

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**“EVALUACIÓN DE REACTIVOS OXIDANTES Y
AGUA MARINA COMO LIXIVIANTE DE
MINERAL OXIDADO DE COBRE”**

TESIS

Presentada por:

Bach. Evelyn Consuelo Merino Bedoya

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

**TACNA – PERÚ
2022**

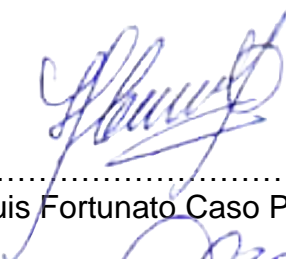
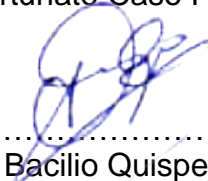
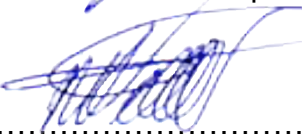
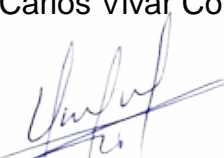
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería en Metalúrgica y Materiales

“EVALUACIÓN DE REACTIVOS OXIDANTES Y AGUA MARINA COMO LIXIVIANTES DE MINERAL OXIDADO DE COBRE”

Tesis sustentada y aprobada el día ... de ... de 2022, estando integrado el
Jurado Calificador por:

| | |
|-------------------|---|
| PRESIDENTE | :  Dr. Luis Fortunato Caso Palpa |
| SECRETARIO | :  Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohaila |
| VOCAL | :  Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha |
| ASESOR | :  Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez |

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico principalmente a Dios por ser mi modelo a seguir y el pilar de mi espíritu en momentos de dificultad.

A mi madre por su voluntad, trabajo y sacrificio a lo largo de estos años, siendo mi motivación para ser cada día mejor.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que este trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios por guiarme y protegerme a lo largo de mi vida y ser una gran fuente de tranquilidad para mí.

A mi madre por siempre confiar en mí y creer en mis expectativas, lo que me permitió alcanzar una nueva meta.

Mi sincero agradecimiento a la Universidad Jorge Basadre de Grohmann que, a través de los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, supieron formarme como profesional compartiendo sus conocimientos a lo largo de mi preparación.

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|------|
| DEDICATORIA..... | iii |
| AGRADECIMIENTO..... | iv |
| CONTENIDO..... | v |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | x |
| RESUMEN..... | xii |
| ABSTRACT..... | xiii |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPÍTULO I..... | 12 |
| 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 12 |
| 1.1.1. Antecedentes del problema..... | 12 |
| 1.1.2. Problemática de la investigación..... | 13 |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 15 |
| 1.2.1. Problema principal..... | 15 |
| 1.2.2. Problemas específicos..... | 15 |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA..... | 16 |

| | | |
|------------------|---------------------------------------|----|
| 1.3.1. | Justificación social..... | 16 |
| 1.3.2. | Justificación económica | 16 |
| 1.3.3. | Justificación práctica..... | 16 |
| 1.3.4. | Justificación metodológica | 17 |
| 1.3.5. | Justificación técnica | 17 |
| 1.3.6. | Importancia del estudio..... | 17 |
| 1.4. | ALCANCES Y LIMITACIONES..... | 18 |
| 1.4.1. | Alcances del estudio..... | 18 |
| 1.4.2. | Limitaciones del estudio..... | 18 |
| 1.5. | OBJETIVOS..... | 18 |
| 1.5.1. | Objetivo general | 18 |
| 1.5.2. | Objetivos específicos..... | 19 |
| 1.6. | HIPÓTESIS | 19 |
| 1.6.1. | Hipótesis general | 19 |
| 1.6.2. | Hipótesis específicas..... | 19 |
| 1.7. | CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES..... | 20 |
| CAPÍTULO II..... | | 22 |
| 2.1. | MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO | 22 |

| | | |
|---|---|------------|
| 2.1.1. | Antecedentes del estudio | 22 |
| 2.1.2. | Bases teóricas | 25 |
| 2.1.3. | Definición de términos..... | 35 |
| CAPÍTULO III..... | | 37 |
| 3.1. | METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN..... | 37 |
| 3.1.1. | Tipo y diseño de la investigación | 37 |
| 3.1.2. | Población y muestra..... | 37 |
| 3.1.3. | Operacionalización de variables..... | 38 |
| 3.1.4. | Técnicas e instrumentos para recolección de datos..... | 38 |
| 3.1.5. | Procesamiento y análisis de datos | 40 |
| CAPÍTULO IV | | 55 |
| 4.1. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN | 55 |
| 4.1.1. | Resultados | 55 |
| 4.1.2. | Discusión | 87 |
| CONCLUSIONES | | 92 |
| RECOMENDACIONES | | 94 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 95 |
| ANEXOS..... | | 105 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 <i>Agentes de lixiviación</i> | 28 |
| Tabla 2 <i>Operacionalización de las variables de investigación</i> | 38 |
| Tabla 3 <i>Principales componentes del agua de mar</i> | 43 |
| Tabla 4 <i>Distribución Granulométrica del Mineral de Cabeza</i> | 45 |
| Tabla 5 <i>Distribución Granulométrica del Mineral Preparado para Lixiviación</i> | 47 |
| Tabla 6 <i>Rangos de los Factores en evaluación</i> | 49 |
| Tabla 7 <i>Matriz del set de pruebas para lixiviación</i> | 53 |
| Tabla 8 <i>Resultados del microanálisis con el SEM/EDX</i> | 57 |
| Tabla 9 <i>Resultados del Análisis de Cobre Soluble y Cobre Total</i> | 58 |
| Tabla 10 <i>Resultados de los análisis de muestras de PLS</i> | 59 |
| Tabla 11 <i>Matriz de valores reales del diseño central compuesto</i> | 61 |
| Tabla 12 Análisis de Varianza para Extracción Cu (ANOVA) | 62 |
| Tabla 13 <i>Resultados Estimados para R Cu usando el modelo de la ec. 26</i> | 65 |
| Tabla 14 <i>Camino de Máximo Ascenso para Extracción Cu</i> | 67 |
| Tabla 15 <i>Rangos de los Factores en evaluación</i> | 67 |
| Tabla 16 <i>Matriz del set de pruebas para lixiviación</i> | 68 |
| Tabla 17 <i>Efectos estimados para Ext Cu (%)</i> | 69 |
| Tabla 18 <i>Análisis de Varianza para la Extracción de Cu en el PLS</i> | 70 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 19 Relación entre los valores de recuperación experimentales y los predichos utilizando la Ecuación (27) | 75 |
| Tabla 20 Datos de análisis por cobre | 80 |
| Tabla 21 Cálculo del factor de conversión x | 81 |
| Tabla 22 Valores experimentales de $F(x)$ para cada modelo cinético | 82 |
| Tabla 23 Conversión x para modelo mixto de control..... | 85 |
| Tabla 24 Balance metalúrgico de la prueba de lixiviación de validación..... | 87 |
| Tabla 25 Valores de pH de las pruebas de diseño experimental central compuesto..... | 105 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Aportes en la Producción de Cobre por Empresas en el Perú..... | 7 |
| Figura 2 Exportación de cobre durante la Pandemia | 11 |
| Figura 3 <i>Denuncios o concesiones mineras en la región Tacna</i> | 13 |
| Figura 4 <i>Minas inactivas en la región Tacna</i> | 14 |
| Figura 5 <i>Diagrama de Pourbaix Cu-O-S</i> | 30 |
| Figura 6 <i>Diagrama de Pourbaix Cu-Fe-O-S</i> | 33 |
| Figura 7 <i>Salinidad anual [ups] en la costa del Perú</i> | 42 |
| Figura 8 <i>Componente de la muestra de estudio</i> | 44 |
| Figura 9 Análisis granulométrico de la muestra inicial | 46 |
| Figura 10 <i>Análisis granulométrico del alimento a lixiviación</i> | 48 |
| Figura 11 <i>Molienda y Lixiviación por agitación en botella</i> | 54 |
| Figura 12 Probeta para análisis por SEM/EDX | 55 |
| Figura 13 Microestructura y microanálisis de la muestra 1 en VGA TESCAN (SEM/EDX)..... | 56 |
| Figura 14 Microestructura y microanálisis de la muestra 3 VGA TESCAN (SEM/EDX)..... | 56 |
| Figura 15 Muestras de PLS Procedentes de Cada Prueba de Lixiviación | 60 |
| Figura 16 <i>Diagrama de Pareto al 95 % de significancia</i> | 62 |
| Figura 17 <i>Superficie respuesta espacial y planar para la extracción de Cu</i> | 64 |
| Figura 18 <i>Superficie respuesta planar para la extracción de Cu</i> | 64 |

| | |
|--|-----|
| Figura 19 Validación estadística del modelo de la Ec. 26 | 66 |
| Figura 20 Gráfica de Pareto para la Ext. Cu..... | 70 |
| Figura 21 Efectos medios de los factores en la Ext. Cu | 71 |
| Figura 22 Interacción de los factores en la Ext. Cu..... | 72 |
| Figura 23 Respuesta espacial de extracción de cobre | 73 |
| Figura 24 Respuesta planar de extracción de cobre con punto óptimo | 74 |
| Figura 25 Relación entre los valores de extracción experimental y predichos utilizando la Ecuación (27)..... | 76 |
| Figura 26 Esquema de la lixiviación de minerales cobre por el método SCM | 78 |
| Figura 27 Esquema del reactor de lixiviación..... | 79 |
| Figura 28 Modelo de control químico de superficie | 82 |
| Figura 29 Difusión a través de la película líquida | 83 |
| Figura 30 Difusión a través de la capa de producto | 83 |
| Figura 31 Lixiviación de partículas según el tamaño SCM-constante..... | 84 |
| Figura 32 Modelo control mixto..... | 85 |
| Figura 33 Modelo de control mixto | 86 |
| Figura 34 Reacción con control químico | 107 |

RESUMEN

El presente trabajo de investigación cuyo objetivo fue, evaluar el comportamiento de los reactivos oxidantes en la lixiviación de mineral oxidado de cobre utilizando agua de mar a nivel de laboratorio. Los datos se recolectaron durante la preparación del mineral y la ejecución de dos sets de 17 y 18 pruebas dadas por el software estadístico Statgraphics Centurion, para un diseño central compuesto. Se usó una investigación aplicada de tipo de innovación tecnológica experimental propositiva, en razón que se utilizaron conocimientos de las ciencias fácticas. Las muestras se tomaron de una población de 300 kilogramos de mineral mixto de cobre. Se trabajaron las pruebas con el método de agitación en botella y el PLS resultante de cada prueba arrojó extracciones positivas alcanzando un óptimo del 98,32 % y un valor de la prueba de validación del modelo de 97,97 % para dosificaciones de Ácido sulfúrico = 27,36 g/L, Cloruro de sodio = 63,42 g/L y Sulfato férrico = 196,82 g/L, siendo por tanto un proceso viable que resuelve el problema tratado en este estudio.

