



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**FACTORES QUE LIMITAN LA EXTRACCIÓN DE COBRE EN EL PROCESO  
EXPERIMENTAL DE BIOLIXIVIACIÓN EN COLUMNAS**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero de Minas y Metalurgista**

**PRESENTA**

Itzel Aketzalli Simbrón Juárez

**ASESOR DE INFORME**

Dr. Dandy Calla Choque



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020**

## DEDICATORIA

A mi familia y amigos.

## AGRADECIMIENTOS

La consumación de este trabajo ha sido gracias al gran esfuerzo, apoyo y exigencia de mis padres (Luz y Joel).

Gracias a mi hermano (Emi) por tomar mi mano en todo momento.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (Iniciación Universitaria, Preparatoria No.2 y la Facultad de Ingeniería), por haberme abierto las puertas al conocimiento crítico y científico desde una edad muy temprana, jamás dejare de agradecer lo mucho que me ha brindado.

A mis profesores Viridiana, Ornelas, Soto, Guadalupe, Santos, López, Márquez por transmitir sus conocimientos y ayudarme a ser un mejor ser humano cada día. En especial al Dr. Dandy por brindarme la confianza y el apoyo para terminar este trabajo.

También a mis abuelos paternos (Leonila y Cirilo), mis tíos (Alma, Juan, Ángel) y primos (Aloja, Yami, Juan y Kari) por todo ese afecto, confianza y cariño que me tienen.

A si mismo a mi abuela materna (Amelia) y tíos por ser comprensivos y solidarios.

A Juan José, por brindarme su confianza, tiempo, dedicación y apoyo incondicional. TQM.

Por otra parte, a mis mejores amigas, Bris y Adri por siempre estar al pendiente en las buenas y en las malas, sin importar el tiempo y la distancia.

También a mis amigos que hicieron más ameno el paso por la Universidad, por todos esos momentos de felicidad, angustia y tristeza que pasamos juntos (Mayra, Sus, Sandy, Bere, Dani, Memo, Daniel, Carlos Gallegos, Carlos Valle y Abram).

Finalmente, a Daniela C., Martin Z. y Alejandra G. por su hospitalidad y compañía.

# CONTENIDO

Dedicatoria.....	I
Agradecimientos.....	II
Contenido.....	III
Índice de figuras.....	VII
Índice de tablas.....	IX
Resumen.....	X
Abstract.....	XI

## CAPÍTULO I

### Prefacio

	PÁGINA
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes .....	3
1.3 Planteamiento del problema.....	7
1.3.1 Problemas operativos.....	7
1.4 Motivación.....	7
1.5 Limitaciones y suposiciones.....	8
1.6 Objetivos.....	8
1.7 Resumen.....	9

## CAPÍTULO II

### Preparación mecánica del mineral

2.1	Introducción.....	10
2.2	Propiedades físicas y químicas del mineral.....	10
2.3	Tamaño de partícula.....	11
2.3.1	Liberación de Partícula.....	12
2.4	Toma de muestra.....	12
2.4.1	Cono Cuarteo .....	13
2.4.2	Separador tipo Jones.....	15
2.5	Análisis Granulométrico.....	15
2.5.1	Cribado y tamizado.....	16
2.6	Trituración, molienda y secado.....	17

## CAPÍTULO III

### Fundamentos de hidrometalurgia para la extracción de cobre

3.1	Introducción.....	19
3.2	Minerales de cobre.....	20
3.2.1	Óxidos.....	21
3.2.1	Sulfuros.....	21
3.3	Métodos de lixiviación.....	21
3.3.1	Lixiviación en tanques.....	22
3.3.2	Lixiviación en terreros y pilas.....	22
3.3.3	Lixiviación en el lugar (in situ).....	23
3.3.4	Lixiviación por agitación.....	23
3.3.5	Lixiviación de los sulfuros.....	24
3.3.6	Lixiviación de los sulfuros mediante bacterias.....	24

## CAPÍTULO IV

### Complejos mineros-metalúrgicos en México

4.1 Introducción.....	26
4.2 Ubicación.....	27
4.3 Geología.....	28
4.4 Proceso de lixiviación para minerales de cobre.....	29

## CAPÍTULO V

### Metodología experimental

5.1 Introducción.....	30
5.2 Toma de muestra.....	33
5.3 Recolección de muestras sólidas para el análisis granulométrico.....	35
5.3.1 Preparación física de las muestras para el análisis granulométrico.....	35
5.3.2 Equipo y material para el análisis granulométrico.....	36
5.3.3 Análisis granulométrico.....	36
5.4 Recolección de la muestra para el análisis químico y mineralógico.....	38
5.4.1 Equipo y material para el análisis químico y mineralógico.....	38
5.4.2 Preparación mecánica de las muestras para el análisis químico y mineralógico.....	38

## CAPÍTULO VI

### Resultados

6.1 Descarga de columnas.....	41
6.2 Análisis granulométrico.....	43
6.3 Análisis químico y mineralógico.....	45

## CAPÍTULO VIII

### Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones y recomendaciones.....	48
Referencias.....	50
Anexos.....	51
Anexo 1. Datos y cálculos del análisis granulométrico.....	51

## Índice de figuras

	PÁGINA
Figura 1 Esquema de la relación de la minería con la sociedad.....	1
Figura 2 Esquema del horno de reverbero.....	5
Figura 3 Convertidor cilíndrico para soplar matas.....	6
Figura 4 Diferentes tamaños de partícula.....	11
Figura 5 Formación del stockpile.....	13
Figura 6 Medio cono invertido truncado.....	13
Figura 7 División en cuatro partes.....	14
Figura 8 Separador tipo Jones.....	14
Figura 9 Muestreo con el cortador de rifles.....	15
Figura 10 Diferentes Rot-Tap con distintos tamaños de cribas.....	16
Figura 11 Una muestra después de ser cribada.....	17
Figura 12 Mapa de la República Mexicana.....	27
Figura 13 Plano de potencial geológico en la República Mexicana .....	28
Figura 14 Esquema del proceso de lixiviación en un complejo minero.....	29
Figura 15 Esquema del proceso experimental con bacterias.....	30
Figura 16 Resumen de una primera prueba experimental de lixiviación con bacterias.....	31
Figura 17 Esquema del sistema de riego.....	33
Figura 18 Esquema de descarga de columnas.....	34
Figura 19 Descarga de columnas.....	34
Figura 20 Toma de muestra de mineral de cada una de las columnas.....	35
Figura 21 a) Gilson, b) Partículas por tamaño.....	36
Figura 22 Segundo cribado.....	37
Figura 23 a) Masa retenida, b) Clasificación de muestras por tamaño de partícula.....	37
Figura 24 a) Quebradora de quijada, b) Trituradora de cono.....	39

Figura 25 Muestra obtenida del separador Jones.....	39
Figura 26 a) Pulverizador de anillos, b) Muestra de 10 gr.....	40
Figura 27 Mineral de descarga de la columna A.....	41
Figura 28 Mineral de descarga de la columna B.....	42
Figura 29 Mineral de descarga de la columna C.....	42
Figura 30 Mineral de descarga de la columna D.....	43
Figura 31 %Retenido vs Tamaño ( $\mu\text{m}$ ).....	44
Figura 32 %Acumulado(-) vs Tamaño ( $\mu\text{m}$ ).....	45
Figura 33 Análisis mineralógico de las columnas A y B.....	46
Figura 34 Análisis mineralógico de las columnas C y D.....	47
Figura 35 Esquema del nuevo sistema de riego.....	49

## Índice de tablas

	PÁGINA
Tabla 1 Minerales más importantes de óxidos de cobre.....	20
Tabla 2 Análisis químico del mineral de cabeza.....	31
Tabla 3 Condiciones iniciales para las cuatro columnas.....	32
Tabla 4 Condiciones particulares para las columnas C y D .....	32
Tabla 5 Análisis químico de residuos.....	46

## Resumen

La minería es una industria encargada de proveer las materias primas necesarias para satisfacer las necesidades que la sociedad demanda, tales como: construcción, vías de comunicación y transporte, tecnología, vestimenta, medicina, accesorios de limpieza personal, entre otros.

El presente trabajo tiene como objetivo presentar los factores que limitan la extracción de cobre en el proceso de biolixiviación en columnas de una unidad minero-metalúrgica ubicada en el norte de México, mediante la preparación, análisis físico y químico del mineral de sulfuros y óxidos de cobre.

La extracción de cobre se realizó en columnas por biolixiviación, para evaluar la recuperación de cobre.

Los parámetros establecidos en este trabajo fueron considerados a partir de literatura e información de otros complejos mineros-metalúrgicos, con la intención de tener un marco teórico-práctico de referencia y lograr mejores resultados en experimentación.

## **Abstract**

Mining is an industry in charge of supplying the necessary raw materials to satisfy the needs that society demands, such as: construction, communication, high roads, technology, clothing, medicine, personal cleaning accessories, among others.

The present work is aimed to present the factors that limit copper extraction in the column bioleaching process of a mining-metallurgical unit located in northern Mexico, through the preparation, physical and chemical analysis of the sulphide ore and oxide oxides of copper.

The extraction of copper was carried out in columns by bioleaching, with the objective of evaluate the recovery efficiency.

The parameters established in this work were considered from literature and information from other mining-metallurgical complexes, with the intention of having a theoretical-practical frame of reference and looking for better results in experimentation.

# CAPÍTULO I

## Prefacio

*“Para investigar la verdad es preciso dudar, en cuanto sea posible, de todas las cosas”*

Pensamiento de René Descartes

---

## 1.1 Introducción

La minería es una de las actividades económicas más importantes del país, se caracteriza por la explotación y extracción de minerales, para producir bienes que la sociedad demande como se observa en la Figura 1. Para cumplir con este objetivo el Ingeniero de Minas y Metalurgista debe dominar ciertas técnicas que le permitan cumplir con la meta de producción.



**Figura 1.** Esquema de la relación de la minería con la sociedad. Recuperado de <http://outletminero.org>.

Una de las actividades primarias que debe hacer es ubicar el yacimiento mineral, analizarlo, evaluarlo y determinar si su explotación es económicamente viable. Después de haber realizado los primeros pasos de evaluación del proyecto minero-metalúrgico es necesario definir cuál es el mejor método de explotación y extracción.

La explotación se puede dividir en tres grupos principales (López Aburto, 1994)

- Métodos superficiales (minado de placeres, cielo abierto y glory hole)
- Métodos subterráneos (rebajes naturalmente soportados, rebajes artificialmente soportados, rebajes de hundimiento y rebajes con métodos combinados)
- Métodos indirectos (minado por soluciones)

Actualmente es poco probable que se encuentre un mineral nativo, por lo que es necesario que después de la explotación el mineral pase por distintos procesos físicos (preparación mecánica del mineral) y químicos (concentración del mineral), esto depende de algunas características físicas y químicas del mineral como son: ley, granulometría, composición química, peso, porosidad, dureza, etc., para determinar el método de extracción el parámetro a considerar más importante es la ley mineral.

México se ubica entre los diez mayores productores de metales, entre los que se encuentran la plata, el oro y el cobre. En cuanto a producción de cobre, el país ocupa el octavo lugar a nivel mundial.

El cobre es uno de los metales con mayor demanda en la industria ya sea para la elaboración de cables, la producción de piezas eléctricas y electrónicas, esto se debe a sus características físicas y químicas como: su gran capacidad para la conducción eléctrica, ductilidad y maleabilidad.

En 1521 se consolida la conquista de México, a partir de esta fecha se inicia la minería en el país, debido a que la explotación de yacimientos tiene casi quinientos años, han surgido algunos problemas con el paso del tiempo, como son: el agotamiento en las reservas minerales y la complejidad de las especies de minerales localizadas a mayores profundidades en los yacimientos mineros, por tales motivos, es necesaria la innovación en los métodos de extracción y concentración.

Actualmente los minerales sulfurados de cobre se encuentran en una concentración baja, de aproximadamente 0.5% o menos, en minas a cielo abierto y en minas subterráneas va de 1 a 2% de ley mineral (Pablo Bifani, 1999), esto ha llevado a la creación de nuevos métodos de recuperación, entre los que se encuentra la hidrometalurgia.

La lixiviación de minerales es una técnica hidrometalúrgica que permite explotar yacimientos minerales de baja ley, los cuales no podrían ser explotados bajo métodos tradicionales (pirometalúrgicos) debido a los costos de producción y la regulación ambiental cada vez más estrictas, la lixiviación ofrece una alternativa eficiente, menos agresiva y amigable con el medio ambiente.

