

## Desarrollo de un proceso de optimización para la recuperación de minerales con contenido metálico de oro y plata

ACEVEDO-FIGUEROA, Agustín\*†, JUÁREZ-HERRERA, Francisco, CASTREJÓN-PÉREZ, Sofía y MONREAL-DOMÍNGUEZ, Alejandro

*Instituto Tecnológico de Iguala, Iguala - Taxco, Adolfo Lopez Mateos, 40030 Iguala de la Independencia, Gro*

Recibido 11 de Julio, 2017; Aceptado 15 de Septiembre, 2017

### Resumen

El proyecto “desarrollo de un proceso de optimización para la recuperación de minerales con contenido metálico de oro y plata”, consistió en la creación de un manual basado en la norma ISO - 9001 que sistematice las actividades para llevar a cabo cada una de las operaciones unitarias de flotación que se realizan en el laboratorio de métodos y sistemas de manufactura del Instituto Tecnológico de Iguala, para que el usuario o persona que requiera realizar una prueba de recuperación de minerales tenga presente cuales son los procedimientos que debe seguir y la instrumentación necesaria para su ejecución, así también conozca las medidas de seguridad a tomar en cuenta para evitar daños materiales y físicas a su persona. Se realizó una prueba piloto con una para estandarizar el proceso y se presentó los resultados obtenidos, añadiendo a esto comentarios que permitirán manejar de manera adecuada cada equipo durante la ejecución del proceso y el manejo de los reactivos empleados para llevar a cabo ciertas operaciones unitarias básicas.

**Flotación, Proceso de recuperación de minerales, Optimización de procesos**

### Abstract

The project "development of an optimization process for the recovery of minerals with metallic content of gold and silver" consisted in the creation of a manual based on the ISO - 9001 standard that systematizes the activities to carry out each one of the operations Flotation units that are carried out in the laboratory of methods and manufacturing systems of the Technological Institute of Iguala, so that the user or person who needs to perform a mineral recovery test must keep in mind the procedures that must be followed and the instrumentation necessary to Its execution, and also know the security measures to be taken into account to avoid material and physical damage to your person. A pilot test was conducted with one to standardize the process and the results obtained were presented, adding to this comments that will allow to properly handle each equipment during the execution of the process and the handling of the reagents used to carry out certain basic unit operations.

**Flotation, Mineral recovery process, Process optimization**

**Citación:** ACEVEDO-FIGUEROA, Agustín, JUÁREZ-HERRERA, Francisco, CASTREJÓN-PÉREZ, Sofía y MONREAL-DOMÍNGUEZ, Alejandro. Desarrollo de un proceso de optimización para la recuperación de minerales con contenido metálico de oro y plata. Revista de la Invención Técnica 2017. 1-3:48-54

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: agustinacevedo086@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

El proyecto “desarrollo de un proceso de optimización para la recuperación de minerales con contenido metálico de oro y plata”, consistió en un proyecto de investigación que pretendía la creación de un manual basado en la norma ISO – 9001, con el objetivo de identificar las operaciones unitarias básicas en el proceso de recuperación de minerales valiosos tales como el oro y la plata y documentar el procedimiento para que la persona que lo ejecute pueda realizar las actividades de manera sistemática y sepa cómo realizarlo de la manera correcta y de modo más rápido.

Se incluyó además las cantidades de reactivos tales como colectores, espumantes, depresores, etc. A utilizar dependiendo la cantidad de mineral con el que se trabaje.

## Justificación

En México como en otros países, existen yacimientos en los que el oro y la plata se encuentran asociados a minerales, los cuales se procesan para su recuperación mediante el proceso de flotación selectiva o diferencial, también puede ser mediante una flotación “Bulk”.