Palabras clave: sales oxidantes, sulfu-óxidos, agua marina, cinética de lixiviación, modelo de núcleo reducible.

ABSTRACT

The objective of this research work was to evaluate the performance of oxidizing reagents in the leaching of oxidized copper ore using seawater at the laboratory level. The data were collected during the preparation of the ore and the execution of two sets of 17 and 18 tests given by the statistical software Statgraphics Centurion, for a central composite design. An applied research of propositional experimental technological innovation type was used, in reason that knowledge from the factual sciences was used. The samples were taken from a population of 300 kilograms of mixed copper ore. The tests were carried out with the bottle agitation method and the PLS resulting from each test showed positive extractions reaching an optimum of 98,32 % and a value of 97,97 % for the model validation test for dosages of Sulfuric Acid = 27,36 g/L, Sodium Chloride = 63,42 g/L and Ferric Sulfate = 196,82 g/L, being therefore a viable process that solves the problem treated in this study.

Keywords: oxidizing salts, sulphu-oxides, seawater, leaching kinetics, shrinking core model.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio parte de la premisa conceptual de la palabra hidrometalurgia que proviene del prefijo "hydro", que significa agua, y su sufijo "metallurgy", que significa el estudio de los metales. Así, la hidrometalurgia es el estudio del agua y los metales, debido a que la extracción hidrometalúrgica se realiza generalmente lixiviando el metal de un mineral mediante una reacción química, donde un ejemplo sencillo es la lixiviación del cobre del óxido cúprico (tenorita) utilizando ácido sulfúrico. En este ambiente los iones de hidrógeno eliminan el oxígeno del óxido cúprico para formar agua, lo que deja el cobre como ion disuelto. Así, el cobre ha sido extraído o lixiviado del mineral original. En la extracción hidrometalúrgica se utilizan diversos compuestos químicos, teniendo en cuenta, además, las condiciones de extracción de los distintos metales que pueden implicar temperaturas y presiones elevadas para facilitar una extracción acelerada (Seetharaman et al. 2014). En consecuencia, es que se ha utilizado el agua de mar sin desalinizar como medio acuoso para formar la solución lixivante con la disolución de sales oxidantes para lixiviar los sulfuros secundarios y óxidos de cobre.

A lo largo del desarrollo del presente estudio se abordó la importancia de la optimización de los procesos hidrometalúrgicos. En particular, la lixiviación de mineral de cobre de baja ley, que es una tecnología en desarrollo constante, aplicada con éxito en óxidos y sulfuros de cobre alrededor del mundo, siguiendo la mentalidad de la utilización del recurso hídrico de forma eficiente.

Asimismo, el uso de agua de mar en procesos metalúrgicos ha sido medianamente comprobada y factible obteniendo extracciones aceptables dependiendo de las condiciones utilizadas, por lo que en el desarrollo de la presente investigación se evaluó la alternativa propuesta sobre la evaluación del uso del sulfato férrico como reactivo oxidante, usando como medio acuoso el agua de mar y cloruro de sodio, para la lixiviación de mineral sulfu-oxidado de cobre y observar los cambios que pudieran presentarse en el equilibrio del entorno en las muestras y su efecto en los resultados obtenidos expresados en la recuperación de cobre en la solución rica (o PLS). Esto verificará la eficacia del proceso. A lo largo de la introducción y del primer capítulo, se establece la forma y las bases del estudio, comentando también sobre la situación actual del cobre en el Perú y sus principales productores. Se fijan las variables y con esto se dejan claros los objetivos que se buscan acerca del comportamiento y resultados

de la aplicación del agua de mar en la lixiviación del mineral sulfu-oxidado de cobre con reactivos oxidantes.

En el segundo capítulo, se describe el sustento teórico que respalda el procedimiento del estudio, así como antecedentes sobre la evolución de la hidrometalurgia del cobre, procesamiento y lixiviación de óxidos de cobre y la definición de términos técnicos.

En el tercer capítulo, se describe el método de trabajo y como se evaluarán las variables, así mismo se recolectan los resultados de la preparación del mineral de cobre, el cuarteo, granulometría de cabeza, caracterización del mineral y definición del set de pruebas para lixiviación por el método de agitación en botella.

En el cuarto capítulo, se encuentran los resultados de la minerografía del mineral, análisis de cobre total y cobre soluble y los resultados de las pruebas de lixiviación, en las cuales se visualizan resultados positivos por lo que se prepara la optimización del proceso con apoyo de la herramienta estadística Statgraphics Centurion. Entonces se discuten los resultados desde la factibilidad en la recuperación de cobre por el método propuesto y desde el comportamiento de las variables.

Historia tecnológica del cobre en el Perú

Con respecto a la minería en el Perú, se desarrolla desde tiempos anteriores a la colonia, por esto existen piezas de orfebrería y ornamenta que datan desde las culturas preincaicas, trabajadas en oro y plata principalmente, y también hay otras piezas elaboradas con material del mar como conchas de moluscos. Tal como explica Tumialán (2003), el desarrollo histórico de la metalurgia en el Perú desde la más antigua en la Cultura Chavín, donde se trabajó el oro mezclado con plata y cobre llegando a la Edad de los Metales; la cultura Tiahuanaco en el Alto Perú se desarrolló desde el principio de nuestra era hasta el siglo XIV. Las menas de cobre se procesaban en hornos improvisados de hoyos en el suelo o crisoles de barro, aportando calor con carbón y una fuerte corriente de aire, lográndose así la reducción de los óxidos a metal. Durante el Imperio Incaico se manejaban un conjunto de técnicas mineras y metalúrgicas como: Instalaciones para el lavado del oro, explotación de minas con penetración a profundidad, los hornos de fundición (Huayrachira), los sopladores de tubos de cobre, la aleación de cobre y estaño y diversas técnicas de orfebrería rudimentaria. En la colonia, luego del descubrimiento de Potosí en 1545, se intensifican las labores mineras. En esa misma óptica, Lovera (2005), haciendo referencia a la obra Perú Minero de Samamé Boggio, escribe:

En el periodo hispánico, el Perú realiza las primeras experiencias en hidrometalurgia, como técnica para extraer cobre y después de la independencia de España, en 1848, el químico Pedro Hugón instala en Cajamarca una planta de lixiviación. En 1890, en Hualgayoc se iniciaron los primeros ensayos de lixiviación y un año más tarde se instalaron dos talleres de lixiviación en Hualgayoc y Bambamarca. En 1892, se instalan tres plantas de lixiviación con hiposulfito de sodio en San José (Castrovirreyna), Gazuna (Cajatambo) y Pilancos (Hualgayoc) y con una evolución acelerada de los métodos metalúrgicos, a fines de 1897 funcionaban en el Perú trece plantas de lixiviación. En 1975, el Perú empezó a aplicar el sistema de intercambio iónico en Cerro Verde. En la década de 1980 emergen plantas hidrometalúrgicas de envergadura tales como: Cajamarquilla, Cerro Verde, planta de agua de mina en Cerro de Pasco, Yanacocha y los proyectos en desarrollo comienzan a tener una perspectiva de implementar tecnologías limpias con bajo impacto ambiental. (pp. 13-14). En la actualidad, el agotamiento de los depósitos de estos ricos minerales, se ha prestado atención al procesamiento de minerales de metales no ferrosos más complejos. Por tanto, los procesos hidrometalúrgicos han tomado protagonismo.

Muñoz (2016) explica el proceso hidrometalúrgico de extracción del cobre a partir de minerales oxidados mediante tres etapas consecutivas:

Lixiviación: El objetivo principal de la lixiviación es la obtención del cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una disolución de ácido sulfúrico y agua. Este proceso es efectivo ya que se basa en la reactividad de los minerales oxidados a la presencia de disoluciones ácidas que produce la formación de una disolución de sulfato de cobre (CuSO_4).

Purificación/Concentración: El electrolito obtenido en la etapa anterior aun no es lo suficientemente rico en cobre, por lo que se separa este cobre en disolventes orgánicos para aislar las impurezas. Así se obtiene el electrolito concentrado de sulfato de cobre con concentraciones altas.

Electrólisis-Electrodeposición: El electrolito de la etapa anterior se procesa por electrolisis con cátodos de acero inoxidable y ánodos inertes de plomo-antimonio. Al finalizar esta etapa, se obtiene cobre sólido con el 99,99 % de pureza.