La biolixiviación en columnas es una técnica que se encuentra en investigación y permite recuperar metales a partir de minerales complejos (Misari, 2016); el objetivo

del presente trabajo es establecer opciones para el mejoramiento del método a nivel laboratorio y disminuir problemas operativos. Se realizó un análisis y observaciones en ciertos parámetros iniciales, como el diseño de columnas, el tamaño de partícula, homogenización del mineral (granulometría), análisis químico y técnica de riego.

## 1.2 Antecedentes

Actualmente existen algunos métodos para la extracción de cobre que requieren de una concentración de mineral alta, los métodos por vía seca (pirometalurgia) es ampliamente utilizada para sulfuros y la húmeda (hidrometalurgia) para óxidos.

La principal técnica de concentración de cobre es por vía seca y puede incluir las siguientes operaciones: 1) concentración de mineral, 2) tostación, 3) fusión de mata, 4) obtención del cobre en bruto y 5) el afino.

La concentración de sulfuros se realiza por el método de flotación, basado en la propiedad hidrofóbica de los sulfuros. Los minerales expuestos al proceso de flotación pasan previamente a una reducción del tamaño de partícula en trituradoras y molinos de bolas hasta obtener partículas de 0.05-0.5 milímetros, dentro de este proceso se da un acondicionamiento a las partículas, el cual consiste en agregar reactivos químicos al mineral molido o la pulpa (mezcla de mineral y agua) que posteriormente pasa a la máquina de flotación donde se introduce aire y reactivos químicos. Las partículas molidas que presentan la característica de hidrofobicidad se adhieren a las burbujas generadas y ascienden a la superficie, donde la espuma generada es colectada, por otra parte, en el fondo del tanque quedan las partículas que no tienen interés comercial (ganga).

Los reactivos químicos para la flotación se dividen en cuatro grupos:

- Colectores o promotores
- Espumantes (selectivos y no selectivos)
- Modificadores (reguladores de pH, activantes y depresores)
- Floculantes y dispersantes.

La espuma que se genera en el proceso de flotación pasa a tratamientos para reducir la dilución, dejando el concentrado con un 7% de humedad aproximadamente. Finalmente, el concentrado pasa por un proceso de tostación, donde el objetivo principal es disminuir el contenido de azufre y transformar una parte de los sulfuros de cobre y hierro a óxidos. Con la tostación se eliminan

impurezas perjudiciales como el arsénico y el antimonio, se realiza de 800 - 1000 °C en hornos especiales.

La fusión a mata se realiza en hornos de cuba o de reverbero (Figura 2), de acuerdo con Malishev y Colaboradores (1975), funciona con combustible en polvo, líquido o gaseoso y alcanza una temperatura superior a los 1000 °C, donde se llevan a cabo las siguientes reacciones (Ecuaciones 1, 2 y 3):



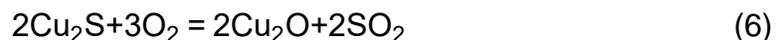
El sulfuro cuproso ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y el sulfuro de hierro ( $\text{FeS}$ ) forman la mata; el fundente de sílice y el óxido ferroso forman las escorias. Terminada la fusión se descargan las escorias y la mata obtenida se envía a los convertidores para su transformación. La conversión se realiza en horno de reverbero que tienen la forma de cilindro (Figura 3) con un suministro lateral de aire, en este proceso se distinguen dos períodos. En el primer período, la reacción de oxidación de hierro (Ecuación 4) ocurre al realizar el soplado con aire:



Al óxido ferroso se le agrega sílice para que se formen las escorias ( $\text{FeSiO}_3$ , Ecuación 5) y se descarguen:



En el segundo período el azufre se oxida (Ecuación 6) y forma óxido cuproso y dióxido de azufre:

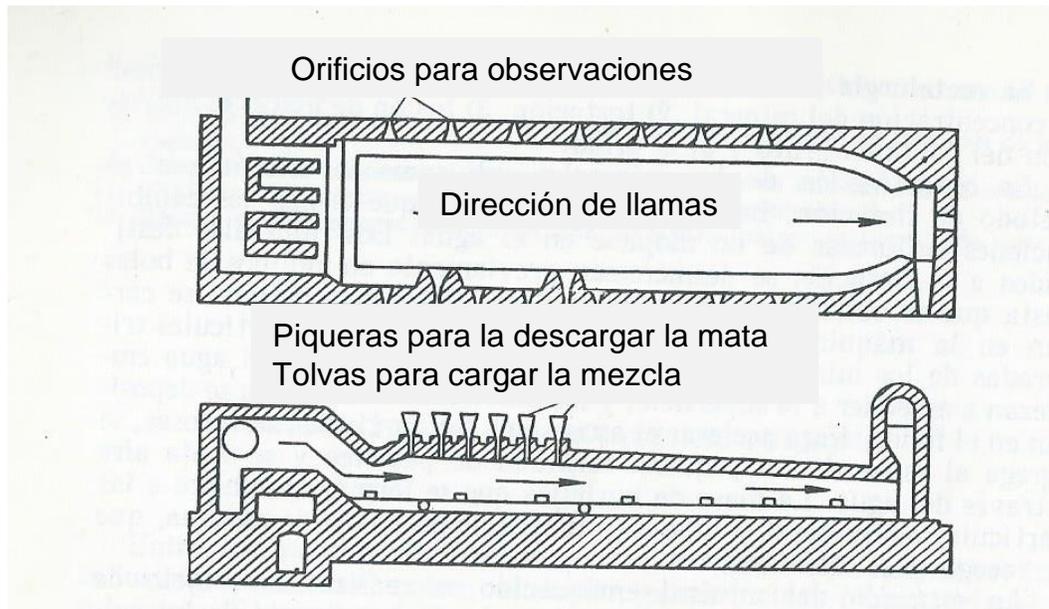


El óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), reacciona con el sulfuro cuproso ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) restante consiguiéndose el cobre blíster (Ecuación 7), contiene cerca del 2% de impurezas.

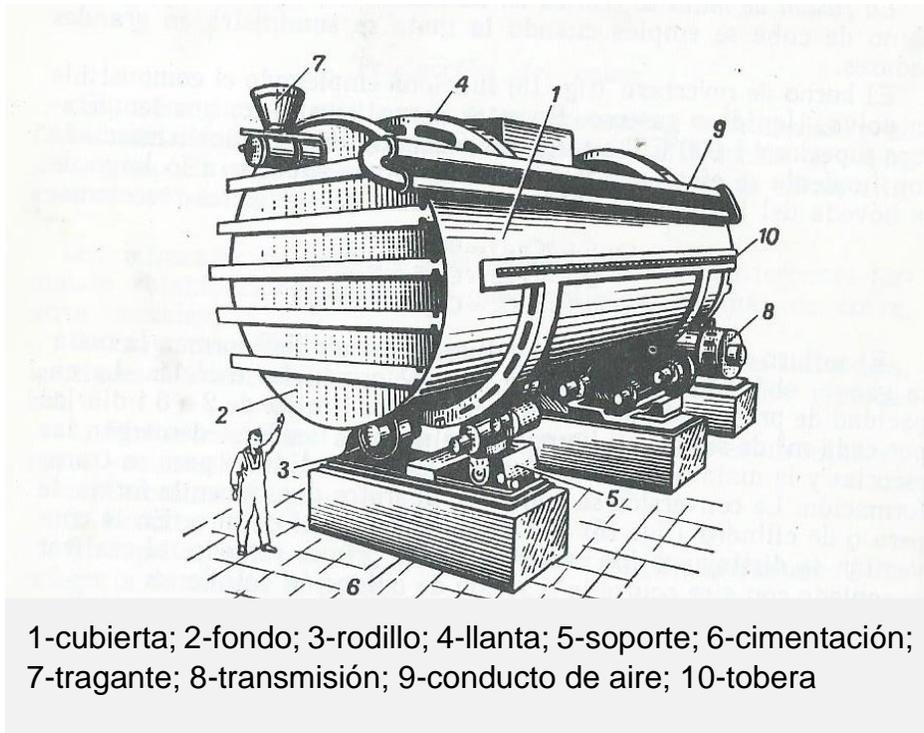


El afino, es el proceso donde el cobre blíster se funde, posteriormente se llevan a cabo las etapas de oxidación y reducción del cobre, las cuales se realizan en horno de reverbero o por electrolisis.

El cobre obtenido contiene 99.5 - 99.7% de Cu, éste se destina para el vertido con el fin de obtener bloques o placas anódicas necesarias para la electrolisis. La electrolisis se utiliza para purificar el cobre (hasta 99.98% de Cu) necesario en la industria eléctrica.



**Figura 2.** Esquema del horno de reverbero (Malishev y Colaboradores, 1975).



**Figura 3.** Convertidor cilíndrico para soplar matas (Malishev y Colaboradores, 1975).

La metalurgia tradicional por vía húmeda se emplea en minerales de óxidos pobres. Al principio los minerales pasan por un circuito de trituración y molienda hasta obtener partículas de 2 a 15 milímetros, después se clasifican para obtener partículas de igual tamaño (fracción).

El mineral de baja ley menor que 0.3% se trata con una solución débil de ácido sulfúrico y se filtra posteriormente, para obtener una solución pura. La separación del cobre de la solución se realiza por electrólisis o desplazándolo con chatarra de hierro (Ecuación 8).



El cobre obtenido se funde en hornos de llama directa y se afina.

La concentración del mineral en la naturaleza va disminuyendo a medida que la explotación avanza, por lo que cada vez es común recurrir a procesos químicos por vía húmeda, como lo es el caso de lixiviación con solventes y lixiviación con bacterias para tratar este tipo de minerales de baja ley.

## **1.3 Planteamiento del problema**

### **1.3.1 Problemas operativos**

Al realizar recorridos de rutina y verificar el funcionamiento adecuado del sistema de biolixiviación en columnas, se identificaron anomalías en el riego de la solución, así como en la distribución granulométrica.

Durante el proceso experimental de biolixiviación en columnas, uno de los problemas operativos evidenciados es la cristalización de la solución de riego, que ocasiona el bloqueo de las columnas, por lo que se realiza un análisis de las posibles causas de generación del problema.

Finalmente se sugiere un nuevo procedimiento de control de tamaños de partícula y un diseño que permita evaluar las condiciones reales de trabajo para una segunda prueba experimental.

## **1.4 Motivación**

La demanda que actualmente existe en la minería, exige a sus estudiantes a crear, mejorar, innovar y perfeccionar nuevos procesos dentro de la industria.

El análisis físico y químico de un mineral, en la actualidad es una herramienta primordial antes de someter a cualquier mineral a un proceso químico, debido a que se busca la mayor recuperación posible en el menor tiempo a un bajo costo.

Al realizar un análisis granulométrico adecuado previo, se obtiene la información necesaria para analizar y evitar problemas operativos durante la lixiviación como: tapado de columnas, inmovilización de equipo, formación de conglomerados, saturaciones, etc., que si no son solucionados a tiempo pueden generar grandes pérdidas y una menor recuperación en la inversión realizada.

La Universidad Nacional Autónoma de México, proporciona herramientas a los estudiantes de Ingeniería de Minas y Metalurgista, para analizar, detectar y resolver cualquier tipo de problema que se le presente en el área, así como proponer y desarrollar nuevas alternativas que son útiles para mejorar cualquier proceso.

## **1.5 Limitaciones y suposiciones**

La metodología propuesta para el nuevo sistema de riego y cargado de columnas del proceso de biolixiviación, tiene como supuesto que las condiciones iniciales del medio no son homogéneos, no existe un análisis químico previo y no existe una muestra representativa que puede ser usado como referencia.

Son necesarias más pruebas que confirmen la metodología propuesta debido a que cada demostración consume un periodo de tiempo de aproximadamente cuatro meses que complica la mejora del procedimiento. Otros parámetros son la carencia de equipo especializado en el área de trabajo, la falta de personal e interés por parte de algunos departamentos sobre la importancia del monitoreo de las características físicas y químicas del mineral.

Durante el desarrollo de la metodología se observó que se podían modificar algunos parámetros, el tamaño de partícula para las columnas puede estar en el rango menor o igual que tres pulgadas, sin embargo, se observó la presencia de finos, ocasionando la formación de conglomerados que interrumpen el flujo de la solución de riego, debido a lo anterior, es necesario encontrar un tamaño mínimo de partícula para evitar dichos problemas.

## **1.6 Objetivo**

Delimitar los factores que intervienen en el proceso de biolixiviación en columnas a nivel laboratorio, de una unidad minero-metalúrgica ubicada en el norte de México, mediante un análisis físico y químico de la preparación de mineral de sulfuros y óxidos de cobre (covelita, malaquita, bornita, cuprita, azurita, pirita, calcopirita, calcantita y calcosita) y proponer un nuevo sistema de riego para el proceso experimental de biolixiviación que será de ayuda para maximizar la eficiencia de las columnas, reducir problemas operativos y alcanzar una mayor recuperación de cobre.

