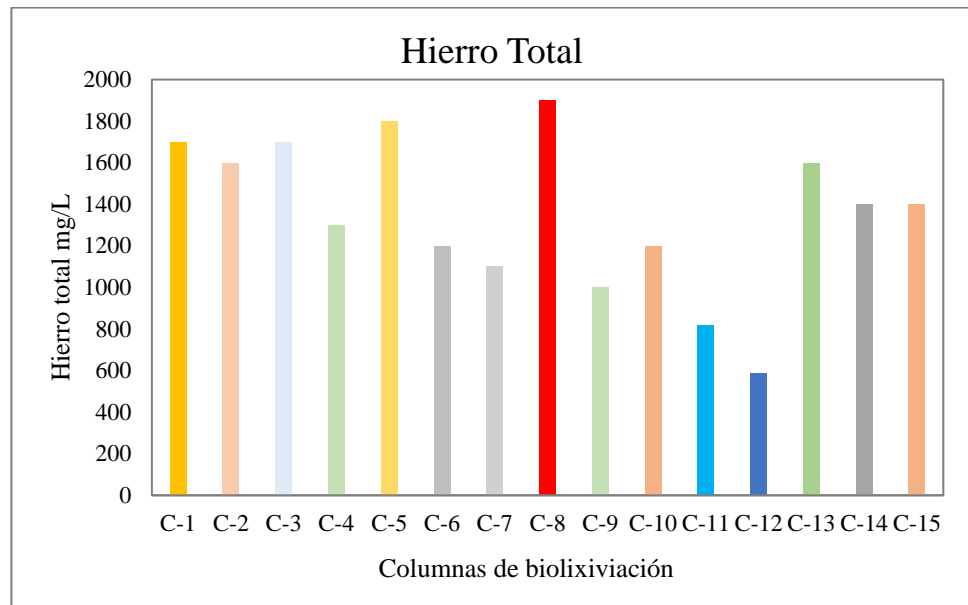
$$\begin{aligned} \text{Potencial redox} = & 360,646 + 9,64766 * A + 5,62767 * B + 41,6268 * C \\ & + -0,205392 * AB + 1,67833 * AC + 6,03214 * BC + -0,194467 * A^2 + - \\ & 0,480228 * B^2 + -30,1019 * C^2 \end{aligned}$$

4.1.6. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para hierro total en el proceso de bio lixiviación bacteriana

En la figura 57 se muestra los valores de la recuperación de hierro total en mg/L obtenidos para cada columna codificada.

Figura 57

Recuperación de hierro total en columnas de biolixiviación

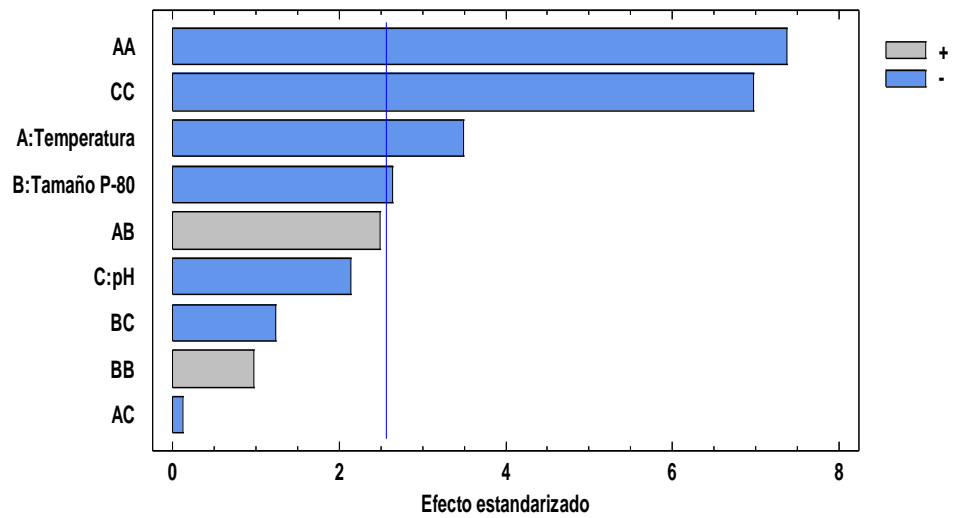


Nota. Elaboración propia

La grafica muestra el cobre en cada una de las columnas al final del proceso de bio lixiviación, se observa que la columna C8 presenta el mayor valor con 1850 mg/L y la columna C12 presentó el mínimo valor 600 mg/L

Figura 58

Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizada para hierro total.



Nota. Statgraphics V.17

Interpretación:

El análisis de los coeficientes del modelo cuadrático que ajusta la respuesta de hierro total, se puede analizar según la prueba de Pareto (figura 58), en ella se muestra, en orden descendente, que el efecto cuadrático del factor Temperatura (AA) = (0,0007) resultó significativo para un p-valor < 0,05. También los efectos cuadráticos de pH (CC)= 0,0009, el efecto lineal de temperatura (A)=0,0173 y el efecto lineal de Tamaño P80 (B)= 0,0457 presentan valores de F calculada menor a p-valor < 0,05.

El análisis de varianza para el modelo elegido (modelo cuadrático) también fue significativo para un valor F de 0,0044 comparado con un p-valor $<0,05$. Es decir que el hierro total varía de manera importante, en las columnas, cuando se varía los factores cuadráticos AA, CC y los factores lineales A y B en el proceso de bio lixiviación.

Figura 59

Contorno y superficie de respuesta para hierro total según temperatura y pH en diseño Box-Behnken

Fig 59a

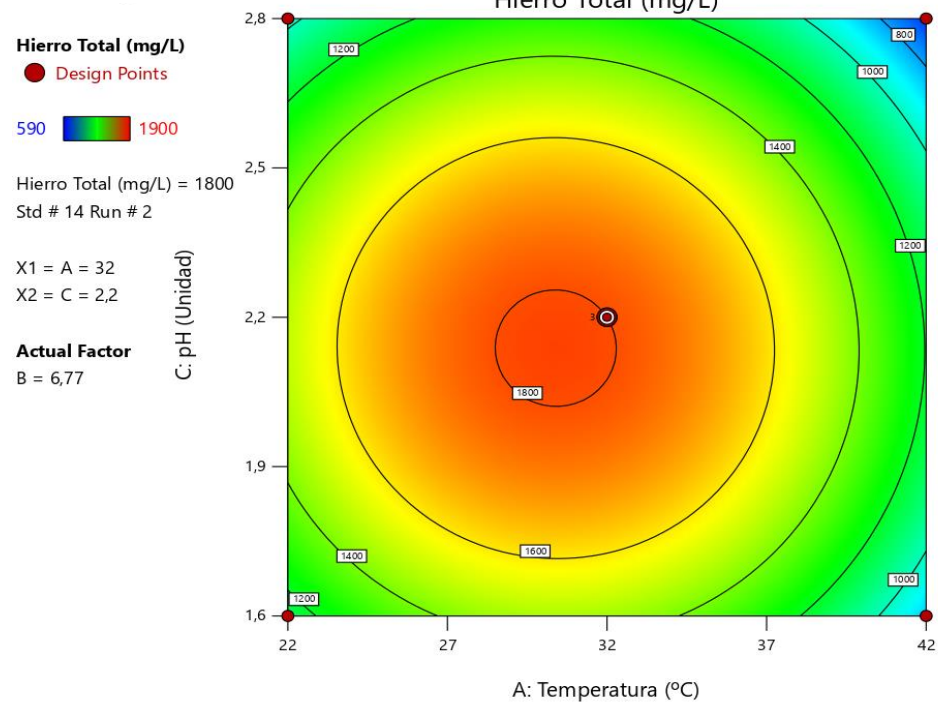


Fig 59-b

Hierro Total (mg/L)

Design Points:

- Above Surface
 - Below Surface
- 590  1900

Hierro Total (mg/L) = 1900

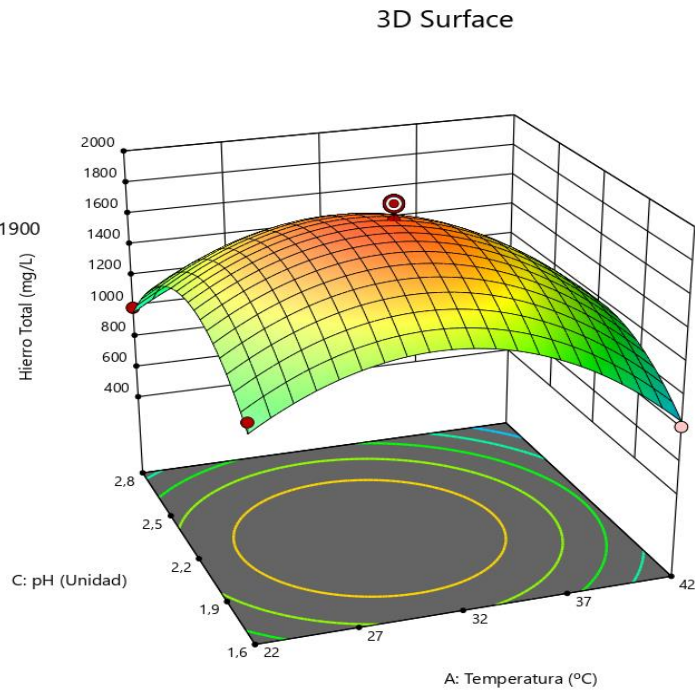
Std # 15 Run # 10

X1 = A = 32

X2 = C = 2,2

Actual Factor

B = 6,77



Nota. Design expert V.13

Interpretación:

La figura 59a muestra el gráfico para la superficie de contorno para los efectos de la temperatura (A) y pH (C) cuando se mantiene constante el factor B (Tamaño P80). Se aprecia una zona externa de color azul, una zona central de color verde a amarillo y una zona central de color rojo, indicando valores máximos para la respuesta hierro total para las columnas 12, 2 y 10 cuando hierro total toma valores de: 1 700 mg/L, 1 800 mg/L y 1900 mg/L respectivamente.

En la figura 59b se muestra la superficie de respuesta en 3D para los efectos de la Temperatura (A) y pH (C) cuando se mantiene constante el

factor B (Tamaño P80) a un valor medio de 6,77. Se aprecia una curvatura máxima (montaña) de color rojo en la zona elevada indicando la máxima respuesta para el hierro total. Se presenta un punto de indicación máximo, en la cumbre para el tratamiento 10 o columna 10 con un valor de 1 900 mg/L y un punto mínimo para potencial redox con un valor de 820 mg/L representado en la zona de color azul correspondiente a 42 °C de temperatura y 1,6 de pH.

- **Ecuación final en términos de componentes actuales**

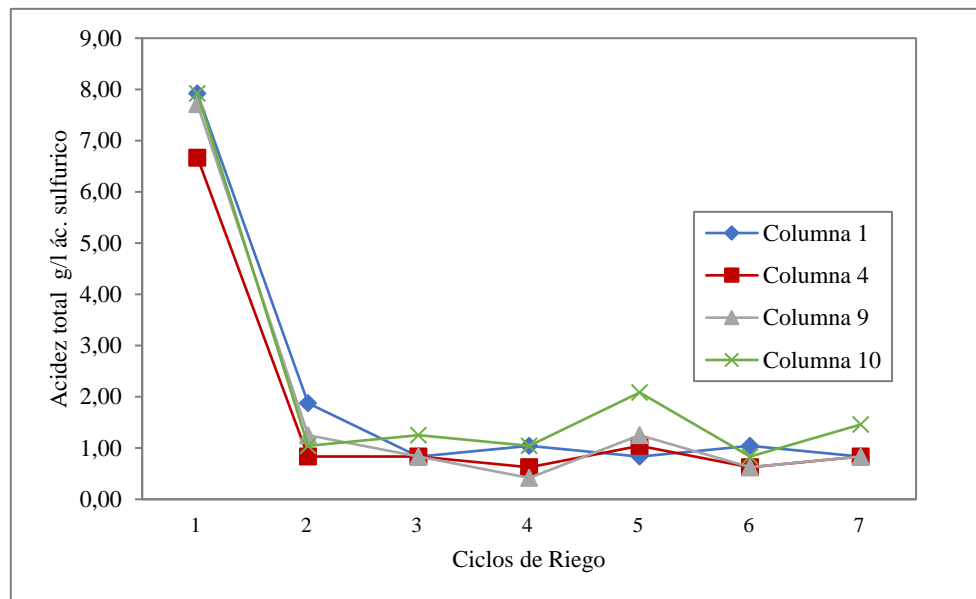
$$\begin{aligned} \text{Hierro total} = & -5.461,65 + 216,702 * A + -561,792 * B + 5.772,97 * C \\ & + 9,80392 * AB + -1,25 * AC + -81,6993 * BC + -4,6125 * A^2 + 26,1652 \\ & * B^2 + -1.211,81 * C^2 \end{aligned}$$

4.1.7. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para acidez total en el proceso de bio lixiviación bacteriana

En las figuras 60, 61 y 62 se muestra los valores de la acidez total obtenidos de las muestras de lixiviado de las columnas correspondientes a la cabina 1, 2 y 3 a 22°C, 32 C y 42 C.

Figura 60

Acidez total en columnas de biolixiviación a 22°C



Nota. Fuente. Elaboración propia.

Interpretación:

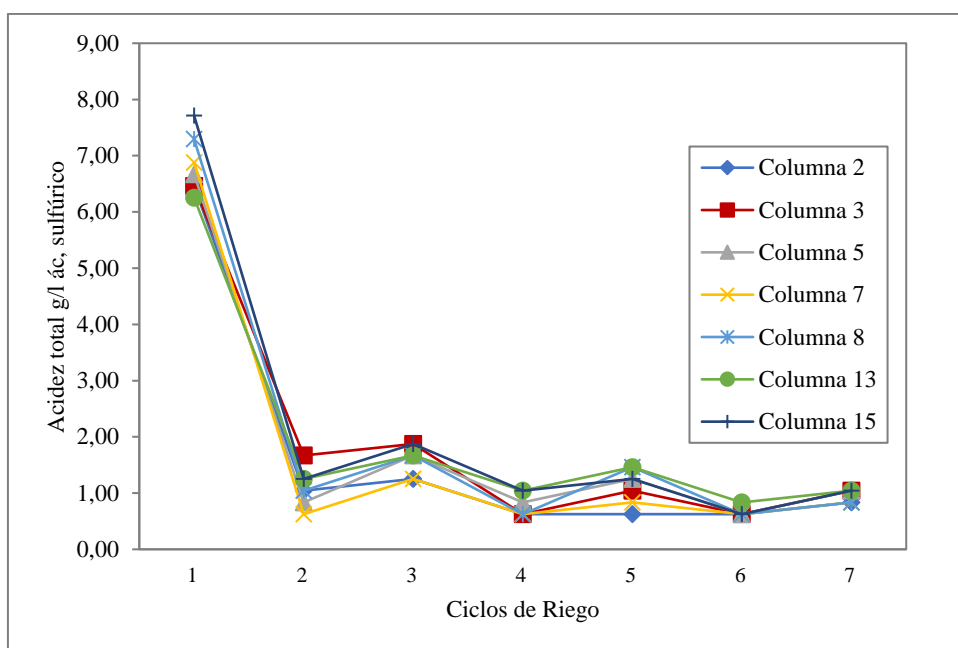
La acidez disminuye abruptamente hasta niveles inferiores por las reacciones químicas entre el ácido sulfúrico y las bases contenidas en la

calcopirita. Se concluye que no tiene efecto significativo sobre las respuestas.

En la figura 61 se muestra los valores de la acidez total obtenidos de las muestras de las columnas correspondientes a la cabina 2 a 32°C

Figura 61

Acidez total en columnas de biolixiviación a 32°C



Nota. Fuente. Elaboración propia.

Interpretación:

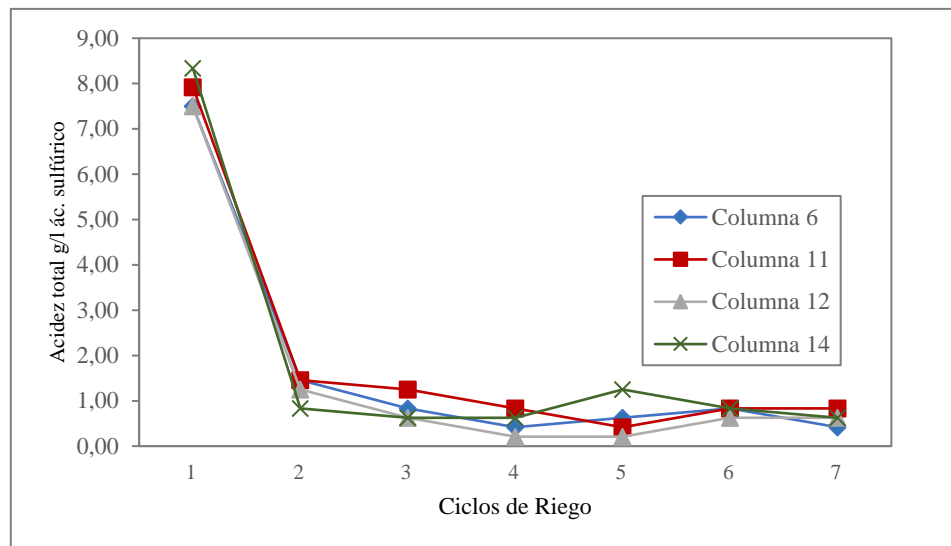
La acidez disminuye abruptamente hasta niveles inferiores por las reacciones químicas entre el ácido sulfúrico y las bases contenidas en la

calcopirita. Se concluye que no tiene efecto significativo sobre las respuestas.

En la figura 62 se muestra los valores de la acidez total obtenidos de las muestras de las columnas correspondientes a la cabina 3 a 42°C

Figura 62

Acidez total en columnas de biolixiviación a 42°C



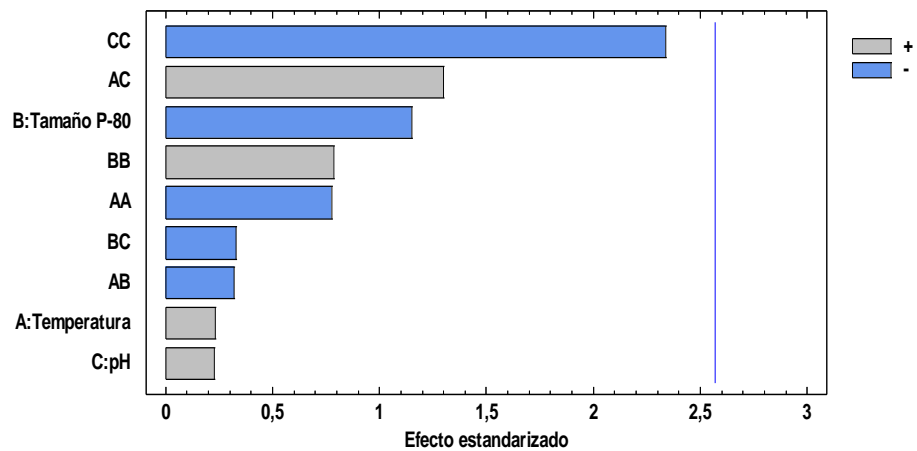
Nota. Fuente. Elaboración propia.

Interpretación:

La acidez disminuye abruptamente hasta niveles inferiores por las reacciones químicas entre el ácido sulfúrico y las bases contenidas en la calcopirita. Se concluye que no tiene efecto significativo sobre las respuestas.

Figura 63

Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizada para acidez total.



Nota. Statgraphics V.17

Interpretación:

El análisis de los coeficientes del modelo cuadrático que ajusta la respuesta para acidez total, se puede analizar según la prueba de Pareto (figura 63), en ella se muestra, que ningún factor lineal ni sus efectos cuadráticos influyen en la respuesta acidez total para un p -valor $< 0,05$. El análisis de varianza para el modelo elegido (modelo cuadrático) también fue no significativo para un valor F de 0,7332 comparado con un p -valor $< 0,05$. Es decir que la acidez total no varía de manera importante, en las columnas, cuando se varía los factores cuadráticos AA, BB, CC y los factores lineales A, B y C en el proceso de bio lixiviación.

Figura 64

Contorno y superficie de respuesta para acidez total según temperatura y pH en diseño Box-Behnken.

Fig 64a

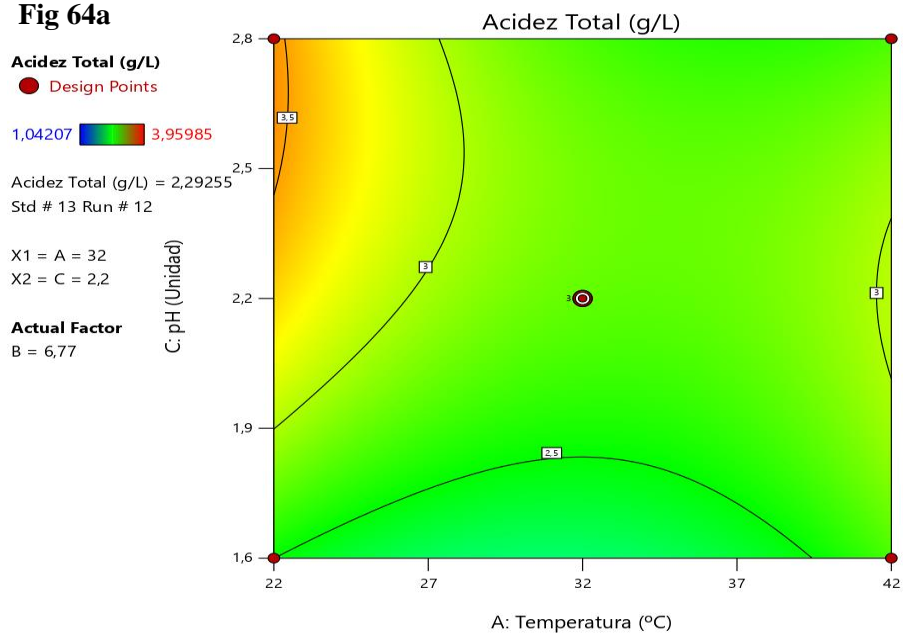
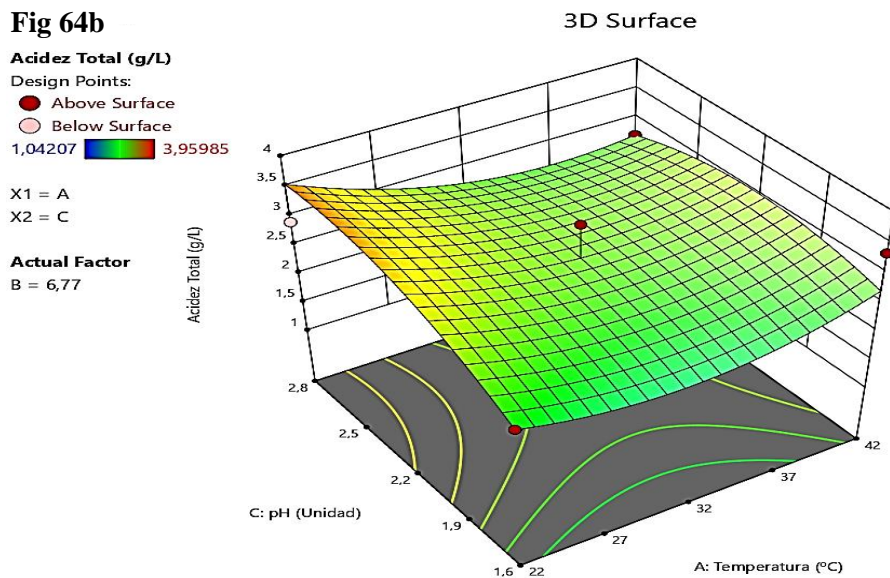


Fig 64b



Nota. Design expert V.13

Interpretación:

La figura 64a muestra el gráfico para la superficie de contorno para los efectos de la temperatura (A) y pH (C) cuando se mantiene constante el factor B (Tamaño P80). Se aprecia que para la respuesta acidez total dentro de los límites superior e inferior de los factores A (temperatura) y C (pH) cuando se manipula el factor B (Tamaño P80) 6,77, estos factores no presentan mucha influencia sobre esta respuesta. Se observa que el mayor valor para la respuesta acidez total se presenta en una zona de color rojo en la parte superior izquierda del gráfico de contorno, tomando un valor de 3,5 g/L cuando pH es igual 2,8 y la temperatura 22°C. El menor valor de acidez total fue de 3,3 g/L cuando la temperatura 42°C y el pH es de 1,6.