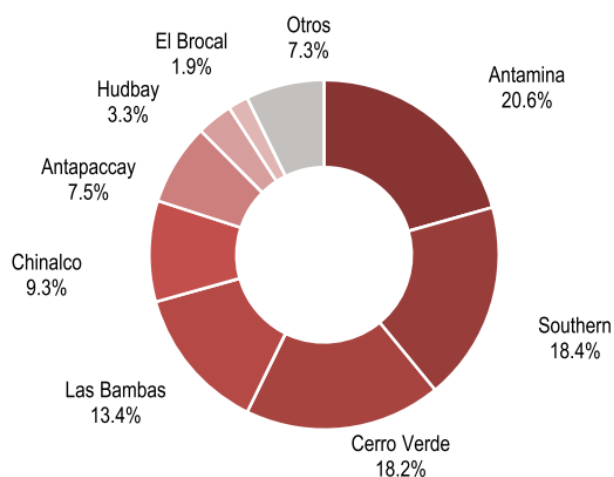
Principales productores de cobre en el Perú

En la actualidad, según el reporte emitido por el Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM, 2021), para mediados del año 2021, Minera Antamina S.A. se posiciono como el primer productor de cobre, con una participación del 20,6%. De manera similar, en segundo y tercer lugar

se ubicaron Southern Perú Copper Corporation y Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. con el 18,4% y 18,2%, respectivamente. Tal y como se observa en la Figura 1, se puede visualizar la distribución de los aportes de los diferentes productores de cobre en el Perú.

Figura 1

Aportes en la Producción de Cobre por Empresas en el Perú



Nota. Distribución porcentual. Reproducida de Estructura de la Producción de Cobre por Empresas, Enero-Julio, del Ministerio de Energía y Minas, MINEM, 2021 (<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/VARIABLES/2021/BEM%2007-2021.pdf>).

Según el boletín estadístico del Ministerio de Energía y Minas, correspondiente a la primera mitad del año 2021 (MINEM, 2021), a nivel regional, Áncash mantuvo el primer puesto contribuyendo con el 20,8 % en la producción cuprífera. En segunda posición, está el departamento de

Arequipa representando el 18,3 % de la producción. Seguidos de Apurímac con una producción significativa de 13,4 % del total.

Historia económica del cobre

Como explica Glave y Kuramoto (2007), desde 1950, la minería peruana comienza un desarrollo acelerado que a la vez exige la estandarización de prácticas cotidianas en el procesamiento de minerales, como consecuencia de la nueva política del Código de Minería de ese año. En los años 90 sumado al cambio del modelo económico y la globalización del mercado, se inicia una expansión nunca antes vista a la fecha que llega hasta la actualidad, por la cual la minería se ha constituido como el pilar más fuerte de la economía del país. El cambio a la privatización de las operaciones nacionales se tradujo en la expansión y modernización de las mismas, entre los ejemplos más resaltantes estuvieron, Cerro Verde y Tintaya. En 2017, por proyectos jóvenes que se desarrollaron aceleradamente como Las Bambas que ya contaba con 2 años de antigüedad en el mercado, la producción de cobre en el Perú rompe su propio récord incrementándose a 2,5 millones de toneladas métrica finas, llegando a la segunda posición como productor mundial de cobre después de Chile y por encima de China. Las exportaciones superaron los US\$ 13 700 millones, lo que significó un incremento del 36 % con respecto al 2016, generando un incremento conjunto del volumen exportado (7,2 %) y

también se vio reflejado en la cotización del mineral (27 %). La exportación de cobre individualmente significó el 31 % de las exportaciones totales del país, que superaron los US\$ 44,000 millones.

Luego, en el mes de junio del presente año 2021, el valor de las exportaciones de cobre alcanzó los US\$ 1 804 millones lo que representa un incremento interanual de 79,0 %. Este resultado positivo también fue posible por el incremento del precio (+80,7 %), a pesar que el volumen interanual embarcado tuvo una caída del 0,9 %. De esta manera, el valor acumulado de las exportaciones de cobre dio un panorama positivo con respecto al año anterior ya que para la primera mitad del año se obtuvieron US\$ 9440 millones, lo que es superior en 84,5 % (US\$ 5117 millones) en comparación al año anterior en el mismo periodo. Además, es importante mencionar que el cobre se mantuvo como el primer producto minero exportado con una participación de 33,9 % en el total de las exportaciones peruanas. (MINEM, 2021, p. 11)

Evolución de la producción de cobre en tiempos de pandemia

Ahora bien, en lo que concierne al año 2020, la economía del mundo se vio gravemente afectada por la pandemia del COVID-19. Una estricta cuarentena dispuesta en la segunda quincena de marzo de 2020 para proteger a la población, llevó a un descenso en los indicadores económicos

de la minería, la cual paralizó sus actividades. La minería peruana es un importante motor de crecimiento, aún más en tiempos de crisis, y desde el segundo semestre de 2020, se ven señales de recuperación en los niveles de producción, la inversión y el empleo.

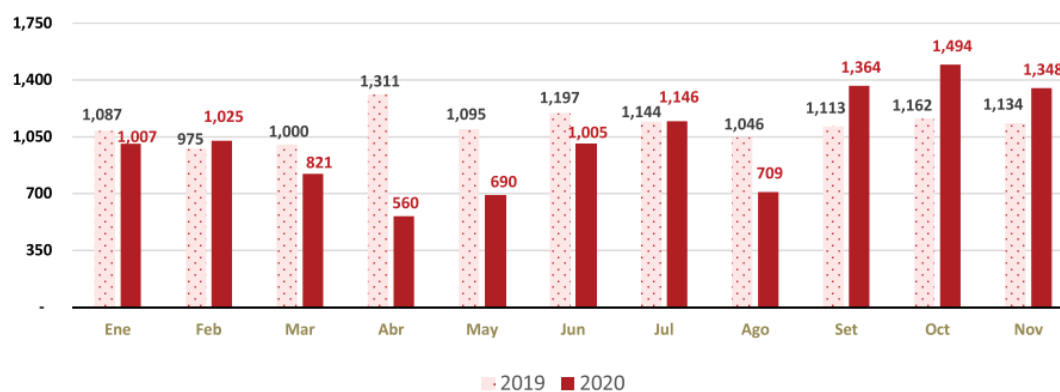
Después, como indica el reporte emitido por el Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM, 2020), Durante los momentos más duros de la crisis sanitaria, las empresas mineras se encontraban autorizadas para realizar únicamente actividades críticas con personal mínimo operativo. Posteriormente, el gobierno aprobó la reanudación de actividades económicas. Debido a ello, durante el desarrollo de las tres primeras fases, el subsector minero alcanzó la reanudación de actividades en su totalidad. En este contexto, el registro de producción al finalizar el año 2020 mostró una motivante recuperación entre los meses de los 7 metales principales, estos fueron: cobre, oro, zinc, plata, plomo, estaño y molibdeno.

Por toda la evidencia presentada anteriormente, el sector de minería peruana contribuyó con el 61,4 % del valor total de las exportaciones nacionales, las cuales se distribuyen en 60,3 % para los productos minero metálicos y el 1,1 % para los no metálicos. Específicamente, el valor de las exportaciones cupríferas fue de US\$ 1348 millones registrando una expansión de 18,9 %, como comparativa entre noviembre del 2020 y el año anterior. Esto se traduce en un continuo incremento a lo largo de 3 meses

consecutivos, en el valor de exportación de periodos similares en el histórico hasta el momento. De esta manera, con respecto al 2019, el valor de exportación acumulada de cobre al penúltimo mes del 2020 sumó US\$ 11 169 millones, lo que es una cifra inferior en un 8,9 %. Se debe considerar que, debido a la sobresaliente ejecución de la producción en los últimos 3 meses, es que se pudo acortar la brecha de producción en la comparativa anual entre los años 2019 y 2020. Podemos observar esta comparación sobre la exportación de cobre en la Figura 2.

Figura 2

Exportación de cobre durante la Pandemia



Nota. Valor FOB en millones de USD. Reproducida de Valor de las Exportaciones de Cobre, del Ministerio de Energía y Minas, MINEM, 2020 (<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/VARIABLES/2020/BEMdic2020.pdf>).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. Antecedentes del problema

En cuanto a la disponibilidad del recurso hídrico a nivel mundial, actualmente se ve disminuida por los cambios climáticos, aumento de la población y crecimiento de las industrias, que se ha venido dando desde hace años. La disponibilidad del recurso hídrico en el campo de la minería es primordial por lo que se debe considerar su buena gestión.

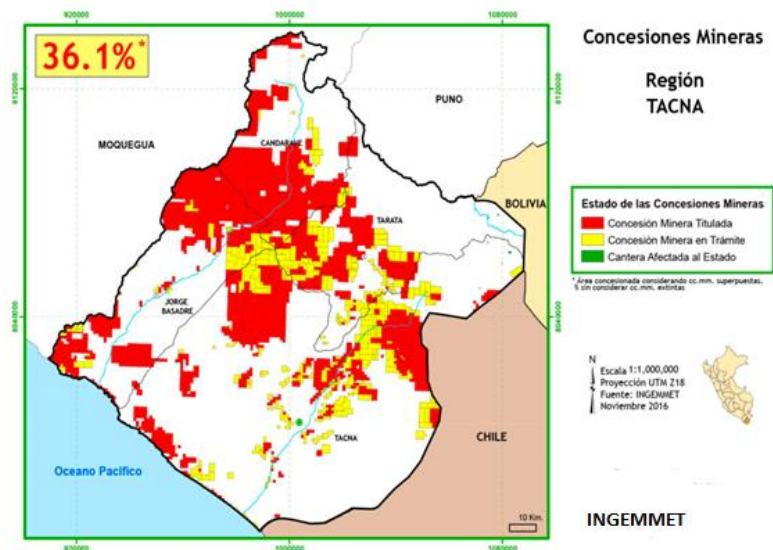
Según Ramírez y Cantallopts (2020), en los últimos años, se han optimizado los procesos siguiendo la mentalidad de la utilización del recurso hídrico de forma eficiente y siguiendo estos lineamientos se pretende aumentar los estudios sobre utilización de agua de mar como alternativa. Como es de suponer, incorporar agua de mar a los procesos productivos, provocara cambios en el equilibrio de las soluciones y en las propiedades físico-químicas de las mismas. Sin embargo, los resultados que se obtienen evidencian la viabilidad de esta práctica.