## 1.7 Resumen

En el primer capítulo se explica el objetivo de la minería y la metalurgia, así como una breve introducción de la importancia del cobre, asimismo, se plantean los problemas, propuestas de solución y motivación de este trabajo.

Durante el segundo capítulo se hace un pequeño resumen de la preparación mecánica del mineral, enfocado a los procesos físicos que éste es sometido.

El tercer capítulo se enfoca a las principales aplicaciones de las técnicas de extracción hidrometalúrgica por medio de la lixiviación, para minerales oxidados y sulfurados de cobre.

Por otra parte, en el cuarto capítulo se habla brevemente de México como un país minero, se hace referencia a su ubicación geográfica, geología y principales minerales.

Así mismo, en el quinto capítulo se enfoca a la metodología del proceso experimental realizado, como la descarga de columnas, análisis granulométrico y análisis químico.

El sexto capítulo se orienta al análisis y discusión de los resultados de la descarga de columnas, análisis granulométrico y análisis químico.

Por último, las conclusiones y el trabajo futuro se abordan en el capítulo séptimo.

# CAPÍTULO II

## Preparación mecánica del mineral

*“Lo que sabemos es una gota de agua; lo que ignoramos es el océano”*

Isaac Newton

---

### 2.1 Introducción

La preparación mecánica de un mineral es uno de los pasos primordiales antes de someterlo a cualquier tratamiento químico, es de vital importancia debido a que de esta etapa depende el incremento del área de contacto entre los minerales y los reactivos químicos para el proceso de lixiviación y finalmente llegar a la producción de metales comercialmente puros.

Para la disposición del mineral se requieren de métodos físicos como, trituración, molienda, análisis granulométrico, además se realiza un análisis químico al mineral después de la voladura, para tener una mejor disposición del material de acuerdo a la ley mineral.

### 2.2 Propiedades físicas y químicas del mineral

Todo mineral posee características físicas y químicas particulares que lo define, gracias a esto se puede tener un amplio conocimiento en su comportamiento para poder ser tratado y obtener una mayor recuperación en un tiempo determinado a menor costo.

Algunas de las principales características físicas son: la densidad, el peso específico, la porosidad, permeabilidad, ángulo de rodamiento y las químicas son: solubilidad, reactividad, radiactividad, composición química, etc.

## 2.3 Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es un parámetro de medida del mineral, sus dimensiones se definen de acuerdo con el proceso al que va a ser sometido, a las características físicas, químicas y ley de concentración del mineral. Esta medición es importante porque la superficie en reacción aumenta cuando disminuye el tamaño de partícula, pero debe encontrarse un punto de equilibrio, para evitar problemas como la formación de lodos, saturaciones, conglomerados, bloqueo de equipos, etc., cabe mencionar que la forma del tamaño de partícula es de forma irregular como se observa en la Figura 4.



**Figura 4.** Diferentes tamaños de partícula.

Toda operación metalúrgica, puede realizarse con mayor eficiencia si el material que se alimenta al proceso es de composición y tamaño regular. El control de tamaño de partícula tiene distintos objetivos, uno de ellos es facilitar la manipulación del material, por ejemplo, la trituración del mineral en una mina subterránea permite un mejor transporte, o bien, para hacer que el producto sea adecuado para su venta como en el caso de un agregado pétreo.

Otro de los principales objetivos de la reducción de tamaño es para lograr la liberación de partícula entre la mena y la ganga, para posteriormente continuar con los procesos de concentración. Desde esta etapa del proceso se pueden definir planes para eliminar las especies mineralógicas que pudieran significar alguna dificultad en los procesos metalúrgicos subsecuentes.

Para exponer o liberar elementos esenciales para el procesamiento posterior, la exposición y la liberación de partícula se logran con la reducción de tamaño. En el proceso siguiente (lixiviación) con suficiente exposición de los valores, los minerales tienen que ser previamente separados por procesos físicos, por lo que es necesario tener un control adecuado de liberación de partícula de los diferentes minerales entre sí.

Es importante controlar la composición del mineral, eliminar elementos o compuestos que puedan ocasionar que el mineral sea difícil de procesar químicamente o que den lugar a la obtención de un producto final que no cumpla con las características adecuadas. La producción de un concentrado es la fase más compleja y difícil del procesamiento de minerales, debido a que en ella intervienen la liberación de partícula, y el control de la composición química.

### **2.3.1 Liberación de partícula**

La liberación de partícula es un paso central de la separación de un mineral en sus distintas porciones de mena o ganga. El rango de liberación pertenece a un porcentaje del mineral de valor, pero también existen partículas liberadas que se desechan y son llamadas partículas no liberadas o intermedias. Para que este paso se pueda llevar a cabo satisfactoriamente depende del tratamiento al que se someta.

La trituración y molienda ayudan a la liberación del mineral de interés al fracturar el material con la finalidad de obtener un grado de liberación, pero algunas veces en este paso quedan partículas de tamaño intermedias, por lo que, el material requiere ser recirculado en el proceso de molienda, cuando no se logra alcanzar el grado de liberación adecuado a pesar del proceso de recirculación el material es transportado a la presa de jales.

## **2.4 Toma de muestra**

Consiste en adquirir una parte representativa del área donde se encuentra el mineral a tratar, esta debe ser lo más homogénea posible, el principal objetivo es tener un control de calidad. Para hacer la toma de muestra, existen distintas técnicas, como los son: cono-cuardeo, cortador de rifles, reductor de triángulos y divisores rotatorios.

Las técnicas más utilizadas en la actualidad son el cono-cuardeo, cortador de rifles, reductor de triángulos y algunos automáticos.

#### 2.4.1 Cono cuarteo

El cono cuarteo es una de las técnicas que más se implementa para tomar una muestra, este método consiste en formar un medio cono invertido, con ayuda de palas o cucharas. Este medio cono debe de formarse paleando de abajo hacia arriba en varias ocasiones, hasta formar un stockpile (medio cono invertido) lo más homogéneo posible como se observa en la Figura 5.



**Figura 5.** Formación del stockpile.

Posteriormente con ayuda de una regleta, palo o varilla (Figura 6), se comienza a dar vueltas desde la punta del medio cono, en forma vertical hasta obtener un medio cono truncado o la forma de un pastel.



**Figura 6.** Medio cono invertido truncado.

Después se divide en cuatro partes iguales y se desechan dos cuartas partes, estos cuartos deben ser uno contrario del otro como se observa en la Figura 7.



**Figura 7.** División en cuatro partes.

Con las dos cuartas partes que quedaron se vuelve hacer todo el procedimiento desde el inicio hasta obtener otros dos cuartos, ahora se toman los cuartos contrarios. Esta técnica se repite mínimo cinco veces para asegurar una buena homogenización; cabe mencionar que, por lo general, para que la muestra sea lo más representativa y homogénea se utiliza el separador tipo Jones (cortador de rifles) en el proceso de cono-cuardeo (Figura 8).

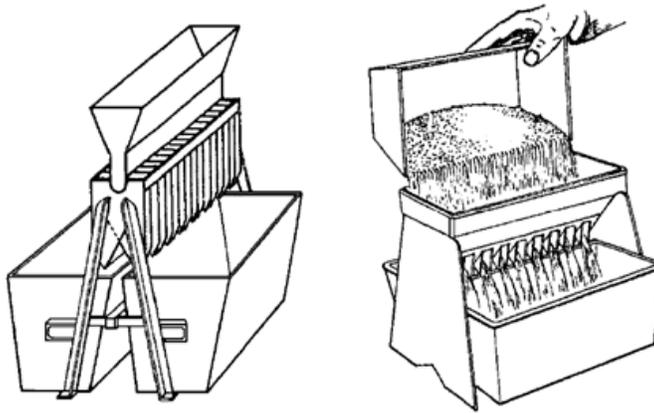


**Figura 8.** Separador tipo Jones.

## 2.4.2 Separador tipo Jones

El separador tipo Jones o cortador de rifles (Figura 9), tiene como objetivo dividir la muestra, para realizar este tipo de muestreo se vierte el material en la parte superior del separador y este lo divide en dos partes, una de ellas se descarta y con la otra se trabaja, si se desea se puede repetir este procedimiento las veces que se considere necesario.

Es importante mencionar que el tamaño máximo de partícula de la muestra debe ser igual o menor que 15 milímetros, debido a que el equipo está diseñado para este rango de tamaño.



**Figura 9.** Muestreo con el cortador de rifles. Recuperado de <https://www.academia.edu>.

## 2.5 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico es la separación o distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de mineral. Tiene como objetivo la optimización y diseño de parámetros de los procesos de clasificación y diseño de circuitos de conminución (trituration, molienda y recirculados).

Este análisis también ayuda a conocer y definir el tamaño de liberación del mineral, es útil para conocer el área de contacto entre los reactivos químicos y el mineral, para alcanzar una mayor recuperación en el proceso de flotación o extracción.

## 2.5.1 Cribado y tamizado

Para realizar el análisis granulométrico, se hace pasar la muestra a través del Rot-Tap, el cual está compuesto por tamices (mallas) o cribas de diferentes tamaños (Figura 10). El funcionamiento de dicho equipo es por medio de una combinación de movimiento oscilatorio y vibraciones que ayudan a separar las partículas por tamaños.



**Figura 10.** Diferentes Rot-Tap con distintos tamaños de cribas.

El cribado consiste en seleccionar el número de mallas o cribas y tamaño, por el cual se va a pasar la muestra, para hacer la selección, se necesita saber el tamaño más grande y pequeño de partícula que se tiene en la muestra. Una vez identificado estos dos tamaños se prosigue con el uso de ecuaciones para saber el número y acomodo de los tamices o cribas.

Esta selección suele realizarse de forma arbitraria, de acuerdo con los resultados obtenidos por experiencia en cada unidad minero-metalúrgica.

Después de tener seleccionadas y colocadas las mallas en el Rot-Tap, se vierte la muestra y comienza el proceso de cribado, donde se divide la muestra por tamaños de partículas, quedando en la parte superior de la criba el retenido (partículas gruesas) o acumulado positivo, lo que queda por debajo es el acumulado negativo y las partículas que quedan en el tamiz ciego (base) son partículas finas.

Finalmente se retira el mineral retenido de cada tamiz, procurando no dejar alguna partícula, se pesa la masa retenida y se pone dentro de un recipiente o bolsa para tener un control adecuado por si requiere utilizar de nuevo la muestra (Figura 11).

Cabe mencionar que la muestra antes de ser llevada por este proceso no presente humedad, debido a que se pueden formar conglomerados, lodos y pérdidas de material. Esto podría arrojar datos erróneos durante el análisis.

Una vez obtenidos los resultados del procedimiento anterior, se inicia con los cálculos matemáticos para obtener el análisis granulométrico y un balance de masa.



**Figura 11.** Una muestra después de ser cribada.

### **2.3 Trituración, molienda y secado**

Existen distintas formas de agrupar los métodos de reducción de tamaño de partícula, debido a que la reducción de tamaño ocurre en etapas, el tamaño de las partículas aporta el método primario de agrupamiento. Cuando el cuerpo del mineral es de carácter masivo, la primera etapa de reducción de tamaño es el minado, por lo regular se realiza con explosivos, también pueden usarse medios mecánicos en los minerales blandos como lo son talco, yeso, etc.

Para lograr una reducción de tamaño del mineral, se necesita que éste pase por dos procesos físicos, primero por una trituración y después por la molienda, el proceso depende de la granulometría del mineral con la que son alimentadas a las trituradoras, en algunos casos es necesaria una trituración o una molienda secundaria, terciaria y en ocasiones una cuaternaria.

La molienda puede subdividirse por el tipo de molino, el tipo de los medios de molienda en medio húmedo o seco.

Para los óxidos y sulfuros de cobre es necesario obtener un concentrado que pase por ambos procesos físicos (trititación y molienda) para que las partículas de dicho mineral se liberen de otros compuestos no deseados.

Algunas de las razones cruciales para tener un control adecuado del tamaño de partícula en minerales de cobre son:

- Las partículas de mayor tamaño provocan que los minerales de cobre se queden atrapados (entrelacen) en los minerales de la ganga, y no puedan ser recuperados en el proceso de flotación (Biswas, y Davenport, 1993).
- Las partículas muy finas tienden a formar una lama, que puede cubrir a los minerales de cobre y disminuye la eficiencia del proceso de flotación (Biswas, y Davenport, 1993).

Una vez que se obtenga el concentrado es importante que se reduzca el porcentaje de humedad en un rango de 6-8%, para lograr ese objetivo se utilizan prensas hidráulicas.