Para el tratamiento de estas menas se han propuesto muchas alternativas, de las que solo una o dos de ellas han llegado a su aplicación industrial. A su vez existe una propuesta que tiene como finalidad evaluar la alternativa de disolver los minerales de cobre usando soluciones de baja concentración de cianuro, menores a 0.05% NaCN, seguida por la adsorción de estos valores sobre carbón activado, para posteriormente lixiviar los metales preciosos usando soluciones de cianuro de concentración normal, 0.10-0.30% NaCN; en nuestro caso usaremos la alternativa de flotación de minerales.

## Problema

En el laboratorio de ingeniería de métodos y de sistemas de manufactura se realizan pruebas de flotación de minerales con contenido valioso para las personas que lo solicitan, actividades académicas y prácticas escolares. Sin embargo, no existe un procedimiento estandarizado para la realización de dichas pruebas metalúrgicas que permita optimizar el procedimiento de flotación.

Se requiere desarrollar un proceso que optimice la recuperación de oro y plata contenidos en menas de contenido metálico, no se tiene estandarizado el procedimiento, se cuenta con el equipo de laboratorio para realizar las pruebas en flotación selectiva para la recuperación de minerales con contenido metálico de oro y plata.

## Hipótesis

Mediante la investigación realizada y el procedimiento creado se optimizara la obtención de plata y oro utilizando el proceso de flotación.

## Objetivos

### Objetivo general

Realizar un procedimiento que permita la optimización en la recuperación selectiva de minerales valiosos, mediante el proceso de flotación selectiva que tiene las siguientes operaciones unitarias: molienda, flotación, filtración y copelación, los cuales permiten procesar adecuadamente una mena de minerales con contenido de oro y plata.

### Objetivos específicos

- Caracterizar física, química y mineralógicamente una mena de metales preciosos la cual contiene minerales de cobre asociados.

- Realizar pruebas de flotación con el equipo necesario: molino, celda de flotación, filtro de vacío, mufla de laboratorio a fin de coleccionar y recuperar los minerales de valiosos de oro y plata contenidos en la mena.
- Valorar efectos de algunas variables: cantidad de reactivos colectores activadores, depresores y espumantes. Así como tamaño de partícula, aireación, etc. en la atracción intermolecular de los minerales valiosos.

### Marco teórico

Para la industria minera mexicana, el proceso que mayor influencia tendría en su futuro desarrollo, fue el proceso de Concentración por Flotación que permite la separación de los minerales valiosos de la ganga, posibilitando el aprovechamiento de los minerales que eran considerados poco económicos por su contenido y su lejanía de los centros consumidores. En 1921, Perkins y Keller patentaron el procedimiento de Flotación química que hoy es de uso universal, el que fue rápidamente introducido en México iniciando el proceso de cambio tecnológico de la industria minera.

Para realizar el procedimiento de flotación se tienen que llevar a cabo las siguientes operaciones unitarias:

### Trituración

De todas las formas y tamaños en que pueden encontrarse los sólidos, la más importante, desde el punto de vista de la ingeniería química, es la partícula pequeña. Es necesario conocer las características de las masas de sólidos en forma de partículas para diseñar los procesos y el equipo en que intervienen tales sólidos (McCabe, 1981, p. 825).

### Molienda

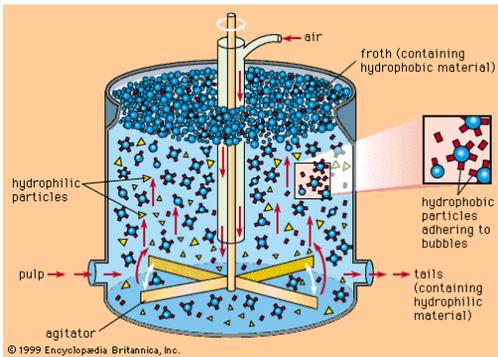
La molienda es el último escalón de la fragmentación industrial, sigue a la trituración normalmente, y se caracteriza por el tamaño de salida de los productos que puede estar entre algunos mm y algunas  $\mu\text{m}$ .