1.1.2. Problemática de la investigación

La Región Tacna en estos últimos tiempos está incrementando los denuncios mineros que se traducen en 51 % en la provincia de Candarave, 38,8 % en la provincia de Tarata, 27,5 % en la provincia de Tacna y 46,2 % en la provincia de Jorge Basadre y en promedio 36,1 % tal como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Denuncios o concesiones mineras en la región Tacna



Nota: Proporcionada por INGEMMET. Subregión de minería Tacna.

Gran parte de estos denuncios pertenecen a yacimientos de cobre cuyos propietarios son pequeños mineros que no encuentran forma de explotarlos.

También se encuentra muchas minas inactivas, y algunas consideradas pasivos ambientales mineros, pero en ellas hay mineral de baja ley que se puede explotar. Estas se muestran en la Figura 4.

Figura 4

Minas inactivas en la región Tacna



Nota: Proporcionada por INGEMMET. Subregión de minería Tacna.

Viendo esta problemática latente, es que se propone la evaluación del comportamiento y resultados, de reactivos o sales oxidantes y agua de mar sin desalinizar aplicados como agentes lixiviantes de mineral sulfuoxidado de cobre, que podrían ser beneficiados por los pequeños mineros.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema principal

¿Cómo es el comportamiento de los reactivos oxidantes en la lixiviación de mineral oxidado de cobre utilizando agua de mar a nivel de laboratorio?

1.2.2. Problemas específicos

1. ¿Cuál es el efecto del agua de mar y los reactivos oxidantes sobre la disolución de los óxidos de cobre?
2. ¿Cuál es la capacidad disolvente de los reactivos oxidantes a los sulfu-óxidos de cobre frente al ácido sulfúrico?
3. ¿Cuál es el efecto del control cinético en la lixiviación con sales oxidantes y agua de mar de los minerales sulfuoxidados de cobre?

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

1.3.1. Justificación social

Esta posibilidad tecnológica, permite una mejora económica a los pequeños mineros sin tener que recurrir a la compra de ácido sulfúrico, por otro lado, crear fuentes de trabajo tan necesarias en estos tiempos de pospandemia COVID-19.

1.3.2. Justificación económica

Al ser implementada esta tecnología permitirá generar incremento del canon minero y otras normas que redundan en beneficio del desarrollo de Tacna como región y del país.

1.3.3. Justificación práctica

La realización de esta investigación ha permitido evaluar la hidrometalurgia del cobre en un ambiente acuoso distinto al conocido (agua de mar) y un oxidante que se comporta como sustituto parcial del ácido sulfúrico. Ha permitido también proponer una innovación tecnológica que no solo va a permitir procesar un mineral oxidado, un mineral mixto sino también a los sulfuros primarios de cobre, proporcionando así una alternativa a los pequeños mineros de Tacna para poder procesar sus minerales.

1.3.4. Justificación metodológica

Este estudio se ha realizado usando un método estadístico para evaluar en un determinado rango de variables consideradas mediante el diseño experimental central compuesto; que ha permitido obtener una respuesta aceptable con la utilización de pocas pruebas mejor estructuradas.

1.3.5. Justificación técnica

Este estudio permite demostrar que, si es posible recuperar cobre de sus minerales sulfu-oxidados a nivel de laboratorio, lo que permite pasar a la etapa de pilotaje que queda pendiente para otro estudio.

1.3.6. Importancia del estudio

Con la disminución del protagonismo del agua fresca en el procesamiento de minerales se hace un uso más eficiente del mismo lo que genera un impacto positivo en el medio ambiente, lo cual está dentro del perfil inherente de una sociedad globalizada y responsable con la vida de toda la biota de esta desértica zona del sur del país.

Así pues, es también importante debido a que se está proponiendo una innovación tecnológica viable a la luz de ciencia y del avance

tecnológico usando medios no convencionales y del control medioambiental.

1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.4.1. Alcances del estudio

La evaluación del comportamiento y resultados, de reactivos oxidantes y agua de mar aplicados como agentes lixiviantes de mineral sulfu-oxidado de cobre, solo a nivel de laboratorio para luego escalarlo.

1.4.2. Limitaciones del estudio

La investigación se desarrolló dentro de las instalaciones de la UNJBG, en los laboratorios ESME-FAIN, durante los meses de octubre a diciembre de 2019, donde la única limitante fue la falta de algunos reactivos que fueron proporcionados por el asesor.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento de los reactivos oxidantes en la lixiviación de mineral oxidado de cobre utilizando agua de mar a nivel de laboratorio.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Determinar el efecto del agua de mar y los reactivos oxidantes sobre la disolución de los óxidos de cobre.
2. Evaluar la capacidad disolvente de los reactivos oxidantes a los sulfu-óxidos de cobre frente al ácido sulfúrico
3. Determinar el control cinético del proceso de lixiviación con sales oxidantes en agua marina del mineral sulfu-oxidado de cobre.

1.6. HIPÓTESIS

1.6.1. Hipótesis general

El comportamiento de los reactivos oxidantes influye significativamente en la lixiviación de mineral oxidado de cobre utilizando agua de mar a nivel de laboratorio.

1.6.2. Hipótesis específicas

1. El efecto del agua de mar y los reactivos oxidantes influyen sobre la disolución de los sulfu-óxidos de cobre.
2. La capacidad disolvente de los reactivos oxidantes a los sulfu-óxidos de cobre mejora significativamente frente al ácido sulfúrico.

3. El control cinético influye significativamente en la lixiviación de sulfu-óxidos de cobre con sales oxidantes y agua de mar.

1.7. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Variable independiente: X= Reactivos oxidantes.

Definición conceptual

Un oxidante es una especie química que elimina uno o más electrones de otra especie en una reacción química. Un reactivo oxidante es un receptor de electrones lo que genera la oxidación de otras especies en la solución (Havlík, 2008)

Definición operacional

Generalmente los minerales de cobre requieren una oxidación previa que facilite la disolución del contenido metálico. En el caso de sulfuros de cobre, la fuerza de oxidación dependerá del tipo de sulfuro. A grandes rasgos, la utilización de estos reactivos permite la liberación del cobre en la solución para la posterior obtención del electrolito rico en cobre (Havlík, 2008).

Variable dependiente: Y= Lixiviación de mineral oxidado de cobre

Definición conceptual

La lixiviación de mineral de cobre es el proceso hidrometalúrgico por el cual se recupera el cobre iónico como solución cargada (PLS) por el ataque químico en fase acuosa, se emplea principalmente para el aprovechamiento de mineral pobre, generando una excelente rentabilidad (Havlík, 2008).

Definición operacional:

En la lixiviación de minerales de cobre, los reactivos más utilizados son el ácido sulfúrico para minerales oxidados y sulfato férrico en medio oxidante para minerales sulfurados, la solución lixivante se aplica por agitación o por aspersion (goteo), esto permite la liberación estratégica del ion cobre en la solución, para que sea cosechado en las etapas posteriores (Havlík, 2008).

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO TEÓRICO DEL ESTUDIO

2.1.1. Antecedentes del estudio

Chaparro (2009), en su ponencia titulada “Los procesos mineros y su vinculación con el uso del agua”, para la XXVII Convención Internacional de Minería. Él manifiesta que el agua usada en procesos industriales, como los mineros, se reutiliza cada vez más, debido a la aparición de nuevos procesos que elimina los contaminantes incorporados en ellas durante el proceso, debido al potencial de contaminación del agua y su consecuente efecto en la salud humana y el ambiente. La industria está más pendiente de indicadores como: Consumo total de agua fresca, tasa de recirculación, medición de flujos en procesos, gestión del recurso hídrico (mide y evalúa las interacciones y repercusiones sociales económicas y ambientales para fijar metas de sustentabilidad).

Además, Quezada y Velásquez (2016), en sesión para la Conferencia de Extracción Sustentable Hidrometalurgia de Metales, “Dissolution Kinetics of Copper Ores and Concentrate with Sea Water and Discard Brine”, mencionan que, aunque el 80-85 % del cobre se produce a

través de procesos pirometalúrgicos, se ha prestado mucha atención a las rutas de procesamiento hidrometalúrgico. Se considera que la extracción hidrometalúrgica de cobre de la calcopirita es más económica y ambientalmente más aceptable que la extracción pirometalúrgica, especialmente cuando los minerales de sulfuro que contienen cobre están presentes en el mineral de baja ley. En los resultados de su estudio pudieron concluir que el uso de descarte de salmuera y agua de mar en la disolución de minerales de óxido con la mineralogía predominante de atacamita y crisocola es totalmente factible metalúrgicamente; Se obtienen extracciones de cobre superiores al 95 % en las condiciones utilizadas.

Hernández (2013), en su “Estudio del equilibrio sólido-líquido de sistemas acuosos de minerales de cobre con agua de mar, aplicado a procesos de lixiviación”, concluye sus ensayos comparativos para la lixiviación de sulfato de cobre con agua de mar y agua pura, diciendo que la solubilidad del sulfato se disminuye ya que satura la solución con mayor rapidez debido a la salinidad del agua. La densidad, índice de refracción, conductividad y viscosidad presenta valores mayores en el sistema saturado de agua de mar, los mismos que aumentan con el aumento de temperatura desde 25 a 50 °C, excepto por la viscosidad. El pH disminuye con el aumento de temperatura debido a la mayor concentración de cobre, que es el aumento de la concentración del compuesto de cobre hidrolizado

que aporta más acidez. Por lo que el agua de mar presenta un efecto positivo en comparación a otros sistemas con agua pura. El cloruro que aporta el agua de mar es un ion activo en la lixiviación del mineral.