Para el análisis granulométrico es importante que cualquier muestra representativa esté seca en su totalidad (0% de humedad), para que durante el análisis granulométrico los cálculos y procedimientos tengan un mejor control. Para el procedimiento de secado, el mineral puede colocarse a la intemperie, cuidando que no exista contaminación por polvos, también puede emplearse un horno.

# CAPÍTULO III

## Fundamentos de hidrometalurgia para la extracción de cobre

*“No es la especie más fuerte la que sobrevive, ni la más inteligente, sino la que responde mejor al cambio”*

Charles Darwin

---

### 3.1 Introducción

#### Lixiviación de minerales

Después de que el mineral ha pasado por la preparación mecánica, continua el proceso de extracción, en el caso del cobre, actualmente se utilizan dos métodos: hidrometalúrgico y pirometalúrgico.

Hoy en día, los métodos hidrometalúrgicos son los más utilizados debido a que presentan ventajas ambientales y de recuperación en comparación con otros métodos, además, se adaptan mejor a los yacimientos de menor ley mineral.

Los métodos hidrometalúrgicos utilizan diferentes concentraciones de ácidos los cuales disuelven los contenidos de cobre en el mineral, de esta forma el cobre pasa a solución acuosa, sin embargo, existen algunos problemas, por ejemplo, algunos contaminantes como el hierro también se disuelven y algunas especies mineralógicas son más reactivas a los ácidos utilizados como en el caso de los carbonatos, que tienen una velocidad de disolución muy rápida; por otro lado, los sulfuros tienen una menor velocidad por lo que se deben de tomar algunas consideraciones para acelerar el proceso, las acciones que se tomen repercutirán sobre la producción y el grado de pureza del metal y afectarán la rentabilidad de todo el proyecto.

La solución acuosa compuesta por ácido sulfúrico por lo regular es el medio de lixiviación para los minerales de cobre. El amoniaco y el ácido clorhídrico son usados en algunos casos para minerales de sulfuro compuesto por níquel-cobre o mata y han sido propuestos para concentrados de cobre.

El ácido sulfúrico en distintas concentraciones es el reactivo más utilizado debido a las ventajas que presenta como: bajo costo y la acción rápida sobre minerales de cobre que contienen oxígeno.

## 3.2 Minerales de cobre

Existe una gran variedad de minerales de cobre, los cuales se pueden dividir en dos grupos: óxidos y sulfuros.

La extracción de cobre mediante la vía hidrometalurgia es más eficiente para los minerales de óxidos de cobre, esto se debe a que el oxígeno del mineral reacciona con el hidrogeno del ácido, lo cual permite que la reacción sea rápida para los óxidos. Algunos de los minerales más importantes se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Minerales más importantes de óxido de cobre (Biswas y Davenport, 1993).

<b>Tipo</b>	<b>Minerales comunes</b>
<b>Carbonatos</b>	Azurita $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ Malaquita $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
<b>Silicatos</b>	Crisocola $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
<b>Sulfúricos</b>	Sulfitos $3\text{CuOSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Los óxidos de cobre son el producto de la degradación de los depósitos de sulfuro y a menudo se encuentran pequeñas cantidades de sulfuro de hierro y cobre en su composición (Biswas y Davenport, 1993).

Los sulfuros de cobre también se lixivian utilizando ácido sulfúrico, sin embargo, no es tan recomendable debido a que el proceso es más tardado comparado con los óxidos y por la formación de capas pasivas que limitan la disolución de cobre.

Debido a esto, la lixiviación de sulfuros se ha limitado al tratamiento prolongado de desechos minerales de óxidos y sulfuros por un período de 3 a 30 años. Sin embargo, mediante esta técnica de lixiviación prolongada son extraídas grandes cantidades de cobre y su importancia como suministro de cobre va aumentando. Los principales minerales de sulfuro encontrados en los depósitos de lixiviación son la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), calcosita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y pirita ( $\text{FeS}_2$ ). Los componentes de hierro de la mineralización son importantes porque conllevan a la formación de sulfato férrico.

### 3.2.1 Óxidos

El proceso de lixiviación para los óxidos es muy rápido porque es soluble en el ácido sulfúrico.

Los ciclos de lixiviación típicos para los minerales que contienen oxígeno son de 2 a 5 horas para concentrados con tamaño de partícula fina mediante la lixiviación por agitación, de 5 a 10 días para partículas trituradas en la lixiviación en tanques y de 100 a 180 días para la lixiviación en montones, pero la rapidez real de disolución depende del tipo de lixiviación y de las condiciones de contacto. Los factores que favorecen al proceso de lixiviación son la concentración de ácido (hasta 150 kg  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{m}^3$ ), temperatura (hasta 60 °C), grandes áreas de contacto y agitación.

### 3.2.2 Sulfuros

Debido a que los sulfuros de cobre son poco solubles en ácido sulfúrico las reacciones que ocurren en el proceso de lixiviación tienden **a ser muy lentas**, pueden pasar años para poder lixivarse, por lo cual no es rentable este proceso para los minerales sulfurados a menos de que existan algunos medios como las bacterias que podrían acelerar el proceso.

## 3.3 Métodos de lixiviación

Existen distintos métodos de lixiviación dentro de la hidrometalurgia para la extracción del cobre, algunos de ellos son:

- Lixiviación en tanques
- Lixiviación en terreros y pilas
- Lixiviación en el lugar (in situ)
- Lixiviación por agitación

También existe un proceso de lixiviación de sulfuros de cobre en medio ácido con bacterias, este método la recuperación es más lenta en comparación con los otros, sin embargo, se encuentra en investigación para que pueda ser eficiente en cuanto al tiempo, debido a que con este método las recuperaciones son atractivas.

### **3.3.1 Lixiviación en tanques**

Los óxidos de cobre por lo regular se lixivian en tanques, cuando el mineral tiene una ley de 1-2 % de Cu, para producir directamente la solución lixiviante concentrada, con suficiente cobre para la separación por electrolisis (30 a 50 kg de Cu/m<sup>3</sup>).

Como se menciona en el Capítulo II, el tamaño de partícula es un parámetro muy importante para llevar acabo de manera eficiente los procesos de extracción de minerales. La lixiviación en tanques requiere que el mineral se encuentre a un tamaño de partícula menor a 1 centímetro con una solución de 50 a 100 kilogramos de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> en grandes tanques rectangulares (25 metros de largo, 15 metros de ancho, 6 metros de profundidad), que permita la aireación del lote y produzca el contacto con la solución lixiviante. La lixiviación frecuentemente tiene una secuencia de cuatro a siete ciclos de llenado y desagüe. Las primeras dos o tres operaciones de llenado con soluciones concentradas se usan como electrolitos (después de la purificación), mientras que las soluciones restantes (diluidas en cobre) se vuelven a usar para lixiviar los lotes nuevos de mineral. La lixiviación continua en tanques mediante la cual el lixiviante fluye a través del mineral en una serie de tanques.

Uno de los problemas que se tiene con este proceso es la gran acumulación de finos, los cuales generan capas impermeables que impiden una percolación uniforme del lixiviante evitando el contacto con la mena, provocando un bajo rendimiento de la lixiviación, por lo tanto, se genera un incremento de los costos de operación.

### **3.3.2 Lixiviación en terreros y pilas**

Para los minerales que contienen cobre con una ley baja (menores que 0.3%), se usa la lixiviación en terreros, por lo regular este mineral proviene de un método de explotación a cielo abierto.

La roca se apila en depósitos de millones de toneladas, el lixiviante se distribuye periódicamente sobre la superficie para que escurra a través del depósito. La mayor parte del cobre lixiviado en los terreros proviene de minerales sulfurados para lo cual es necesario el oxígeno, el cual es suministrado entre las aplicaciones periódicas mensuales del lixiviante, de modo que el aire se infiltre al interior de los depósitos.

La lixiviación en pilas prácticamente es igual que la lixiviación en terreros, la diferencia es que en los depósitos de mineral oxidado superficial se dividen y apilan en pilas de 100 000 a 500 000 toneladas. El mineral del terrero tiene un tamaño de partícula menor que 10 centímetros, la lixiviación es continua y más rápida.

### **3.3.3 Lixiviación en el lugar (in situ)**

La lixiviación in situ se aplica a minerales de baja ley este proceso implica la ruptura de la mena en el lugar de explotación con explosivos sin que la mena sea extraída y transportada a otro lugar para su tratamiento. Esto puede hacerse en depósitos superficiales o minas subterráneas. Es una técnica que requiere la fractura de la roca subterránea bajo presión hidráulica, se diseñan pozos de recolección y sistemas de bombeo para recolectar el lixiviado.

### **3.3.4 Lixiviación por agitación**

Para el caso de la lixiviación por agitación se requieren un tamaño de partícula fina (menor o igual a 75 micrómetros), el mineral tratado debe pasar previamente por trituración y molienda. Este procedimiento requiere una ley más alta en comparación con la lixiviación in situ debido a que es más costoso, sin embargo, la recuperación es mayor en un intervalo de tiempo menor.

La lixiviación por agitación es el proceso de disolución más rápida de partículas finas, toma 2 a 5 horas conseguir una recuperación de cobre mayor que 80%, mientras que la lixiviación in situ, pilas y terreros toma años y en tanques toma días. Normalmente el tamaño de partícula para este método es de aproximadamente 75 micrómetros, donde al menos el 90% de la carga debe cumplir con esta granulometría. Los concentrados de cobre provienen de minerales de óxidos o productos calcinados del tostador que son sometidos a soluciones concentradas de ácido (50 a 100 kg de  $H_2SO_4/m^3$ ).

La rápida velocidad de lixiviación se debe a:

- El tamaño de partícula (mayor liberación del cobre presente en el mineral)
- La rápida saturación de la solución de lixiviación de la superficie de mineral como resultado de agitación vigorosa

Los minerales sulfurados no son lixiviados durante este proceso (formación de capas pasivas).

Por lo regular, para este proceso se tiene una serie de tres o cuatro tanques con un volumen aproximado de 50 a 200 m<sup>3</sup>, los medios mecánicos o el aire proporcionan la agitación. La lixiviación de minerales que contienen oxígeno es un proceso simple debido a su alta solubilidad en ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Las precauciones necesarias para obtener extracciones de más de 95% son:

- Molienda fina
- Concentración de ácido moderadamente alta al comienzo y final del ciclo de lixiviación

### **3.3.5 Lixiviación de los sulfuros**

Debido a que los minerales oxidados de cobre son escasos, existen alternativas al procesamiento de minerales sulfurados de cobre, algunos métodos para la lixiviación de sulfuros de cobre son:

- Disoluciones de sales férricas, preparadas o formadas in situ, en la propia lixiviación, en presencia del oxígeno, como el sulfuro de hierro. Estas disoluciones, como los cloruros, son oxidantes y atacan bien a los sulfuros minerales de cobre. En la lixiviación a presión de menas sulfuradas, el oxígeno sirve para oxidar sulfuro a sulfato o a azufre elemental (Sancho y Colaboradores, 2000).
- Disoluciones clorhídricas con un oxidante, o cloraciones que atacan con facilidad los sulfuros de cobre pasando el cloruro de cobre a disolución (Sancho y Colaboradores, 2000).
- Lixiviación de sulfuros para desintegrar al cobre en forma de cationes y al azufre como aniones de óxido-sulfuro, por ejemplo, el proceso Arbiter (proceso de lixiviación a presión atmosférica con NH<sub>3</sub> – O<sub>2</sub>) de lixiviación con amoniaco-oxígeno (Biswas, y Davenport, 1993).
- Lixiviación con agua de mar. El uso de agua de mar es una forma práctica de explotación de sulfuros de cobre rápida y económica, menos contaminante, se utilizan los iones cloruro presentes en el agua de mar (UCN, 2015).

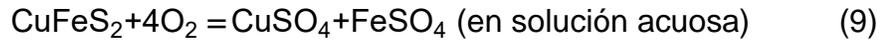
### **3.3.6 Lixiviación de los sulfuros mediante bacterias**

La lixiviación mediante bacterias de minerales sulfurados utiliza microorganismos que ayudan en la extracción de la mena. La disolución de metales es realizada por acción de bacterias sobre especies minerales poco solubles. Este proceso se usa para minerales de baja ley y desechos industriales.

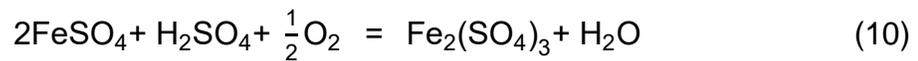
Las condiciones oxidantes para la lixiviación prolongada de minerales de sulfuro (lixiviación en depósitos de los desechos minerales) son proporcionadas por el aire atmosférico. Las bacterias aceleran la oxidación de los sulfuros de cobre y hierro.