- **Ecuación final en términos de componentes actuales**

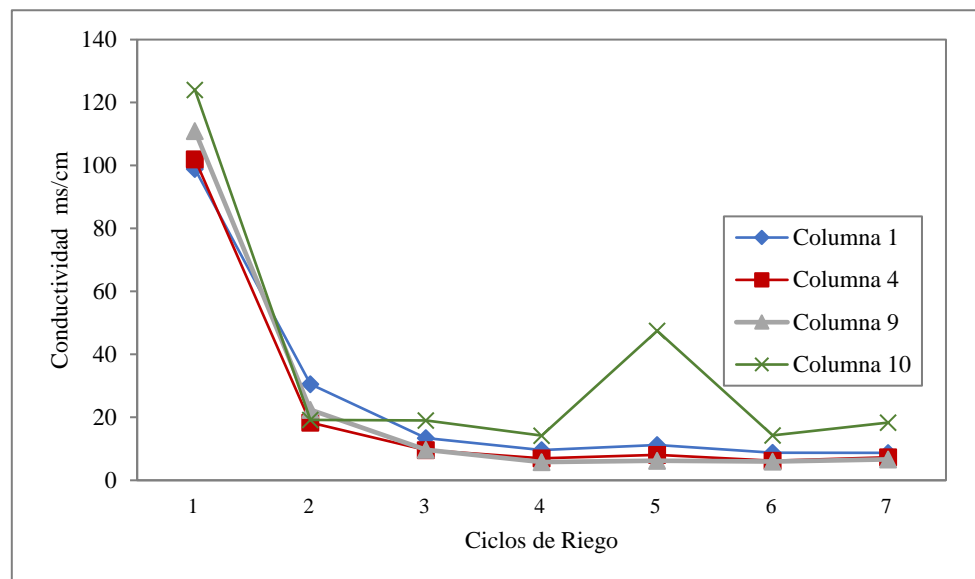
$$\begin{aligned} \text{Acidez Total} = & -7,19608 + 0,0966972 * A + 1,29398 * B + 2,76473 * C \\ & + 0,00555556 * AB + -0,00125 * AC + -0,0245098 * BC + -0,00210833 * \\ & A^2 + -0,105017 * B^2 + -0,62037 * C^2 \end{aligned}$$

4.1.8. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para conductividad eléctrica en el proceso de bio lixiviación bacteriana

En las figuras 65, 66 y 67 se muestra los valores de la conductividad eléctrica obtenidos de las muestras de lixiviado de las columnas correspondientes a la cabina 1, 2 y 3 a 22°C, 32 C y 42 C.

Figura 65

Conductividad eléctrica en columnas de biolixiviación a 22 °C



Nota. Elaboración propia.

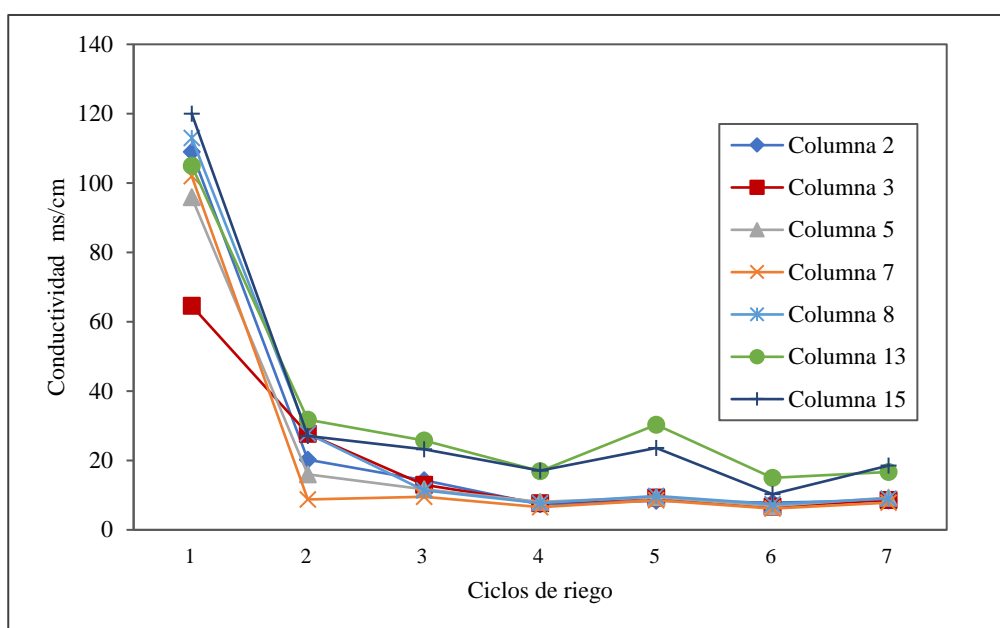
Interpretación:

En la figura 65 las columnas se comportan como un filtro de intercambio iónico de tal manera que en los primeros ciclos al no haberse formado la torta tenemos una alta conductividad debido a la gran presencia de sales disueltas y en los siguientes ciclos estas sales son retenidas en las

columnas por acción de la compactación del mineral y por la presencia de bacterias. Manteniéndose una curva casi contante a partir del segundo ciclo.

Figura 66

Conductividad eléctrica en columnas de biolixiviación a 32°C



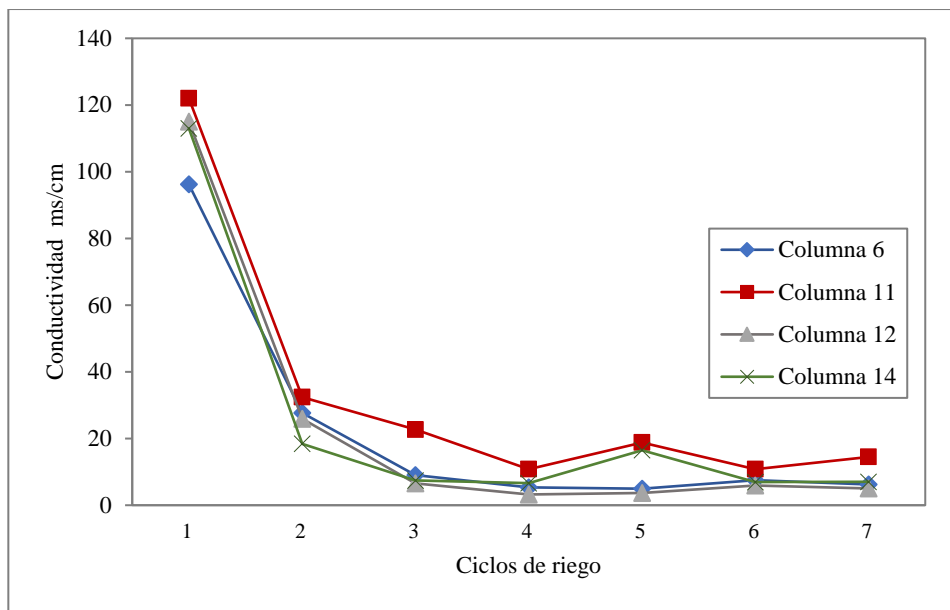
Nota. Elaboración propia.

Interpretación:

En la figura 66 las columnas se comportan como un filtro de intercambio iónico de tal manera que en los primeros ciclos al no haberse formado la torta tenemos una alta conductividad debido a la gran presencia de sales disueltas y en los siguientes ciclos estas sales son retenidas en las columnas por acción de la compactación del mineral y por la presencia de bacterias. Manteniéndose una curva casi contante a partir del segundo ciclo.

Figura 67

Conductividad eléctrica en columnas de biolixiviación 42°C



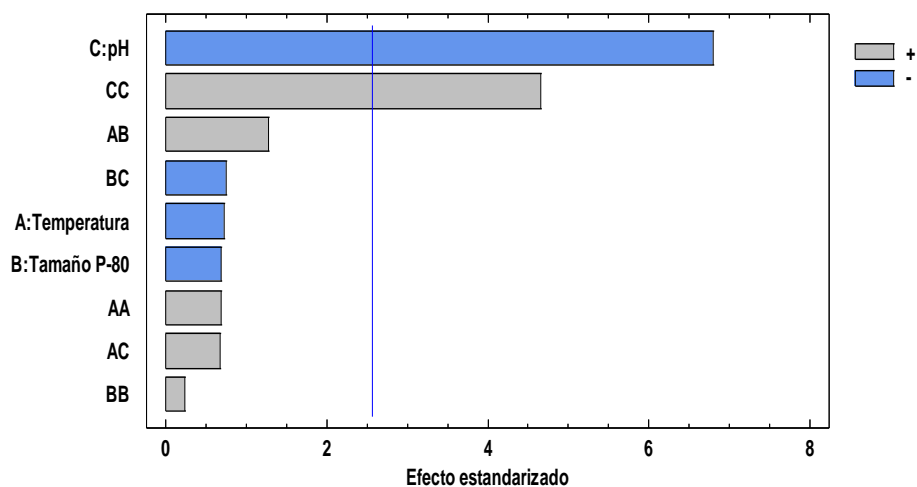
Nota. Elaboración propia

Interpretación:

En la figura 67 las columnas se comportan como un filtro de intercambio iónico de tal manera que en los primeros ciclos al no haberse formado la torta tenemos una alta conductividad debido a la gran presencia de sales disueltas y en los siguientes ciclos estas sales son retenidas en las columnas por acción de la compactación del mineral y por la presencia de bacterias. Manteniéndose una curva casi constante a partir del segundo ciclo.

Figura 68

Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizada para conductividad eléctrica (mS/cm)



Nota. Statgraphics V.17

Interpretación:

El efecto de los factores del modelo cuadrático que ajusta la respuesta de conductividad, fue analizado según la prueba de Pareto (figura 68), en ella se muestra que solo los factores lineales (C) y cuadrático (CC) del pH resultó significativo para un p-valor < 0,05. El análisis de varianza para el modelo elegido (modelo cuadrático) también si fue significativo para un valor F de 0,0171 comparado con un p-valor <0,05. Es decir que la conductividad varia de manera importante, en las columnas, cuando se varía los factores cuadrático C (pH)= 0,0010 y el factor lineal de C (pH) = 0,0056 para un p-Valor <0,05. Los demás factores no presentan un efecto significativo sobre esta respuesta.

Figura 69

Contorno y superficie de respuesta para conductividad eléctrica según temperatura y pH en diseño Box-Behnken

Fig 69a

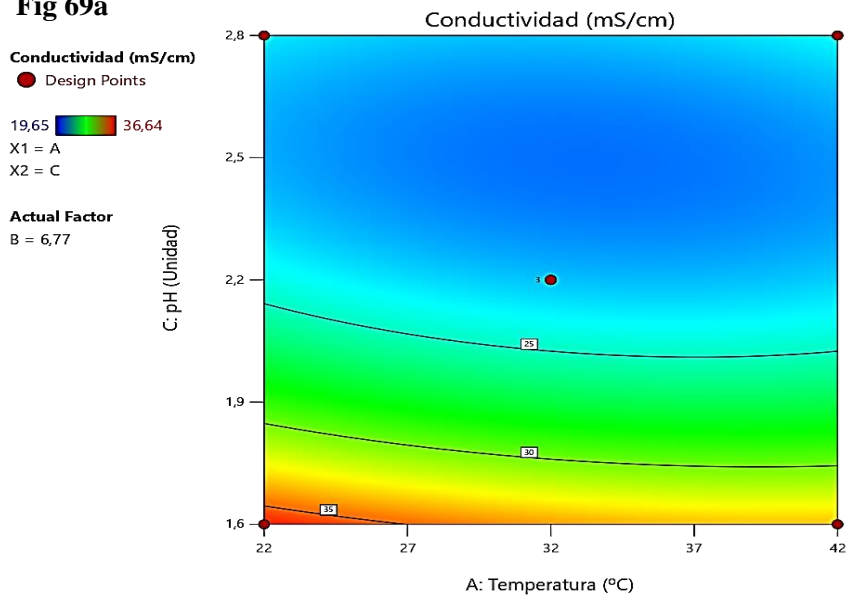
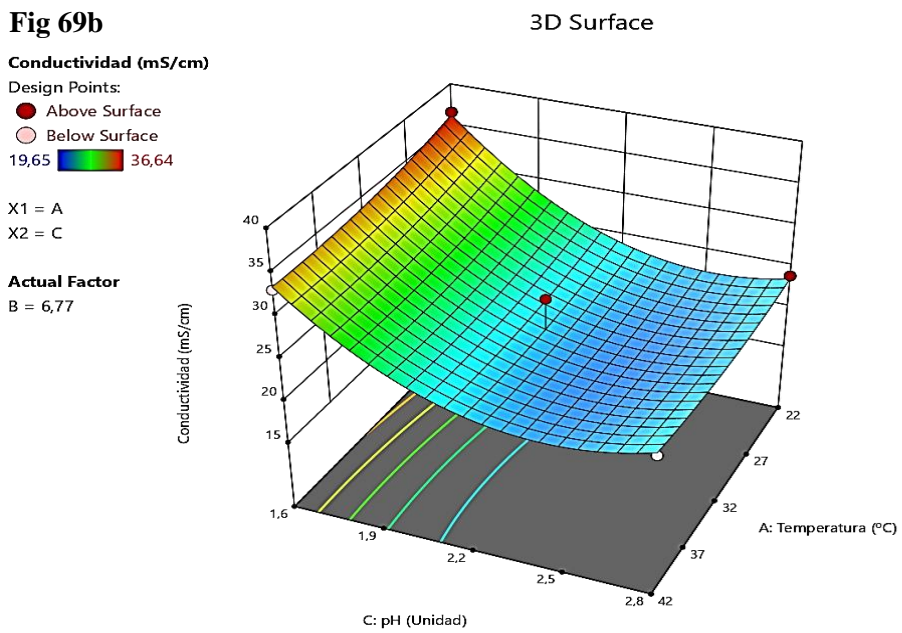


Fig 69b



Nota. Design expert V.13

Interpretación:

En la figura 69a, se muestra el gráfico de contorno para la respuesta conductividad, en este gráfico se puede apreciar que la conductividad es menor hacia el vértice superior derecho cuando pH= 2,8 y temperatura = 42°C está representada por el color azul, pasando por valores medios representado por zonas de color verde y amarillo. La mayor conductividad se presenta en el vértice inferior izquierdo representado por una zona de color rojo cuando pH= 1,6 y temperatura 22°C.

En la figura 69b, gráfico de superficie de respuesta en 3D, nos presenta la variación de la conductividad en función de los factores A= Temperatura y C= pH, cuando se manipula el factor B= Tamaño P80. En la superficie se puede apreciar que la conductividad es baja cuando el pH= a 2,8 en todos los casos (zona de color azul) y aumenta hacia el pH=1,6 para todas las temperaturas, hacia la arista superior; y se hace máxima (en la zona roja) en el vértice superior derecho, cuando conductividad toma el valor de 36,64 mS/cm. Siendo la temperatura= 22°C y pH=1,6.

- **Ecuación final en términos de componentes actuales**

$$\begin{aligned} \text{Conductividad} = & 153,238 + -1,53476 * A + -3,01946 * B + -75,5858 * \\ & C + 0,0965686 * AB + 0,131667 * AC + -0,955882 * BC + 0,0083 * A^2 + \\ & 0,122816 * B^2 + 15,5833 * C^2 \end{aligned}$$

4.1.9. Resultados del diseño experimental Box-Behnken para población del consorcio bacteriano en el proceso de bio-lixiviación bacteriana

Tabla 17

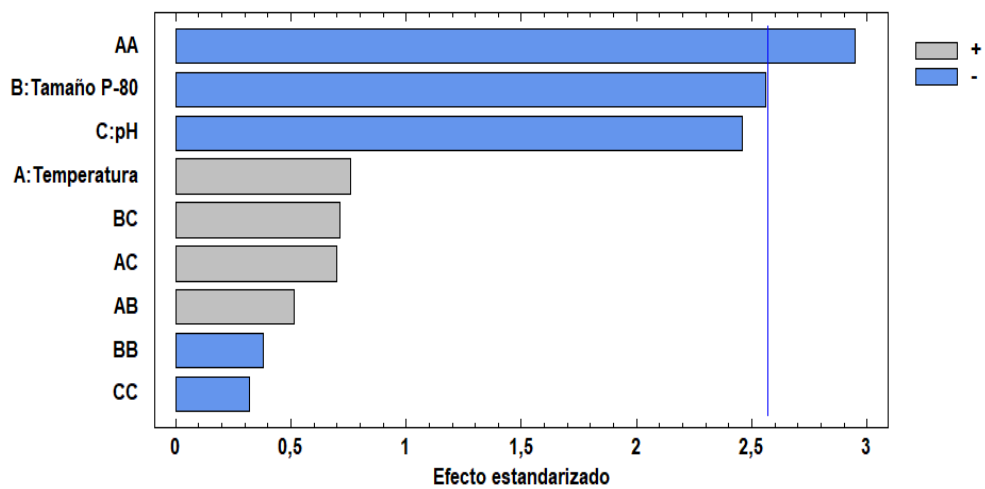
Resultados para población del consorcio bacteriano en el proceso de biolixiviación

Tratamiento o columna	Conteo de población microbiana en cel/mL	Log (Cel/mL)
C-1	6,25E+08	8,795880017
C-2	7,55E+08	8,877876979
C-3	6,05E+08	8,781866542
C-4	4,47E+08	8,650445171
C-5	9,17E+08	8,962445266
C-6	6,22E+08	8,793480543
C-7	5,27E+08	8,721804768
C-8	7,80E+08	8,892267289
C-9	3,75E+08	8,574561326
C-10	6,92E+08	8,839941097
C-11	6,79E+08	8,831699591
C-12	5,26E+08	8,721206828
C-13	1,06E+09	9,024853304
C-14	5,64E+08	8,751540699
C-15	6,16E+08	8,789673393

Nota. Elaboración propia.

Figura 70

Determinación de los efectos principales mediante el diagrama de Pareto estandarizada para población del consorcio bacteriano



Nota. Statgraphics V.17


Interpretación:

El efecto de los factores del modelo que ajusta la respuesta de biomasa del consorcio bacteriano, fue analizado según la prueba de Pareto (figura 70), en ella se muestra que solo el efecto cuadrático de temperatura (AA) resultó significativo para un p-valor $< 0,05$. Es decir que la biomasa del consorcio bacteriano es afectada de manera importante, en las columnas, cuando se varía el factor cuadrático de temperatura (AA) 0,0320 menor a un p-Valor $=0,05$. Los demás factores no presentan un efecto significativo sobre esta respuesta.

Figura 71

Contorno y superficie de respuesta para población del consorcio bacteriano según temperatura y pH en diseño Box-Behnken.

Fig. 71a

Biomasa (cel E+08/ml)
● Design Points
3,75  10,06
X1 = A
X2 = B
Actual Factor
C = 2,2

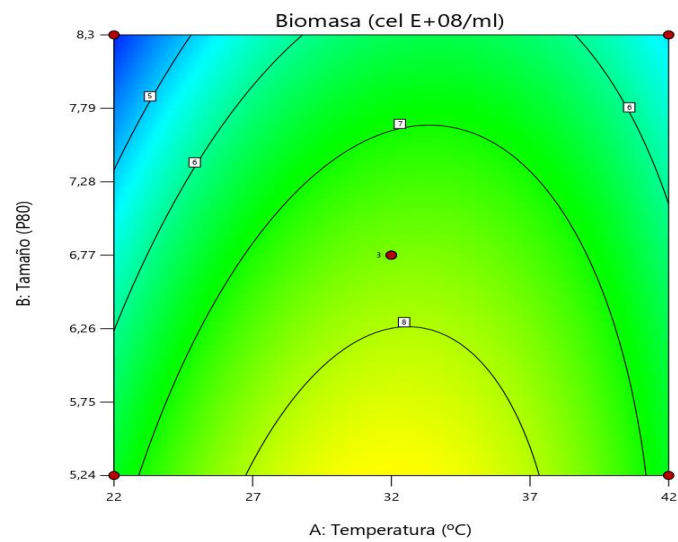

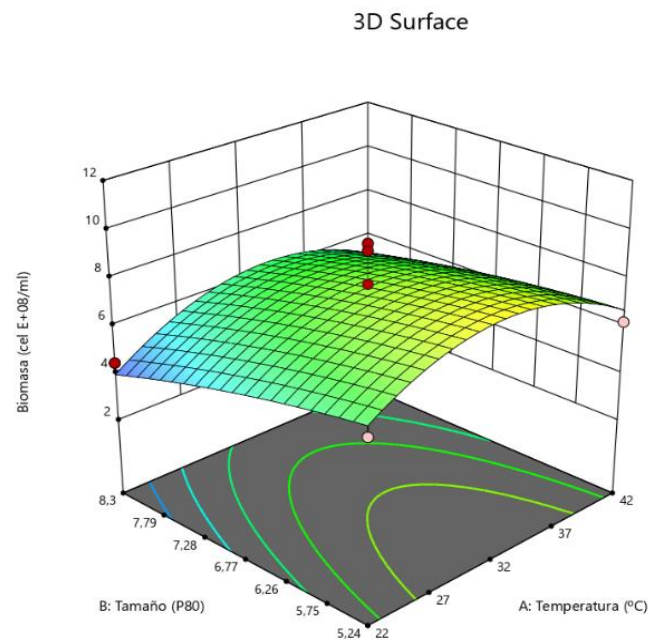


Fig. 71b

Biomasa (cel E+08/ml)
Design Points:
● Above Surface
○ Below Surface
3,75  10,06
X1 = A
X2 = B
Actual Factor
C = 2,2



Nota. Design expert V.13

Interpretación:

En la figura 71a, se muestra el gráfico de contorno para la respuesta biomasa, en este gráfico se puede apreciar que la población bacteriana es menor hacia el vértice superior derecho cuando pH= 2,8 y temperatura = 22°C que está representada por el color azul. Los valores medios representado por zonas de color verde. La mayor población se presenta en la zona media de la arista inferior representado por una zona de color amarillo cuando pH= 1,6 y temperatura 32°C.

En la figura 71b, gráfico de superficie de respuesta en 3D, nos presenta la variación de la biomasa esta función de los factores A= Temperatura y C= pH, cuando se manipula el factor B= Tamaño P80. En la superficie se puede apreciar que la biomasa es baja, zona de color azul en el vértice inferior izquierdo, cuando el pH= está en 2,8 y aumenta hacia el pH=1,6 y temperatura de 32°C, hacia la arista superior; y se hace máxima (en la zona amarilla) en la zona central de la arista superior. cuando la población bacteriana llega a un valor máximo de $10,06+E08$ cuando la temperatura es de 32°C y el pH es 1,6 como fue el caso de la columna 13.

- ***Ecuación final en términos de componentes actuales***

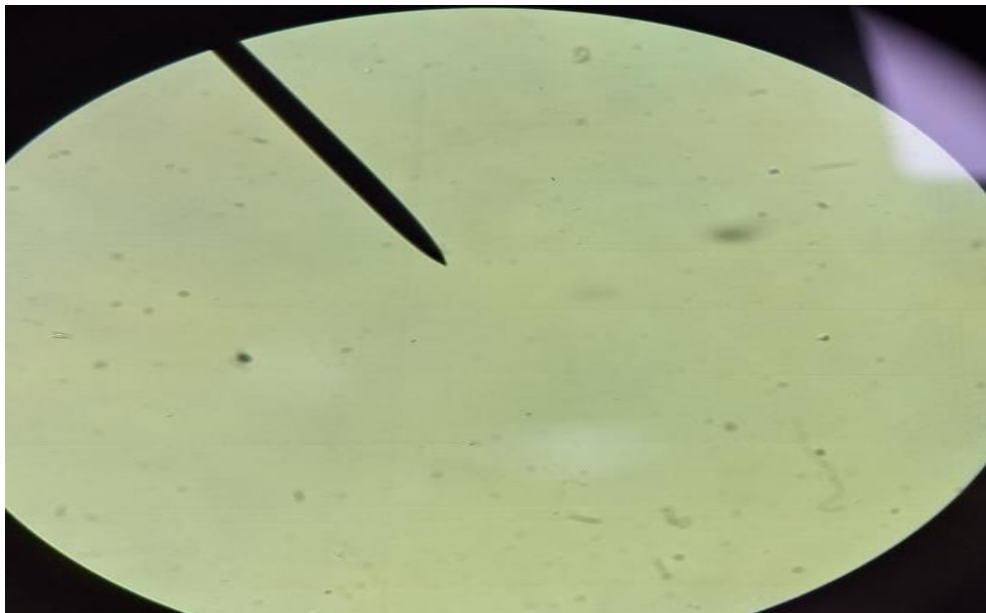
Población del consorcio bacteriano = $5,3795 + 0,899088 * A + -0,98887 * B + -4,57511 * C + 0,0196078 * AB + 0,0683333 * AC + 0,454793 * BC + -0,0179792 * A^2 + -0,0984308 * B^2 + -0,542824 * C^2$.

Esta ecuación en términos de factores reales se puede utilizar para hacer predicciones sobre la respuesta para niveles dados de cada factor. Aquí, los niveles deben especificarse en las unidades originales para cada factor.

En la Figura 72 se muestra un conteo microscópico de bacterias usando la cámara Petroff Hausser

Figura 72

Vista microscópica X1000 de conteo de bacterias en cámara Petroff Hausser



Nota. Elaboración propia.

4.1.10. Resultados de la lixiviación química de mineral calcopirita a temperatura ambiente indicado como tratamiento en blanco.

Tabla 18

Resultado de la recuperación de Cu para lixiviación química

Columna	Temperatura °C	pH de riego	Tamaño de partícula	Cu mg/L
ACSB-1	22	2,2	5,24	293,97
ACSB-2	22	2,2	6,77	249,39
ACSB-3	22	2,2	8,30	266,76
BCSB-1	22	2,2	5,24	82,25
BCSB-2	22	2,2	6,77	97,79
BCSB-3	22	2,2	8,30	126,28
CCSB-1	22	2,2	5,24	94,37
CCSB-2	22	2,2	6,77	79,41
CCSB-3	22	2,2	8,30	114,81
DCSB-1	22	2,2	5,24	275,05
DCSB-2	22	2,2	6,77	375,37
DCSB-3	22	2,2	8,30	381,47
ECSB-1	22	2,2	5,24	188,79
ECSB-2	22	2,2	6,77	122,23
ECSB-3	22	2,2	8,30	207,94

Nota. Las condiciones que se emplearon en la lixiviación química fueron

temperatura 22°C, pH 2,2 y tamaño variable. Elaboración propia.

4.1.11. Comparación porcentual de la recuperación de cobre por cada columna codificada.

Cada columna tenía 4 kilogramos de mineral calcopirita (CuFeS_2) y 7 ciclos de riego, por la ley del mineral (0,5%). Por cada 4 kilos se recuperaron aproximadamente 20000 mg de Cu o 20g de Cu, esto sirvió para el cálculo de porcentaje de recuperación en cada columna. El balance de materia (Anexo 1E).