Luego, Alejo y Canchan (2019) en su tesis de grado, “Lixiviación de minerales sulfurados de cobre en medio cloruro-ferroso de los pórfidos del proyecto Lara-Ica-Perú”, recomiendan que el uso de cloruro ferroso, podría aplicarse en la etapa de aglomerado, antes de la lixiviación de minerales de cobre a escala industrial. La hidrometalurgia seguirá siendo la tecnología de extracción más viable y amigable con el ambiente, por esto se debe mejorar la cinética del proceso.

Ipinza y Flaquer (2014) en su presentación, “Lixiviación de minerales de calcopirita y enargita en medio cloruro de sodio-ácido sulfúrico”, indican que la cinética de lixiviación de calcopirita en medio sulfato es menor que con los sulfuros de cobre secundarios por la pasivación de su superficie a altos potenciales redox, dando lugar a la formación de una capa de azufre elemental o polisulfuro CuS_n . En medio cloruro-ácido sulfúrico la velocidad de disolución de cobre puede incrementarse mucho más que la velocidad en medio sulfato. Además, la ganga asociada a minerales oxidados y sulfurados, en medio cloruro-ácido sulfúrico tiende a tener una estructura más cristalina, lo que favorece la permeabilidad del lecho y es fundamental

la presencia de un agente oxidante para evitar la precipitación de CuCl , lo que da solidez al uso de sulfato férrico en el presente trabajo.

Asimismo, Fernández (2007) en su tesis de maestría, "Optimización del proceso de lixiviación clorurante en medio ácido oxidante de concentrados sulfurados de cobre", también señala que la velocidad de reacción de lixiviación en soluciones ácidas del concentrado de cobre está controlada por la difusión del ion férrico formado durante la reacción a través de la capa de azufre elemental que se forma y la extracción alcanza la recuperación del 76 % de cobre en las primeras 8 horas siempre que la granulometría sea del 70 % menos malla 200. Como indica Mamani (2019) para su tesis de grado, "Lixiviación de minerales finos oxidados de cobre", inclusive es posible la recuperación de cobre desde los finos de mineral oxidado de cobre, El medio ácido formado es suficiente para disolver la crisocola, la malaquita y otros óxidos minerales de cobre, y ligeramente al hierro. Sin embargo, es mejor mantener un estándar en la granulometría del mineral y es más favorable tratar los finos en botaderos.

2.1.2. Bases teóricas

Procesamiento de minerales de cobre

Sintetiza Habashi (1997), que la mayoría de los minerales de cobre extraídos son minerales de óxido o sulfuro. Aquí se introduce la extracción

de minerales de sulfuro porque se utiliza un subproducto importante de este proceso para la extracción de minerales de óxido. El proceso utilizado para tratar los minerales de sulfuro de cobre comienza en el sitio de la mina, donde los minerales que contienen cobre se separan físicamente del resto de la roca, el porcentaje de cobre aumenta a medida que el mineral se refina, primero físicamente, luego químicamente.

Como describe Gupta y Yan (2016), el mineral triturado se vierte sobre una membrana a prueba de fugas, el ácido sulfúrico diluido se vierte sobre el mineral triturado utilizando un sistema de riego. El estanque de lixiviación preñado contiene iones de cobre que le dan el color azul del sulfato de cobre. En la planta de extracción por solventes y electro-obtención (SX-EW) durante la fase inicial se usa un solvente orgánico para recuperar los iones de cobre de la solución preñada, intercambiándolos con iones de hidrógeno en el ácido. La fase final del proceso de extracción con solvente emplea un ácido fuerte para separar el cobre de la solución orgánica, produciendo una solución azul enriquecida con cobre que se trata en una planta de electrodeposición. Los iones de cobre se eliminan de la solución con un ácido fuerte y dejan una solución azul con un alto contenido de cobre. Esto se llama "electrolito rico". Finalmente, en la planta de electrodeposición se recolecta el cobre sobre cátodos de acero y se utilizan ánodos de plomo inertes para formar los cátodos con 99,99% de pureza.

Hidrometalurgia

Explica Havlík (2008) que la hidrometalurgia es considerada la metalurgia extractiva que abarca la extracción y recuperación de metales a través de medios acuosos. Su principio es la concentración de uno o varios elementos metálicos de valor en las soluciones, presentes como iones que seguidamente son separados y aislados de forma específica por reacciones reversibles y diferencias físicas. Así se obtiene una solución cargada del elemento de interés. El interés en esta técnica radica en el amplio rango de variedad en técnicas y combinaciones que pueden hacer de este método un recurso selectivo y específico para la obtención de metales, una vez han sido disueltos a formas iónicas en la solución.

Reactivos de lixiviación de sulfu-óxidos de cobre

Brevemente como explica la Corporación Nacional del Cobre de Chile (2019), para la selección del agente lixivante existe una amplia lista de criterios a considerar como la disponibilidad, costo, consumo, características corrosivas sobre el material industrial, entre otras. Sin embargo, la característica fundamental es la efectividad y la selectividad sobre el mineral trabajado. Las menas tienen amplias diferencias en sus características, variando ampliamente incluso dentro de la misma zona, debido a esto la aplicación de los principios químicos son únicamente una

guía que fija las bases para la elección del lixiviante. Los minerales de cobre generalmente se oxidan previamente para la disolución del metal. Para los sulfuros de cobre, se emplean agentes oxidantes, cuya fuerza de oxidación variará dependiendo del tipo de sulfuro y para los carbonatos y óxidos de cobre se elige emplear un disolvente que en la mayoría de los casos es el ácido sulfúrico. Los agentes de lixiviación más utilizados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1

Agentes de lixiviación

| Tipo de agente | Ejemplos |
|-----------------------|---|
| Ácidos inorgánicos | Ácido sulfúrico Ácido clorhídrico Ácido nítrico |
| Bases | Hidróxido de amonio |
| Agentes complejantes | Amoniaco Sales de amonio Cianuros Carbonatos Cloruros |

Nota. CODELCO Educa, 2019 (https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion_media_t_cnico_080119.pdf).

Lixiviación de minerales de sulfu-óxidos de cobre

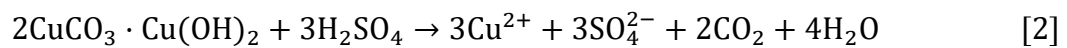
La Figura 5 muestra el diagrama de Pourbaix (potencial-pH) para el sistema Cu-O-S. El cobre puede ser disuelto como Cu^{2+} bajo condiciones

ligeramente acidas (pH < 5). Ejemplos de algunos minerales de cobre que se lixivian de esta forma, son:

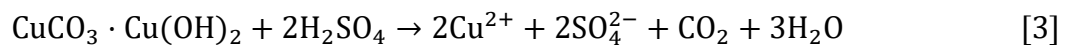
Tenorita



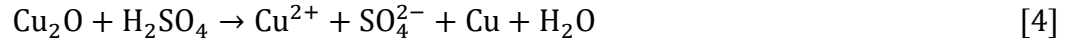
Azurita



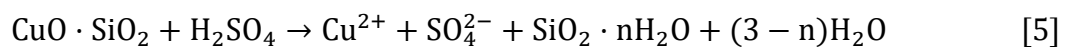
Malaquita



Cuprita

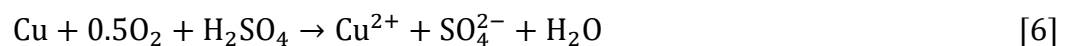


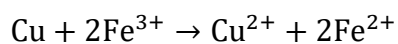
Crisocola



Los minerales sulfurados de cobre requieren del uso de ácidos y agentes oxidantes para romper la estructura molecular del mineral y liberar el Cu^{2+} en la solución (Sherrit, Pavlides & Weekes, 2005). El cobre elemental encontrado en la naturaleza puede ser lixiviado tanto por el oxígeno como por el ion férrico, como se ve a continuación:

Cobre metálico

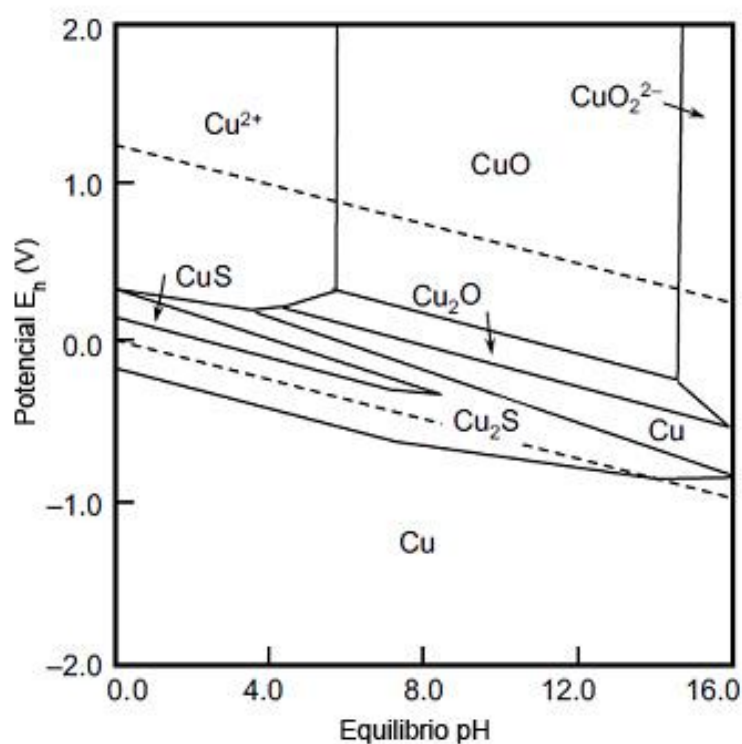




[7]

Figura 5

Diagrama de Pourbaix Cu-O-S

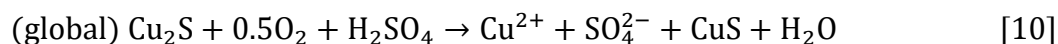
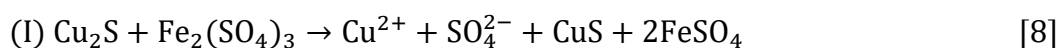


Nota. Sistema en medio acuoso a 25°C, los minerales como el CuO pueden ser lixiviados en medios ácidos, los sulfuros y cobre nativo necesitan un agente oxidante y ácido. Adaptada de Pourbaix diagram of the Cu-S-O-H₂O system at 25°C. [Cu] = [S] = 10⁻⁴ M (House, 1987), de M. E. Schlesinger, M. J. King, K. C. Sole y W. G. Davenport, 2011, Extractive Metallurgy of Copper, 5ta edición, p. 284.