La bacteria *thiobacillus thiooxidans* oxida el sulfuro a sulfato y las *thiobacillus ferrooxidans* oxida el hierro de ferroso férrico (Sancho y Colaboradores, 2000).

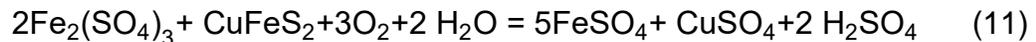
El ataque de los sulfuros de cobre en medio sulfatado y con presencia de bacterias involucra las siguientes reacciones



La *Thiobacillus ferrooxidans* óxidan químicamente a los iones ferrosos para formar iones férricos y catalizan la reacción y aceleran el proceso de lixiviación.



El efecto oxidante del ion férrico pasa a disolución el cobre contenido en mineral en forma de sulfuro.



El agua potable contiene bacterias autotróficas (obtienen sus nutrientes y energía de materia orgánica), el hacer uso de éste tipo de agua proporciona los cultivos iniciales de bacterias para la lixiviación. Para que la bacteria cause una acción optima se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Un pH entre 1.5 y 3.5
- Temperatura de 25 a 45 °C
- Un suministro de oxígeno
- Evitar la exposición a la luz solar
- Un buen contacto entre el lixivante y el mineral

# CAPÍTULO IV

## Complejos mineros-metalúrgicos de cobre en México

*“El sabio no dice nunca todo lo que pieza, pero siempre piensa todo lo que dice”.*

Aristóteles

---

### 4.1 Introducción

México se posiciona en el lugar número ocho en producción de cobre a nivel mundial y el estado de Sonora es el primer productor de cobre a nivel nacional con el 84.1% de la producción total, le sigue el estado de Zacatecas con el 6.2 % y San Luis Potosí con el 4.5%.

El estado de Sonora cuenta con los yacimientos y reservas más grandes de cobre del país, la mayoría de sus minas son operaciones a cielo abierto y su extracción se realiza utilizando los métodos de flotación y lixiviación.

México también cuenta con yacimientos de oro, plata, molibdeno, aluminio, hierro selenio, y otros, también se realiza la explotación de minerales no metálicos como arcillas, agregados pétreos, yeso, entre otros.

## 4.2 Ubicación

La República Mexicana se encuentra ubicada en el continente de América (Figura 12), colinda con los Estados Unidos de América al norte y al sur con Guatemala y Belice.



**Figura 12.** Mapa de la República Mexicana. Recuperado de <http://cuentame.inegi.org>.

Cuenta con 32 estados y a su vez está dividido en municipios o alcaldías. Se puede acceder por vía aérea, terrestre y marítima.

Es un país minero, por lo que las principales actividades económicas son la minería y la extracción de petróleo y cuenta con 129.2 millones de habitantes.

### 4.3 Geología

México ha sido afectado a través del tiempo por varios eventos geológicos de gran importancia, esto ocasionó que se convirtiera en un lugar privilegiado: el estado de Sonora contiene la columna estratigráfica más completa del país, es el estado donde se han identificado las rocas más antiguas del país y la localización del límite de placas tectónicas.

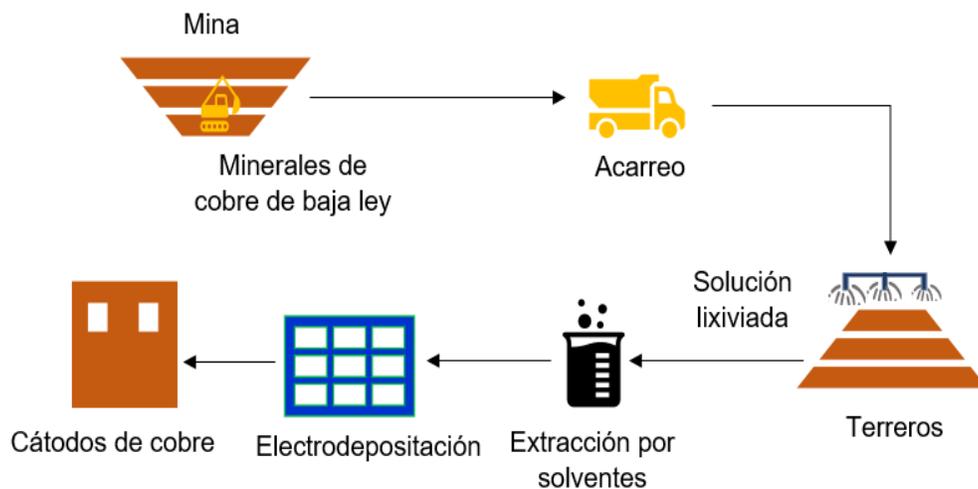
Estos eventos geológicos con las condiciones necesarias ocasionaron un remplazamiento de una gran variedad de depósitos minerales tanto metálicos como no metálicos como se observa en la Figura 13.



**Figura 13.** Plano potencial geológico en la República Mexicana. Recuperado de <http://www.sgm.gob.mx>.

#### 4.4 Proceso de lixiviación para minerales de cobre.

Varias minas a cielo abierto ubicadas en el norte de México extraen cobre de minerales con baja ley (0.19 a 0.3%) como se muestra en la Figura 14, con ayuda de camiones fuera de carretera, el mineral explotado es llevado a terreros, donde las rocas son apiladas en un área determinada. Los bancos de los terreros tienen una altura aproximada de 30 metros y un área de 27 hectáreas. El lixiviante se distribuye periódicamente (60 días de riego y 60 días de reposo) sobre la superficie para que escurra a través del depósito, pasando posteriormente a una extracción por solventes, donde se eleva la concentración de cobre de la solución (50 g/l) y finalmente los cátodos de cobre son obtenidos por electrodeposición. La mayor parte del cobre lixiviado en los terreros proviene de minerales oxidados y sulfurados por lo cual es necesaria la inyección de oxígeno, de modo que el aire suba a través de los depósitos.



**Figura 14.** Esquema del proceso de lixiviación en un complejo minero.

# CAPÍTULO V

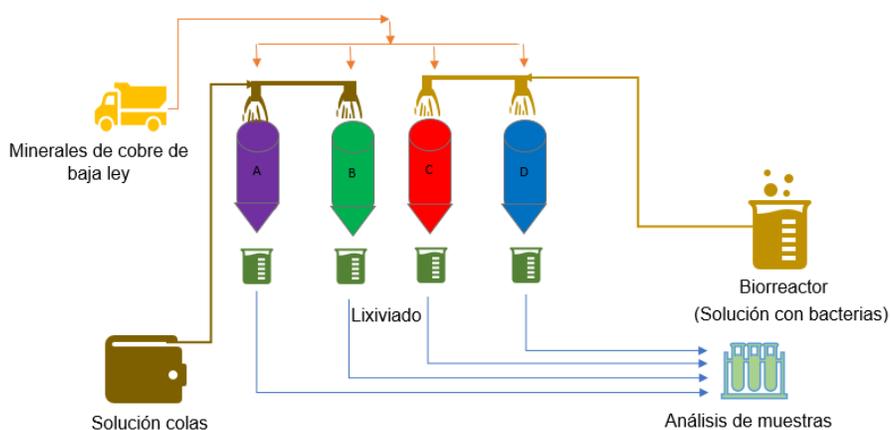
## Metodología experimental

*“Es sencillo hacer que las cosas sean complicadas, pero difícil hacer que sean sencillas”*

Nietzsche

### 5.1 Introducción

En un complejo minero ubicado en el norte de México, se encuentra en proceso experimental el método de lixiviación mediante bacterias (Figura 15), el cual consiste en tener 4 depósitos en una escala determinada, asemejándolo lo más posible a las condiciones reales.



**Figura 15.** Esquema del proceso experimental con bacterias.

A continuación, se presenta un esquema y una breve descripción de la metodología que se siguió para el proceso experimental, el análisis granulométrico y químico **en la Figura 16.**

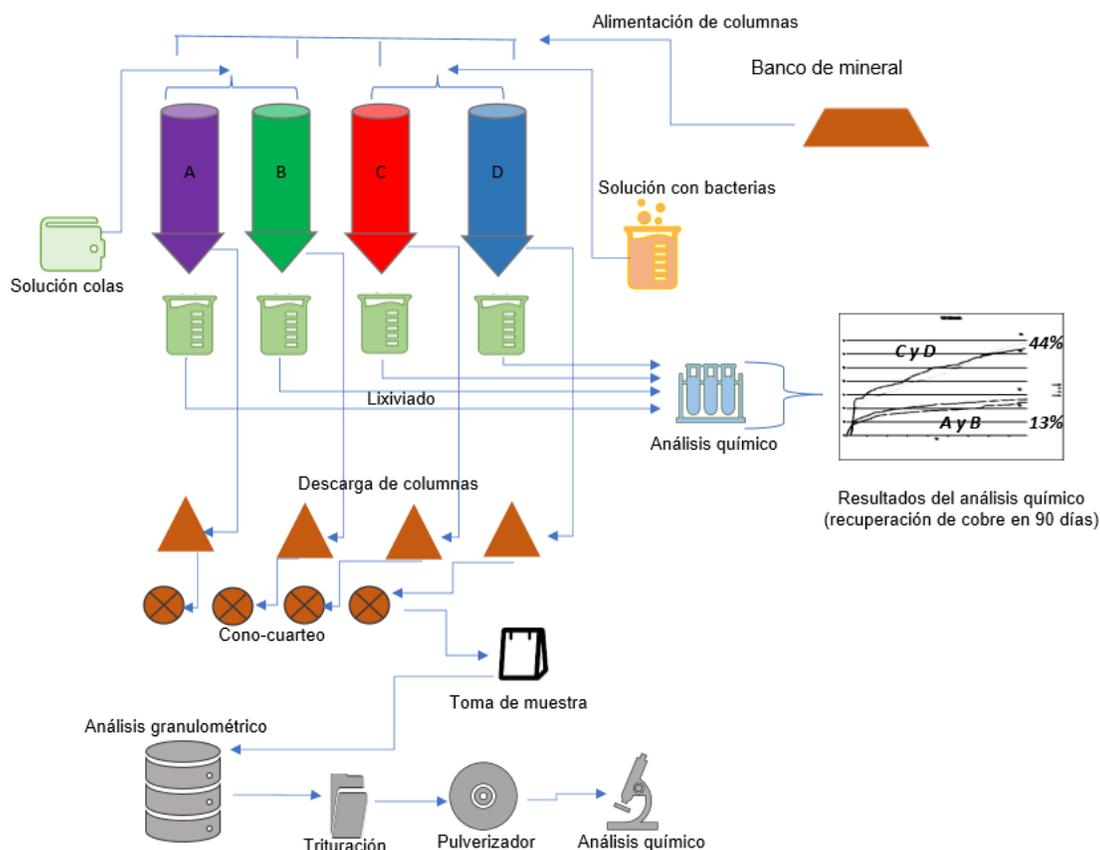
Se alimentaron cuatro columnas con mineral de cobre de baja ley (0.197%), y se le realizó un análisis químico al mineral de cabeza (Tabla 2).

**Tabla 2.** Análisis químico del mineral de cabeza.

%Cu	%CuO	%Fe	%Mn
0.197	0.014	4.1	0.008

La granulometría con que se cargaron las columnas (A, B, C y D) fue menor a 3 pulgadas. Durante 90 días, A y B fueron regadas con solución colas (1% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), C y D con una solución con bacterias, se tomó una muestra diaria del lixiviado y se realizaban rondines para verificar el funcionamiento del proceso. Durante los recorridos de vigilancia se observaron anomalías como el taponamiento de columnas, granulometrías mayores a 3 pulgadas y cristalización de la solución con bacterias por lo que se sugirió hacer un análisis granulométrico y químico a los residuos.

Al finalizar las pruebas experimentales se dejaron pasar 10 días para hacer la descarga de cada una de las columnas y tomar una muestra representativa por el método de cono-cuarteo, posteriormente se hizo un análisis granulométrico y finalmente se trituró y pulverizó cada una de las muestras para realizar un análisis químico y mineralógico (Figura 16).



**Figura 16.** Resumen de una primera prueba experimental de lixiviación con bacterias.

En la Tabla 3 se mencionan las condiciones iniciales para las cuatro columnas y la Tabla 4 muestra las condiciones particulares para las columnas C y D.