Tabla 19

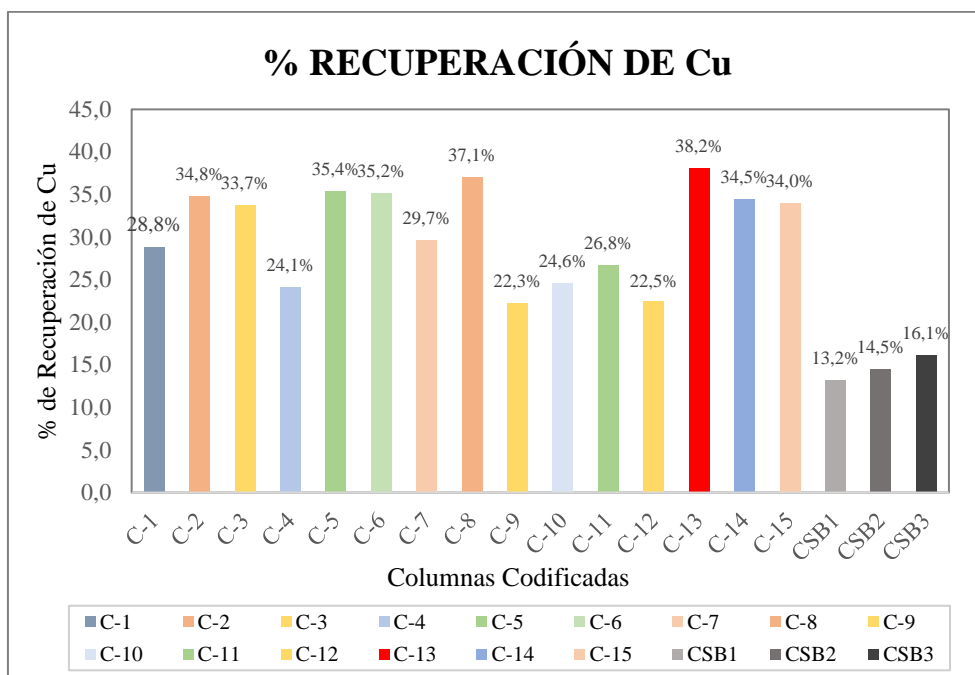
Comparación porcentual de la recuperación de cobre por cada columna

Columnas codificadas	Cu mg/L	Agua de riego por ciclo (L)	Cu mg	%
C-1	3843,52	1,5	5765,28	28,83
C-2	4642,23	1,5	6963,35	34,82
C-3	4494,77	1,5	6742,16	33,71
C-4	3215,73	1,5	4823,60	24,12
C-5	4718,86	1,5	7078,29	35,39
C-6	4692,92	1,5	7039,38	35,20
C-7	3957,01	1,5	5935,52	29,68
C-8	4940,31	1,5	7410,47	37,05
C-9	2967,8	1,5	4451,70	22,26
C-10	3284,67	1,5	4927,01	24,64
C-11	3567,12	1,5	5350,68	26,75
C-12	3003,56	1,5	4505,34	22,53
C-13	5088,76	1,5	7633,14	38,17
C-14	4594,88	1,5	6892,32	34,46
C-15	4529,69	1,5	6794,54	33,97
CSB1	2638,77	1,5	2638,77	13,19
CSB2	2903,21	1,5	2903,21	14,52
CSB3	3224,38	1,5	3224,38	16,12

Nota. Las condiciones que se emplearon en la lixiviación química fueron temperatura 22C, pH 2,2 y tamaño variable. Elaboración propia.

Figura 73

Comparación de la recuperación de cobre en porcentaje de la biolixiviación y de la lixiviación química.



Nota. Comparación de recuperación porcentual de Cu entre biolixiviación y lixiviación química. Elaboración propia.

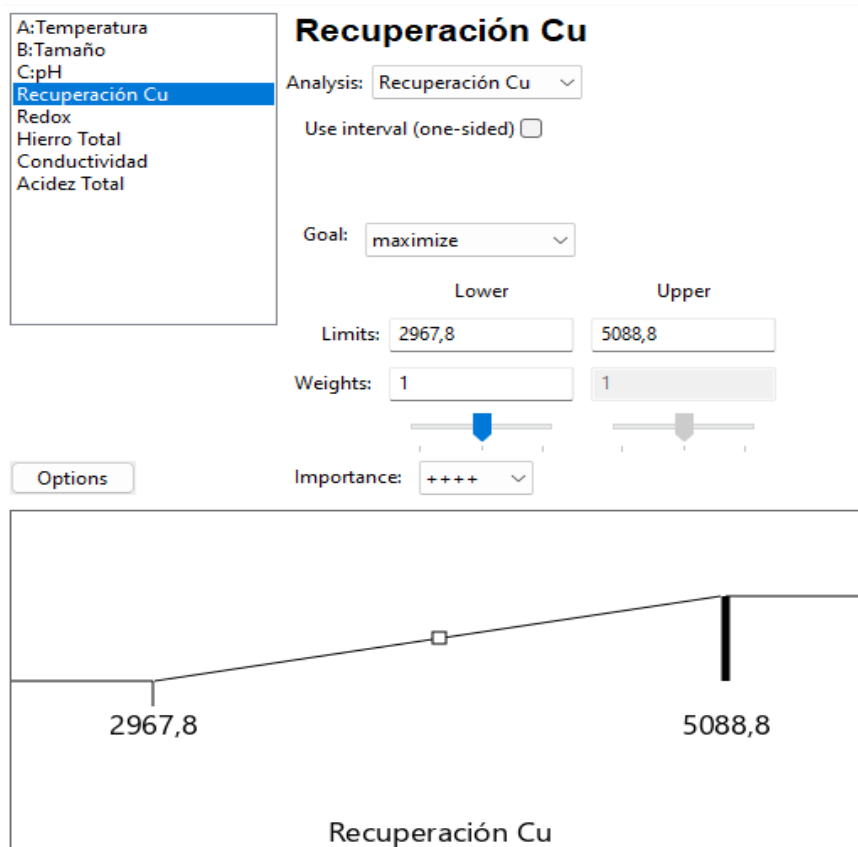
Interpretación:

En la gráfica 73 se aprecia los valores porcentuales para la recuperación de Cu mediante la lixiviación microbiana y la lixiviación química; siendo la columna codificada C-13 la que alcanzó mejores resultados de recuperación de cobre (38,2%) para biolixiviación y la columna CSB3 con (16,1%) la que alcanzó la mayor recuperación de Cu por lixiviación química.

4.1.12. Optimización mediante el método de Función Deseabilidad (FD) para máxima recuperación de cobre a partir de mineral calcopirita mediante biolixiviación de consorcio bacteriano.

Figura 74

Crterios de optimización de recuperación de cobre



Nota. Obtenido de Design Expert V.13. A través del método de Función Deseabilidad (FD), se determinó la combinación óptima de variables operativas para maximizar la recuperación de cobre. Se definió como criterio de optimización la variable “Recuperación Cu”, con el objetivo de maximizarla dentro del rango experimental observado, establecido entre 2967,8 mg/L y 5088,8 mg/L.

Tabla 20

Restricciones de los factores y respuestas para maximización de recuperación de cobre.

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A:Temperatura	maximize	22	42	1	1	3
B:Tamaño	is in range	5,24	8,3	1	1	3
C:pH	is in range	1,6	2,8	1	1	3
Recuperación Cu	maximize	2967,8	5600	1	1	4
Redox	none	541,86	609,14	1	1	3
Hierro Total	none	590	1900	1	1	3
Conductividad	none	19,65	36,64	1	1	3
Acidez Total	none	1,04207	3,95985	1	1	3

Nota. Obtenido de Design Expert V.13

Tabla 21

Solución optimizada para máxima recuperación de cobre.

Number	Temperatura	Tamaño	pH	Recuperación Cu	Redox	Hierro Total	Conductividad	Acidez Total	Desirability	Desirability (w/o Intervals)
1	37,621	5,240	2,081	5141,875	577,616	1646,947	23,911	2,534	0,814	0,900
2	37,577	5,240	2,077	5146,052	577,680	1649,391	23,963	2,533	0,814	0,898
3	37,602	5,240	2,087	5143,204	577,737	1650,142	23,843	2,530	0,814	0,899
4	37,617	5,240	2,094	5141,291	577,763	1650,342	23,776	2,528	0,814	0,899
5	37,700	5,240	2,064	5135,126	577,216	1635,892	24,086	2,543	0,814	0,901
6	37,842	5,240	2,098	5119,726	577,232	1632,814	23,698	2,536	0,814	0,905
7	37,911	5,240	2,132	5107,628	577,372	1632,781	23,361	2,523	0,813	0,907
8	38,210	5,240	2,198	5057,368	577,040	1610,411	22,795	2,499	0,807	0,906
9	38,021	8,300	2,047	4787,073	587,348	1597,512	25,333	2,574	0,742	0,833
10	38,015	8,300	2,052	4787,186	587,506	1598,189	25,269	2,579	0,742	0,833
11	37,942	8,300	2,046	4792,782	587,586	1601,756	25,333	2,570	0,742	0,833
12	37,960	8,300	2,040	4791,849	587,307	1600,118	25,435	2,563	0,742	0,833
13	38,053	8,300	2,036	4785,323	586,861	1594,589	25,510	2,561	0,742	0,833
14	37,957	8,300	2,058	4790,792	587,894	1601,763	25,171	2,584	0,742	0,833
15	38,132	8,300	2,062	4777,495	587,442	1592,286	25,136	2,596	0,742	0,833
16	38,231	8,300	2,026	4772,227	585,923	1583,386	25,685	2,555	0,741	0,834
17	37,707	8,300	2,064	4807,382	588,912	1615,449	25,042	2,584	0,741	0,831

Nota. Obtenido de Design Expert V.13

Interpretación:

Tras el análisis, se identificó una solución óptima (Tabla 21, corrida 1), la cual arrojó una recuperación de 5141,875 mg/L de Cu, superando el límite superior. La solución optimizada sugerida se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22

Solución optimizada para recuperación de cobre a partir de mineral calcopirita mediante columnas de bio lixiviación.

Código	VARIABLE	Valor óptimo	Fd (Deseabilidad)
X1	Temperatura	37,621 °C	0,781
X2	Tamaño P80	5,240 mm	1,0
X3	pH	2,081	1,0
Y1	Recuperación de cobre	5 141,87 mg/L	0,84

Nota. Design Expert V.13.

Figura 75

Superficie de respuesta para optimización de recuperación de cobre.

Factor Coding: Actual

3D Surface

Recuperación Cu (mg/l)

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

2967,8 5088,8

Recuperación Cu (mg/l) = 5088,8

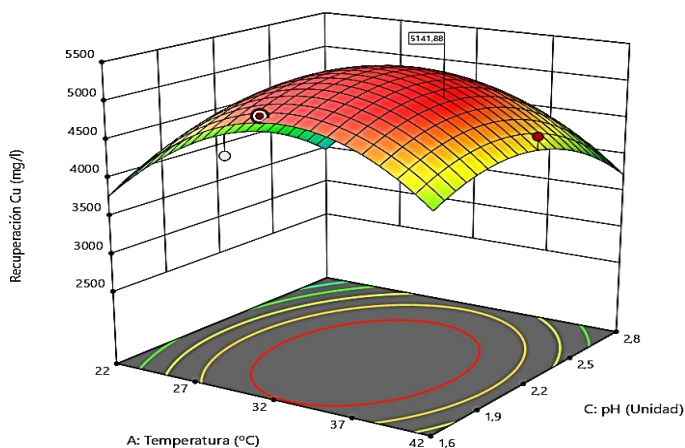
Std # 9 Run # 5

X1 = A = 32

X2 = C = 1,6

Actual Factor

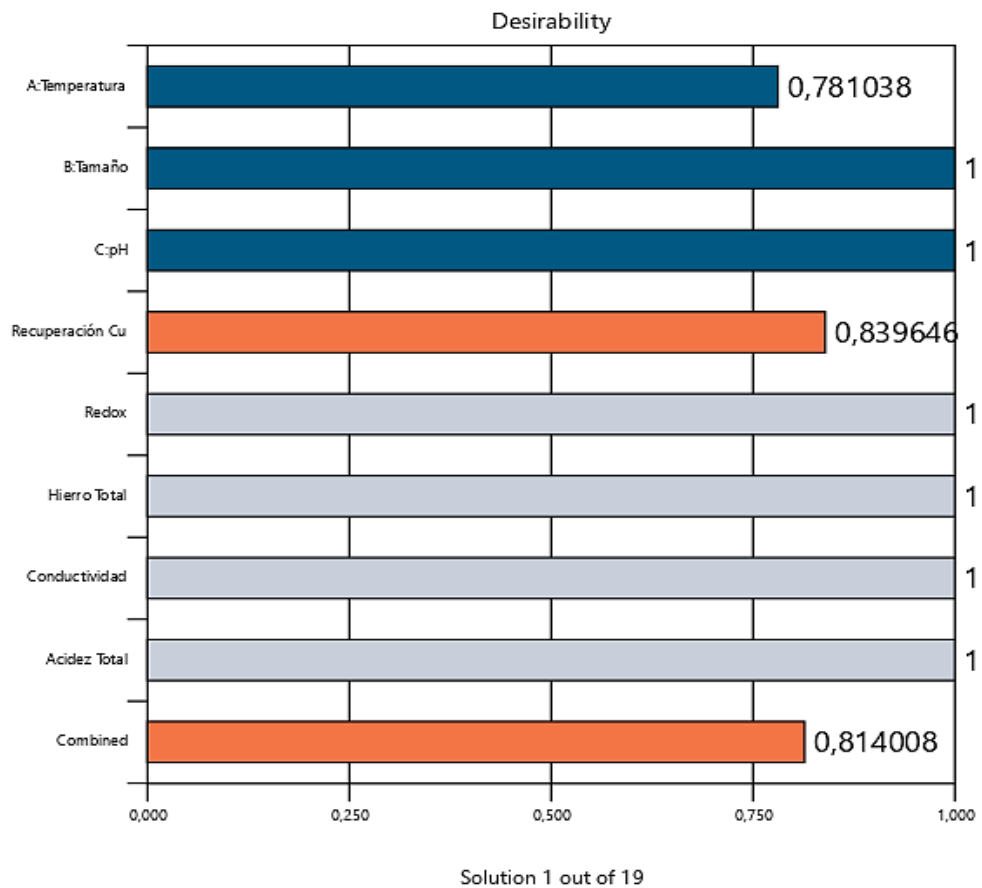
B = 5,24



Nota. Obtenido de Design Expert V.13

Figura 76

Gráfico de barras de la función deseabilidad (F_d) para recuperación de cobre Cu, cuando se optimiza: temperatura, Tamaño P80 y pH.



Nota. Design Expert V.13.

Interpretación:

En la Figura 75 se presenta la superficie de respuesta para el modelo cuadrático cuando se maximiza la temperatura y se maximiza la Recuperación de cobre. El consorcio bacteriano integrado por *Acidimicrobium ferrooxidans* y *Leptosporillum ferrooxidans* según

Schippers et al., (2013) que pueden soportar temperaturas de hasta 40°C aumentando también su valor Q_{10} en las reacciones biológicas, por ello se eligió maximizar este factor Temperatura a fin de lograr un mayor rendimiento de cobre. La superficie de respuesta grafica una parábola tridimensional con unas zonas de mayor rendimiento de cobre en las columnas. Siendo la recuperación óptima de cobre de 5 141,87 mg/L ligeramente superior a lo obtenido en la columna C-13, que fue la de mayor rendimiento. Los valores óptimos de los factores para esta condición se muestran en la Tabla 22.

En la Figura 76 se presenta en forma de barras horizontales los valores de deseabilidad (FD) que puede variar desde 0 hasta 1. Indicando que para la recuperación de cobre se ha logrado hasta un valor (FD)=0,839 (83,9%).

No es necesario obtener siempre un valor de deseabilidad muy alto. El valor depende completamente de cuán cerca estén los límites inferior y superior del óptimo real. El objetivo de la optimización es encontrar un buen conjunto de condiciones que cumplan con todos los objetivos, no llegar a un valor de deseabilidad de 1.0. La deseabilidad es simplemente un método matemático para encontrar el óptimo (Stat-Ease Inc., 2025)

4.2. DISCUSIÓN

- a) Determinación del nivel óptimo de la temperatura para una máxima recuperación de cobre por bio-lixiviación empleando consorcio microbiano en columnas a partir de mineral calcopirita.

En la Tabla 21 se presenta el resultado de la optimización del diseño experimental Box-Behnken, donde la temperatura óptima elegida para el proceso de lixiviación bacteriana es de 37,621°C calculada en base a los datos experimentales del diseño y por optimización numérica mediante el método de Función Deseabilidad (FD) cuando se busca maximizar la temperatura (X1) y la recuperación de cobre (Y1). Bajo estos criterios de obtiene que la temperatura obtiene un valor de deseabilidad de 0,781 (78,1%) de eficiencia y la recuperación de cobre un valor de deseabilidad de 0,83 (83%) siendo el valor optimizado de 5 141,87 mg/L (38,6%), valor ligeramente superior al obtenido de manera experimental en la mejor columna C-13 que fue de un valor de 5 088,8 mg/L de cobre en solución bio lixiviada (equivalente a 38,2% del cobre total presente en la mineral calcopirita). La biolixiviación es una técnica hidrometalúrgica que emplea microorganismos para la recuperación de metales en solución (Rivera, et al., 2011); adecuada para el procesamiento de minerales de baja ley en comparación con otras técnicas convencionales de procesamiento de

minerales (Chen et al., 2019), y se ha utilizado en la producción industrial en los últimos años (Xia et al., 2018).

El consorcio bacteriano utilizado en este experimento estuvo compuesto por dos especies: *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum*, cuya temperatura de trabajo óptimo está entre 30 a 35 °C y 30 a 37°C respectivamente, sin descartar que pueden trabajar a mayor temperatura (Zepeda, 2018). Esto concuerda con lo expresado por (Zea, 2023) donde reporta el consorcio microbiano formado por *Leptospirillum ferriphilum* (M1D-2020) y *Leptospirillum sp* (M3E-2020) y el cultivo microbiano no nativo *Acidithiobacillus ferrooxidans* DSM 14882, que fue el que produjo la mayor concentración de cobre recuperado a través de la biolixiviación sobre la calcopirita con un porcentaje de 37,09 % (4940 mg/L) del total de mineral presente en una muestra de 20 gramos de calcopirita en 648 horas y a 30°C. Asimismo, la recuperación de cobre óptima calculada fue de 5 141 mg/L equivalente a una recuperación el 38,6% cuando el pH es 1,6 y el tamaño de partícula P80 es de 5,242 mm. Finalmente, Watling et al., (2020) señala que el mayor crecimiento, así como la actividad de oxidación se incrementó apreciablemente en el crecimiento óptimo a temperatura de 30 °C.

- b) Determinación del nivel óptimo del tamaño de partícula P80 para una máxima recuperación de cobre por bio lixiviación empleando consorcio microbiano en columnas a partir de mineral calcopirita.

En la Tabla 21 se presenta el resultado de la optimización del diseño experimental Box-Behnken, donde el tamaño de partícula P80 óptima elegida para el proceso de lixiviación bacteriana es de 5,24 mm, calculada en base a los datos experimentales del diseño y por optimización numérica mediante el método de Función Deseabilidad (FD), cuando se busca maximizar la temperatura (X1) y maximizar la recuperación de cobre (Y1). Martínez, (2012), señala a la granulometría como uno de los factores que afectan al transporte de las especies microbianas dentro de las columnas. Esto concuerda con lo encontrado por Dennis (2016) donde señala que el tamaño particular de 9,5 mm dio los mejores resultados de crecimiento bacteriano con un contenido de hierro total alto a un pH por debajo de 2 en calcopirita. El tamaño de la partícula está en relación directa con la superficie total donde las bacterias pueden fijarse, es decir cuando más pequeño el tamaño la superficie es mayor, sin embargo, es una función cuadrática pues cuando es extremadamente pequeña sumado las sustancias poliméricas (EPS) que producen las bacterias, pueden llevar a la detención de la lixiviación por taponamiento de los espacios entre las partículas.

- c) Determinación del nivel óptimo del pH para una máxima recuperación de cobre por bio lixiviación empleando consorcio microbiano en columnas a partir de mineral calcopirita.

En la Tabla 22 se presenta el resultado de la optimización del diseño experimental Box-Behnken, donde el pH óptimo elegido para el proceso de lixiviación bacteriana es de 2,081 calculado en base a los datos experimentales del diseño y por optimización numérica mediante el método de Función Deseabilidad (FD) cuando se busca maximizar la temperatura (X1) y la recuperación de cobre (Y1). Rawling (1998) y Suzuki et al., (1999), señalan que las bacterias lixiviantes trabajan mejor en pH comprendidos ente 1 a 3. Según (Schippers et al., 2013), tabla 1 citada en la presente tesis, señala que con respecto al pH óptimo del *Acidithiobacillus ferrooxidans* el valor corresponde a 2,5 pudiendo trabajar en los rangos de pH de 1,3-4,5 y con respecto al *Leptosporillum ferriphilum* 1,3-1,8 por lo que se resalta que el valor hallado por la optimización realizada cae dentro del rango de promedio de actividad de ambas bacterias. Zhao-jing et al., (2016), indica el papel importante del pH en la biolixiviación, pues favorecen el incremento poblacional, y la disolución de sulfuros minerales solubles en ácido, se produce mediante una combinación de hierro férrico y ataque de protones a través de la vía del polisulfuro por tanto, una fuente abundante de protones es esencial según Rohwerder et al, (2003); evitándose

también la formación de jarositas (EPS) cuando el pH es menor a 2, que dificultan la oxidación de los sulfuros. Por lo tanto, el pH de 2.081 es coincidente con el óptimo encontrado por estos investigadores.

- d) Determinación de los niveles óptimos de temperatura, tamaño de partícula y pH de solución ácida para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas por gravedad con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio.

La función deseabilidad (FD) de Design Expert V.13, fue utilizada para que, en base a los datos obtenidos del experimento, se obtenga los parámetros optimizados para los factores Temperatura (A), tamaño de partícula P80 (B) y pH (C), cuando se maximizó la temperatura (A) para obtener una máxima recuperación de cobre (Y1) en el proceso de biolixiviación en columnas usando un consorcio bacteriano compuesto por *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum*. Finalmente se obtuvo que la óptima recuperación de cobre será 5141,87 mg/L (FD=0,84), cuando la temperatura se iguala a 37,621 °C (FD= 0,781), el tamaño particular P80 igual a 5,24 mm (FD= 1,0) y un pH igual a 2,081 (FD= 1,0).

CONCLUSIONES

- Sí fue posible determinar los niveles óptimos de temperatura, tamaño de partícula y pH de la solución ácida para una máxima recuperación de cobre por biolixiviación empleando un consorcio microbiano biolixivante en columnas con calcopirita de la mina de Toquepala en condiciones de laboratorio empleando un consorcio microbiano biolixivante compuesto por *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum*
- Mediante los datos experimentales obtenidos a través del diseño experimental Box-Behnken, y haciendo uso de la Función Deseabilidad (FD) de análisis estadístico, se logró determinar el valor óptimo para la temperatura que fue de 37,621 °C cuando se elige maximizar la temperatura y la recuperación de cobre en columnas de biolixiviación, usando un consorcio bacteriano compuesto por *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum* que actuó sobre el mineral calcopirita proveniente de la mina de Toquepala.
- Se logró determinar el tamaño óptimo de partícula P80, cuyo valor calculado mediante la función deseabilidad (FD) fue de 5,240 mm, para la biolixiviación bacteriana del mineral calcopirita proveniente de la mina de

Toquepala. Se trabajó con tres tamaños de partículas P80: 8,30 mm, 6,77 mm y 5,24 mm.

- Se determinó que el factor pH para una óptima recuperación de cobre en condiciones de laboratorio, que fue de 2,081; para cuando se maximiza la temperatura y se maximiza la recuperación de cobre, utilizando la Función deseabilidad (FD) como método de optimización numérica. Se consideraron los datos experimentales obtenidos en cada una de las columnas de biolixiviación a nivel de laboratorio.
- Los valores máximos y mínimos reportados para la recuperación de cobre fueron: 5 088,8 mg/L y 2 967,8 mg/L. Para población de masa bacteriana fue: 1,06E+09 Cel/ mL y 3,75E+08 Cel/mL. Para potencial redox fue: 609.14 mV y 541,86 mV. Para Hierro total fue: 1 900 mg/mL y 590 g/L. Para conductividad eléctrica fue: 36,64 mS/cm y 19,65 mS/cm. Valores logrados en condiciones de laboratorio para el proceso de biolixiviación de mineral calcopirita proveniente de la mina de Toquepala. Con temperaturas de 22°C; 32°C y 42°C. Tamaño particular P80 de 5,24 mm; 6,77mm, 8,30 mm y pH de 1,6; 2,2 y 2,8.