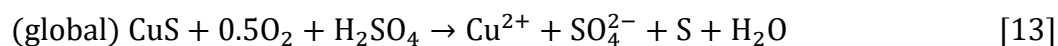
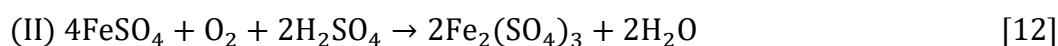
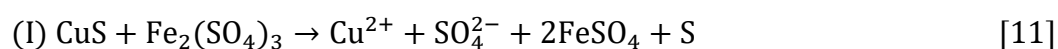
Como explican Schlesinger et al. (2011), todos los sulfuros de cobre requieren la presencia de Fe³⁺ y O₂ como agentes oxidantes para que la lixiviación ocurra. El sulfuro de cobre es oxidado por el Fe³⁺ y el Fe²⁺

resultante es nuevamente oxidado a Fe^{3+} por el O_2 . La pareja redox de Fe (II)/Fe (III) tiene un comportamiento catalítico en estas reacciones (se muestra en condiciones de reacción de temperatura elevada donde el producto que contiene azufre es sulfato, en vez de sulfuro elemental que se forma bajo condiciones ambientales normales), como ejemplo están las siguientes especies mineralógicas:

Calcosita



Covelita



Bajo algunas condiciones (especialmente lixiviación biológica), el azufre elemental que se forma como producto de la reacción puede ser convertido a ácido sulfúrico, de la siguiente forma:

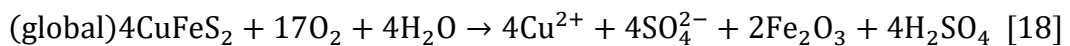
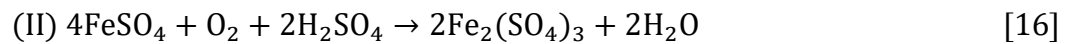
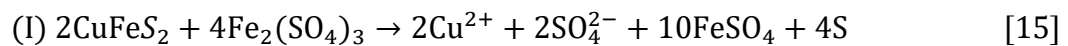
Azufre



En la Figura 6 donde se muestra el diagrama de Pourbaix para el sistema Cu-Fe-O-S, se ve que los minerales muy refractarios, como la calcopirita, requieren presiones y temperaturas elevadas para que la lixiviación sea económicamente viable. Las reacciones de lixiviación son complejas y varían dependiendo de las condiciones experimentales específicas (Hiskey, 1993; Lazarro & Nicol, 2003; Nicol & Lazarro, 2003).

Una serie típica de reacciones que ocurren bajo condiciones de oxidación y a temperaturas elevadas es la siguiente:

Calcopirita



Uso del recurso hídrico por la industria minera en el Perú y sus efectos

En cuanto a la limitada disponibilidad de agua dulce, se agrava por su distribución desigual en las superficies continentales, generando zonas de abundancia y zonas de escasez por lo que en los últimos años la disminución en el volumen del recurso hídrico se ha convertido en un tema sensible y de amplia discusión, generando un sentimiento negativo hacia el desarrollo de la industria en el rubro minero. (Chaparro, 2009).

El concepto “consumo de agua” incluye todas aquellas actividades en las que el uso de agua produce pérdidas en relación a la cantidad inicial suministrada. Consumos urbanos e industriales. Los procesos mineros reutilizan el recurso en sus procesos y tratan los efluentes generados, el agua se utiliza en los procesos de exploración, en la explotación y en aquellos como los de concentración por flotación, en la fusión y electro refinación, o en el proceso hidrometalúrgico, el que consta de lixiviación, extracción por solventes y electro obtención (LX-SX-EW) (Gallios & Matis, 2013).

2.1.3. Definición de términos

Lixiviación: Extracción de la materia soluble de una mezcla mediante la acción de un disolvente líquido (Muñoz, 2016).

Diseño compuesto central: Un tipo de modelo de superficie respuesta. Es un diseño factorial o factorial fraccionado con puntos centrales, ampliado con un grupo de puntos axiales, que permiten estimar la curvatura. Los diseños centrales compuestos son especialmente útiles en los experimentos secuenciales, porque frecuentemente permiten ampliar experimentos factoriales anteriores al agregar puntos axiales y centrales (Myers et al., 2016).

Reactivo/agente oxidante: También llamado comburente, es un compuesto químico que oxida a otra sustancia en reacciones electroquímicas o de reducción-oxidación. En estas reacciones, el compuesto oxidante se reduce (Muñoz, 2016).

Investigación propositiva: Investigación que se fundamenta en una necesidad o vacío dentro de la institución, una vez que se tome la información descrita, se realizará una propuesta de sistema de evaluación del desempeño para superar la problemática actual y las deficiencias encontradas (Serrano, 2017).

Efectividad: Es la capacidad de conseguir el resultado que se busca. Quien es efectivo, por lo tanto, obtiene el efecto deseado (Serrano, 2017).

Sistema: Es un conjunto de elementos relacionados entre sí que funciona como un todo (Domic, 2001).

Hidrometalurgia: Rama de la metalurgia extractiva que cubre la extracción y recuperación de metales usando soluciones líquidas, acuosas y orgánicas (Havlík, 2008).

Ley del mineral: Es una medida que describe el grado de concentración de recursos naturales valiosos (como los metales o minerales) presentes en una mena (Wills & Finch, 2015).

Mena: Mineral sin limpiar, tal como se extrae de la mina (Wills & Finch, 2015).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo y diseño de la investigación

El presente trabajo reúne las condiciones metodológicas de una investigación aplicada y de innovación tecnológica propositiva, en razón, que se utilizaron conocimientos de las ciencias fácticas. De acuerdo a la naturaleza del estudio de la investigación se utilizará el nivel de estudio explicativo experimental. Este diseño de la investigación consiste en el preparación y acondicionamiento de muestras para la realización de pruebas para posteriormente analizar los resultados y determinar el comportamiento de los reactivos oxidantes y agua de mar en la lixiviación de mineral sulfu-oxidado de cobre.

3.1.2. Población y muestra

La población fue de 300 kg y el grupo muestra de 17 kilogramos de mineral sulfu-oxidado de cobre para la preparación de 17 pruebas,

determinadas por el plan de pruebas establecido para un diseño experimental central compuesto (CCD) y de superficie respuesta.

3.1.3. Operacionalización de variables

Se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Operacionalización de las variables de investigación

| Variable | Dimensión | Indicador |
|---|---------------------|------------------|
| VI Reactivos oxidantes | Ácido sulfúrico | g/L |
| | Cloruro de sodio | g/L |
| | Sulfato férrico | g/L |
| VD Lixiviación de mineral óxido de cobre | Extracción de cobre | % |
| | Ley del PLS | g/L |

Nota. El agua de mar es el elemento acuoso.

3.1.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

3.1.4.1. Técnicas para recolección de datos

La recolección de datos por ser una investigación experimental, se han obtenido de las pruebas de lixiviación de cada combinación de variables en el rango considerado por el diseño central compuesto. Para ello se tomó el procedimiento de muestreo en cortador circular rotatorio a fin de contar con muestras homogéneas en composición y granulometría.

3.1.4.2. Instrumentos y equipos

Con los objetivos establecidos, se identificaron los datos requeridos y las fuentes más adecuadas para proporcionarlos. Según lo anterior se decidió que los instrumentos y equipos que se emplearon fueron:

Instrumentos:

- Lonas de plástico
- Cuarteador portátil
- Multímetro
- Resina
- Peróxido
- Catalizador
- Lija de fierro #80
- Lijas de agua #240, 320, 400 y 600
- Pilas
- Mortero
- Juego de mallas finas y gruesas
- Fiolas
- Vasos de precipitado
- Embudos de vidrio

- Etiquetas

Equipos:

- Pulidora para probetas
- Balanza analítica
- Chancadora de quijada
- Pulverizadora
- Molino de bolas
- Molino de Bond
- Equipo RoTap
- Estufa eléctrica
- Campana extractora
- Mesa con rodillos giratorios
- Microscopio electrónico de barrido (SEM)
- Equipo de absorción atómica (AAS)

3.1.5. Procesamiento y análisis de datos

La presente investigación evaluó la eficacia en la lixiviación de minerales sulfu-oxidados de cobre con agentes oxidantes en términos de porcentaje de disolución o extracción y contempló el uso de agua de mar en el proceso, como medio acuoso y portador de cloro.

Con un set de pruebas preparadas a diferentes volúmenes de cada variable, se interpretó el efecto de cada una en los resultados.

Se estableció una línea base con los diferentes análisis físico-químicos realizados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, como análisis evaluativos del proceso.

A continuación, se expresa en forma desarrollada cada etapa de este trabajo de investigación a nivel de laboratorio y los resultados obtenidos.