**Tabla 3.** Condiciones iniciales para las cuatro columnas.

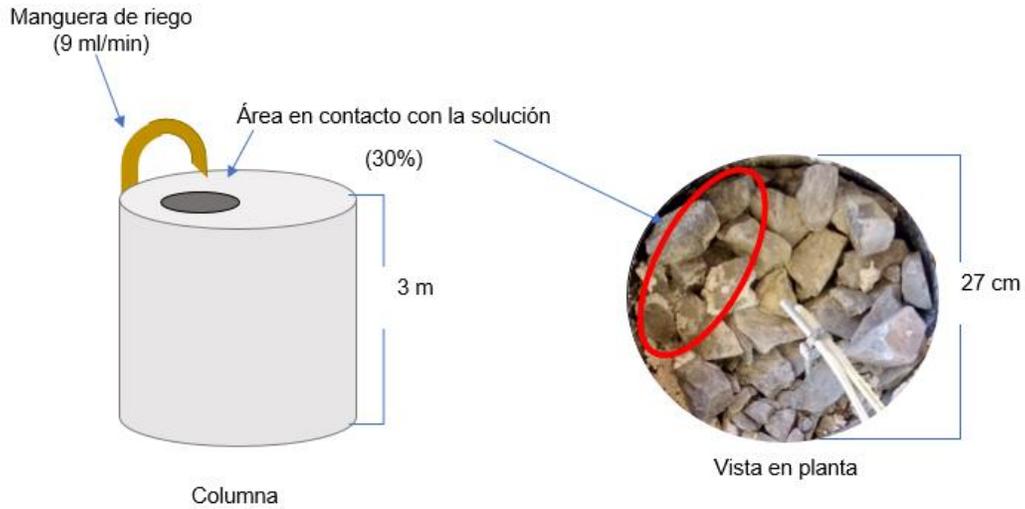
<b>Parámetro inicial</b>	
<b>Granulometría</b>	Menor a 3 pulgadas
<b>Ley de cabeza</b>	0.197 % Cu
<b>Concentración de ácido sulfúrico</b>	10 gramos/litro
<b>Tiempo de riego</b>	90 días
<b>Tasa de riego</b>	9.1 mililitros/minuto
<b>Altura de columnas</b>	3 metros
<b>Diámetro de columnas</b>	27 centímetros
<b>Masa por columna</b>	500 kilogramos

**Tabla 4.** Condiciones particulares para las columnas C y D.

<b>Parámetro inicial</b>	
<b>Tipo de bacterias</b>	Termófilas
<b>Población de bacterias</b>	10 <sup>6</sup> microorganismos/mililitro
<b>Temperatura</b>	45 °C
<b>Nutrientes para bacterias</b>	90 gramos de sulfato de amonio, 1058 gramos de sulfato ferroso, 1.7 gramos fosfato de potasio para 250 litros

Finalmente, otra de las condiciones iniciales es el sistema de riego, que fue uno de los principales problemas técnicos que se observan en el proceso experimental de columnas a nivel laboratorio.

El sistema de riego para las cuatro columnas está formado por una manguera fija, para cada columna, este sistema solo permite que la solución entre en contacto con una pequeña área de la columna como se observa en la Figura 17.

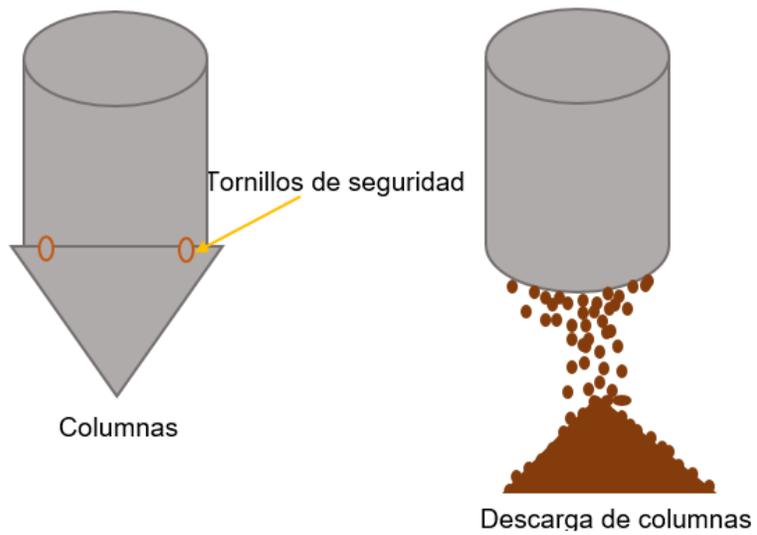


**Figura 17.** Esquema del sistema de riego.

## 5.2 Toma de muestra

Para obtener una muestra representativa para el análisis granulométrico se realiza la descarga del mineral de cada una de las columnas.

Cada columna cuenta con una tapa de seguridad en la parte inferior, sujeta con cuatro tornillos (Figura 18), los cuales deben retirarse con llaves especiales. El último tornillo debe quitarse de forma rápida, debido a que el material cae por gravedad.



**Figura 18.** Esquema de descarga de columnas.

Primero se descargó la columna A, luego la B, C y D, dando un intervalo de tiempo de 2 horas cada una, para que el material de cada columna no se combine entre los residuos de cada columna (Figura 19).



**Figura 19.** Descarga de columnas.

### 5.3 Recolección de muestras sólidas para el análisis granulométrico

Se tomaron muestras representativas mediante el método de cono cuarteo, con una masa de aproximadamente 30 kilogramos cada una (Figura 20).



**Figura 20.** Toma de muestra de mineral de cada una de las columnas.

#### 5.3.1 Preparación física de las muestras para el análisis granulométrico

Se obtuvo una muestra seca de cada columna con una masa aproximada a 30 kilogramos, cada una de ellas se colocó en un bote de 20 litros y se etiquetó.

En el laboratorio de concentración de minerales se volvió a verificar que cada muestra estuviera seca y etiquetada, una vez verificando los datos se prosiguió con la selección del material, tomando en cuenta que, para la selección de mallas, el tamaño mayor de partícula de acuerdo con el diseño de columnas debería ser igual o menor a 3 pulgadas.

### 5.3.2 Equipo y material para el análisis granulométrico

Para hacer el análisis granulométrico de cada columna se requiere el siguiente material físico:

- Báscula
- Cribas (de acuerdo con la selección)
- Bolsas para muestra
- Charolas y cubetas
- Rot-tap

### 5.3.3 Análisis granulométrico

Debido a que el tamaño mayor de partícula es de 3 pulgadas, se hizo la selección de cribas a partir de esa referencia, además de que esta selección también fue sugerida por la empresa por fines prácticos.

Después de tener cada una de las mallas a ocupar, se vació la muestra en un Gilson (modelo GRIEVE 343, Figura 21a), se dejó cribar la muestra durante 10 minutos, con la finalidad de separar a las partículas por tamaño (Figura 21b), no obstante, el tiempo de separación de partículas no fue suficiente, por lo cual fue necesario un segundo cribado.



**Figura 21.** a) Gilson, b) Partículas por tamaño.

Para el segundo cribado se llevó a cabo en un Rot-Tap (modelo RX-29), la muestra se dejó de igual forma en un tiempo de 10 minutos (Figura 22).



**Figura 22.** Segundo cribado.

Posteriormente se pesó la masa retenida de cada tamiz (Figura 23a) y se colocó en bolsas, etiquetando cada una de ellas (Figura 23b), este procedimiento se realiza con las muestras obtenidas de cada una de las columnas.



**Figura 23.** a) Masa retenida, b) Clasificación de muestras por tamaño de partícula.

## **5.4 Recolección de la muestra para el análisis químico y mineralógico**

De cada una de las columnas se toma una muestra representativa de 1 kilogramo por el método de cono-cuarteo, de la cual se usa 10 gramos para el análisis químico.

### **5.4.1 Equipo y material para el análisis químico y mineralógico**

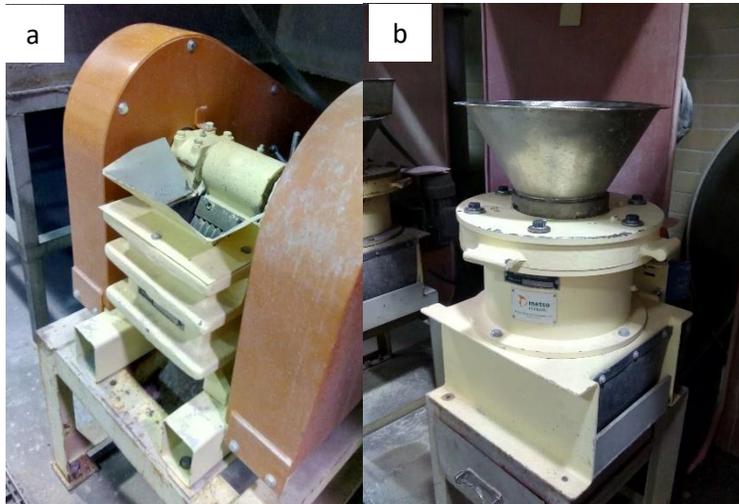
Para realizar el análisis químico se utilizó el siguiente material:

- Quebradora de quijada
- Trituradora de cono
- Separador tipo Jones
- Pulverizador de anillos
- Bolsas para el almacenamiento de las muestras
- Microscopio

### **5.4.2 Preparación mecánica de las muestras para el análisis químico y mineralógico**

Cada una de las muestras pasa por un circuito de trituración primaria, secundaria y terciaria para obtener una muestra a -10 mallas.

Se realiza una trituración primaria para cada una de las columnas en una quebradora de quijada (Figura 24a), posteriormente una trituración secundaria con ayuda de una trituradora de cono (Figura 24b) y finalmente se recircula la muestra volviendo a pasar por la quebradora de cono.



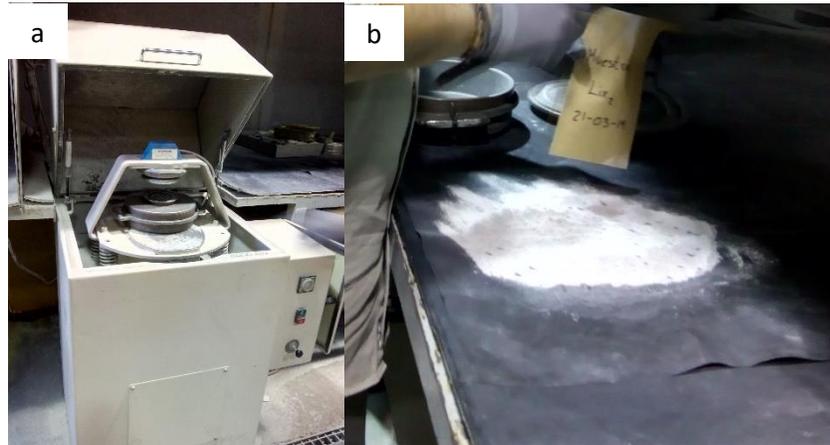
**Figura 24.** a) Quebradora de quijada, b) Trituradora de cono.

Posteriormente se pasó la muestra por el separador tipo Jones (aproximadamente 6 veces) para obtener una muestra a 0.5 kilogramos (Figura 25).



**Figura 25.** Muestra obtenida del separador Jones.

Una vez que se obtuvo la muestra de 0.5 Kg, se disminuyó el tamaño de partícula por medio de un pulverizador de anillos (Figura 26a). Después se manto y se volvió hacer el método de cono-cuardeo para finalmente obtener una muestra de 10 gramos (Figura 26b) y se envía a analizar por el método de absorción atómica y microscopio de barrido.



**Figura 26.** a) Pulverizador de anillos, b) Muestra de 10 gramos.

# CAPÍTULO VI

## Resultados

*“Lo falso es susceptible de una infinidad de combinaciones; pero la verdad no tiene más que una manera de ser”.*

Rousseau

---

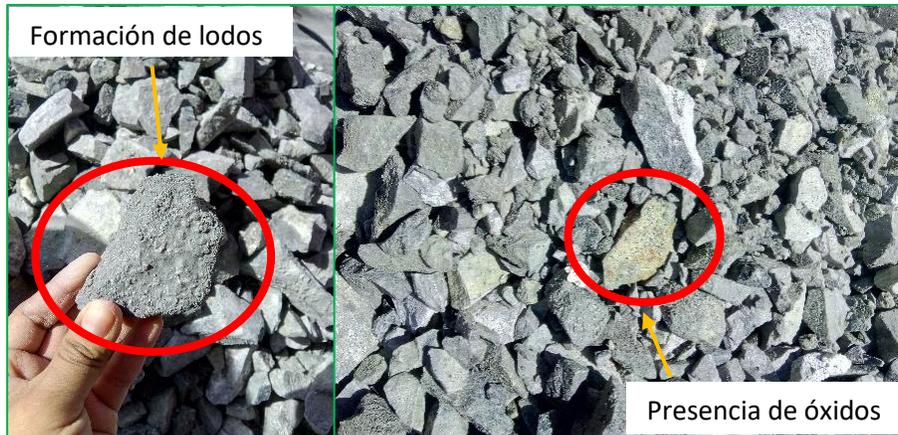
### 6.1 Descarga de columnas

Una vez descargada la columna A (Figura 27) se observa que el color de la roca es gris, con algunas zonas de óxidos, no presenta humedad y se percibe una cantidad importante de partículas finas.