RECOMENDACIONES

- Se sugiere ampliar el estudio a otras condiciones operativas, como la concentración de microorganismos y el tiempo de lixiviación, para mejorar aún más la eficiencia del proceso.
- Implementar un control en tiempo real de variables como potencial redox, biomasa y conductividad, para evaluar su influencia en la recuperación de cobre y mejorar la precisión de los resultados.
- Incluir un análisis de costos operativos y reducción de impacto ambiental en comparación con otros métodos de extracción de cobre, como la pirometalurgia.
- Explorar la inclusión de otros microorganismos biohidrometalúrgicos, como *Sulfobacillus* y *Ferroplasma*, que podrían mejorar la eficiencia del proceso.
- Investigar posibles aplicaciones o tratamientos para los residuos generados, como la recuperación de otros metales valiosos presentes en la calcopirita.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acebedo, F., & Gentina, J. (2005). *Fundamentos y Perspectivas de las tecnología Biomineras*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Chile: Edición universitaria de Valparaíso.
- Ahmadi, A., Schaffie, M., Manafi, Z., & Ranjbar, M. (2010). Electrochemical bioleaching of high grade chalcopyrite flotation concentrates in a stirred biorreactor. *Hydrometallurgy*, 104(1), 99-105. doi:<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.05.001>
- Alafara, A. B., Kuranga, I. A., Folahan, A. A., Malay, K. G., Olushola, S. A., Rafiu, B. B., . . . Sangita, R. P. (2012). A Review on Novel Techniques for Chalcopyrite Ore Processing. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, 1(1), 1-16. doi:10.5923/j.mining.20120101.01
- Álvarez, M. (2012). *LIXIVIACIÓN ÁCIDA NO-OXIDATIVA DE CALCOPIRITA A 70°C*. Santiago de Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/111464>
- Arnáiz, C., Isac, L., & Lebrato, J. (2000). *Determinación de la biomasa en procesos biológicos*. España: Sevilla.
- Arteaga, R., & Otiniano, G. (2021). *Influencia de la temperatura y pH en el porcentaje de recuperación de cobre en la biolixiviación de un concentrado de calcopirita utilizando Sulfobacillus acidophilus*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo.
- Arumí, R. (2020). *TUS AMIGOS Y VECINOS LOS MICROBIOS*. Obtenido de Microbiología para humanos: <https://microbiologiaparahumanos.wordpress.com/>

- Ballester, A. (2005). Mecanismos de biolixiviación. (E. Valparaíso, Ed.) *En F. Acevedo & J. C. Gentina (Eds.), Fundamentos y perspectivas de las tecnologías biomineras*, 25-43.
- Bevilaqua, D. L. (2013). Effect of NaCl on the bioleaching of a chalcopyrite. *Hydrometallurgy*, 138, 1-13. doi:<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.06.008>
- Bosecker, K. (1997). Biolixiviación: solubilización de metales por microorganismos. *Fems Microbiology Reviews*, Volumen 20, 591-604. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.1997.tb00340.x>
- Bravo, S. (2016). *Biolixiviación de calcopirita por sulfobacillus acidophilus*. Chile: Universidad de Chile.
- Brierley, C., & Brierley, J. (2001). Present and future commercial applications of biohydrometallurgy. *Hidrometalurgia*, 59(2-3), 233-239. doi:[https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00162-6](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00162-6)
- Brierley, J. (2008). "2000 Wadsworth award lecture: Expanding role of microbiology in metallurgical processes". *Mining Engineering*, 52: 49-53.
- Burkin, A. (2001). *Chemical Hydrometallurgy: Theory and Principles*. Londres: Imperial College Press.
- Chen, W., Yin, S., Wu, A., Wang, L., & Chen, X. (2019). Bioleaching of copper sulfides using mixed microorganisms and its community structure succession in the presence of seawater. *Elsevier*, 1-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122453>
- Cochilco. (2009). *Biolixiviación: Desarrollo actual y sus expectativas*. Comisión Chilena de Cobre, Chile.

- Cochilco. (2017). *Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades*. Ministerio de Minería Chile. Santiago de Chile: Comisión Chilena del Cobre.
- Codelco. (2018). *Codelco Educa*. Obtenido de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/biolixiviacion.html>
- Córdoba, E., Muñoz, J., Blázquez, M., González, F., & Ballester, A. (2008). Leaching of chalcopyrite with ferric ion. Part II: Effect of redox potential. *Hydrometallurgy*, 93, 88–96. doi:<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.04.016>
- Davis, D., Parsek, M., Pearson, J., Iglewski, B., Costerton, J., & Greenberg, E. (1998). The Involvement of Cell-to-Cell Signals in the Development of a Bacterial Biofilm. *Science*, 295-298. doi:DOI: 10.1126/science.280.5361.295
- De Barros, R., Gomes, S., Silva, G., Cesario, I., & Gonzada, L. (2012). Artículo: BIOLEACHING OF COPPER SULPHIDE FLOTATION CONCENTRATE IN BATCH REACTION SYSTEM USING MESOPHILE AND THERMOPHILE MICROORGANISMS. *Universidad Nacional de Colombia*, 79(171), 23-31. Obtenido de https://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532012000200015&tlng=en
- De Lorenzo, V. (2020). UNA NUEVA METODOLOGÍA PERMITE LA CARACTERIZACIÓN DE CONSORCIOS BACTERIANOS. *CSIC*, 1-3. doi:DOI: 10.1016/j.watres.2020.116468
- Delgado, S. (2015). “Efecto de la temperatura en el crecimiento microbiano y la biolixiviación sobre la calcopirita por un cultivo”. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.

- Dennis, R. (2016). *BIOLIXIVIACIÓN DE COBRE POR BACTERIAS FERROOXIDANTES A PARTIR DE CALCOPIRITA EN UN SISTEMA DE COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN POR GRAVEDAD*. Arequipa-Perú: Universidad Nacional San Agustín.
- Derringer, G. C., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214-219. doi:<https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
- Donoso, M. J. (2013). The copper market worldwide: trends, risks, characteristics and potential future growth. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, pp. 248-261. doi:[dx.doi.org/10.4067/S0718-33052013000200008](https://doi.org/10.4067/S0718-33052013000200008)
- Eyzaguirre, P. (2015). “*Influencia de la Concentración de Cobre en la Biolixiviación del Fierro y en el Crecimiento Celular de un Cultivo Microbiano Biolixivante de Cobre*”. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna.
- Filtec. (2022). *Filtec*. Obtenido de EQUIVALENCIAS ENTRE LAS PRINCIPALES MANERAS DE MEDIR CANALIZACIONES, NPS, DN: https://www.depuradoras.es/blog/169_equivalencias-entre-las-principales-maneras-de-medir-canalizaciones-nps-dn
- Galleguillos, P., Romensellez, F., Galleguillos, F., Guiliani, N., Castillo, D., & Demergasso, C. (2008). Identification of differentially expressed genes in an industrial bioleaching heap processing low-grade copper sulphide ore elucidated by RNA arbitrarily primed polymerase chain reaction. *Hydrometallurgy*, 94, 148–154. doi:<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.031>

- Geologyscience. (17 de Agosto de 2023). *Minerales de cobre más comunes*.
Obtenido de <https://es.geologyscience.com/minerales/minerales-de-cobre-mas-comunes/>
- Ghorbani, Y., Petersen, J., Becker, M., Mainza, A., & Franzidis, J. (2013). Investigation and modelling of the progression of zinc leaching from large sphalerite. *Hydrometallurgy*, 131-132, 8-23.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.10.004>
- Gomez, E. (1999). Biolixiviación. *Revista Biológica Vol. 13*.
- Gutierrez, P. H., & De La Vara, S. R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. (S. d. Interamericana editores, Ed.) Mexico D.F., Mexico: Mc Graw Hill.
- Hao, X., Liu, X., Liang, Y., Qiu, G., & Ma, H. (2020). Responses of bacterial community to potential heap construction methods of fine-grained copper tailings in column bioleaching system. *ScienceDirect*.
doi:[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65617-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65617-0)
- Harrinton, E. C. (1965). The desirability function. *Industrial Quality Control*(21), 494-498.
- Hiroyoshi, N., Miki, H., Hirajima, T., & Tsunekawa, M. (2001). Enhancement of chalcopyrite leaching by ferrous ions in acidic ferric sulfate solutions. *Hydrometallurgy*, 60:185-197. doi:[https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00155-9](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00155-9)
- Hong, M., Huang, X., Gan, X., Qiu, G., & Wang, J. (2021). The use of pyrite to control redox potential to enhance chalcopyrite bioleaching in the presence of *Leptospirillum ferriphilum*. *Minerals Engineering*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107145>

- Jimenez, A., Alfaro, E., Hernández, A., & García, V. (2021). Una metapoblación autóctona de *Acidithiobacillus ferrooxidans* explotada para la biooxidación de pirita en dos etapas mejora la liberación de partículas Au/Ag de los desechos mineros. *UASLP Unidad de Posgrado e Investigación*. doi:<https://doi.org/10.3390/mining1030021>
- Johnson, & Hallberg. (2023). "The microbiology of acidic mine waters.". *Research in Microbiology*, 154(7), 466-473.
- Johson, B., & Ginnes, S. M. (1991). Ferric iron reduction by acidophilic heterotrophic bacteria. *Appl. Environn. Microbiol*, 57,207-211.
- Jones, R. (2006). *Electronic structures of the sulfide minerals sphalerite, wurtzite, pyrite, marcasite and chalcopyrite*. University of South Australia: [PhD thesis] .
- Kalbe, U., Bandow, N., Bredow, A., Mathies, H., & Piechotta, C. (2014). Column leaching tests on soils containing less investigated organic pollutants. *Journal of Geochemical Exploration, Volume 147, Part B*, Pages 291-297. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.06.014>
- Kennedy, C., & Gewin, L. (1997). Soil microbial diversity: present and future considerations. *Soil Science*, 162,9,607-612.
- Khoshkhoo, M. (2016). *Chalcopyrite (Bio)leaching in Sulphate Solutions*. Canadá: Luleå University of Technology.
- Klauber, C. (2008). A critical review of the surface chemistry of acidic ferric sulphate dissolution of chalcopyrite with regards to hindered dissolution. *Int. J. Miner.*, 86 (1-4), 1-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.09.003>

- López, T., Dominguez, L., & García, J. (2007). Arreglo estructural de un consorcio microbiano de interés alimentario en la producción del vinagre. *Congreso Nacional de Microscopía*, Mexico.
- Martínez, M. (2012). *Calibración, validación y aplicación del modelo heapsim para estimar la producción de cobre de los bronce y Collahuasi. Tesis para optar el título de ingeniero civil*. Chile.: Universidad de Chile.
- Microbiología. (2014). *Microbiología*. Obtenido de La Microbiología, es el estudio de los organismos microscópicos, deriva de 3 palabras griegas: mikros (pequeño), bios (vida) y logos (ciencia) que conjuntamente significan el estudio de la vida microscópica: <https://microbiologia3bequipo5.blogspot.com/2014/10/curva-del-crecimiento.html>
- Minitab. (5 de junio de 2022). *Soporte Minitab 18*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/response-surface-central-composite-and-box-behnken-designs/>
- Misari, F. (2016). *Biolixiviación*. Lima Perú: Osinerming.
- Misari, F. (2016). *Biolixiviación*. Lima-Perú: Osinerming.
- Monroy, M., Galvan, R., & Lazaro, I. (2003). *Biolixiviación de Concentrados de Calcopirita por Bacterias Termófilas Extremas: Productos y Procesos Implicados*. Mexico: Tesis de Grado. Universidad Federal de Mexico.
- Moreno, J., Medina, C., & Albarracín, V. (2012). Aspectos ecológicos y metodológicos del muestreo, identificación y cuantificación de cianobacterias y microalgas eucariotas. *Reduca (Biología). Serie Microbiología.* , 117-118.

- Ochoa, D., & Montoya, A. (2010). UNA METÁFORA BIOLÓGICA APLICADA A LA ASOCIATIVIDAD EMPRESARIAL EN CADENAS PRODUCTIVAS AGROPECUARIAS. *rev.fac.cienc.econ*, 55-73. doi:<http://www.scielo.org.co/pdf/rfce/v18n2/v18n2a04.pdf>
- Pairazamán, O., Neciosup, J., Valdez, Y., Veliz, F., Barrios, P., Araya, C., . . . Esparza, M. (2019). *Extreme resistance to copper by a microbial consortium formed from Sulfobacillus spp., and Acidithiobacillus ferrooxidans*. Cajamarca-Perú: Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ciencias de la Salud.
- Rawling, D. (1999). *Biomining: Theory, microbes, and industrial processes*. USA: Springer.
- Rivera, R., Camejo, P., Moyar, F., López-Méndez, J., & Munguía-Bravo, M. (2011). ESTUDIO DE BIOLIXIVIACIÓN DE UN MINERAL DE SULFUROS DE COBRE DE BAJA LEY CON BACTERIAS Tio- Y Ferroxidantes EN CONDICIONES TERMÓFILAS. *Universidad Nacional Autónoma de México*. doi:<http://dx.doi.org/10.21704/rea.v18i1.1310>
- Rodríguez, C., Chuk, O., Berteri, R., & Trigo, P. (2017). Medición del Tamaño de Partículas de Minerales Mediante. *Instituto de Investigaciones Mineras. Facultad de Ingeniería.*, 409-410.
- Rodríguez, Y. M. (2001). La Biolixiviación al Comienzo del Siglo XXI. *Revista de Metalurgia*, 1-2. doi: 10.3989/revmetalm
- Rohwerder, T., Gehrke, T., Kinzler, K., & Sand, W. (2003). Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63.

- Saavedra, A. (2018). “*Solubilización del zinc a partir de! mineral esfalerita del Yacimiento minero “María Grimesa” por lixiviación microbiana con cepas nativas*”. Tacna: Tesis de grado. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Sánchez, J. (2012). *Laboratorio I. Determinación de Biomasa*. Perú: Universidad Nacional de Trujillo- Ciencias agropecuarias.
- Sand, W., Rohde, K., & Sobotke, B. (1992). Evaluation of *Leptospirillum ferrooxidans* for Leaching. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, Vol. 58 No1 85.
- Schippers, A., & Sand, W. (1999). Biological and Chemical Mechanisms of Mineral Oxidation by Leaching Bacteria. *Hydrometallurgy*, 59(2-3), 85-101.
- Schippers, A., Hedrich, S., Vasters, J., Drobe, M., Sand, W., & Willscher, S. (2013). Biomining: Metal Recovery from Ores with Microorganisms. *Geobiotechnology*, 1-47.
- Semat, H., & Katz, R. (1958). Physics, Chapter 28: Electrical Conduction in Liquids and Solids. *University of Nebraska - Lincoln*, 1-16. doi:<https://digitalcommons.unl.edu/physicskatz>
- Soto, R. (2018). *Lixiviación de sulfuros de cobre de baja ley pretratados con NaCl-H₂SO₄ junto con NaNO₃ o Fe(NO₃)₃, en medio sulfato-cloruro*. Valparaíso : Universidad técnica federico santa maría .
- Srichandam, H., Mohapatra, R., Singh, P., Mishra, S., Parhi, P., & Naik, K. (2020). Column bioleaching applications, process development, mechanism, parametric effect and modelling: A review. *Journal of Industrial and*

Engineering Chemistry, Volume 90, 1-16.
doi:https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.07.012

Stat-Ease Inc. (2025). *Design Expert v.23.1*. Minnesota,USA: Estat Ease.

Suzuki, I., Lee, D., MacKay, B., Harahuc, L., & Key Oh, J. (1999). “Effect of Various Ions, pH and Osmotic Pressure on Oxidation of Elemental Sulfur by *Thiobacillus thiooxidans*”. *Applied and environmental microbiology*, 5163-5168.

Tekere, M. (2019). Microbial Bioremediation and Different Bioreactors Designs Applied. *Biotechnology and Bioengineering*, 11-19. doi:DOI: 10.5772/intechopen.83661

Tributsh, H. (2001). Direct versus Indirect Bioleaching. *Hydrometallurgy*, 59(2-3), 177-185.

Valdés, J., Pedroso, I., Quatrini, R., Dodson, R., Tettelin, H., Blake, R., . . . Holmes, D. (2008). Metabolismo de *Acidithiobacillus ferrooxidans* : de la secuenciación del genoma a las aplicaciones industriales. *Genómica BMC*, 1-24.

Watling, H. (2006). a biolixiviación de minerales sulfurados con énfasis en sulfuros de cobre: una revisión. *Hidrometalurgia*, 84(1-2), 81-108.

Watling, H. R., Johnson, J. J., Shiers, D. W., Gibson, J. A., Nichols, P. D., & Plumb, J. J. (2020). Effect of temperature and inoculation strategy on Cu recovery and microbial activity in column bioleaching. *Hydrometallurgy*, 1-30. doi:doi: 10.1016/j.hydromet.2016.05.017

Xia, J., Song, J., Liu, H., Nie, Z., Shen, L., Yuan, P., . . . Zhao, Y. (2018). Study on catalytic mechanism of silver ions in bioleaching of chalcopyrite by SR-

- XRD and XANES. *Hydrometallurgy*, 180,20-35.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.07.008>
- Xia, J., Yang, Y., He, H., Liang, C., Zhao, X., Zheng, L., . . . Qiu, G. (2010). Investigation of the sulfur speciation during chalcopyrite leaching by moderate thermophile *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*. *International Journal of Mineral Processing*, 94:52-57.
- Xiaodi, F., Shuiyu, S., Xiaojian, L., Shoupeng, L., Zhou, S., Gan, Q., . . . Guan, Z. (2021). Effect of diurnal temperature range on bioleaching of sulfide ore by an artificial microbial consortium. *Science of The Total Environment, Volumen 806, Part1*, 45-48.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150234>
- Y. Yang, D. M. (2013). Column bioleaching of low-grade copper ore by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in pure and mixed cultures with a heterotrophic acidophile *Acidiphilium* sp. *EEUU*, 93-98.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.09.003>
- Yin, W., & Chen, K. (2020). Effect of the particle size and microstructure characteristics of the sample from HPGR on column bioleaching of agglomerated copper ore. *Hydrometallurgy*, 1-7.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105563>
- Zea, E. (2023). *Evaluación de la capacidad biolixibiente de cultivos microbianos puros y en consorcio sobre a calcopirita*. Tacna-Perú: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Zea, F. E. (2023). *Evaluación de la capacidad biolixibiente de cultivos microbianos puros y en consorcio sobre a calcopirita*. Tacna-Perú: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

- Zepeda, V. (2018). *Biolixiviación de minerales sulfurados de cobre de baja ley*. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, España, Madrid.
- Zhao, H., Wang, J., Yang, C., Hu, M., Gan, X., Tao, L., . . . Qiu, G. (2014). Effect of redox potential on bioleaching of chalcopyrite by moderately thermophilic bacteria: An emphasis on solution compositions. *Hydrometallurgy*. doi:doi: 10.1016/j.hydromet.2014.11.009
- Zhao, H., Zhang, Y., Zhang, X., Qian, L., Sun, M., Yang, Y., . . . Qiu, G. (2019). The dissolution and passivation mechanism of chalcopyrite in bioleaching: An overview. *Minerals Engineering*, Volume 136, Pages 140-154. doi:doi.org/10.1016/j.mineng.2019.03.014
- Zhao-jing, Y., Run-lan, Y., A-juan , L., Jing, L., Wei-min, Z., Xue-duan, L., & Guan-zhou, Q. (2016). Effect of pH values on extracellular protein and polysaccharide secretions of *Acidithiobacillus ferrooxidans* during chalcopyrite bioleaching. *ELSEVIER*, 406-408. doi:https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60046-3

ANEXOS

ANEXO 1

Cálculos matemáticos de la lixiviación

ANEXO 1A Determinación del consumo de ácido (H_2SO_4) para la calcopirita (CuFeS_2)

Este test es importante para determinar el consumo de ácido total que se usará durante todo el proceso de lixiviación. A continuación, se muestra el procedimiento:

Procedimiento para la determinación de consumo

- 1) Triturar y moler 200 g del mineral pasado por malla # 200. Además, previamente se preparó soluciones hidróxido de sodio (NaOH) de 1N, 0,1 N y 0,001N que se valoraron con ácido clorhídrico (HCl) 1N y fenolftaleína 5% y se estandarizó con carbonato de sodio (Na_2CO_3) 1N.
- 2) Se tomó 100 g del mineral anterior #200 y se colocó en un vaso de precipitado de 400mL + una solución de 14 mL de H_2SO_4 diluido en 150 mL de agua destilada.
- 3) Posteriormente el vaso de precipitado con el mineral y la dilución ácida fue llevado a un agitador magnético modelo a 360 rpm por 24 h a temperatura ambiente.
- 4) Se filtró el mineral, transcurridas las 24h, con papel filtro y se tomó 5mL de la solución filtrada + 10 mL de agua destilada en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- 5) Finalmente se valoró con el NaOH de 1N y naranja de metilo 0,5% y por triplicado.

Cálculos

Las fórmulas para el consumo de ácido del mineral:

$$[H_2SO_4]_{gpl} = \frac{V_{gastado} (mL) \times Normalidad \text{ g/(L x eq-g)} \times N^{\circ} eq-g}{V_{muestra}(ml)}$$

$$N^{\circ} eq-g = \frac{PM_{H_2SO_4}}{P.E.H_2SO_4}$$

$$Consumo \text{ de } H_2SO_4 = H_2SO_4 (Inicial) - H_2SO_4 (Final)$$

Datos

- Peso del mineral #200 de calcopirita: 100 g
- Densidad del ácido H₂SO₄ y pureza: 1,83 g/mL
- Pureza del ácido: 98%
- Concentración [H⁺] = 100 g/L
- Volumen de dilución tomado: 250 mL

Dilución del ácido y cuanto ácido tomar

Para una solución de H₂SO₄ de concentración [H⁺] de 100 g/L en un volumen de 250 mL se debe emplear el siguiente volumen de ácido.

$$H^+ = 100 \frac{g}{L} \times 0,250L$$

$$H^+ = 25 \text{ g de } H_2SO_4$$

Luego para hallar el volumen de ácido sulfúrico que se empleará:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

$$V = \frac{M}{D}$$

$$V = \frac{25 \text{ g de H}_2\text{SO}_4}{1,83 \text{ g / mL}} = 13,66 \text{ mL}$$

Volumen real

Volumen real a tomar para la prueba de consumo

$$\text{Volumen real} = \frac{13,66 \text{ mL}}{\text{pureza del ácido}}$$

$$\text{Volumen real} = \frac{13,66 \text{ mL}}{98\%}$$

$$\text{Volumen real} = \frac{13,66 \text{ mL}}{0,98} = 13,93 \text{ mL} \sim 14 \text{ mL}$$

Peso del ácido H₂SO₄

Volumen de ácido H₂SO₄ tomado: 14 mL

$$\text{Densidad: } D = \frac{m}{V}; \text{ Masa: } m = D \times V$$

$$\text{Masa: } m = 1,83 \text{ g / mL} \times 14 \text{ mL} = 25,62 \text{ g}$$

Valoración del 1L de NaOH 1N con HCl 0,1N

- Volumen de NaOH tomado: 3mL

-Volumen gastado del ácido: 33mL

- Normalidad real del HCl: 0,116N

Luego, $N_1 \times V_1 = N_2 \times V_2$

$$N_1 (\text{NaOH}) \times 3\text{mL} = 0,116\text{N HCl} \times 33\text{mL}$$

$$N_1 (\text{NaOH}) = \frac{0,116\text{N HCl} \times 33\text{mL}}{3\text{mL}} = 1,276\text{N}$$

Factor de corrección del NaOH 1N

$$\text{Factor de corrección} = \frac{\text{Concentración esperada}}{\text{Concentración real}}$$

$$\text{Factor de corrección} = \frac{1\text{N}}{1,276\text{N}} = 0,784$$

Hallamos el ácido libre

Para esto se toma 5 mL del filtrado del vaso con el mineral (el que fue agitada con la solución de ácido sulfúrico) y se valora con el NaOH 1N. Con todos estos datos hallamos el ácido libre.