Se persigue, normalmente, la liberación de unas especies mineralógicas con otras hasta aquel tamaño que permita una concentración diferenciada o bien llegar al tamaño de grano exigido por el método posterior de utilización del producto obtenido.

### Flotación

La flotación es un proceso físico-químico de separación de minerales o compuestos finamente molidos, basados en las propiedades superficiales de los minerales (mojabilidad), que hace que un mineral o varios se queden en una fase o pasen a otra. Las propiedades superficiales pueden ser modificadas a voluntad con ayuda de reactivos. El proceso de flotación se basa en las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de los minerales. Se trata fundamentalmente de un fenómeno de comportamiento de sólidos frente al agua. Los metales nativos, sulfuros o especies como el grafito, carbón bituminoso, talco y otros son poco mojables por el agua y se llaman minerales hoidrofóbicos. Por otra parte, los sulfatos, carbonatos, fosfatos, etc. Son hidrofílicos o sea mojables por el agua.

La flotación es un proceso heterogéneo, es decir, involucra más de una fase: sólido (mineral), líquido (agua) y gaseosa (burbujas). Para entender el proceso, es necesario estudiar las propiedades fisicoquímicas de las superficies de los minerales, la relación entre las fases sólida, líquida y gaseosa, y sus interfases.



**Figura 1** Fases en la flotación.

Fuente: Enciclopedia Británica, Inc, 1999.

### Espesamiento

El espesamiento es la operación de separación de una pulpa para lograr un producto más denso, el mecanismo clásico de espesamiento es la sedimentación por gravedad, existen diferentes equipos de espesado a nivel industrial.

Para eliminar arenas relativamente gruesas, que poseen velocidades de sedimentación relativamente grandes, la clasificación por gravedad bajo sedimentación libre o impedida resulta satisfactoria. Para separar partículas finas con diámetros de unos micrones o inferiores, las velocidades de sedimentación son demasiado bajas, y, para que la operación sea practicable, las partículas deben aglomerarse, o flocularse, para formar partículas mayores que posean velocidades de sedimentación razonables (McCabe, 1981, p. 950).

### Filtración

La filtración es la separación de partículas sólidas contenidas en un fluido pasándolo a través de un medio filtrante, sobre el que se depositan los sólidos. La filtración industrial va desde el simple colado hasta separaciones altamente complejas. El fluido puede ser un líquido o un gas; las partículas sólidas pueden ser gruesas o finas, rígidas o plásticas.

Redondas o alargadas, individualidades separadas o agregados. La suspensión de alimentación puede llevar una fracción elevada o muy baja de sólidos. Puede estar muy fría o muy caliente, y estar sometida a vacío o a alta presión. Todavía se introduce una nueva complejidad al considerar el valor relativo de las dos fases. A veces es el fluido la fase valiosa, a veces lo es el sólido y otras, ambos. En algunos casos la separación de las fases debe ser prácticamente completa; en otros solo se desea una separación parcial. Por consiguiente, se han desarrollado numerosos filtros para resolver los diferentes problemas (McCabe, 1981, p. 911).

### Metodología de la investigación

La metodología de investigación empleada es básicamente cuantitativa, ya que se dirige a explorar y describir un proceso de recuperación de minerales con contenido metálico de oro y plata, el cual será útil para establecer un procedimiento que nos permita optimizar el proceso de recuperación. Para ello se realizara pruebas en el laboratorio con una muestra de mineral con contenido metálico.

### Tipo de investigación

El proyecto de investigación llevado a cabo es de tipo descriptivo y explicativo. Se busca mostrar que la realización del proceso de recuperación de minerales mediante flotación se puede optimizar indicando las características esenciales que en ella se involucran, buscando responder las causas de los reactivos durante el proceso, además de explicar la relación que tienen los materiales en el comportamiento del proceso.