**Figura 27.** Mineral de descarga de la columna A.

En la columna B (Figura 28) se observa la roca del mismo color que presenta la columna A, niveles variantes de humedad en la roca con presencia de zonas de oxidación (color amarillo opaco) y formación de lodos.



**Figura 28.** Mineral de descarga de la columna B.

Las columnas C y D (Figuras 29 y 30 respectivamente) presentaron una coloración amarilla debido a la solución de riego, no presentan humedad, se observó también una mayor cantidad de partículas finas, formación de conglomerados de 20 x 11 centímetros y de 13 x 22 centímetros.



**Figura 29.** Mineral de descarga de la columna C.



**Figura 30.** Mineral de descarga de la columna D.

## 6.2 Análisis Granulométrico

Se realiza un análisis granulométrico debido a que en la descarga de columnas se observaron partículas con un tamaño mayor a 3 pulgadas y la formación de conglomerados con partículas finas menores a 0.5 pulgadas.

Para las columnas A, B, C y D se obtuvieron los resultados, mostrados en el Anexo 1.

Donde el porcentaje retenido (%R) se calcula con la siguiente formula:

$$\%R = \frac{\text{masa retenida en la criba}}{\text{masa total}} \times 100\% \quad (12)$$

Para el porcentaje acumulado positivos (%Ac(+)), se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%Ac(+) = \sum_i^n \%R_i \quad (13)$$

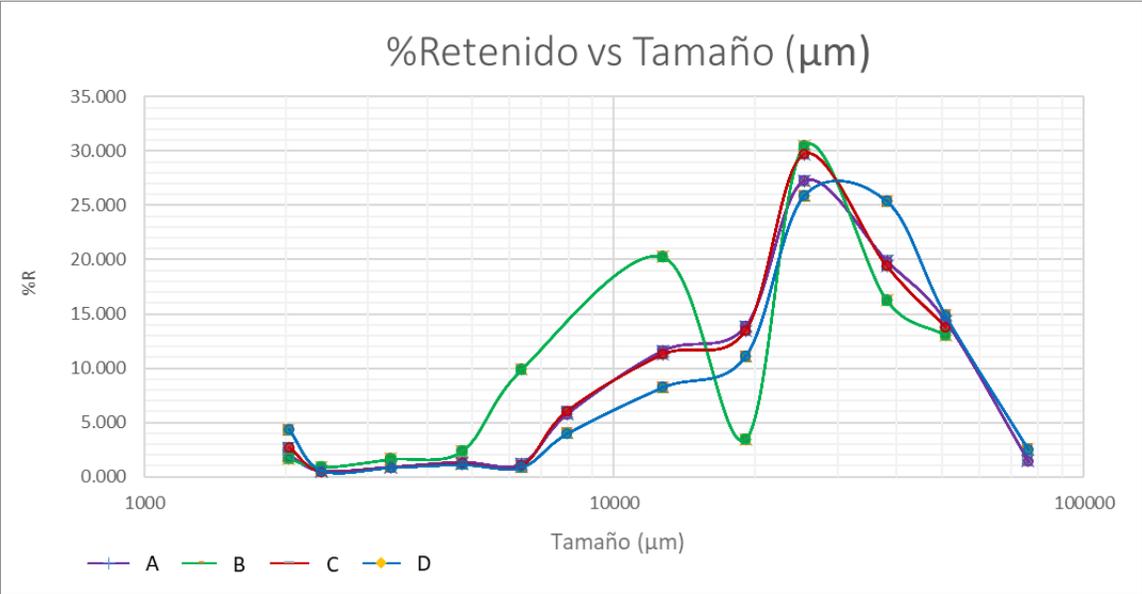
Y en el caso del porcentaje acumulado negativo (%Ac(-)), se obtiene de la siguiente forma:

$$\%Ac(-) = 100\% - \%Ac(+) \quad (14)$$

Con ayuda de los resultados arrojados por el análisis granulométrico, se obtuvo la Figura 31, donde se puede observar que existe una distribución granulométrica irregular para las columnas A, C y D, esto se debe a que las gráficas se pueden representar con dos funciones, la primera comienza en un rango que va de 6000 a 19000 micras, donde se observa una pendiente positiva, la cual representa un 18.5% del total de la muestra aproximadamente. La segunda función con un rango que va de 19000 a 50000 micras, se comporta de forma regular debido a que se asemeja más a una distribución normal con un 75 % del total de la muestra aproximadamente, las partículas menores a 6000 micras representan un 5 % y con un 1.5% partículas mayores a 60000 micras. Esto contradice a las observaciones hechas anteriormente con relación a la presencia de partículas finas (menor o igual que 6350.00 micras) y gruesas (mayores o igual que 76200.00 micras), debido a que el porcentaje de finos resultó ser menor de lo esperado. A pesar de que el porcentaje de partículas finas es menor que el 6%, es suficiente para generar conglomerados, por lo que se recomienda tener un control con estas partículas para evitar el taponamiento de las columnas.

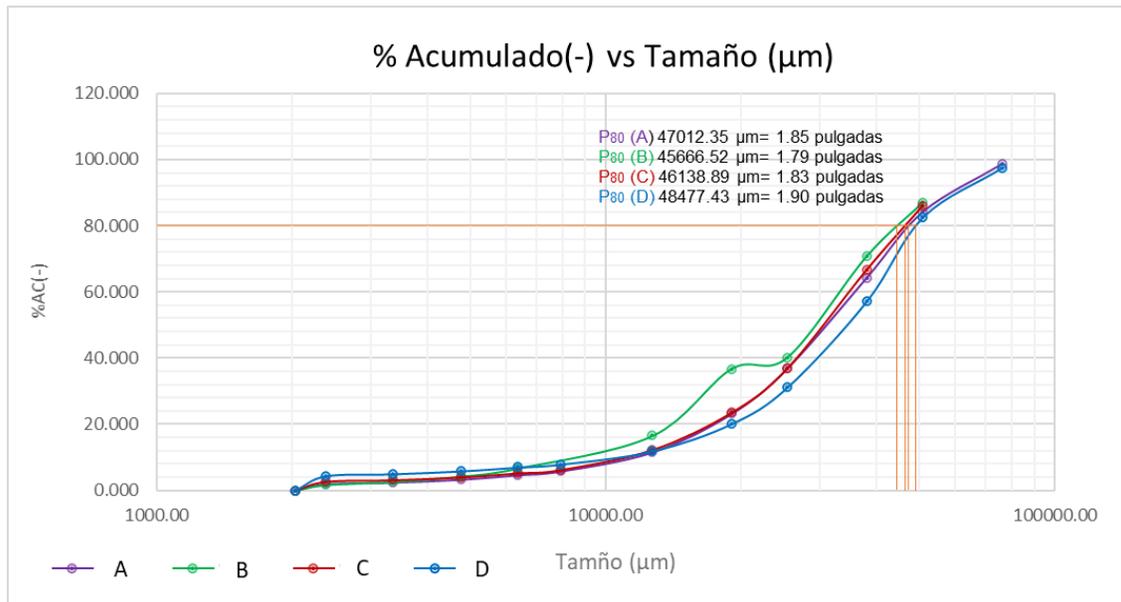
También se puede apreciar que para las cuatro columnas el porcentaje mayor retenido que va del 25 al 30% presenta un tamaño de partícula de 25400 micras, esto confirma que la alimentación de las cuatro columnas fue del mismo banco.

Para el caso particular de la columna B, se muestra una distribución granulométrica irregular, con una mayor cantidad de retenidos en los puntos de 12700.00 micras y 25400 micras, esto se debe a la irregularidad de la gráfica.



**Figura 31.** %Retenido vs Tamaño (µm).

De acuerdo con las funciones de distribución de Gaudin-Schuhmann, se obtuvieron las siguientes graficas de cada una de las columnas (Figura 32). Se observa que las gráficas son muy similares, el  $P_{80}$  de cada una de las columnas es casi el mismo, se encuentra en un rango de 1.79 a 1.90 pulgadas.



**Figura 32.** %Acumulado (-) vs Tamaño ( $\mu\text{m}$ ).

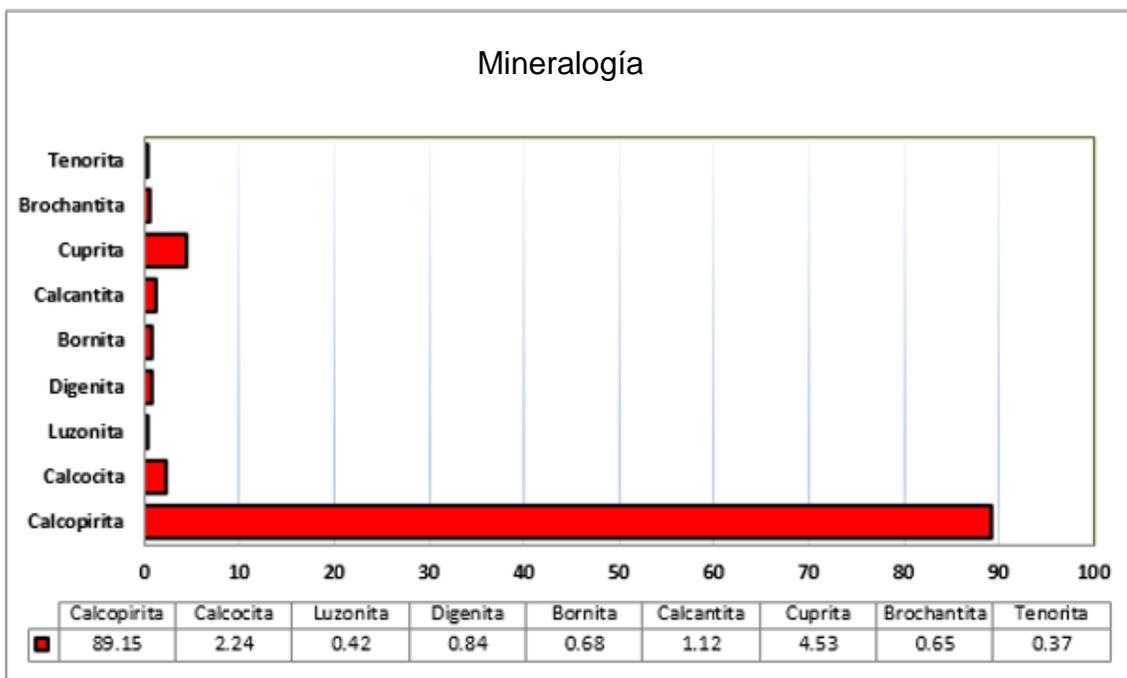
### 6.3 Análisis químico y mineralógico

El análisis químico de cada muestra se presenta en la Tabla 5 y nos permite observar la presencia de cobre total, óxidos de cobre, sulfuros, hierro y manganeso. Con el promedio total de las cuatro columnas, se observa la presencia de cobre con una ley de 0.196% en los residuos, lo cual nos indica que solo se recuperó el 1% de cobre durante los 90 días. Esta información nos sirve como evidencia para señalar la problemática existente durante el proceso experimental con bacterias y señala que es necesario correr una segunda prueba con mejoras al método.