Datos:

- Gasto del NaOH con la solución filtrada: 10,5 mL
- Alícuota de la solución filtrada: 5mL

$$[H_2SO_4]_{gpl} = \frac{V_{gastado} (mL) \times Normalidad \text{ g/(Lxeq-g)} \times N^{\circ} eq - g}{V_{muestra}(ml)}$$

$$N^{\circ} eq - g = \frac{PM H_2SO_4}{P.E.H_2SO_4}$$

Luego,

$$N^{\circ} eq - g = \frac{98,079 \text{ g / mol}}{2} = 49,039 \text{ g / mol}$$

Para hallar el consumo real de ácido:

$$Consumo \text{ de } H_2SO_4 = H_2SO_4(\text{Inicial}) - H_2SO_4(\text{Final})$$

Para el consumo inicial:

$$[H_2SO_4]_{gpl} = \frac{10,5 \text{ ml} \times 1,276N \times 49,039 \text{ g / eq - g}}{5 \text{ mL}} = 131,404 \text{ g / L}$$

Para el consumo final:

$$[H_2SO_4]_{gpl} = \frac{15,5mL \times 1,276N \times 49,039 \text{ g / mol}}{10 \text{ mL}} = 96,989 \text{ g / L}$$

Luego,

$$Consumo \text{ de } H_2SO_4 = 131,404 \text{ g / L} - 96,989 \text{ g / L} = 34,415 \text{ g / L}$$

Hallamos lo kg/tn de consumo de H₂SO₄

$$34,415 \frac{\text{g}H_2SO_4}{L} \times 0,250L = 8,604 \text{ g}H_2SO_4$$

$$8,604 \text{ g}H_2SO_4 \times \frac{1}{100 \text{ g } CuFeS_2} \times \frac{1 \text{ kg}H_2SO_4}{1000 \text{ g}H_2SO_4} \times \frac{1000 \text{ 000 g } CuFeS}{t \text{ CuFeS}} = \frac{86,04 \text{ kg } H_2SO_4}{t \text{ CuFeS}}$$

Calculamos la cantidad de ácido para 73 kg de mineral

$$\frac{86,04kg}{t} \frac{H_2SO_4}{CuFeS} \times 0,073 tCuFeS = 6,28kgH_2SO_4$$

Para conocer los litros necesarios, usamos la densidad del ácido sulfúrico 1,83 g/mL

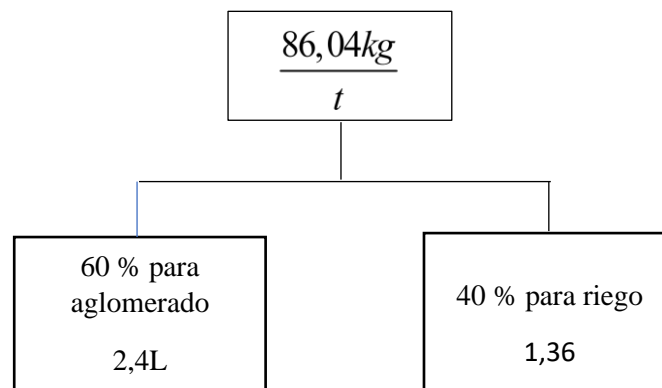
$$D = \frac{m}{V} \Rightarrow V = \frac{m}{D}$$
$$V = \frac{m}{D} = \frac{6,28kgH_2SO_4}{1,83kg/L} = 3,4L H_2SO_4$$

Por lo que se concluye que se necesitarán 3,4 L de ácido para 73 kg de mineral

Distribución del H₂SO₄ para el riego y el aglomerado

Se requiere aproximadamente 3,4 L de ácido. En cuanto a la distribución de uso:

60% del ácido para el aglomerado 40% restante para el riego por lo que:



Por motivos de demoras y problemas con la adquisición se optó finalmente por trabajar con la mitad del ácido requerido, es decir 1,7 L, quedando el aglomerado en 1,4 L y el riego con 0,68 L

ANEXO 1B Determinación de la humedad y densidad del mineral

La humedad del mineral se determinó junto a la prueba de consumo, el

Procedimiento para la determinación de la humedad

- 1) Se tomó una cantidad conocida de los 200g de mineral molido y pasado por mall #200
- 2) Se pesó el mineral en una placa petri, se anotó el peso de ambos
- 3) Luego se llevó la placa la estufa a 100 °C durante 24h
- 4) Al día siguiente se sacó la placa Petri de la estufa y se colocó cuidadosamente en un desecador con drierita.
- 5) Finalmente se pesó la placa Petri con el mineral y se anotó el peso

Cálculos

La fórmula para la humedad:

$$\% Humedad = \left(\frac{P_{humedo} muestra - P_{seco} muestra}{P_{seco} muestra} \right) \times 100$$

Datos:

- Peso de la placa Petri vacía: 65,77 g
- Peso de la placa con el mineral húmedo: 165,80 g
- Peso de la placa con el mineral seco: 159,96 g

Peso real húmedo: $165,80g - 65,77g = 100,03g$

Peso real seco: $159,96 - 65,77g = 94,77g$

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{P_{\text{humedo}} \text{ muestra} - P_{\text{seco}} \text{ muestra}}{P_{\text{humedo}} \text{ muestra}} \right) \times 100$$

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{100,03 \text{ g} - 94,77 \text{ g}}{100,03 \text{ g}} \right) \times 100$$

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{5,26 \text{ g}}{100,03 \text{ g}} \right) \times 100$$

$$\% \text{ Humedad} = (0,0525 \text{ g}) \times 100 = 5,25\%$$

Procedimiento para la determinación de la densidad

- 1) Se tomo el peso de una de las rocas de calcopirita y se anotó
- 2) Se tomó un volumen conocido en una probeta y se agregó l roca de calcopirita y se anotó el incremento del volumen
- 3) Finalmente se calculó la densidad

Cálculos

La fórmula para la humedad:

$$\text{Densidad} = \left(\frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} \right)$$

Datos:

- Peso de la roca de calcopirita: 9,45 g
- Volumen desplazado: 2,25 mL

$$\text{Densidad} = \left(\frac{9,45 \text{ ml}}{2,25 \text{ ml}} \right) = 4,2 \text{ g} / \text{mL}$$

ANEXO 1C Análisis granulométrico del mineral y armado de los tres P80

Se realizó inicialmente un análisis granulométrico del mineral recepcionado (73 Kg aproximadamente) mediante el tamizado de la muestra. La tabla X muestra los datos obtenidos.

Tabla 1C

Análisis granulométrico del mineral calcopirita

Nº	Malla #	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Peso retenido
1	5/8	16	1,190	1,63
2	1/2	12,7	2,430	3,32
3	3/8	9,51	9,250	12,65
4	1/4	6,35	16,695	22,84
5	6	3,36	16,140	22,08
6	10	2,0	6,855	9,38
7	50	0,297	11,885	16,26
8	100	0,149	1,625	2,22
9	200	0,074	2,145	2,93
10	400	0,037	3,570	4,88
11	-400	Ciego	1,310	1,79

Nota. Elaboración propia.

Posteriormente se halló su P80 mediante el método Rosin-Ramler el cual conta de la siguiente ecuación:

$$F = 100 - 100e^{-\left(\frac{d}{b}\right)^n} \quad ()$$

Para poder emplearla para hallar d se debe despejar de la siguiente manera:

$$100 - F = -100e^{-\left(\frac{d}{b}\right)^n}$$

$$\frac{100-F}{100} = e^{-\left(\frac{d}{b}\right)^n} \Rightarrow \ln\left(\frac{100-F}{100}\right) = -\left(\frac{d}{b}\right)^n \Rightarrow -\ln\left(\frac{100-F}{100}\right) = \left(\frac{d}{b}\right)^n$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{100-F}{100}\right)^{-1} = \left(\frac{d}{b}\right)^n \Rightarrow \ln\left(\frac{100}{100-F}\right) = \left(\frac{d}{b}\right)^n$$

$$\Rightarrow \ln\left[\ln\left(\frac{100}{100-F}\right)\right] = \ln\left(\frac{d}{b}\right)^n \Rightarrow \ln\left[\ln\left(\frac{100}{100-F}\right)\right] = n \ln\left(\frac{d}{b}\right)$$

$$\Rightarrow \ln\left[\ln\left(\frac{100}{100-F}\right)\right] = n \ln(d) - n \ln(b)$$

Luego se observa que:

$$\ln\left[\ln\left(\frac{100}{100-F}\right)\right] = n \ln(d) - n \ln(b)$$

$$Y = mX + c$$

Donde:

$$Y = \ln\left[\ln\left(\frac{100}{100-F}\right)\right]; \quad X = \ln(d)$$

$$m = n \quad ; \quad c = -n \ln(b)$$

De aquí se puede desprender que b es:

$$-n \ln(b) = c \Rightarrow n \ln(b) = -c$$

$$\Rightarrow \ln(b) = \frac{-c}{n} \Rightarrow b = e^{\frac{-c}{n}}$$

Luego, reemplazando lo anterior en la ecuación de Rosin-Ramler

$$F = 100 - 100e^{-\left(\frac{d}{e^n}\right)^n}$$

y reemplazando F por 80:

$$80 = 100 - 100e^{-\left(\frac{d}{e^n}\right)^n}$$

Despejamos d:

$$80 - 100 = -100e^{-\left(\frac{d}{e^n}\right)^n} \Rightarrow -20 = -100e^{-\left(\frac{d}{e^n}\right)^n}$$

$$-\frac{20}{100} = e^{-\left(\frac{d}{e^n}\right)^n} \Rightarrow 0,2 = e^{-\left(\frac{d}{e^n}\right)^n} \Rightarrow \ln 0,2 = -\left(\frac{d}{e^n}\right)^n$$

$$\Rightarrow -1,609 = -\left(\frac{d}{e^n}\right)^n \Rightarrow 1,609 = \left(\frac{d}{e^n}\right)^n \Rightarrow \ln(1,609) = \ln\left(\frac{d}{e^n}\right)^n$$

$$\Rightarrow 0,476 = \ln\left(\frac{d}{e^n}\right)^n \Rightarrow 0,476 = n \ln\left(\frac{d}{e^n}\right) \Rightarrow \frac{0,476}{n} = \ln\left(\frac{d}{e^n}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{0,476}{n} = \ln(d) - \ln(e^n) \Rightarrow \ln(d) = \ln(e^n) + \frac{0,476}{n}$$

$$\Rightarrow d = e^{\left(\frac{\frac{c}{\ln(e^n)} + 0,476}{n} \right)}$$

Con estas ecuaciones despejadas y graficando los ejes X y Y que corresponden a:

$$Y = \ln \left[\ln \left(\frac{100}{100 - F} \right) \right] \text{ y}$$

$$X = \ln(d);$$

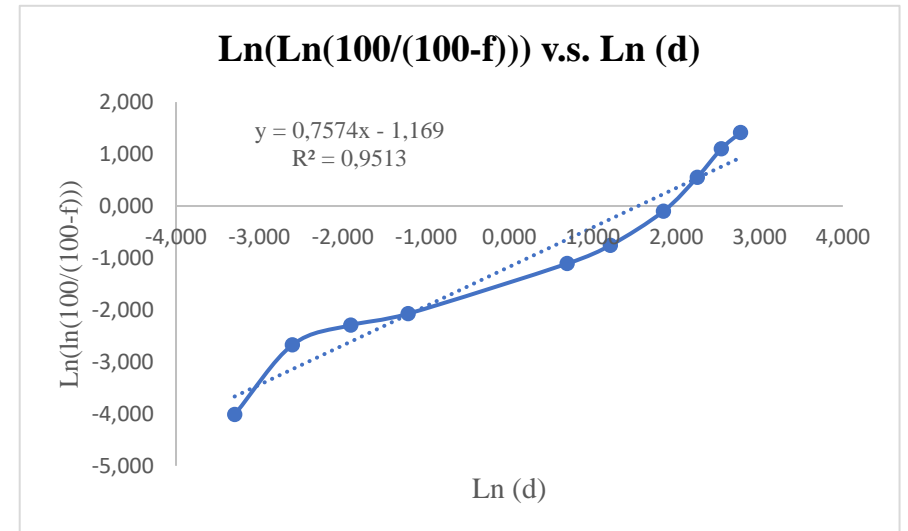
Es posible hallar el P80 (d) del mineral calcopirita inicial.

Una vez conseguido esto, se planeó los 3 posibles tamaños diferentes de P80 de acuerdo al diseño experimental (+1,0 y -1) que se armarían a partir del análisis granulométrico inicial; todo esto considerando la cantidad total del mineral y los pesos homogenizados de 4 kg de cada columna. A continuación, se muestran todos los cálculos efectuados.

✓ Análisis granulométrico del mineral calcopirita

P80 DEL MINERAL							EJE Y	EJE X
N	Malla #	Abertura mm	Masa g	% Masa retenida	% Acumulado retenido	% Acumulado Pasante	$\text{Ln}(\text{Ln}(100/(100-f)))$	$\text{ln}(d)$
1	5/8	16	1190,00	1,63	1,63	98,37	1,415	2,773
2	1/2	12,7	2430,00	3,32	4,95	95,05	1,100	2,542
3	3/8	9,51	9250,00	12,65	17,61	82,39	0,552	2,252
4	1/4	6,35	16695,00	22,84	40,45	59,55	-0,100	1,848
5	6	3,36	16140,00	22,08	62,53	37,47	-0,756	1,212
6	10	2	6855,00	9,38	71,91	28,09	-1,109	0,693
7	50	0,297	11885,00	16,26	88,17	11,83	-2,072	-1,214
8	100	0,149	1625,00	2,22	90,39	9,61	-2,292	-1,904
9	200	0,074	2145,00	2,93	93,32	6,68	-2,672	-2,604
10	400	0,037	3570,00	4,88	98,21	1,79	-4,013	-3,297
11	-	-	1310,00	1,79	100,00	0,00		
TOTAL			73095,00	100				

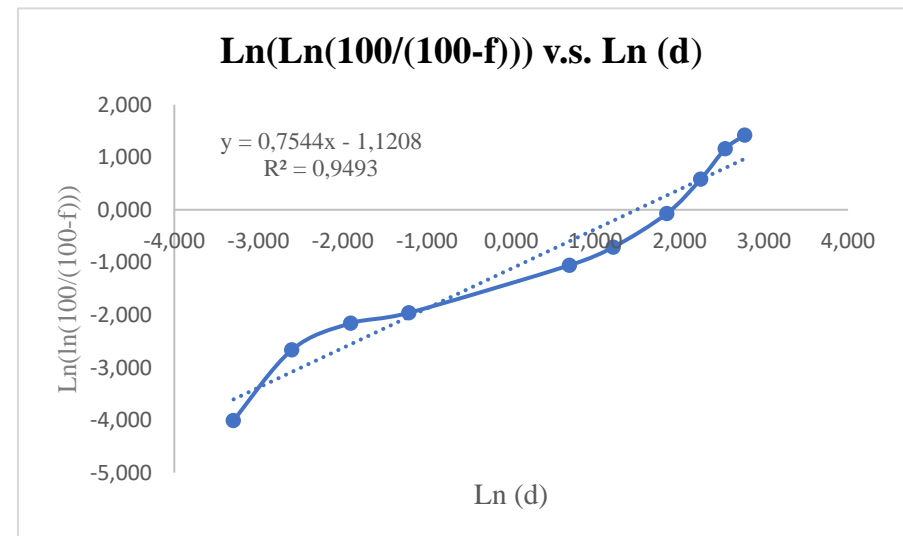
Pendiente m	0,7574
Intersección c	-1,1690
b	4,68
d	8,77
P80	80



✓ Distribución P80 8,30 para el tamaño mayor (+1)

p80 8,30							EJE Y	EJE X
N	Malla #	Abertura mm	Masa g	% Masa retenida	% Acumulado retenido	% Acumulado Pasante	$\text{Ln}(\text{Ln}(100/(100-f)))$	$\text{Ln}(d)$
1	5/8	16	64,12	1,603	1,603	98,397	1,419	2,773
2	1/2	12,7	100,98	2,525	4,128	95,873	1,159	2,542
3	3/8	9,51	500,19	12,505	16,632	83,368	0,584	2,252
4	1/4	6,35	910,60	22,765	39,397	60,603	-0,071	1,848
5	6	3,36	873,23	21,831	61,228	38,772	-0,712	1,212
6	10	2	375,13	9,378	70,606	29,394	-1,055	0,693
7	50	0,297	650,39	16,260	86,866	13,134	-1,960	-1,214
8	100	0,149	88,93	2,223	89,089	10,911	-2,158	-1,904
9	200	0,074	167,38	4,185	93,274	6,726	-2,665	-2,604
10	400	0,037	197,36	4,934	98,208	1,792	-4,013	-3,297
11	-	-	71,69	1,792	100,000	0,000		
TOTAL			4000,00	100				

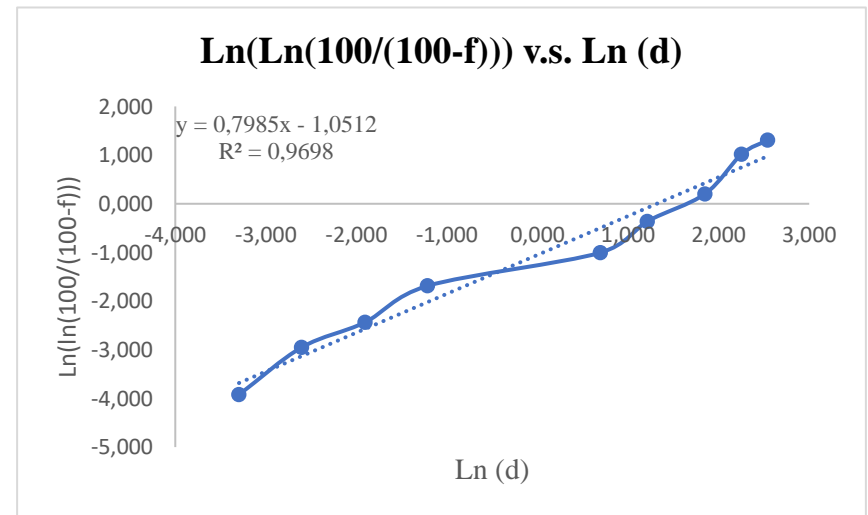
Pendiente m	0,7544
Intersección c	-1,1208
b	4,42
P80 (d)	8,30
%	80



✓ Distribución P80 6,77 para el tamaño intermedio (0)

P80 6,77							EJE Y	EJE X
N	Malla #	Abertura mm	Masa g	% Masa retenida	% Acumulado retenido	% Acumulado Pasante	$\text{Ln}(\ln(100/(100-f)))$	$\text{Ln}(d)$
1	1/2	12,7	98,58	2,46	2,465	97,536	1,309	2,542
2	3/8	9,51	154,57	3,86	6,329	93,671	1,015	2,252
3	1/4	6,35	923,73	23,09	29,422	70,578	0,202	1,848
4	6	3,36	816,95	20,42	49,846	50,154	-0,362	1,212
5	10	2	780,34	19,51	69,354	30,646	-1,005	0,693
6	50	0,297	550,15	13,75	83,108	16,892	-1,687	-1,214
7	100	0,149	340,40	8,51	91,618	8,382	-2,436	-1,904
8	200	0,074	131,31	3,28	94,901	5,099	-2,950	-2,604
9	400	0,037	125,60	3,14	98,041	1,959	-3,923	-3,297
10	-	-	78,37	1,96	100,000	0,000		
TOTAL			4000,00	100				

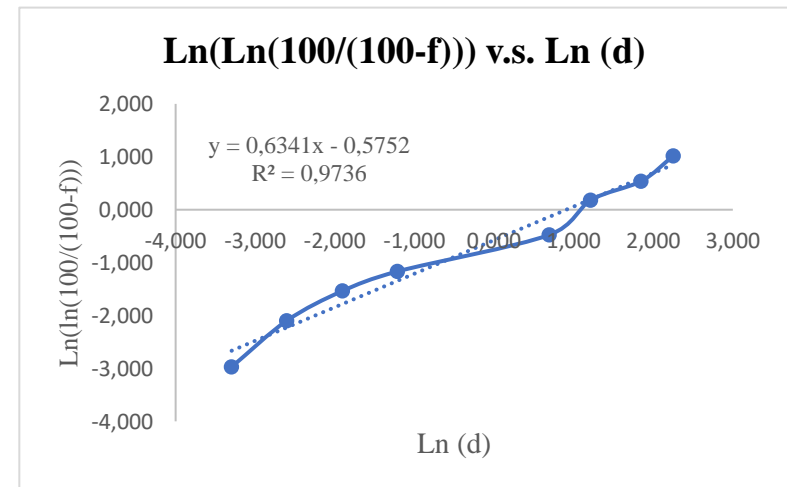
Pendiente m	0,7985
Intersección c	-1,0512
b	3,73
d	6,77
P80	80



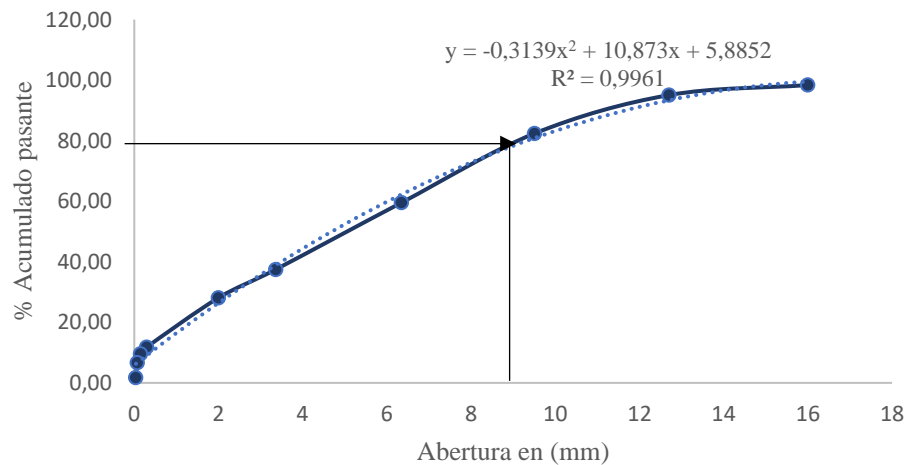
✓ Distribución P80 5,24 para el tamaño menor (-1)

P80 5,24							EJE Y	EJE X
N	Malla #	Abertura mm	Masa g	% Masa retenida	% Acumulado retenido	% Acumulado Pasante	$\text{Ln}(\text{Ln}(100/(100-f)))$	$\text{Ln}(d)$
1	3/8	9,51	252,18	6,305	6,305	93,696	1,017	2,252
2	1/4	6,35	466,02	11,651	17,955	82,045	0,541	1,848
3	6	3,36	490,95	12,274	30,229	69,771	0,179	1,212
4	10	2	940,52	23,513	53,742	46,258	-0,476	0,693
5	50	0,297	780,36	19,509	73,251	26,749	-1,167	-1,214
6	100	0,149	294,81	7,370	80,621	19,379	-1,535	-1,904
7	200	0,074	313,48	7,837	88,458	11,542	-2,098	-2,604
8	400	0,037	261,95	6,549	95,007	4,993	-2,972	-3,297
9	-	-	199,73	4,993	100,000	0,000		
TOTAL			4000,00	100				

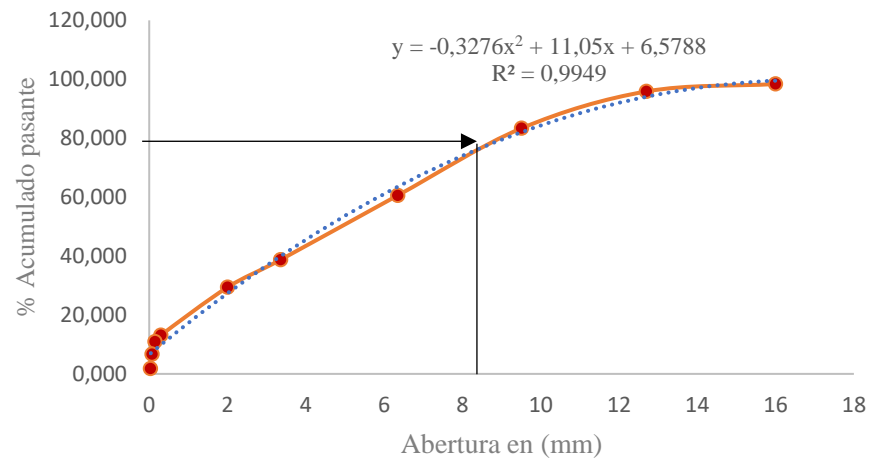
Pendiente m	0,6341
Intersección c	-0,5752
b	2,48
d	5,24
P80	80



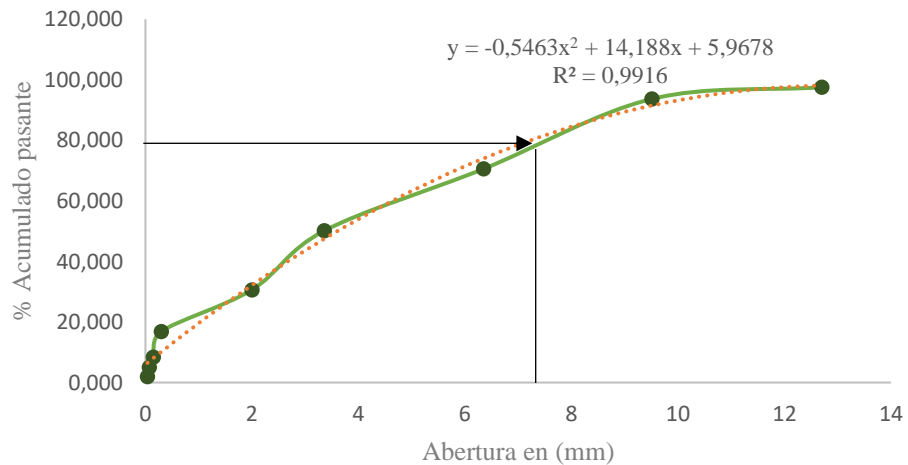
P80 DEL MINERAL CALCOPIRITA



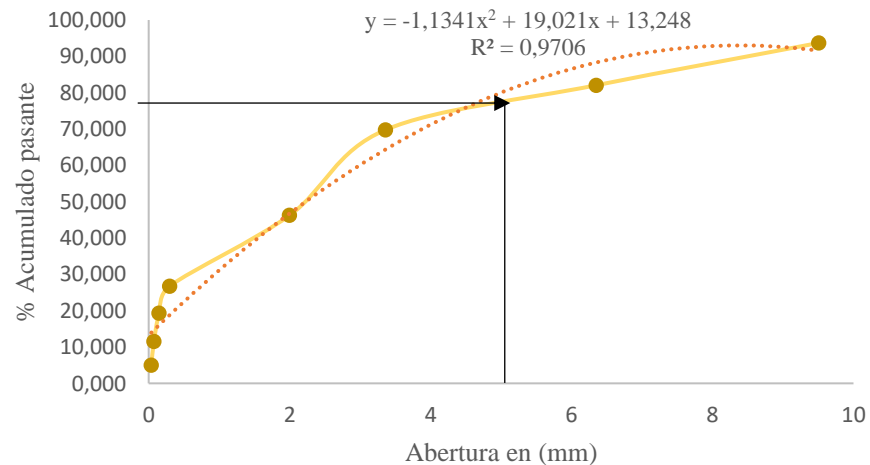
P80 8,30 GRAFICAMENTE



P80 6,77 GRAFICAMENTE



P80 5,24 GRAFICAMENTE



ANEXO 1D Caculos de dimensionamiento de las columnas y cabinas de biolixiviación.