### Métodos teóricos

La investigación sigue un método lógico, se reproduce la esencia del objeto de estudio que en este caso es la recuperación de minerales, investigando las operaciones unitarias que en ella interfieren, mencionan el funcionamiento de cada una y el desarrollo que siguen para lograr sus objetivos. Dentro del método se crea la hipótesis si se lograra la investigación y se mencionan los objetivos.

### Metodología para le elaboración del manual

Se documenta el proceso de recuperación de minerales con contenido metálico de oro y plata basado en las especificaciones de la norma ISO – 9001. De la siguiente manera:

#### Trituración

Se menciona el tamaño de partícula deseada a alcanzar y los instrumentos o equipos necesarios para llevar la reducción de tamaño a acabo. Cabe mencionar que debido a que se trabaja con rocas de mineral no muy grandes la primera trituración se realiza con el apoyo de un martillo y la segunda con la ayuda de un molino de mano.

#### Molienda

Se cuenta con un molino de bolas pequeño, ya se realizaron las pruebas de molienda y el tiempo necesario para que el mineral sea el adecuado es de 15 minutos. Las especificaciones son las siguientes:

Volumen del molino	201.06 pl <sup>2</sup>
Cantidad de bolas a utilizar:	
Bolas de 1 pulgada	30 %
Bolas de ¾ de pulgada	30 %
Bolas de ½ pulgada	40 %
Tiempo de molienda	15 min

**Tabla 1** Características de carga del molino de bolas (elaboración propia).

#### Flotación

Se incluye los reactivos utilizados durante la operación, tiempos para realizar cada actividad y el equipo que el usuario debe portar para evitar accidentes dentro del área de trabajo. Algunos datos importantes que se recolectaron son los siguientes:

Sustancia	Cantidad	Observación
Mineral	1 kg	Se tiene que tener una mezcla al 55 % de solido
Agua	1.818 l	

**Tabla 2** Especificación de la cantidad de agua para la flotación (elaboración propia)

Reactivo	Descripción	Dosificación usual (g/l)	Método usual de alimentación	Dosificación (g/kg)	Peso de la gota (g)	Cantidad de reactivo a utilizar (g)	Numero de gotas a utilizar
Xantato isopropilico de sodio	El más ampliamente usado por su bajo costo. Es un buen compromiso entre poder colector y selectividad.	10 - 100	Solución al 10 - 20 %	0.01 - 0.1	0.0292	0.1	4
Aerofloat 208	Colector selectivo para minerales de cobre. Excelente colector para Au, Ag y Cu nativo.	5 - 50	Solución al 5 - 20 % o sin diluir	0.005 - 0.5	0.0228	0.05	3
Espumante	Espumante baso alcohol. Útil donde quiera que se desee una acción de espumación ligera y aum vrida.	10 - 100	Solución al 10 - 20 % o sin diluir	0.01 - 0.1	0.0196	0.1	6

**Tabla 3** Especificación de reactivos empleados en la flotación

## Filtración

En esta etapa se somete el concentrado a un filtro de presión para separar el líquido presente en el fluido. Es importante mencionar que el filtro se tiene que monitorear porque en ocasiones se obstruye el paso del aire ocasionando que el equipo se apague repentinamente. Las especificaciones de cada actividad para llevar a cabo este proceso se detallan a fondo a fin de que no halla pérdida de partículas valiosas.

## Fundición

Se realiza el cálculo de la cantidad de reactivos fundentes a emplear dependiendo del peso de la muestra con la que se trabaje, la manipulación de la misma y las herramientas que permiten realizar la operación. Se menciona al usuario que valla a realizar la actividad la medida que debe de tomar en cuenta a la hora de manejar el equipo de fundición para evitar accidentes. Las especificaciones de los reactivos se dan a continuación:

Reactivo	Descripción	Proporción	Para 1 kg de muestra	Para 100 g de muestra	Para 20 g de muestra
Litargirio	Litargirio es el óxido de plomo (PbO), de color amarillo, el cual normalmente contiene un poco de minio, Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (óxido doble de plomo (II) y plomo (IV), de color rojo) lo cual le confiere una tonalidad naranja al producto, utilizado comúnmente en la industria química y en cerámica.	64.50 %	654 g	65.4 g	13 g
Carbonato de sodio	Sal blanca y translúcida de fórmula química Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , es usado para tostar (calentar bajo una ráfaga de aire) el cromo y otros extractos y disminuye el contenido de azufre y fósforo de la fundición y del acero.	25.80 %	258 g	25.8 g	5.16 g
Bórax	Tiene la propiedad de disolver óxidos metálicos cuando este compuesto se funde con ellos.	9.70 %	97 g	9.7 g	1.94 g

**Tabla 4** Especificación de reactivos para la fundición

## Copelación

Se introducirá una copela que contendrá el mineral obtenido de la fundición a una mufla de laboratorio, el cual ayudara a eliminar el plomo presente en el mineral con el fin de tener una muestra pura de oro y/o plata.

Las medidas de seguridad y el uso de las herramientas que esta operación involucra se dan a conocer en el manual.

## Apartado

En esta operación finalmente se determina la cantidad de oro presente en la muestra, mediante el uso de ácido nítrico en una concentración al 10 %. Se conoce la cantidad de mineral de oro sacando la diferencia de los pesos de la partícula (peso que se obtuvo al finalizar la copelación menos el peso de la partícula obtenida después del proceso de apartado). En esta última operación se especifica el tratamiento del ácido con el que se realizó el apartado de la plata y el oro.

## Resultados

El manual estructura de manera sistemática los procedimientos que componen el proceso, quedan incluidos todos las herramientas y materiales que se utilizan, el equipo de protección necesario, daños al medio ambiente e ilustraciones del procedimiento para facilitar al usuario una mejor interpretación de las actividades que debe realizar.

Los resultados obtenidos en la prueba de laboratorio fueron excelentes, se logró obtener una concentración de oro de 0.0010 g, lo cual nos indica que la ley de oro del mineral es de 50 gramos por toneladas. El botón obtenido de la copelación en un principio de considero como una muestra de plata, para ello se recurrió a introducirlo en ácido nítrico y obtener la cantidad de oro presente en el botón.

## Conclusiones

El desarrollo del proceso de optimización para la recuperación de minerales con contenido metálico de oro y plata que se realiza en el laboratorio queda expresado en una serie de 23 hojas que nos indican las actividades que hay que desarrollar en cada operación unitaria, las herramientas y materiales que se emplean en cada una, el equipo de protección necesario para ejecutar la actividad y que hay que hacer si en dado caso la actividad provoque daño al medio ambiente.

Este manual permitirá a cualquier persona llevar a cabo un proceso de recuperación de minerales valiosos reduciendo el tiempo de operación y previendo algún accidente. En el anexo se encuentra una constancia de capacitación para avalar que el usuario ha realizado exitosamente la capacitación y puede ejecutarlo sin problema por sí solo.

En ocasiones el oro presente en la muestra no se puede ver a simple vista, pero eso no descarta la posibilidad que el mineral tenga presente oro, para ello se recurrirá a otros métodos como la espectroscopia.

También es muy importante cumplir con los equipos de seguridad e higiene, para evitar accidentes en el área de trabajo.

## Referencias

American Cyanamid Company. (1988). *Manual de productos químicos para minería*. Edición revisada.

Bhargava D.S., Rajagopal. (1993). *Diferentiation Between Transition zone and Compression in zone settling*. Wat. Res. 27:3:557-463.

Dick Richard I., Vesilind P. Arane. (1969). The Sludge Volume Index What is it?. Jour. Wat. Pollut. control Fed. 41:07:1285-1291.

Laidler J., Keith; Meiser H., John. (2003). *Fisicoquímica*. México: CECSA.

McCabe; Smith. (1981). *Operaciones básicas de ingeniería química*. España: Editorial REVERTÉ, S.A.