**Tabla 5.** Análisis químico de residuos.

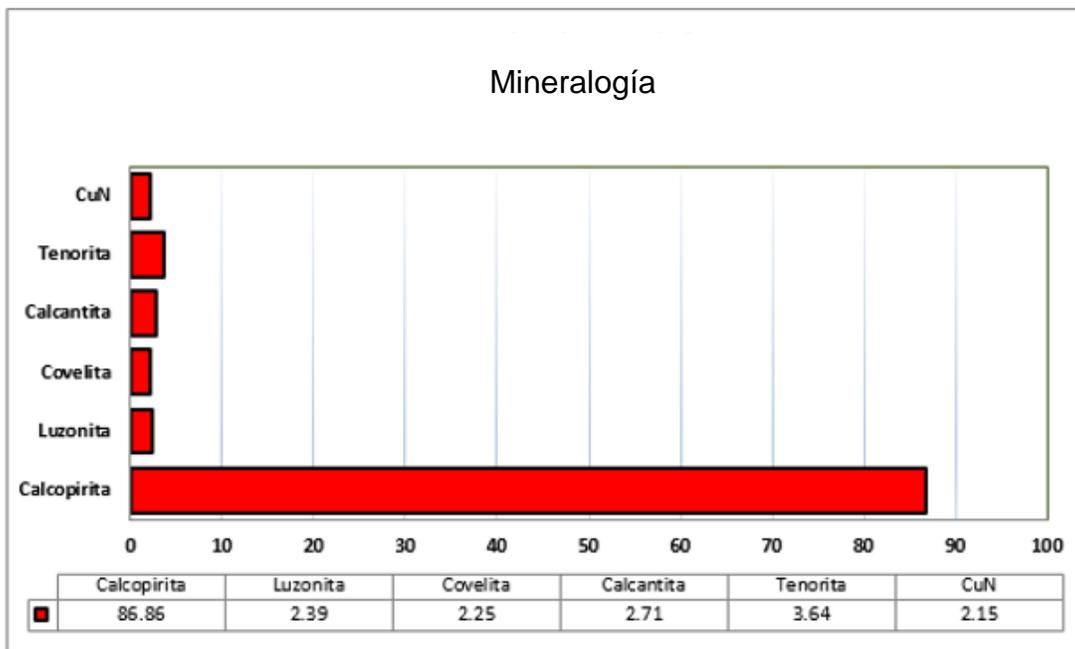
Muestra	%Cu	%CuO	%Sulfuros	%Fe	%Mn
<b>Columna A</b>	0.125	0.013	89.60	3.95	0.015
<b>Columna B</b>	0.268	0.017	93.66	3.73	0.014
<b>Columna C</b>	0.225	0.015	93.33	3.40	0.022
<b>Columna D</b>	0.166	0.003	98.19	3.99	0.014
<b>Promedio</b>	0.196	0.012	93.69	3.76	0.016

El análisis mineralógico realizado para las columnas A y B observa en la Figura 33, donde las muestras presentan una variedad mineralógica y predominan los sulfuros como la calcopirita en un 89%, las especies como calcocita, digenita y luzonita, se presentan en un 3.5%. Para el caso de los óxidos de cobre corresponden a un 5% en forma de cuprita y tenorita.



**Figura 33.** Análisis mineralógico de las columnas A y B.

En cuanto a las columnas C y D (Figura 34) en los residuos se evidencia en su mayoría minerales sulfurados 86% calcopirita, 5% de luzonita y covelina y un 6.35% de minerales oxidados en forma de calcantita y tenorita.



**Figura 34.** Análisis mineralógico de las columnas C y D.

# CAPÍTULO VII

## Conclusiones y recomendaciones

*“La ciencia humana consiste más en destruir errores que en descubrir verdades”.*

Sócrates

---

### 7.1 Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo a los datos obtenidos en la prueba de lixiviación con bacterias en columnas, no se observa una recuperación significativa de cobre (menor al 1%); esto pudo deberse a las anomalías evidenciadas en el proceso experimental, como el tipo de riego, taponamiento de columnas, análisis granulométrico y químico, las cuales pudieron iniciar desde la toma de muestra del banco, por un mal registro e interpretación de los datos del muestreo del lixiviado o una mala ejecución experimental.

Debido a que no se sabe qué porcentaje de cada especie mineral existe dentro de cada muestra, sería conveniente un análisis químico y mineralógico inicial que indique los contenidos de óxidos y sulfuros, posteriormente a la prueba experimental de lixiviación con bacterias, realizar un análisis químico y mineralógico final, esto ayudaría a tener una comparación de la recuperación de cobre, y con ello, una evidencia concreta del efecto en la disolución del cobre en presencia de las bacterias en columnas.

A pesar de que el análisis granulométrico se realizó posteriormente a las pruebas de biolixiviación, los resultados permiten hacer algunas observaciones sobre la descarga de columnas, se confirma la distribución granulométrica irregular y en cuanto a la presencia de finos, resultaron ser menores de lo esperado. Sin embargo, las partículas finas corresponden al 6% del total de la muestra (cuyos tamaños se encuentran entre 6350.00 y 2032.00 micras), son suficientes para ocasionar la formación de conglomerados y el taponamiento de columnas.

Un control de tamaño de partícula podría evitar la formación de una capa impermeable de partículas finas en las columnas y en los terreros, lo cual provocaría que el ácido sulfúrico no circule homogéneamente, se genere una formación de lodos, conglomerados y roca intacta (sin contacto con el ácido), además de saturaciones durante los 90 días de experimentación.

Para eliminar estas formaciones, es necesario separar las partículas gruesas de las finas (menores a 6350.00 micras), lo cual se lograría por medio de un proceso de cribado y una posterior pelletización en un tambor aglomerador, el cual tiene la

función de formar pequeños terrones con las partículas finas, esto haría más eficiente el proceso de lixiviación, debido a que se lograría un mejor contacto entre la solución ácida y el mineral, logrando así, una mejor disolución de los contenidos metálicos.

También, con la intención de aumentar el área de contacto entre la solución lixivante y el mineral, se sugiere hacer una modificación al sistema de riego para las cuatro columnas, mediante un aspersor el cual permitirá cubrir una mayor superficie como se observa en la Figura 35.

Es importante mencionar que el aspersor debe estar fabricado con materiales resistentes a los ácidos y a las bases (Netafim, 2019).



**Figura 35.** Esquema del nuevo sistema de riego.

Se necesitan más pruebas experimentales y mejorar el proceso con las observaciones hechas previamente, para los experimentos futuros.

Para cualquier muestra que se tome, se recomienda tener un duplicado.

## Referencias

Malishev, G. Nikolalev, Y. Shuvalov, 1975, Tecnología de los metales, séptima reimpresión, URSS, Mir, pp. 32-35.

Víctor Manuel López Aburto, 1994, Manual para la selección de métodos de explotación de minas, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, pp.7-8.

Errol G. Kelly, y David J. Spottiswood, 1990, Introducción al procesamiento de minerales, México, LIMUSA, pp.29-30.

A. K. Biswas, y W. G. Davenport, 1993, El cobre metalurgia extractiva, México, LIMUSA, 2<sup>nd</sup> edición, pp. 48.

Víctor Manuel López Aburto, 2004, Principios básicos en los procesos para la concentración de minerales, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, pp.7-8.

Pablo Bifani, 1999, Medio ambiente y desarrollo sostenible, Madrid, UAM, 4<sup>a</sup> edición, pp. 537.

Fidel Sergio Misari Chuquipoma, 2016, Biolixiviación, Tecnología de la lixiviación bacteriana de minerales, Perú, Osinergmin.

J. Sancho, L. F. Verdeja y A Ballestere, 2000, Metalurgia Extractiva, Madrid, SINTESIS, Vol II.

Esteban M. Domic M, Hidrometalurgia fundamentos, proceso y aplicaciones, Chile.

C. Chaussin, G. Hilly y P.Chevenard, 1975, Metalurgia, España, URMA, tomo II.

J.Bérnard. A. Michel, J.Philibert y J. Talbot, 1973, Metalurgia General, Barcelona, Hispano Europea.

Philip Rabone, 1938, Concentración de minerales, Londres, México 1975.

## Mesografía

Universidad Católica del Norte de Chile, 2015  
<http://www.noticias.ucn.cl/destacado/agua-de-mar-clave-para-la-explotacion-mas-eficiente-de-sulfuros-de-cobre/> 7/02/2020

<https://www.netafim.com.mx/mineria/> 22/02/2020

## Anexos

### Anexo 1. Datos y cálculos del análisis granulométrico

Columna A									
No. Criba	Tamaño in	Tamaño $\mu\text{m}$	Masa retenida en gr	%R	%Ac(+)	%Ac(-)	log tamaño $\mu\text{m}$	log tamaño in	log % Ac (-)
3	3	76200.00	0.418	1.441	1.441	98.559	11.241	0.477	1.994
2	2	50800.00	4.168	14.364	15.805	84.195	10.836	0.301	1.925
11/2	1.50	38100.00	5.768	19.878	35.683	64.317	10.548	0.176	1.808
1	1.00	25400.00	7.918	27.288	62.971	37.029	10.143	0.000	1.569
3/4	0.75	19050.00	4.018	13.847	76.819	23.181	9.855	-0.125	1.365
1/2	0.50	12700.00	3.368	11.607	88.426	11.574	9.449	-0.301	1.063
0.3125	0.3125	7937.50	1.668	5.748	94.174	5.826	8.979	-0.505	0.765
1/4	0.25	6350.00	0.336	1.158	95.333	4.667	8.756	-0.602	0.669
4	0.187	4749.80	0.387	1.334	96.667	3.333	8.466	-0.728	0.523
6	0.132	3352.80	0.255	0.880	97.547	2.453	8.118	-0.879	0.390
8	0.0937	2379.98	0.147	0.507	98.054	1.946	7.775	-1.028	0.289
10	0.08	2032.00	0.565	1.946	100.000	0.000	7.617	-1.104	
Masa total			29.016	100					

Columna B									
No. Criba	Tamaño in	Tamaño $\mu\text{m}$	Masa retenida en gr	%R	%Ac(+)	%Ac(-)	log tamaño $\mu\text{m}$	log tamaño in	log % Ac (-)
3	3	76200.00	-	-	-	-	-	-	-
2	2	50800.00	3.268	13.062	13.062	86.938	4.706	0.301	1.939
11/2	1.50	38100.00	4.068	16.259	29.320	70.680	4.581	0.176	1.849
1	1.00	25400.00	7.618	30.448	59.768	40.232	4.405	0.000	1.605
3/4	0.75	19050.00	0.868	3.469	63.238	36.762	4.280	-0.125	1.565
1/2	0.50	12700.00	5.068	20.256	83.494	16.506	4.104	-0.301	1.218
0.3125	0.3125	7937.50	0	0	83.494	-	-	-	-
1/4	0.25	6350.00	2.468	9.864	93.358	6.642	3.803	-0.602	0.822
4	0.187	4749.80	0.598	2.391	95.749	4.251	3.677	-0.728	0.629
6	0.132	3352.80	0.410	1.641	97.389	2.611	3.525	-0.879	0.417
8	0.0937	2379.98	0.225	0.900	98.289	1.711	3.377	-1.028	0.233
10	0.08	2032.00	0.428	1.711	100.000	0.000	3.308	-1.104	
Masa total			25.020	100.000					

Columna C									
No. Criba	Tamaño in	Tamaño $\mu\text{m}$	Masa retenida en gr	%R	%Ac(+)	%Ac(-)	log tamaño $\mu\text{m}$	log tamaño in	log % Ac (-)
3	3	76200.00	-	-	-	-	-	-	-
2	2	50800.00	3.818	13.814	13.814	86.186	4.706	0.301	1.935
1 1/2	1.50	38100.00	5.368	19.422	33.235	66.765	4.581	0.176	1.825
1	1.00	25400.00	8.218	29.733	62.968	37.032	4.405	0.000	1.569
3/4	0.75	19050.00	3.718	13.452	76.420	23.580	4.280	-0.125	1.373
1/2	0.50	12700.00	3.118	11.281	87.701	12.299	4.104	-0.301	1.090
0.3125	0.3125	7937.50	1.668	6.035	93.736	6.264	3.900	-0.505	0.797
1/4	0.25	6350.00	0.283	1.022	94.759	5.241	3.803	-0.602	0.719
4	0.187	4749.80	0.334	1.208	95.966	4.034	3.677	-0.728	0.606
6	0.132	3352.80	0.237	0.857	96.823	3.177	3.525	-0.879	0.502
8	0.0937	2379.98	0.130	0.469	97.292	2.708	3.377	-1.028	0.433
10	0.08	2032.00	0.748	2.708	100.000	0.000	3.308	-1.104	
Masa total			27.639	100					

Columna D									
No. Criba	Tamaño in	Tamaño $\mu\text{m}$	Masa retenida en gr	%R	%Ac(+)	%Ac(-)	log tamaño $\mu\text{m}$	log tamaño in	log % Ac (-)
3	3	76200.00	0.718	2.561	2.561	97.439	4.882	0.477	1.989
2	2	50800.00	4.168	14.866	17.427	82.573	4.706	0.301	1.917
1 1/2	1.50	38100.00	7.118	25.388	42.814	57.186	4.581	0.176	1.757
1	1.00	25400.00	7.268	25.923	68.737	31.263	4.405	0.000	1.495
3/4	0.75	19050.00	3.118	11.121	79.858	20.142	4.280	-0.125	1.304
1/2	0.50	12700.00	2.318	8.268	88.125	11.875	4.104	-0.301	1.075
0.3125	0.3125	7937.50	1.118	3.987	92.113	7.887	3.900	-0.505	0.897
1/4	0.25	6350.00	0.252	0.900	93.013	6.987	3.803	-0.602	0.844
4	0.187	4749.80	0.321	1.145	94.159	5.841	3.677	-0.728	0.767
6	0.132	3352.80	0.245	0.873	95.031	4.969	3.525	-0.879	0.696
8	0.0937	2379.98	0.167	0.595	95.626	4.374	3.377	-1.028	0.641
10	0.08	2032.00	1.226	4.374	100.000	0.000	3.308	-1.104	
Masa total			28.037	100					