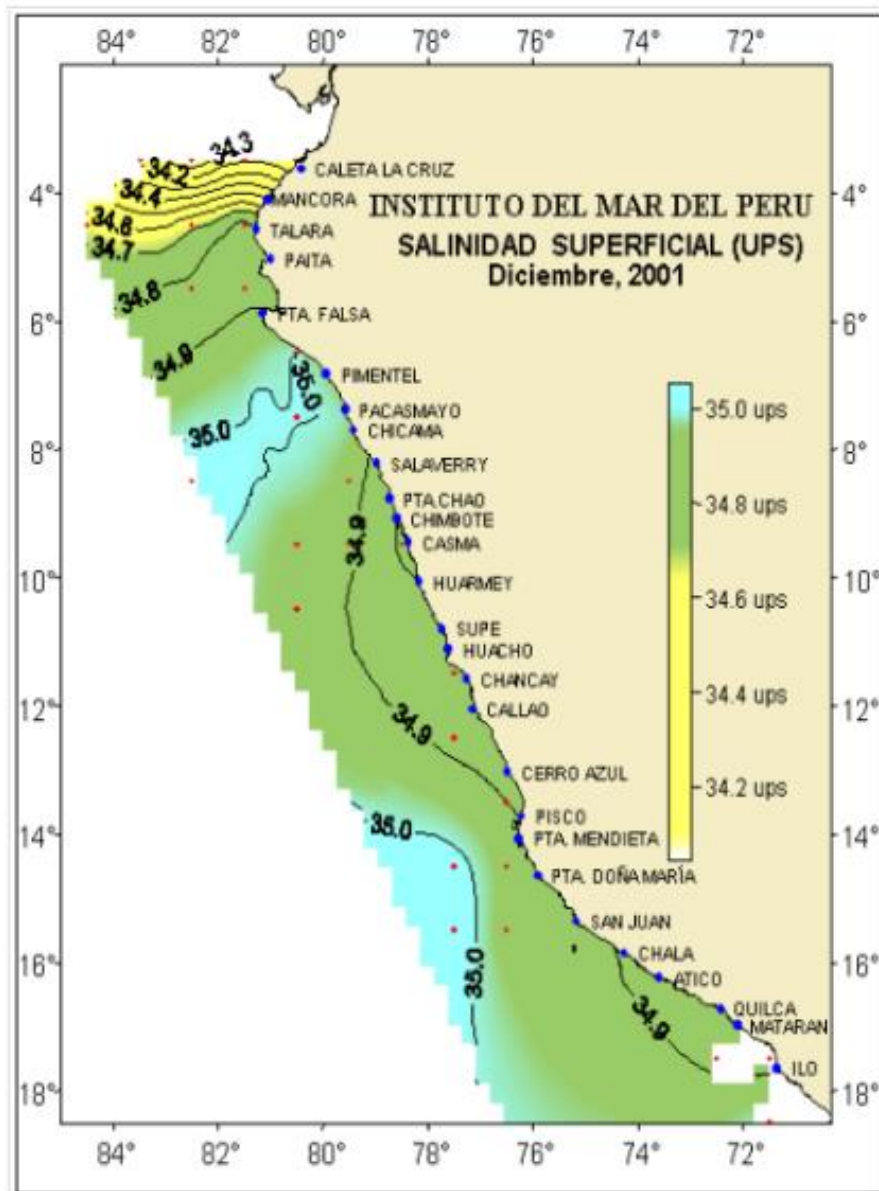
Caracterización del agua de mar

Para esta investigación no se alteró la salinidad natural del agua de mar empleada. Como explica Linares (2017), la salinidad marina varía en distintos puntos geográficos por diferentes factores como son el deshielo de los polos, desembocadura de ríos, entre otros. La mayoría del agua marina, contiene en promedio, un 3,5% de sal (35 g/L), así como otros minerales disueltos.

El Instituto del Mar del Perú (2001), indica que la salinidad era de aproximadamente 34,9 ups en la costa sur del Perú, como se observa en la Figura 7.

Figura 7

Salinidad anual [ups] en la costa del Perú



Nota. Salinidad anual [ups] en la superficie mar de Tacna, de N. M. Linares, 2017, Propuesta técnica de procesamiento de minerales utilizando agua de mar para la mejora de la responsabilidad social y sostenibilidad de las comunidades altoandinas de la región Tacna, tesis doctoral, p. 134.

En la Tabla 3 se especifica la composición parcial del agua de mar para una salinidad de 35 ups.

Tabla 3

Principales componentes del agua de mar

| Símbolo | Elemento | % de total | moles | g/kg |
|-------------------------------|-----------------|-------------------|--------------|-------------|
| Cl ⁻ | Cloruro | 55,29 | 546,0 | 19,353 |
| Na ⁺ | Sodio | 30,74 | 469,0 | 10,760 |
| Mg ²⁺ | Magnesio | 3,69 | 53,0 | 1,292 |
| SO ₄ ²⁻ | Sulfato | 7,75 | 28,0 | 2,712 |
| Ca ²⁺ | Calcio | 1,18 | 10,3 | 0,412 |
| K ⁺ | Potasio | 1,14 | 10,2 | 0,399 |
| Total | | 99,80 | | |

Nota. Composición del agua de mar a una salinidad superficial de 35 ups, análisis en ICP-OES (ESME,2011), N. M. Linares, 2017, Propuesta técnica de procesamiento de minerales utilizando agua de mar para la mejora de la responsabilidad social y sostenibilidad de las comunidades altoandinas de la región Tacna, tesis doctoral, p. 134.

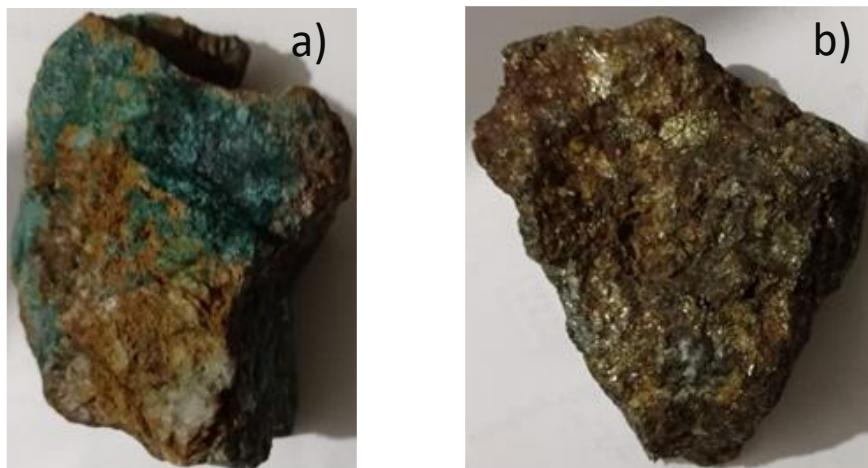
Recolección del mineral muestra

Se colectaron aproximadamente 300 kilogramos de mineral sulfuroxidado de cobre provenientes de tres concesiones mineras, mina Florita, mina Caplina y mina X. El mineral utilizado en el presente trabajo de

investigación es procedente de la zona de Palca y Caplina, en Tacna. En la Figura 8 se observan muestras representativas.

Figura 8

Componente de la muestra de estudio



Nota: a) Mineral de la zona de óxidos y b) Mineral de la zona de mixtos

Análisis granulométrico de cabeza

El mineral sulfu-oxidado donado por las concesiones mineras antes mencionadas, fue trasladado a las instalaciones del Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales desde los yacimientos mineralizados, del cual, en una primera instancia por el método de coneo y cuarteo se tomó dos muestras de aproximadamente 30 kg.

Estas muestras fueron sometidas a un análisis granulométrico, que posteriormente sirvió para programar la planificación de las pruebas de

lixiviación. El resultado promedio de estas pruebas, presentan la distribución granulométrica que se muestra en la Tabla 4 y en la Figura 9 se observa el análisis granulométrico.

Tabla 4

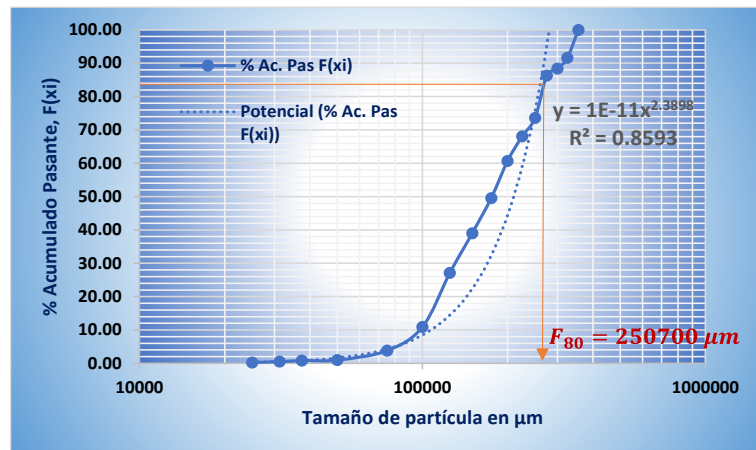
Distribución Granulométrica del Mineral de Cabeza

| Abertura (μm) | Peso (kg) | Peso (%) | % Ac. Ret G(xi) | % Ac. Pas F(xi) |
|--|----------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|
| 355600 | 0 | 0 | 0 | 100,00 |
| 325000 | 2,31 | 8,42 | 8,42 | 91,58 |
| 300000 | 0,87 | 3,17 | 11,59 | 88,41 |
| 275000 | 0,59 | 2,14 | 13,73 | 86,27 |
| 250000 | 3,49 | 12,70 | 26,43 | 73,57 |
| 225000 | 1,52 | 5,54 | 31,97 | 68,03 |
| 200000 | 2,02 | 7,35 | 39,32 | 60,68 |
| 175000 | 3,06 | 11,13 | 50,45 | 49,55 |
| 150000 | 2,90 | 10,54 | 60,99 | 39,01 |
| 125000 | 3,27 | 11,90 | 72,89 | 27,11 |
| 100000 | 4,46 | 16,22 | 89,11 | 10,89 |
| 75000 | 1,95 | 7,10 | 96,21 | 3,79 |
| 50000 | 0,78 | 2,84 | 99,05 | 0,95 |
| 37500 | 0,04 | 0,13 | 99,18 | 0,82 |
| 31250 | 0,09 | 0,33 | 99,51 | 0,49 |
| 25000 | 0,06 | 0,24 | 99,74 | 0,26 |
| Ciego | 0,07 | 0,26 | 100,00 | 0,00 |
| Muestra | 27,5 | 100,00 | | |

Nota. Mallas Tyler

Figura 9

Análisis granulométrico de la muestra inicial



Preparación de muestras para caracterización

A continuación con el método de cuarteo y selección, se prepararon dos muestras de 1 kilogramo cada una, a una granulometría de malla -200, para proceder con los ensayos de caracterización. En los laboratorios respectivos se realizaron los análisis de minerografía para determinar el porcentaje de cobre presente, en el microscopio electrónico de barrido y los ensayos para determinar cobre soluble y cobre total utilizando el método de digestión con la marcha respectiva para cada caso y análisis por absorción atómica para la determinación de la ley de cabeza del mineral muestra.