Para el dimensionamiento de las columnas se tomó en cuenta los siguientes datos:

Datos:

- Cantidad de mineral: 73 Kg
- Cantidad total de columnas mínimas: 18
- Densidad de la calcopirita: 4,2 g/mL,
- Humedad del mineral: 5,25%
- Relación H/D para pruebas en laboratorio 4:1
- Material escogido: PVC

Primero determinamos el peso de mineral que irá en cada columna

Distribución del peso: $\frac{73\text{kg}}{18 \text{ Columnas}} = 4,06 \text{ kg/columna}$

Cálculos para el dimensionamiento de las columnas

a) Cálculo del volumen del mineral (V_m):

$$V_m = \frac{W_m}{\rho_a}$$

Donde:

V_m : Volumen del mineral(m^3)

W_m : Peso del mineral(kg o t)

ρ_a : Densidad aparente (kg/m^3 o t/m^3)

A su vez para calcular la densidad aparente $\rho_a = \frac{M}{V_a}$ necesitamos de hallar

el volumen aparente (V_a)

$$V_a = \frac{\text{Peso}}{\rho_s} \cdot \left(1 + \frac{H}{100} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \right)$$

V_a : Volumen aparente del mineral

Peso: Masa total del mineral húmedo

ρ_s : Densidad del mineral seco

H: Humedad del mineral en porcentaje.

ρ_w : Densidad del agua, que generalmente es 1g/cm³

Luego, el volumen aparente es:

$$V_a = \frac{4\,060\text{g}}{4,2\text{g/cm}^3} \cdot \left(1 + \frac{5,25}{100} \cdot \frac{4,2\text{g/cm}^3}{1\text{g/cm}^3} \right)$$

$$V_a = 966,7\text{ cm}^3 \cdot (1 + 0,0525 \cdot 4,2\text{ g/cm}^3)$$

$$V_a = 1179,85\text{ cm}^3$$

Hallamos la densidad aparente:

$$\rho_a = \frac{M}{V_a} = \frac{4\,060\text{g}}{1179,85\text{ cm}^3} = 3,44\text{ g/cm}^3 \sim 3440\text{ kg/m}^3$$

Con este valor se puede hallar el volumen del mineral

$$V_m = \frac{4,06\text{ kg}}{3440\text{kg/m}^3} = 0,00118\text{ m}^3$$

b) Selección de la relación H/D

La relación H/D es crítica para garantizar un diseño práctico y eficiente:

$$H = Dx(\text{Relación H/D})$$

c) Determinación de diámetro y altura

El volumen del mineral (V_m) también está relacionado con las dimensiones de la columna:

$$V_m = \pi x \frac{D^2}{4} x H$$

Sustituyendo $H = Dx(\text{Relación H/D})$

$$V_m = \pi x \frac{D^2}{4} x (Dx \text{Relación H/D})$$

Resolviendo para D (diámetro):

$$D = \left(\frac{4xV_m}{\pi x \text{Relación} H / D} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Remplazando los datos que tenemos

$$D = \left(\frac{4x0,00118 \text{ m}^3}{\pi x 4} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$D = \left(\frac{0,00118 \text{ m}^3}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$D = (3,79 \times 10^{-4})^{\frac{1}{3}}$$

$$D = 0,0724 \text{ m} = 72,4 \text{ mm} = 2,85'' \sim 3''$$

*Se sabe que comúnmente la Relación H/D para laboratorio oscila entre: 4:1 a 6:1

Ahora busquemos en tablas tuberías de PVC que se aproximen a ese valor

NPS	DN (mm)	PVC
1 1/4	32	40
1 1/2	40	50
2	50	63
2 1/2	65	75
3	80	90
3 1/2	90	-
4	100	110
4 1/2	115	-
5	125	140

Nota. Extraído de (Filtec, 2022).

Es posible apreciar que el diámetro de tubería superior más cercano al valor hallado es el de **3 pulgadas**.

Luego, la altura se calcula como: $H = Dx(\text{Relación H/D})$

$$H = 3'' \times 6$$

$$H = 18'' \sim 46 \text{ cm}$$

Esta es la altura a la que llegará el mineral dentro de las columnas a esto le sumamos una altura del doble ya que se insertará el dispositivo de riego en el interior de las columnas por lo que tenemos una altura total de: $46 \times 2 = 92 \text{ cm}$ aproximadamente por columna.

d) Cálculo del área transversal

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

Donde:

D : Diámetro interno de la columna en metros

Remplazando en D el diámetro hallado, es decir $3'' \rightarrow 0,0752\text{m}^2$

$$A = \pi \cdot \left(\frac{0,0762}{2}\right)^2 = 0,00456 \text{ m}^2$$

e) Volumen de la columna

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Donde:

V : Volumen del cilindro (m^3)

r : Radio de la base del cilindro (m)

h : Altura del cilindro (m)

$$V = \pi \cdot (0,0381)^2 \cdot 0,9\text{m} = 0,0041 \text{ m}^3$$

Multiplicado por el número de columnas en el interior de cada cubículo que son 8

$$0,0041 \text{ m}^3 \times 8 = 0,0328 \text{ m}^3$$

f) Caudal volumétrico

$$Q = L \times A$$

Donde:

Q : es el caudal (volumen de solución lixivante)

L : es la tasa de lixiviación ($\text{L}/\text{m}^2\text{h}$)

A : es el área de la columna o superficie de lixiviación (m^2)

La tasa de riego moderado: 5-20 $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$ en pilas. Se puede utilizar en situaciones donde se desea una alta tasa de recuperación o se están trabajando con sulfuros más complejos o de baja ley

$$Q = 20 \text{ L}/\text{m}^2\text{h} \times 0,00456 \text{ m}^2 = 0,0912 \text{ L}/\text{h}$$

$$Q = 0,0912 \frac{\text{L}}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 1,51 \text{ ml}/\text{min}$$

Lo que equivale a aproximadamente 30 gotas/min.

g) Velocidad de percolación:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Donde:

Q : es el caudal (volumen de solución lixivante)

A : es el área de la columna o superficie de lixiviación (m^2)

$$\frac{1,5\text{ml}}{\text{min}} \times \frac{1\text{min}}{60\text{s}} \times \frac{1 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{\text{ml}} = 2,5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v = \frac{2,52 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}}{0,00456 \text{ m}^2} = 5,526 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

h) Tiempo de residencia (tr):

$$t_r = \frac{H}{v}$$

Donde:

t : Tiempo de residencia (s)

H : Altura de la columna (m)

v : Velocidad de percolación (m/s)

Tomamos en cuenta solo la altura a la que se llegará el mineral

$$t_r = \frac{0,0046 \text{ m}}{5,526 \times 10^{-6} \text{ m/s}} = 832,43 \text{ s} \sim 13,87 \text{ min}$$

Dimensiones de la cabina

a) Área base de la cabina (A_{cab})

$$A_{cab} = W \times L$$

Donde:

W : Ancho en m

L : Largo en m

Luego el ancho y largo es:

$$W = (D_s + S_c) \cdot N_c + S_c; \quad L = (D_s + S_f) \cdot N_c + S_c$$

Donde:

D_c : Diámetro de la columna

S_c : Separación entre columnas en el ancho

S_f : Separación entre columnas en el largo

N_c : Número de columnas

Con el dato obtenido anteriormente diámetro 3" $\sim 0,0762$ m y se escogió una distribución de 8 columnas por cabina (4 columnas en 2 filas) con una separación de 14 cm

$$W = (0,0762 \text{ m} + 0,12\text{m}) \cdot 4 + 0,12 = 0,9048\text{m}$$

$$L = (0,0762 \text{ m} + 0,2\text{m}) \cdot 2 + 0,2 = 0,7524\text{m}$$

Se le agregó un espacio de 5 cm a cada lado del ancho y 5 cm a cada lado del largo del equipo, a fin de que hay un espacio para manipular los armazones internos.

$$A_{cab} = W \times L = (0,9048\text{m}) \times (0,7524\text{m}) = 0,6807\text{m}^2$$

b) Altura de cabina (H_{cab})

$$H_{cab} = H_c + H_{libre} + H_{dist} + H_{base+tapa}$$

H_c = Altura de las columnas

H_{libre} = Espacio libre superior

H_{dist} = Altura de distribución

$H_{base+tapa}$ = Altura de la base y tapa

Altura de la base, ya que será de melamina se estima 6mm, el espacio libre se estima en 40 cm y la altura de distribución en 0,25 cm

$$H_{cab} = 0,90\text{m} + 0,45\text{m} + 0,25\text{m} + 0,0012\text{m} = 1,6012\text{m}$$

c) Volumen del cubículo

$$V_{cubículo} = \text{Largo} \times \text{ancho} \times \text{alto}$$

$$V_{cubículo} = 0,9\text{m} \times 0,7\text{m} \times 1,60\text{m} = 1,008\text{m}^3$$

Sistema de calefacción

a) Pérdidas de calor de las columnas

El calor perdido a través de las paredes de las columnas debe ser compensado por los focos de calefacción.

$$Q_{pérdidas} = U \cdot a \cdot \Delta T$$

Donde:

U : Coeficiente global de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

a : Área de las paredes de la columna (m^2)

ΔT : Diferencia de temperatura entre el interior de la columna y el ambiente

Para una columna cilíndrica, la superficie lateral (área de transferencia) se calcula como:

$$a = \pi \cdot D \cdot H$$

D : Diametro de la columna (m)

H : Altura de la columna (m)

Reemplazando los datos anteriormente hallados para determinar el área de transferencia,

$$a = \pi \times 0,0762\text{m} \times 0,90\text{m} = 0,215\text{m}^2$$

Hallamos el coeficiente global para un tubo cilíndrico

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{\text{int}} A_{\text{int}}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{\text{ext}}}{D_{\text{int}}}\right)}{2\pi L k} + \frac{1}{h_{\text{ext}} A_{\text{ext}}}$$

h_{int} = Coeficiente de transferencia de calor por convección dentro de la columna

h_{ext} = Coeficiente de transferencia de calor por convección fuera de la columna

D_{ext} = Diámetro extremo (m)

D_{int} = Diámetro interno (m)

R_{wall} = Espesor de la pared (m)

k = Conductividad térmica de la pared (W/m · K)

$A_{\text{ext,int}}$ = Área externa e interna

Luego, sabemos que el material es PVC por lo que su conductividad térmica es 0,17 W/mK, el diámetro interno 0,0078 m y el externo 0,0088m, longitud 0,9m, coeficiente de transferencia de calor del fluido interno por ser un fluido líquido se estima en 272,15 W/m²K y el externo como aire con convección natural se estima en 5W/m²K.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{272,15\text{W/m}^2\text{K} \times 0,215} + \frac{\ln\left(\frac{0,0088\text{m}}{0,0078\text{m}}\right)}{2\pi \times 0,9\text{m} \times 0,17\text{W/mK}} + \frac{1}{5\text{W/m}^2\text{K} \times \pi(0,0088\text{m})(0,9\text{m})}$$

$$\frac{1}{U} = 0,017\text{m}^2\text{K} / \text{W} + 0,1255\text{K} / \text{W} + 8,038\text{K} / \text{W} = 8,177\text{m}^2\text{K} / \text{W}$$

$$U = \frac{1}{8,177 \text{ W/m}^2 \text{ K}} = 0,122 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Reemplazando para 42°C que es la temperatura máxima a la que operará el equipo y tomamos una temperatura ambiente 22 °C

$$Q_{\text{pérdidas}} = U \cdot a \cdot \Delta T$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = 0,122 \text{ W/m}^2 \text{ K} \cdot 0,215 \text{ m}^2 \cdot (\Delta T)$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = 0,122 \text{ W/m}^2 \text{ K} \cdot 0,215 \text{ m}^2 (315,15 \text{ K} - 295,15 \text{ K})$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = 0,524 \text{ W}$$

Se desea que el equipo siga un ciclo de encendido y apagado constante a fin de mantener la temperatura en 42° C. Si sabemos que el equipo pierde 2°C cada min 10 ó 1200 s:

$$Q_{\text{pérdidas}} = 0,524 \text{ W} \times 600 \text{ s} = 314,4$$

b) Calor necesario para calentar el material (Q):

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Donde:

m : Masa del material dentro de la columna (kg)

C_p : Calor específico de la solución

ΔT : Diferencia de temperatura requerida ($T_f - T_i$ en °C)

Sabemos que la masa 4kg, el calor específico es 600J/kgK la diferencia de temperaturas es 42°C-22°C =20°C

$$Q = 4\text{kg} \times 520\text{J/kgK} \times 20\text{K} = 41600\text{J}$$

c) Volumen del aire dentro del cubículo

El volumen del aire dentro del cubículo se calcula restando el volumen de las columnas al volumen total del cubículo:

$$V_{\text{aire}} = V_{\text{cubículo}} - V_{\text{columnas}}$$

$$V_{\text{aire}} = 1,008 \text{ m}^3 - 0,0328\text{m}^3 = 0,9752\text{m}^3$$

d) Calor necesario para calentar el aire

El calor necesario para calentar el aire (Q_{aire}) se calcula con:

$$Q_{\text{aire}} = m_{\text{aire}} \times C_{\text{aire}} \times \Delta T$$

- La densidad del aire a 22°C es aproximadamente $\rho_{\text{aire}} = 1.2\text{kg/m}^3$.
- La capacidad calorífica específica del aire es $C_{\text{aire}} = 1005\text{J/kg}^\circ\text{C}$.
- El cambio de temperatura es $\Delta T = 42^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C}$.

$$m_{\text{aire}} = \rho_{\text{aire}} \cdot V_{\text{aire}}$$

$$m_{\text{aire}} = 1.2\text{kg/m}^3 \cdot 0,9752 = 1,17\text{kg}$$

$$\text{El calor necesario es: } Q_{\text{aire}} = 1,17\text{kg} \times 1005\text{J/kg}^\circ\text{C} \times 20^\circ\text{C} = 23,500\text{J}$$

e) Potencia total requerida:

La energía total es la suma de las energías:

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{aire}} + Q_{\text{mineral}} + Q_{\text{perdidas}}$$

$$Q_{\text{Total}} = 23\,500\text{ J} + 41\,600\text{ J} + 314,4\text{ J} = 65\,414,4\text{ J}$$

Si se quiere calentar el cubículo en 1 min (t=60s), la potencia requerida será:

$$P = \frac{Q_{total}}{t}$$

$$P = \frac{65\,414,4\text{ J}}{60\text{ s}} = 1090,24\text{ W}$$

f) Determinar el número de focos

Supongamos que cada foco tiene una potencia de 100 W. El número de focos necesarios es:

$$N = \frac{P}{P_{foco}}$$

Donde:

N : Número de focos

P_{foco} : Potencia por cada foco (w)

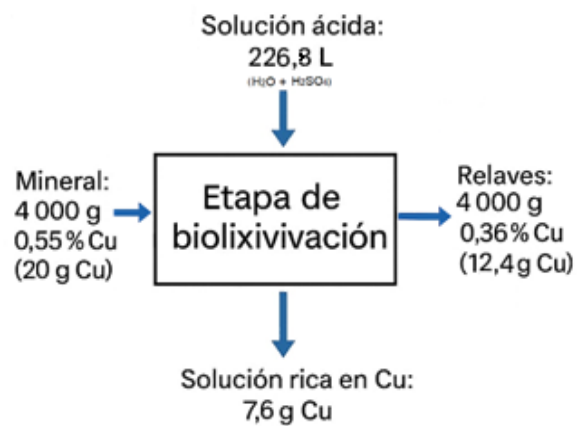
$$N = \frac{1090,24\text{ W}}{100\text{ W}} = 10,95 \sim 11\text{ focos}$$

ANEXO 1E Balance de materia para la columna con mayor recuperación (C-13)

A continuación, se muestra el balance de materia para la biolixiviación del mineral calcopirita para la columna 13 que fue la que mayor recuperación se obtuvo.

Datos de la columna:

- Ley del mineral: 0,5% Cu
- Mineral calcopirita (CuFeS_2)
- Cantidad de mineral 4kg: 4000g
- Tamaño de partícula: 5,24 mm
- Temperatura: 32 °C
- pH: 1,6
- Flujo de riego: $2,5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$
- Tiempo total de lixiviación: 3.45 meses (105 días)
- Peso atómico del Cu 63,55
- Porcentaje de recuperación asumido 38%



Ecuación química del proceso

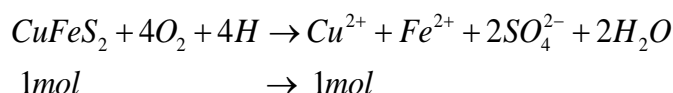
Reacción simplificada de oxidación de calcopirita con oxígeno

$$0,55\% \text{ Cu} = \frac{0,005 \text{ g Cu}}{\text{g mineral}}$$

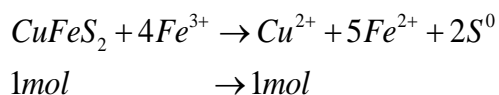
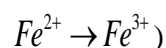
$$4000 \text{ g de mineral} \times 0,005 = 20 \text{ g de Cu total}$$

Ecuación química del proceso

Reacción simplificada de oxidación de calcopirita con oxígeno



ó por medio de la reacción de oxidación de hierro ferroso a hierro férrico (



Luego, los moles de Cu disponibles:

$$moles \ Cu \ disponible = \frac{20g \ Cu}{63,55g / mol} \approx 0,315mol \ Cu$$

Aunque se tengan 22 g de Cu “teóricos”, la biolixiviación de calcopirita rara vez extrae el 100 % por ello se asumió 38%.

$$20g \ Cu \times 0,38 = 7,6g \ de \ Cu \ recuperado \ aprox.$$

Verificación del riego

Para el cálculo del volumen de agua a emplear, se calculó a partir del flujo del goteo calculado a partir del área ene Anexo 1D.

El tiempo de riego aproximado fuer de 3.45 meses es decir 105 días

$$\text{Segundos} = 105 \text{ días} \times \frac{24\text{h}}{1\text{día}} \times \frac{3600\text{s}}{1\text{h}} = 9\,072\,000\text{s}$$

Para el cálculo de los litros de agua a emplear

$$\text{Flujo} = 2,5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s} \times 9\,072\,000 \text{ s} = 0,2268 \text{ m}^3$$

Convirtiendo a litros tenemos

$$0,2268 \text{ m}^3 \times 1000 = 226,8 \text{ L}$$

Es una cantidad muy alta para una sola columna por lo que se optó por recircular.

Suponiendo que se usa una columna de biolixiviación de laboratorio de 1,5 L de capacidad (común para ensayos) y se repuso el 5 % diario por evaporación o pérdidas.

$$1,5 \text{ L} \times 5\% = 0,075 \text{ L/día}$$

Reposición total en 105 días:

$$0,075 \text{ L/día} \times 105 \text{ días} = 7,875 \text{ L}$$

Volumen neto usado para solamente 1 columna:

$$\text{Total: } 1,5 \text{ L (carga inicial)} + 7,875 \text{ L (reposición)} = 9,38 \text{ L} \approx 9,4 \text{ L}$$

En resumen, para la columna 13 que fue la columna con más recuperación el balance de materia indica que se recuperó 7,7 g de cobre equivalentes al 38% de recuperación, en la columna aún resta recuperar 12,4g de Cu. En cuanto a la solución de riego que se empleó fueron 9,4L por columnas.

ANEXO 2

Análisis de laboratorio para el mineral, para el lixiviado,

Cu, Hierro, Sulfuros, etc

666

**INFORME DE ENSAYO
IE-2023-0655****1. DATOS DEL CLIENTE**

- 1.1 Cliente : UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G
1.2 RUC o DNI : 20147796634
1.3 Dirección : AV. MIRAFLORES NRO. SN CERCADO (CIUDAD UNIVERSITARIA)
TACNA - TACNA - TACNA

2. DATOS DE LA MUESTRA

- 2.1 Producto : MINERAL
2.2 Muestreado por : CLIENTE (*)
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2023-05-14
2.5 Periodo de Ensayo : 2023-05-04 al 2023-05-21
2.6 Fecha de Emisión : 2023-05-23

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
BARRIDO DE METALES ICP Plata, Aluminio, Azufre, Arsénico, Boro, Bario, Berilio, Calcio, Cadmio, Cerio, Cobalto, Cromo, Cobre, Hierro, Potasio, Litio, Magnesio, Manganeso, Molibdeno, Mercurio, Sodio, Níquel, Fósforo, Plomo, Antimonio, Selenio, Sílice, Estaño, Estroncio, Titanio, Talio, Vanadio, Zinc, Bismuto, Uranio.	Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES)

4. RESULTADOS

Descripción de Muestra: MUESTRA DE MINERAL CALCOPIRITA CHANCADA 500 gr (*)



KATHERINE
CORAL PERALTA
Ingeniera Química
CIP N° 276377

Jefe de Laboratorio

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.

INFORME DE ENSAYO IE-2023-0655

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LD	Resultados
S-1281	Plata, Ag	mg/Kg	0.50	<0.50
	Aluminio, Al	mg/Kg	0.50	1300.51
	Arsénico, As	mg/Kg	0.50	<0.50
	Boro, B	mg/Kg	0.50	<0.50
	Bario, Ba	mg/Kg	0.50	31.17
	Berilio, Be	mg/Kg	0.50	<0.50
	Bismuto, Bi	mg/Kg	0.50	<0.50
	Calcio, Ca	mg/Kg	0.50	14315.71
	Cadmio, Cd	mg/Kg	0.50	<0.50
	Cerio, Ce	mg/Kg	0.50	<0.50
	Cobalto, Co	mg/Kg	0.50	19.31
	Cromo, Cr	mg/Kg	0.50	9.97
	Cobre, Cu	mg/Kg	0.50	4889.37
	Hierro, Fe	mg/Kg	0.50	26736.10
	Mercurio, Hg	mg/Kg	0.50	<0.50
	Potasio, K	mg/Kg	0.50	1088.89
	Litio, Li	mg/Kg	0.50	<0.50
	Magnesio, Mg	mg/Kg	0.50	545.49
	Manganeso, Mn	mg/Kg	0.50	174.77
	Molibdenu, Mo	mg/Kg	0.50	75.17
	Sodio, Na	mg/Kg	0.50	658.44
	Níquel, Ni	mg/Kg	0.50	<0.50
	Fósforo, P	mg/Kg	0.50	979.77
	Plomo, Pb	mg/Kg	0.50	78.69
	Antimonio, Sb	mg/Kg	0.50	14.98
	Selenio, Se	mg/Kg	0.50	<0.50
	Silicio, Si	mg/Kg	0.50	344.93
	Estaño, Sn	mg/Kg	0.50	<0.50
	Estroncio, Sr	mg/Kg	0.50	100.65
	Titanio, Ti	mg/Kg	0.50	12.82
Talio, Tl	mg/Kg	0.50	<0.50	
Uranio, U	mg/Kg	0.50	<0.50	
Vanadio, V	mg/Kg	0.50	<0.50	
Zinc, Zn	mg/Kg	0.50	77.98	

LD: Límite de detección

(a) Información suministrada por el cliente.

FIN DE DOCUMENTO

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra cómo se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-24-02095

Fecha de emisión: 20/02/2024

Clave generada : A05C5E33

Página 1 de 1

Señores: UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.
Dirección: AV. MIRAFLORES NRO. 5N CERCADO (CIUDAD UNIVERSITARIA) TACNA - TACNA - TACNA
Atención: UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.
Recepción: 16/02/2024
Realización: 16/02/2024
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*599 Determinación del consumo de ácido sulfúrico en muestras minerales

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*599 H ₂ SO ₄ Kg/TM
MN24003260	Calcopinta Tacna	UNUSO	Mineral Gran	t<0,2

Fin del informe


Laboratorios Analíticos del Sur E.S.R.L.
Sixto Vicente Juárez Neira
Gerente General
Ing. Químico C.I.P. 19474

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

*<Valor numérico>=Limite de detección del método, **<Valor Numérico>=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió



Validar el informe
via web



Laboratorios Analíticos del Sur

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050**



Registro INAC - 050

Clave generada : F8C3C25A

INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-AC-24-00211

Fecha de emisión: 02/02/2024

Página 1 de 1

Señores: UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.
Dirección: AV. MIRAFLORES NRO. SN CERCADO (CIUDAD UNIVERSITARIA) TACNA - TACNA - TACNA
Atención: UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.
Recepción: 31/01/2024
Realización: 31/01/2024
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

- *505 Método de Ensayo para Cobre Soluble en Acido Sulfúrico por Absorción Atómica
- *507 Método de ensayo para Cobre Cianurable Secuencial por absorción atómica
- *519 Método de ensayo para carbonatos como carbonato de calcio retro titulación acido-base
- *522 Método de ensayo para Hierro por digestión multi acida - absorción atómica
- *523 Método de ensayo para Hierro Oxidado por absorción atómica
- 502 Método de Ensayo para Cobre por Absorción Atómica, Método Desarrollado (Validado) - 2013 (METODO DE ENSAYO ACREDITADO)

Código Interno L.A.S.	(i) Nombre de Muestra	(j) Procedencia de Muestra	(k) Descripción de Muestra	*505	*507	*519	*522	*523	502
				CuAcS %	CuCNSec %	CaCO ₃ %	Fe %	Fe Ox %	Cu %
MN24001947	MUESTRA DE MINERAL CHANCADO (CALCOPIRITA)	TACNA	Mineral Gran	<0,0040	0,1176	0,72	3,55	0,554	0,525

Fin del Informe


Laboratorios Analíticos del Sur
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"Los ensayos acreditados del presente informe/certificado al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo del os miembros firmantes de IAAC e ILAC"

(* Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

**<Valor numérico">=Limite de detección del método, **<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió



Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAJKA P.E. (03/03/2024 01:00:02 p.m.)

INFORME DE ENSAYO

P24-587

A SOLICITUD DE:	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMAN
POR CUENTA DE:	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMAN
ASUNTO:	Análisis Químico
CONTACTO:	BIANCA VEGA BACA
TIPO DE MUESTRA(S):	Soluciones
CANTIDAD DE MUESTRA(S):	30
CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS:	Solución ácida
CONDICIONES DE RECEPCION:	En frascos de plástico
FECHA DE RECEPCIÓN:	Lunes, 29 de Abril de 2024
FECHA DE EJECUCION DE ENSAYO:	29-04-24 al 30-04-24
FECHA DE REPORTE:	Martes, 30 de Abril de 2024
INSTRUCCIONES DE ENSAYO:	Code LA1-Cu Lectura directa Cobre
TOTAL DE PAGINAS: 02 (Incluida esta)	

Los resultados corresponden al ensayo solicitado en la (s) muestra (s) recibida (s)

Los ensayos se realizaron en :
ACTLABS SKYLINE PERU SAC.
Calle Martin de Murua N° 170-174
Urb. Maranga- San Miguel, Lima - Peru

Innovative Technologies



Ing. Verónica Casu
Jefe de Laboratorio
ACTLABS SKYLINE PERU SAC

Certificado por



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERU S.A.C.
Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQRNet ES-0174/2019



RESULTADOS

	Simbolo de Análito	Cu
	Código de Análisis	LA1
	Simbolo de Unidad	mg/L
	Límite Detección	0.10
1	AC-1	1750.38
2	AC-2	2059.93
3	AC-3	1109.14
4	AC-4	1254.03
5	AC-5	1236.50
6	AC-6	1945.86
7	AC-7	1372.39
8	AC-8	1395.27
9	AC-9	1342.71
10	AC-10	1215.27
11	AC-11	1536.58
12	AC-12	1488.86
13	AC-13	1883.55
14	AC-14	1565.25
15	AC-15	1397.71
16	BC-1	553.02
17	BC-2	443.17
18	BC-3	386.29
19	BC-4	274.12
20	BC-5	270.67
21	BC-6	536.09
22	BC-7	172.52
23	BC-8	313.89
24	BC-9	270.55
25	BC-10	304.37
26	BC-11	311.91
27	BC-12	277.52
28	BC-13	521.09
29	BC-14	280.61
30	BC-15	256.32

Certificado por:



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERÚ S.A.C.
 Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQNet ES-0174/2019



RESULTADOS

	Símbolo de Análito	Cu
	Código de Análisis	LA1
	Símbolo de Unidad	mg/L
	Límite Detección	0.1
1	DC-1	250.1
2	DC-2	232.6
3	DC-3	437.1
4	DC-4	206.0
5	DC-5	477.7
6	DC-6	163.2
7	DC-7	335.0
8	DC-8	502.4
9	DC-9	166.6
10	DC-10	275.0
11	DC-11	190.9
12	DC-12	25.5
13	DC-13	585.0
14	DC-14	314.9
15	DC-15	519.0
16	CC-1	606.7
17	CC-2	1081.8
18	CC-3	1271.1
19	CC-4	530.6
20	CC-5	1208.8
21	CC-6	580.6
22	CC-7	999.5
23	CC-8	1183.7
24	CC-9	504.4
25	CC-10	577.0
26	CC-11	540.2
27	CC-12	280.7
28	CC-13	993.3
29	CC-14	510.7
30	CC-15	1142.5

Certificado por:



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERÚ S.A.C.
 Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQNet ES-0174/2019



RESULTADOS

	Símbolo de Análito	Cu
	Código de Análisis	LA1
	Símbolo de Unidad	mg/L
	Límite Detección	0.1
1	EC-1	320.0
2	EC-2	360.8
3	EC-3	700.5
4	EC-4	422.2
5	EC-5	829.3
6	EC-6	469.9
7	EC-7	494.4
8	EC-8	850.9
9	EC-9	240.6
10	EC-10	396.8
11	EC-11	22.3
12	EC-12	128.0
13	EC-13	577.7
14	EC-14	1003.2
15	EC-15	688.7
16	FC-1	209.7
17	FC-2	255.3
18	FC-3	295.1
19	FC-4	240.6
20	FC-5	339.5
21	FC-6	564.7
22	FC-7	244.5
23	FC-8	355.4
24	FC-9	176.4
25	FC-10	217.5
26	FC-11	363.4
27	FC-12	356.1
28	FC-13	294.6
29	FC-14	561.4
30	FC-15	271.6

Certificado por:



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERÚ S.A.C.
 "Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQNet ES-0174/2019"



RESULTADOS

	Simbolo de Analito	Cu
	Código de Análisis	LA1
	Simbolo de Unidad	mg/L
	Límite Detección	0.10
1	GC-1	153.62
2	GC-2	208.63
3	GC-3	295.54
4	GC-4	288.18
5	GC-5	356.39
6	GC-6	412.57
7	GC-7	338.70
8	GC-8	338.75
9	GC-9	266.54
10	GC-10	298.73
11	GC-11	401.13
12	GC-12	446.88
13	GC-13	233.52
14	GC-14	358.82
15	GC-15	253.86

Quality Analysis...



Innovative Technologies

Certificado por:



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERÚ S.A.C.
 Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQNet ES-0174/2019



RESULTADOS

	Simbolo de Análito	Cu
	Código de Análisis	LA1
	Simbolo de Unidad	mg/L
	Límite Detección	0.10
1	ACSB-1	293.97
2	ACSB-2	249.39
3	ACSB-3	266.78
4	BCSB-1	82.25
5	BCSB-2	97.79
6	BCSB-3	126.26
7	CCSB-1	94.37
8	CCSB-2	79.41
9	CCSB-3	114.81
10	DCSB-1	275.05
11	DCSB-2	375.37
12	DCSB-3	381.47
13	ECSB-1	188.79
14	ECSB-2	122.23
15	ECSB-3	207.94

QualityAnalysis...

Innovative Technologies

Certificado por:



SE PROHÍBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN LA AUTORIZACIÓN DE ACTLABS SKYLINE PERÚ S.A.C.
 Este servicio ha sido realizado de acuerdo a los controles establecidos por un sistema de gestión de la calidad que cumple con los requisitos de la norma ISO 9001:2015, con número de certificado AENOR ER-0174/2019 e IQNet ES-0174/2019



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : BBA05851

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-24-00571

Fecha de emisión: 12/12/2024

Página 1 de 1

Señores: LINLEY SALOMON VEGA VEGA
Dirección: TACNA
Atención: LINLEY SALOMON VEGA VEGA
Recepción: 7/12/2024
Realización: 7/12/2024
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*911 Método de ensayo para fierro por absorción atómica en soluciones ácidas

*953 Método de ensayo para fierro ferroso por volumetría

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*911	*953
				Fe g/L	Fe ²⁺ g/L
SS24004983	C1 T 22C ⁺ -pH2,2-P80 5.01	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,7	0,0038
SS24004984	C2 T 32C ⁺ -pH2,8-P80 8.01	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,6	0,0038
SS24004985	C3 T 32C ⁺ -pH2,2-P80 6.77	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,7	0,0057
SS24004986	C4 T 42C ⁺ -pH2,2-P80 5.01	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,3	0,0057
SS24004987	C5 T 32C ⁺ -pH2,2-P80 6.77	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,8	0,0057
SS24004988	C6 T 42C ⁺ -pH2,2-P80 2.2	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,2	<0,003
SS24004989	C7 T 32C ⁺ -pH8,8-P80 8.30	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,1	<0,003
SS24004990	C8 -pH5,01-P80 5.01	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,9	<0,003
SS24004991	C9 T 22C ⁺ -pH2,8-P80 6.77	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,0	<0,003
SS24004992	C10 T 22C ⁺ -pH2,8-P80 6.77	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,2	<0,003
SS24004993	C11 T 42C ⁺ -pH1,8-P80 6.77	No proporcionado por el cliente.	Solución	0,82	0,19
SS24004994	C12 T 42C ⁺ -pH2,8-P80 6.77	No proporcionado por el cliente.	Solución	0,59	0,0038
SS24004995	C13 T 32C ⁺ -pH1,8-P80 5.01	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,6	0,0038
SS24004996	C14 T 41 C ⁺ -P80 8.30	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,4	0,0038
SS24004997	C15 T 32C ⁺ -pH1,8-P80 8.30	No proporcionado por el cliente.	Solución	1,4	0,0057

Fin del informe

Emisario: JUAN CARLOS SOTO OLMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M. S. Ingestivo Químico CIP 11426. Emisor de certificaciones: LUANA P. E. 12/12/2024 10:20:10

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

*<Valor numérico>=Límite de detección del método, *<Valor Numérico>=Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió



Verificar el informe
en
www.lasweb.com

ANEXO 3

Fichas de control de riesgo y recolección de datos

FICHA DE RIEGO

Parámetros de prueba			
Diámetro de columna (m)	0,0762	Humedad del mineral	5,25%
Área de riego (m ²)	0,00456	Riego/Goteo (m ³ /s)	2,5x10 ⁻⁸
Altura de la columna (m)	1	Densidad de riego (lt/hr-m ²)	20
Altura del lecho (m)	0,75	Velocidad de percolación (m/s)	5,526x10 ⁻⁶
Peso del mineral (Kg)	4,00	Recirculación	Sí

DÍAS/ RIEGO		CODIFICACIÓN	PARAMETROS DE RIEGO			PESOS			SOLUCIÓN DE PERCOLACIÓN			
Nº	Fechas	Columnas	Temperatura °C	pH	P80	Riego (g)	Lixiviado (g)	Cobre (mg)	pH	Pot. Redox (mV)	Conducción eléctrica (s/cm)	Acidez
Inoculación y reposo												
1	22/03/24 -05/04/24	AC-1	22	2,2	5,24	1,500	1,229	1750,38	0,82	440	98,90	4,87
2	22/03/24 -05/04/24	AC-2	32	2,8	5,24	1,500	1,213	2059,93	0,55	455	109,00	3,97
3	22/03/24 -05/04/24	AC-3	32	2,2	6,77	1,500	1,288	1109,14	0,94	437	64,60	3,97
4	22/03/24 -05/04/24	AC-4	22	2,2	8,30	1,500	1,447	1254,03	0,72	441	102,00	4,10
5	22/03/24 -05/04/24	AC-5	32	2,2	6,77	1,500	1,374	1236,50	0,70	443	95,90	4,10
6	22/03/24 -05/04/24	AC-6	42	2,2	5,24	1,500	1,239	1945,86	0,67	449	96,20	4,61
7	22/03/24 -05/04/24	AC-7	32	2,8	8,30	1,500	1,306	1372,39	0,57	441	102,00	4,23
8	22/03/24 -05/04/24	AC-8	32	2,2	6,77	1,500	1,359	1395,27	0,54	452	113,00	4,48
9	22/03/24 -05/04/24	AC-9	22	2,8	6,77	1,500	1,400	1342,71	0,68	416	111,00	4,74
10	22/03/24 -05/04/24	AC-10	22	1,6	6,77	1,500	1,283	1215,27	0,26	463	124,00	4,87
11	22/03/24 -05/04/24	AC-11	42	1,6	6,77	1,500	1,318	1536,58	0,19	458	122,00	4,87
12	22/03/24 -05/04/24	AC-12	42	2,8	6,77	1,500	1,361	1488,86	0,57	448	115,00	4,61
13	22/03/24 -05/04/24	AC-13	32	1,6	5,24	1,500	1,230	1883,55	0,30	456	105,00	3,84
14	22/03/24 -05/04/24	AC-14	42	2,2	8,30	1,500	1,329	1565,25	0,54	452	113,00	5,12
15	22/03/24 -05/04/24	AC-15	32	1,6	8,30	1,500	1,362	1397,71	0,20	461	120,00	4,74
7 días de reposo												
16	12/04/24 -26/04/24	BC-1	22	2,2	5,24	1,500	1,472	553,02	1,07	439	30,50	1,15
17	12/04/24 -26/04/24	BC-2	32	2,8	5,24	1,500	1,467	443,17	1,19	640	20,20	0,64
18	12/04/24 -26/04/24	BC-3	32	2,2	6,77	1,500	1,501	386,29	1,26	557	27,70	1,02
19	12/04/24 -26/04/24	BC-4	22	2,2	8,30	1,500	1,431	274,12	1,41	465	18,30	0,51
20	12/04/24 -26/04/24	BC-5	32	2,2	6,77	1,500	1,424	270,67	1,50	630	16,00	0,51
21	12/04/24 -26/04/24	BC-6	42	2,2	5,24	1,500	1,408	536,09	1,28	429	27,70	0,90
22	12/04/24 -26/04/24	BC-7	32	2,8	8,30	1,500	1,388	172,52	1,65	625	8,75	0,38
23	12/04/24 -26/04/24	BC-8	32	2,2	6,77	1,500	1,441	313,89	1,25	410	27,80	0,64
24	12/04/24 -26/04/24	BC-9	22	2,8	6,77	1,500	1,452	270,55	1,24	433	22,40	0,77
25	12/04/24 -26/04/24	BC-10	22	1,6	6,77	1,500	1,446	304,37	1,36	459	19,20	0,64
26	12/04/24 -26/04/24	BC-11	42	1,6	6,77	1,500	1,451	311,91	1,20	468	32,40	0,90
27	12/04/24 -26/04/24	BC-12	42	2,8	6,77	1,500	1,379	277,52	1,19	623	25,90	0,77
28	12/04/24 -26/04/24	BC-13	32	1,6	5,24	1,500	1,422	521,09	1,16	470	31,80	0,77
29	12/04/24 -26/04/24	BC-14	42	2,2	8,30	1,500	1,404	280,61	1,43	427	18,40	0,51
30	12/04/24 -26/04/24	BC-15	32	1,6	8,30	1,500	1,521	256,32	1,12	613	27,10	0,77

Nota. Fuente: Elaboración propia

FICHA DE RIEGO

		Parámetros de prueba											
Diámetro de columna (m)	0,0762	Humedad del mineral	5,25%										
Área de riego (m ²)	0,00456	Riego/Goteo (m ³ /s)	2,5x10 ⁻⁸										
Altura de la columna (m)	1	Densidad de riego (lt/hr-m ²)	20										
Altura del lecho (m)	0,75	Velocidad de percolación (m/s)	5,526x10 ⁻⁶										
Peso del mineral (Kg)	4,00	Recirculación	Sí										
DÍAS/ RIEGO		CODIFICACIÓN	PARAMETROS DE RIEGO			PESOS		SOLUCIÓN DE PERCOLACIÓN					
N°	Fechas	Columnas	Temperatura °C	pH	P80	Riego (Kg)	Lixiviado (Kg)	Cobre (mg)	pH	Pot. Redox (mV)	Conducción eléctrica (s/cm)	Acidez	
Inoculación y reposo													
1	29/04/24 - 14/05/24	CC-1	22	2,2	5,24	1,500	1,449	606,7	1,62	649	13,40	0,51	
2	29/04/24 - 14/05/24	CC-2	32	2,8	5,24	1,500	1,304	1081,8	1,65	628	14,30	0,77	
3	29/04/24 - 14/05/24	CC-3	32	2,2	6,77	1,500	1,117	1271,1	1,76	647	13,00	1,15	
4	29/04/24 - 14/05/24	CC-4	22	2,2	8,30	1,500	1,451	530,6	1,87	635	9,57	0,51	
5	29/04/24 - 14/05/24	CC-5	32	2,2	6,77	1,500	1,077	1208,8	1,85	614	11,70	1,02	
6	29/04/24 - 14/05/24	CC-6	42	2,2	5,24	1,500	852	580,6	2,06	603	9,04	0,51	
7	29/04/24 - 14/05/24	CC-7	32	2,8	8,30	1,500	1,320	999,5	1,90	643	9,57	0,77	
8	29/04/24 - 14/05/24	CC-8	32	2,2	6,77	1,500	1,166	1183,7	1,89	648	11,40	10,24	
9	29/04/24 - 14/05/24	CC-9	22	2,8	6,77	1,500	1,580	504,4	1,78	652	9,70	0,51	
10	29/04/24 - 14/05/24	CC-10	22	1,6	6,77	1,500	1,391	577	1,36	609	19,00	0,77	
11	29/04/24 - 14/05/24	CC-11	42	1,6	6,77	1,500	822	540,2	1,30	481	22,70	0,77	
12	29/04/24 - 14/05/24	CC-12	42	2,8	6,77	1,500	1,388	280,7	2,07	598	6,58	0,38	
13	29/04/24 - 14/05/24	CC-13	32	1,6	5,24	1,500	1,058	993,3	1,19	694	25,80	1,02	
14	29/04/24 - 14/05/24	CC-14	42	2,2	8,30	1,500	857	510,7	2,04	596	7,39	0,38	
15	29/04/24 - 14/05/24	CC-15	32	1,6	8,30	1,500	1,057	1142,5	1,28	655	23,20	1,15	
7 días de reposo													
16	22/05/24 - 05/06/24	DC-1	22	2,2	5,24	1,500	1,396	250,1	1,89	650	9,61	0,64	
17	22/05/24 - 05/06/24	DC-2	32	2,8	5,24	1,500	2,930	232,6	2,12	647	7,35	0,38	
18	22/05/24 - 05/06/24	DC-3	32	2,2	6,77	1,500	1,287	437,1	1,99	628	7,66	0,38	
19	22/05/24 - 05/06/24	DC-4	22	2,2	8,30	1,500	1,390	206,0	1,96	645	7,02	0,38	
20	22/05/24 - 05/06/24	DC-5	32	2,2	6,77	1,500	1,091	477,7	1,93	641	8,09	0,51	
21	22/05/24 - 05/06/24	DC-6	42	2,2	5,24	1,500	894	183,2	2,26	629	5,33	0,26	
22	22/05/24 - 05/06/24	DC-7	32	2,8	8,30	1,500	2,575	335,0	2,23	645	6,53	0,38	
23	22/05/24 - 05/06/24	DC-8	32	2,2	6,77	1,500	1,273	502,4	1,98	640	7,69	0,38	
24	22/05/24 - 05/06/24	DC-9	22	2,8	6,77	1,500	2,645	166,6	2,19	621	5,80	0,26	
25	22/05/24 - 05/06/24	DC-10	22	1,6	6,77	1,500	1,484	275,0	1,26	644	14,20	0,64	
26	22/05/24 - 05/06/24	DC-11	42	1,6	6,77	1,500	970	190,9	1,35	624	10,80	0,51	
27	22/05/24 - 05/06/24	DC-12	42	2,8	6,77	1,500	2,110	25,5	2,74	566	3,22	0,13	
28	22/05/24 - 05/06/24	DC-13	32	1,6	5,24	1,500	1,118	585,0	1,39	712	16,90	0,64	
29	22/05/24 - 05/06/24	DC-14	42	2,2	8,30	1,500	1,027	314,9	2,10	632	6,62	0,38	
30	22/05/24 - 05/06/24	DC-15	32	1,6	8,30	1,500	1,150	519,0	1,55	627	17,10	0,64	

Nota. Fuente: Elaboración propia

FICHA DE RIEGO

Parámetros de prueba			
Diámetro de columna (m)	0,0762	Humedad del mineral	5,25%
Área de riego (m ²)	0,00456	Riego/Goteo (m ³ /s)	2,5x10 ⁻⁸
Altura de la columna (m)	1	Densidad de riego (lt/hr-m ²)	20
Altura del lecho (m)	0,75	Velocidad de percolación (m/s)	5,526x10 ⁻⁶
Peso del mineral (Kg)	4,00	Recirculación	Sí

DÍAS/ RIEGO		CODIFICACIÓN	PARAMETROS DE RIEGO			PESOS			SOLUCIÓN DE PERCOLACIÓN			
Nº	Fechas	Columnas	Temperatura °C	pH	P80	Riego (Kg)	Lixiviado (Kg)	Cobre (mg)	pH	Pot. Redox (mV)	Conducción eléctrica (s/cm)	Acidez
Inoculación y reposo												
1	06/06/24 -20/06/24	EC-1	22	2,2	5,24	1,500	1,207	320,0	1,70	659	11,20	0,51
2	06/06/24 -20/06/24	EC-2	32	2,8	5,24	1,500	1,221	360,8	2,12	633	8,41	0,38
3	06/06/24 -20/06/24	EC-3	32	2,2	6,77	1,500	969	700,5	1,88	654	9,27	0,64
4	06/06/24 -20/06/24	EC-4	22	2,2	8,30	1,500	1,169	422,2	1,90	646	8,10	0,64
5	06/06/24 -20/06/24	EC-5	32	2,2	6,77	1,500	868	829,3	1,89	650	9,41	0,77
6	06/06/24 -20/06/24	EC-6	42	2,2	5,24	1,500	1,074	469,9	2,32	634	4,95	0,38
7	06/06/24 -20/06/24	EC-7	32	2,8	8,30	1,500	870	494,4	2,10	628	8,54	0,51
8	06/06/24 -20/06/24	EC-8	32	2,2	6,77	1,500	904	850,9	1,91	614	9,79	0,90
9	06/06/24 -20/06/24	EC-9	22	2,8	6,77	1,500	1,137	240,6	2,21	641	6,23	0,77
10	06/06/24 -20/06/24	EC-10	22	1,6	6,77	1,500	1,172	396,8	1,86	513	47,50	1,28
11	06/06/24 -20/06/24	EC-11	42	1,6	6,77	1,500	1,181	223	1,20	502	18,80	0,26
12	06/06/24 -20/06/24	EC-12	42	2,8	6,77	1,500	1,011	128,0	2,32	621	3,69	0,13
13	06/06/24 -20/06/24	EC-13	32	1,6	5,24	1,500	666	577,7	1,07	506	30,30	0,90
14	06/06/24 -20/06/24	EC-14	42	2,2	8,30	1,500	938	1003,2	1,47	641	16,50	0,77
15	06/06/24 -20/06/24	EC-15	32	1,6	8,30	1,500	874	688,7	1,13	640	23,60	0,77
7 días de reposo												
16	27/06/24 -11/07/24	FC-1	22	2,2	5,24	1,500	1,416	209,7	1,81	580	8,77	0,64
17	27/06/24 -11/07/24	FC-2	32	2,8	5,24	1,500	1,414	255,3	2,05	361	7,88	0,38
18	27/06/24 -11/07/24	FC-3	32	2,2	6,77	1,500	1,410	295,1	2,02	596	6,70	0,38
19	27/06/24 -11/07/24	FC-4	22	2,2	8,30	1,500	1,415	240,6	2,05	646	6,22	0,38
20	27/06/24 -11/07/24	FC-5	32	2,2	6,77	1,500	1,161	339,5	2,06	652	6,87	0,38
21	27/06/24 -11/07/24	FC-6	42	2,2	5,24	1,500	1,290	564,7	2,07	641	7,54	0,51
22	27/06/24 -11/07/24	FC-7	32	2,8	8,30	1,500	1,602	244,5	2,15	619	6,13	0,38
23	27/06/24 -11/07/24	FC-8	32	2,2	6,77	1,500	1,418	355,4	1,98	659	7,42	0,38
24	27/06/24 -11/07/24	FC-9	22	2,8	6,77	1,500	1,371	176,4	2,20	641	5,94	0,38
25	27/06/24 -11/07/24	FC-10	22	1,6	6,77	1,500	1,416	217,5	1,48	662	14,30	0,51
26	27/06/24 -11/07/24	FC-11	42	1,6	6,77	1,500	1,365	363,4	1,65	656	10,80	0,51
27	27/06/24 -11/07/24	FC-12	42	2,8	6,77	1,500	1,290	356,1	2,27	617	5,92	0,38
28	27/06/24 -11/07/24	FC-13	32	1,6	5,24	1,500	1,288	294,6	1,46	663	15,00	0,51
29	27/06/24 -11/07/24	FC-14	42	2,2	8,30	1,500	1,299	561,4	2,06	647	6,94	0,51
30	27/06/24 -11/07/24	FC-15	32	1,6	8,30	1,500	1,411	271,6	1,58	637	10,30	0,38

Nota. Fuente: Elaboración propia

FICHA DE RIEGO

Parámetros de prueba			
Diámetro de columna (m)	0,0762	Humedad del mineral	5,25%
Área de riego (m ²)	0,00456	Riego/Goteo (m ³ /s)	2,5x10 ⁻⁸
Altura de la columna (m)	1	Densidad de riego (lt/hr-m ²)	20
Altura del lecho (m)	0,75	Velocidad de percolación (m/s)	5,526x10 ⁻⁶
Peso del mineral (Kg)	4,00	Recirculación	Sí

DÍAS/ RIEGO		CODIFICACIÓN	PARAMETROS DE RIEGO			PESOS		SOLUCIÓN DE PERCOLACIÓN				
Nº	Fechas	Columnas	Temperatura °C	pH	P80	Riego (Kg)	Lixiviado (Kg)	Cobre (mg)	pH	Pot. Redox (mV)	Conducción eléctrica (s/cm)	Acidez
Inoculación y reposo												
1	11/07/24 -25/07/24	GC-1	22	2,2	5,24	1,500	1,413	153,62	1,80	576	8,72	0,51
2	11/07/24 -25/07/24	GC-2	32	2,8	5,24	1,500	1,290	208,63	2,00	576	8,48	0,51
3	11/07/24 -25/07/24	GC-3	32	2,2	6,77	1,500	1,335	295,54	1,83	638	8,65	0,64
4	11/07/24 -25/07/24	GC-4	22	2,2	8,30	1,500	1,341	288,18	1,96	652	7,32	0,51
5	11/07/24 -25/07/24	GC-5	32	2,2	6,77	1,500	1,248	356,39	1,82	634	9,30	0,64
6	11/07/24 -25/07/24	GC-6	42	2,2	5,24	1,500	1,094	412,57	2,13	581	6,25	0,26
7	11/07/24 -25/07/24	GC-7	32	2,8	8,30	1,500	1,238	338,7	2,05	573	7,88	0,51
8	11/07/24 -25/07/24	GC-8	32	2,2	6,77	1,500	992	338,75	1,81	666	8,98	0,51
9	11/07/24 -25/07/24	GC-9	22	2,8	6,77	1,500	1,332	266,54	2,13	578	6,62	0,51
10	11/07/24 -25/07/24	GC-10	22	1,6	6,77	1,500	1,395	298,73	1,33	652	18,30	0,90
11	11/07/24 -25/07/24	GC-11	42	1,6	6,77	1,500	1,210	401,13	1,45	604	14,50	0,51
12	11/07/24 -25/07/24	GC-12	42	2,8	6,77	1,500	1,265	446,88	2,40	582	5,05	0,38
13	11/07/24 -25/07/24	GC-13	32	1,6	5,24	1,500	1,334	233,52	1,37	575	16,70	0,64
14	11/07/24 -25/07/24	GC-14	42	2,2	8,30	1,500	1,190	358,82	1,99	620	6,99	0,38
15	11/07/24 -25/07/24	GC-15	32	1,6	8,30	1,500	1,290	253,86	1,33	522	18,50	0,64

Nota. Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4

Preparación de medio de cultivo 9k modificada y conteo microbiano con cámara

Petroff Hausser

ANEXO 4 A Preparación del medio 9k modificado (Silverman y Ludgen, 1959)

A continuación, se proporciona los ingredientes y el procedimiento general para preparar este medio para 1L:

Componentes del Medio 9K Modificado:

1. Reactivo A:

- Sulfato de hierro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$): 33.3 g
- Agua destilada: Para completar el volumen final de cada reactivo.

2. Reactivo B:

- Fosfato monopotásico (KH_2PO_4): 0.04 g
- Sulfato de magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$): 0,4 g
- Sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$): 0.1 g
- Ácido fosfórico (H_3PO_4): 0,04 mL (esto aporta fósforo al medio)
- Cloruro de potasio (KCl): 0,1 g
- Nitrato de calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$: 0,01g
- Agua destilada: Para completar el volumen final de cada reactivo.

Preparación del Medio 9K Modificado:

1. Mezclar 900 mL de Reactivo A con 100 mL de Reactivo B.
2. Esterilizar por autoclave a 121°C durante 15-20 minutos.

Este medio es adecuado bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

ANEXO 4B Conteo microbianos en cámara Petroff Hausser para determinación de biomasa.

La cámara de Petroff-Hausser es un dispositivo utilizado para realizar conteos directos de microorganismos, como bacterias, en una muestra líquida. La fórmula básica para calcular el conteo bacteriano se basa en el volumen conocido del área de conteo en la cámara y el número de células observadas.

$$N = \frac{n \cdot F}{V}$$

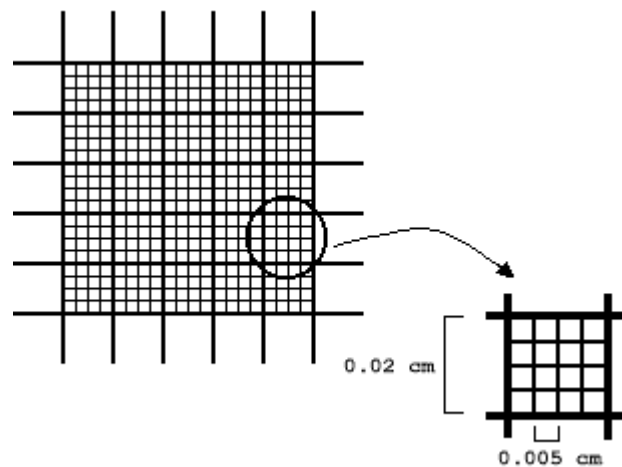
Donde:

N : Conteo total de bacterias por mililitro (células/mL)

n : Número promedio de células contadas en las cuadrículas

F : Factor de dilución (si la muestra fue diluida)

V : Volumen de la cámara por cuadrícula (en mililitros)



ANEXO 5

Reporte del análisis de varianza para las respuestas del estudio.

a) **Análisis de varianza para recuperación de cobre.**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-value	p-value	
Model	7,007E+06	9	7,786E+05	6,58	0,0258	significante
A-Temperatura	8,108E+05	1	8,108E+05	6,85	0,0472	
B-Tamaño	4,852E+05	1	4,852E+05	4,10	0,0987	
C-pH	4,511E+05	1	4,511E+05	3,81	0,1083	
AB	70172,01	1	70172,01	0,5932	0,4760	
AC	15202,89	1	15202,89	0,1285	0,7346	
BC	3975,30	1	3975,30	0,0336	0,8617	
A ²	3,618E+06	1	3,618E+06	30,59	0,0026	Significante
B ²	4,750E+05	1	4,750E+05	4,02	0,1014	
C ²	1,007E+06	1	1,007E+06	8,51	0,0331	significante
Residual	5,915E+05	5	1,183E+05			
Lack of Fit	4,922E+05	3	1,641E+05	3,31	0,2408	no significante
Pure Error	99236,34	2	49618,17			
Cor Total	7,599E+06	14				

Ajustes estadísticos

Std. Dev.	343,94	R²	0,9222
Mean	4102,79	Adjusted R²	0,7821
C.V. %	8,38	Predicted R²	-0,0658
		Adeq Precision	8,1724

b) **Análisis de varianza para Potencial Redox**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-value	p-value	
Model	3164,34	9	351,59	2,56	0,1569	no significante
A-Temperatura	197,11	1	197,11	1,43	0,2849	
B-Tamaño	635,10	1	635,10	4,62	0,0844	
C-pH	39,92	1	39,92	0,2902	0,6132	
AB	39,50	1	39,50	0,2872	0,6150	
AC	405,62	1	405,62	2,95	0,1466	
BC	122,66	1	122,66	0,8918	0,3884	
A ²	1396,33	1	1396,33	10,15	0,0244	significativo
B ²	4,67	1	4,67	0,0339	0,8611	
C ²	433,60	1	433,60	3,15	0,1360	
Residual	687,71	5	137,54			
Lack of Fit	370,06	3	123,35	0,7767	0,6053	no significante
Pure Error	317,65	2	158,83			
Cor Total	3852,05	14				

Ajustes estadísticos.

Std. Dev.	11,73	R²	0,8215
Mean	578,96	Adjusted R²	0,5001
C.V. %	2,03	Predicted R²	-0,7226
		Adeq Precision	5,4587

c) Análisis de varianza para Hierro total

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-value	p-value	
Model	1,898E+06	9	2,109E+05	14,57	0,0044	significant
A-Temperatura	1,770E+05	1	1,770E+05	12,23	0,0173	
B-Tamaño	1,013E+05	1	1,013E+05	6,99	0,0457	
C-pH	66612,50	1	66612,50	4,60	0,0848	
AB	90000,00	1	90000,00	6,22	0,0549	
AC	225,00	1	225,00	0,0155	0,9056	
BC	22500,00	1	22500,00	1,55	0,2677	
A ²	7,855E+05	1	7,855E+05	54,27	0,0007	
B ²	13851,92	1	13851,92	0,9570	0,3729	
C ²	7,027E+05	1	7,027E+05	48,55	0,0009	
Residual	72375,00	5	14475,00			
Lack of Fit	52375,00	3	17458,33	1,75	0,3844	not significant
Pure Error	20000,00	2	10000,00			
Cor Total	1,971E+06	14				

Ajustes estadísticos

Std. Dev.	120,31	R²	0,9633
Mean	1354,00	Adjusted R²	0,8972
C.V. %	8,89	Predicted R²	0,5519
		Adeq Precision	11,7703

d) **Análisis de varianza para Conductividad eléctrica**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-value	p-value	
Model	384,52	9	42,72	7,97	0,0171	significante
A-Temperatura	2,89	1	2,89	0,5392	0,4957	
B-Tamaño	2,55	1	2,55	0,4761	0,5209	
C-pH	247,87	1	247,87	46,21	0,0010	Significativo
AB	8,73	1	8,73	1,63	0,2580	
AC	2,50	1	2,50	0,4654	0,5254	
BC	3,08	1	3,08	0,5742	0,4827	
A ²	2,54	1	2,54	0,4742	0,5217	
B ²	0,3052	1	0,3052	0,0569	0,8209	
C ²	116,20	1	116,20	21,67	0,0056	Significativo
Residual	26,82	5	5,36			
Lack of Fit	2,53	3	0,8427	0,0694	0,9711	no significativa
Pure Error	24,29	2	12,14			
Cor Total	411,34	14				

Ajustes estadísticos

Std. Dev.	2,32	R²	0,9348
Mean	26,49	Adjusted R²	0,8175
C.V. %	8,74	Predicted R²	0,7688
		Adeq Precision	7,6727

e) **Análisis de varianza para Población biomasa**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-value	p-value	
Model	31,81	9	3,53	2,57	0,1553	not significant
A-Temperatura	0,7938	1	0,7938	0,5777	0,4815	
B-Tamaño	9,01	1	9,01	6,56	0,0506	
C-pH	8,30	1	8,30	6,04	0,0574	
AB	0,3600	1	0,3600	0,2620	0,6306	
AC	0,6724	1	0,6724	0,4893	0,5154	
BC	0,6972	1	0,6972	0,5074	0,5081	
A ²	11,94	1	11,94	8,69	0,0320	Significativo
B ²	0,1960	1	0,1960	0,1427	0,7211	
C ²	0,1410	1	0,1410	0,1026	0,7617	
Residual	6,87	5	1,37			
Lack of Fit	1,98	3	0,6597	0,2697	0,8454	not significant
Pure Error	4,89	2	2,45			
Cor Total	38,68	14				

Std. Dev.	1,17	R²	0,8224
Mean	6,49	Adjusted R²	0,5027
C.V. %	18,07	Predicted R²	-0,1031
		Adeq Precision	6,0691

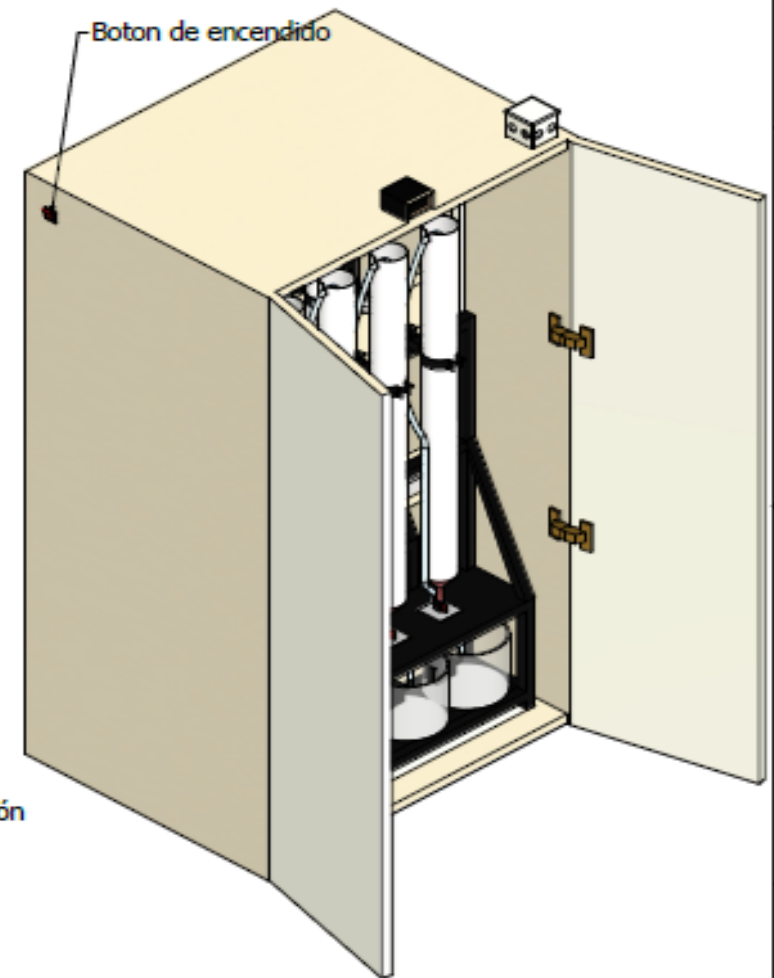
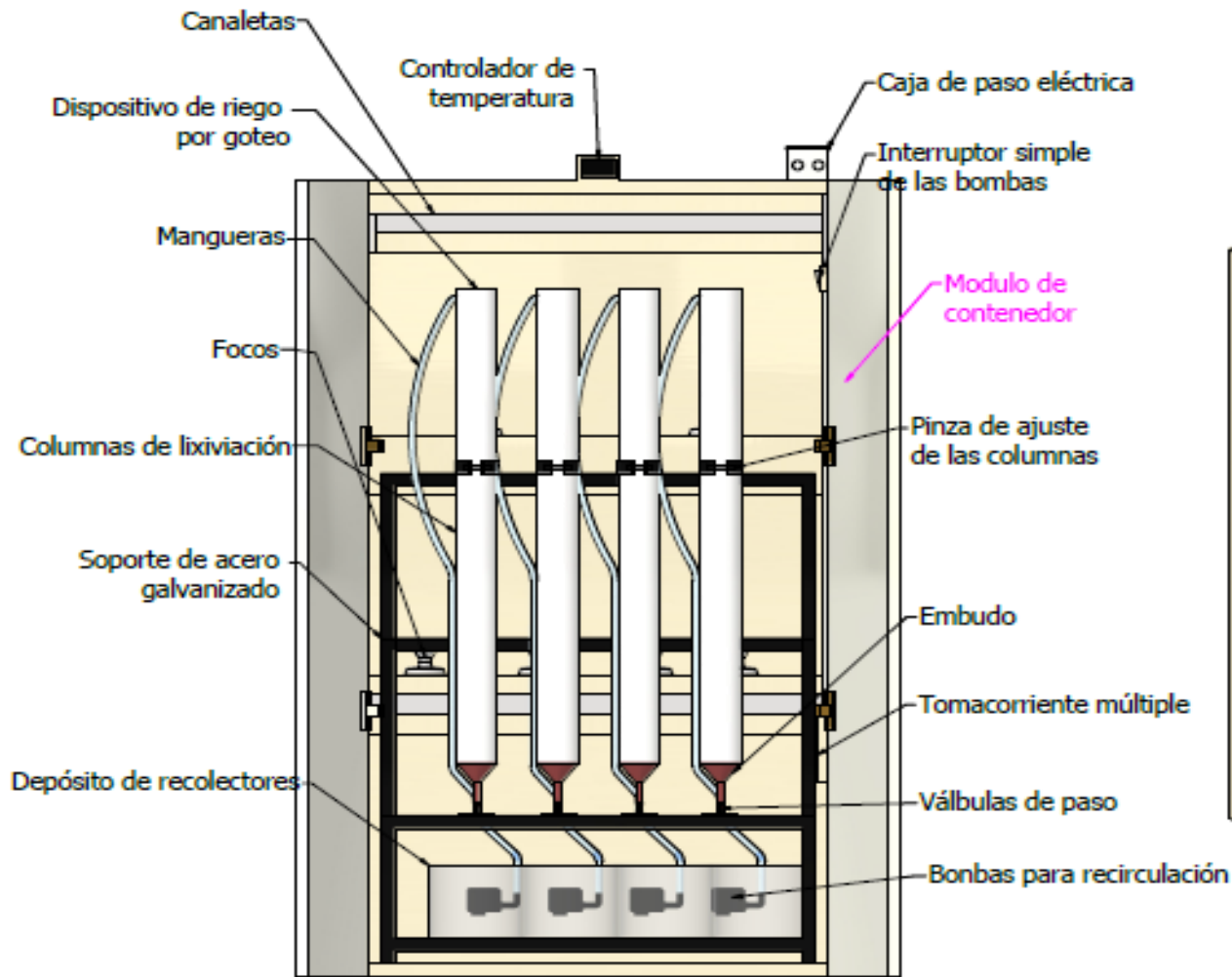
ANEXO 6

Planos de las columnas de biolixiviación, soportes

y cabina de calefacción

NOTES:

1. DEBURR ALL SHARP EDGES AND CORNERS AS NEEDED

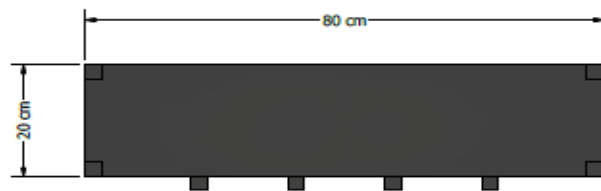
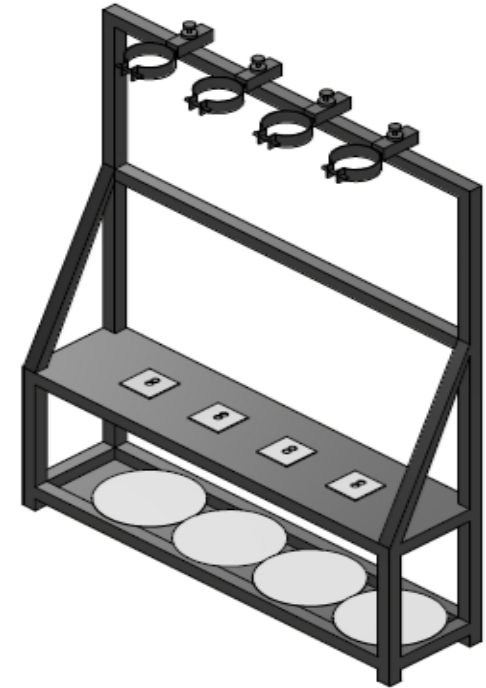
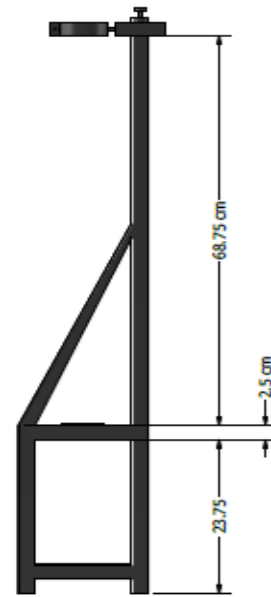
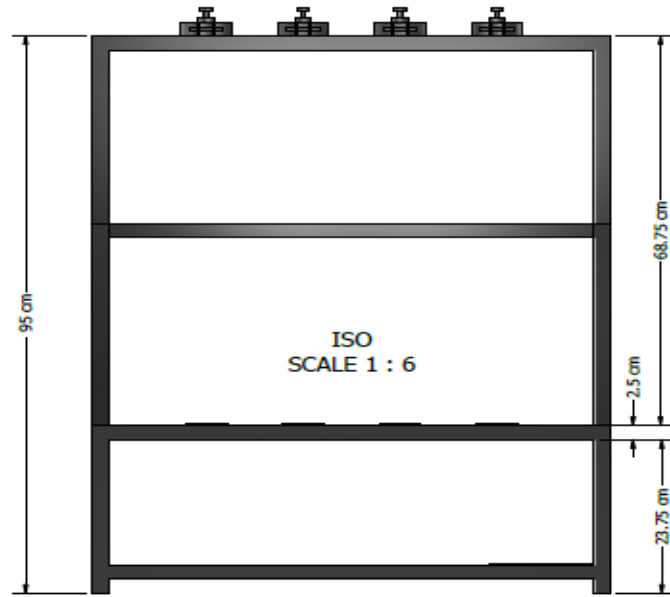
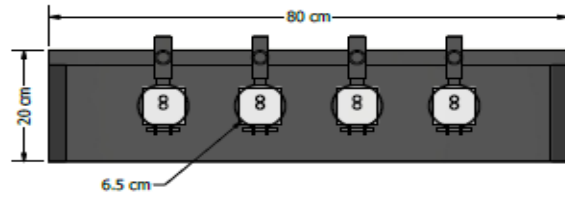


245

DRAWN Jorge	06/08/2024		
CHECKED		TITLE	
QA			
MFG			
APPROVED			
		SIZE C	DWG NO PLANO DEL SISTEMA DE COLUMNAS
		SCALE 1:05 : 0.35	REV SHEET 1 OF 1

NOTES:

1. DEBURR ALL SHARP EDGES AND CORNERS AS NEEDED

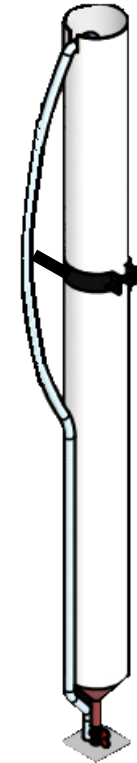
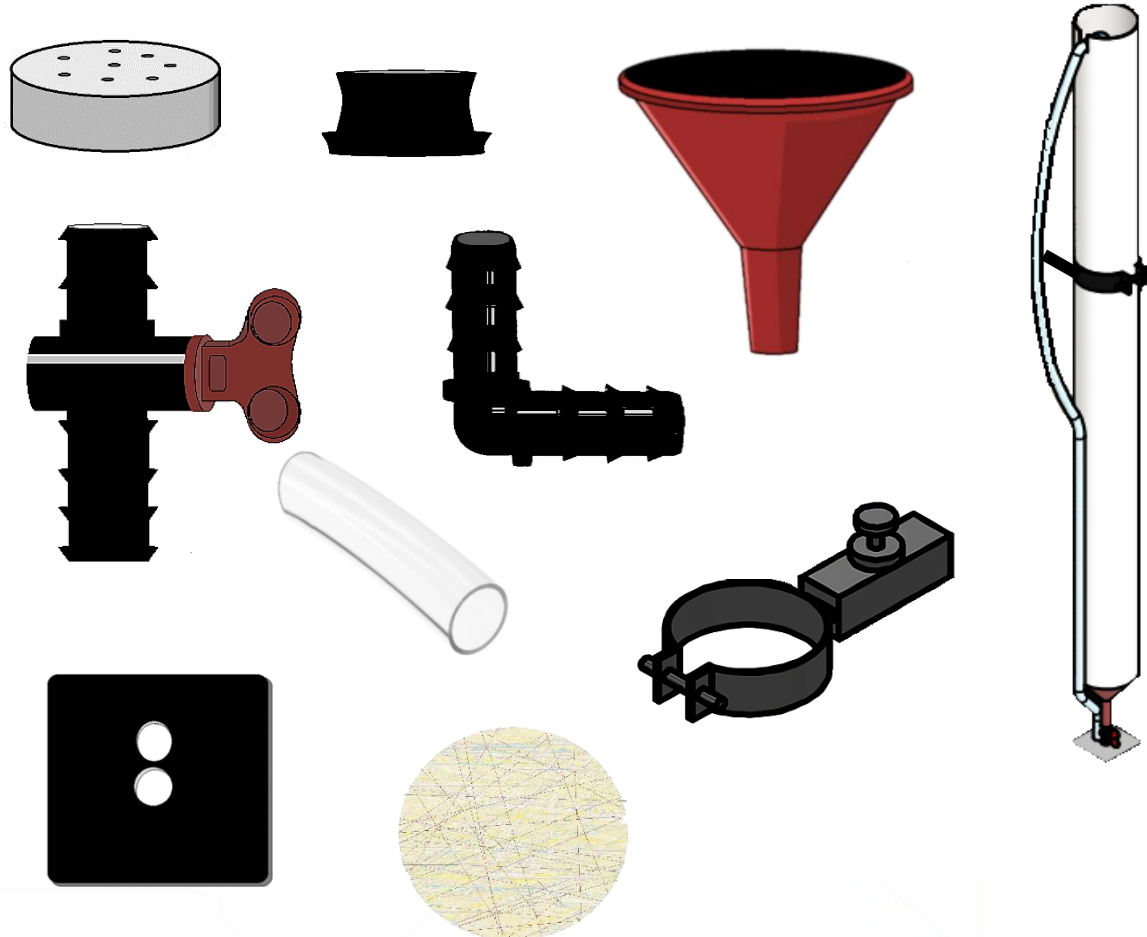
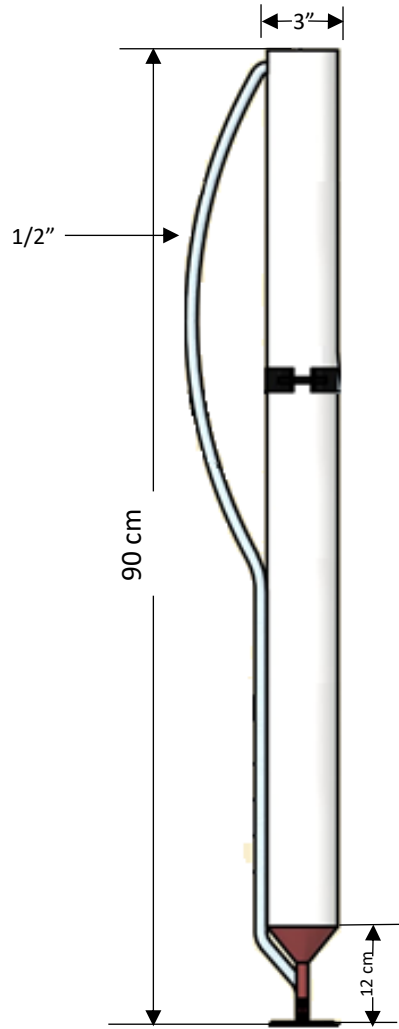


246

DRAWN	01/10/2024		
CHECKED		TITLE	
QA			
MFG			
APPROVED			
		SIZE	DWG NO
		C	
		SCALE	REV
		1 : 6	
		SHEET 1 OF 1	

NOTES:

1. DEBURR ALL SHARP EDGES AND CORNERS AS NEEDED



247

DRAWN	Jorge	06/08/2024		
CHECKED			TITLE	
QA				
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			C	PLANO DEL SISTEMA DE COLUMNAS
			SCALE	REV
			0.05 - 0.35	Sheet 1 of 1