En paralelo se realizaron las pruebas para determinar la densidad real y aparente del mineral. La relación entre ambos resultados nos proporciona la porosidad de mineral.

Preparación de mineral para pruebas

Mediante el método cuarteo se seleccionaron 50 kilogramos de mineral, los que fueron preparados para las pruebas posteriores por lo que fueron reducidos a una granulometría de 100 % malla -10, homogeneizados y separados en grupos de 1 kilogramo aproximadamente, la granulometría de este mineral esta descrita en la Tabla 5 y el análisis granulométrico en la Figura 10.

Tabla 5

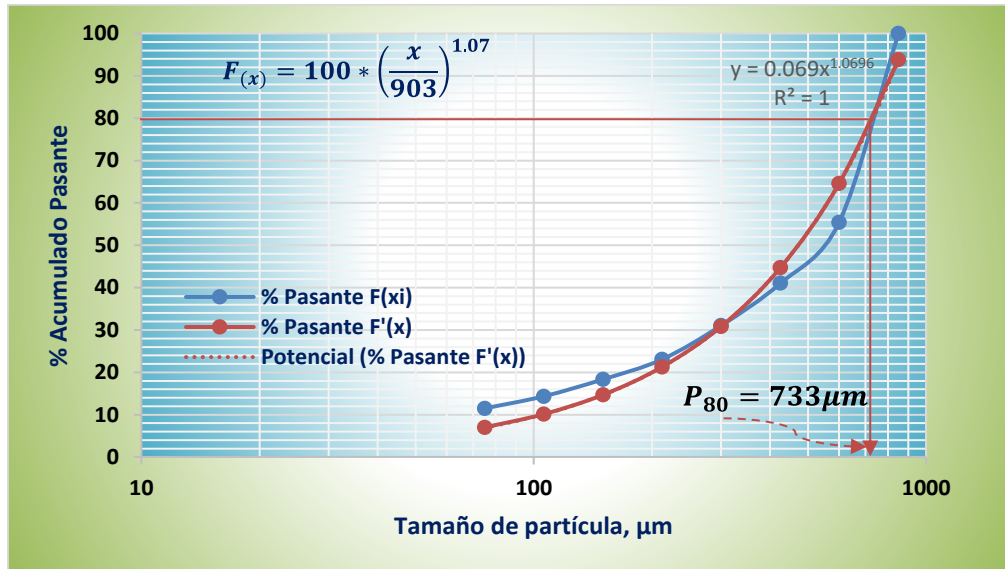
Distribución Granulométrica del Mineral Preparado para Lixiviación

| N° Malla | Abertura (μm) | Peso (g) | % Peso f(xi) | % Acumulado Pasante F(xi) | F'(xi) |
|-----------------|--|---------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------|
| 20 | 850 | 0 | 0 | 100,000 | 93,78 |
| 30 | 600 | 446 | 44,5777 | 55,423 | 64,61 |
| 35 | 500 | 144 | 14,3928 | 41,0295 | 44,68 |
| 50 | 300 | 100 | 9,9950 | 31,0345 | 30,79 |
| 70 | 212 | 80 | 7,9960 | 23,0385 | 21,24 |
| 100 | 150 | 47 | 4,6977 | 18,3408 | 14,67 |
| 140 | 106 | 40 | 3,9980 | 14,3428 | 10,12 |
| 200 | 75 | 28,5 | 2,8486 | 11,4943 | 6,99 |
| ciego | 0 | 115 | 11,943 | 0,0000 | 0,000 |
| | Muestra | 1000,5 | 100,00 | | |

Nota. Mallas ASTM equivalente a Tyler

Figura 10

Análisis granulométrico del alimento a molienda para lixiviación



De la Figura 10 se determina un P_{80} de $733 \mu\text{m}$, valor que se mantuvo constante para todas las pruebas de molienda hasta alcanzar un P_{80} de $41 \mu\text{m}$ y un $52,9 \%$ - malla 200 (Ver Anexo C) que proporciona el modelo central compuesto.

Pruebas de lixiviación con enfoque estadístico

Para establecer el número de pruebas a realizarse se estimaron haciendo uso del Software estadístico Statgraphics Centurion XVII.2, donde para el efecto, se preparó la batería de pruebas con un diseño de superficie respuesta compuesto central (CCD) pensando en variar la

dosificación de ácido sulfúrico, cloruro de sodio y sulfato férrico con los niveles y rangos que se describen en la Tabla 6.

Las variables independientes de la Tabla 6 utilizadas para la optimización del proceso de lixiviación se codificaron según la ecuación (19):

$$x_i = \frac{(\lambda_i - \lambda_0)}{\Delta\lambda_0} \quad [19]$$

donde x_i es el valor codificado adimensional de cada variable independiente, λ_i es el valor real correspondiente, λ_0 es el valor de λ_i en el punto central y $\Delta\lambda_i$ es el valor de cambio de paso (Liu et al., 2016, p.141).

Tabla 6

Rangos de los Factores en evaluación

| Variables independientes | Símbolos | | Niveles y rangos | | | | |
|--------------------------|-------------|------------|------------------|-----|-----|-----|-----------|
| | V. real | Codificada | $-\alpha$ | - 1 | 0 | + 1 | $+\alpha$ |
| Ácido sulfúrico | λ_1 | X_1 | 1,591 | 5 | 10 | 15 | 18,409 |
| Cloruro de sodio | λ_2 | X_2 | 15,91 | 50 | 100 | 150 | 184,09 |
| Sulfato férrico | λ_3 | X_3 | 16,364 | 30 | 50 | 70 | 83,636 |

Los resultados que se muestran en la Tabla 7 se obtuvieron tras ajustar un modelo cuadrático de segundo orden y aplicar un análisis de

regresión múltiple basado en un diseño central compuesto (CCD RSM) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^x \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad [20]$$

Donde k , β_0 , β_i , x_i y x_j , β_{ii} , β_{ij} , y ε representa el número de variables, el término constante, los coeficientes de los parámetros lineales, las variables, los coeficientes de los parámetros cuadráticos, los coeficientes de la interacción de parámetros y el residual asociado con los experimentos respectivamente (Mason et al, 2003, p.515).

Los coeficientes b se obtienen por el método de los mínimos cuadrados. En general, la ecuación (20) puede escribirse en forma de matriz:

$$Y = bX + \varepsilon \quad [21]$$

donde Y se define como una matriz de valores medidos y X como una matriz de variables independientes. Las matrices b y ε consisten en coeficientes y errores, respectivamente. La solución de la ecuación. (3) puede obtenerse mediante el enfoque matricial.

$$b = (X' * X)^{-1} X' * Y \quad [22]$$

donde X' es la transposición de la matriz X y $(X' * X)^{-1}$ es la inversa de la matriz $X' * X$.

El número total de experimentos, tal y como se resume en la Tabla 7, consistió en 2^3 puntos CCD factoriales completos, 6 puntos axiales y 3 réplicas de puntos centrales, lo que indica que se calcularon 17 experimentos a partir de la ecuación 20. Los puntos centrales se incluyeron para proporcionar una varianza razonablemente estable de la respuesta predicha. En un diseño central compuesto (CCD), el número de experimentos (N) se determina según la ecuación (23):

$$N = 2^{(n-p)} + 2n + n_c \quad [23]$$

donde n es el número de factores y p es la fracción del número de factores ($p = 0$ es para el diseño factorial completo), n_c es el número de ejecuciones centrales para estimar el error experimental y $2n$ representa las ejecuciones axiales o puntos estrella. Además, todos los factores se estudian en cinco niveles ($-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$), donde el valor de α es el punto estrella (axial) y se mide mediante la siguiente fórmula:

$$\alpha = (2^{n-p})^{\frac{1}{4}} \quad [24]$$

Se ha tomado esta técnica debido a que en general, el proceso de la metodología de superficie respuesta comprende cinco pasos principales

que incluyen (i) el diseño de una serie de experimentos, (ii) el desarrollo de un modelo matemático con los mejores ajustes para una relación funcional entre los factores de entrada y los resultados, (iii) la búsqueda del conjunto óptimo de factores experimentales que producen un valor máximo o mínimo de la(s) respuesta(s), (iv) la predicción de la(s) respuesta(s) y la comprobación de la adecuación del modelo dentro de la configuración de los experimentos, y (v) la representación de los efectos directos y de interacción de los factores. Esta técnica incluye diferentes diseños como el diseño compuesto central (CCD), el diseño Box-Behnken (BBD), el diseño factorial de tres niveles y el Doehlert, siendo el CCD uno de los diseños más populares utilizados en la optimización de procesos metalúrgicos.

Se sabe que los diseños CCD con puntos factoriales fraccionados son la mejor opción para construir modelos estadísticos en términos del número de experimentos requeridos y la calidad de los datos obtenidos (Azizi et al., 2020, p.3).

En esta ocasión, se utilizará como variable respuesta la extracción de cobre en el PLS. Siendo el set de pruebas el que se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7*Matriz del set de pruebas para lixiviación*

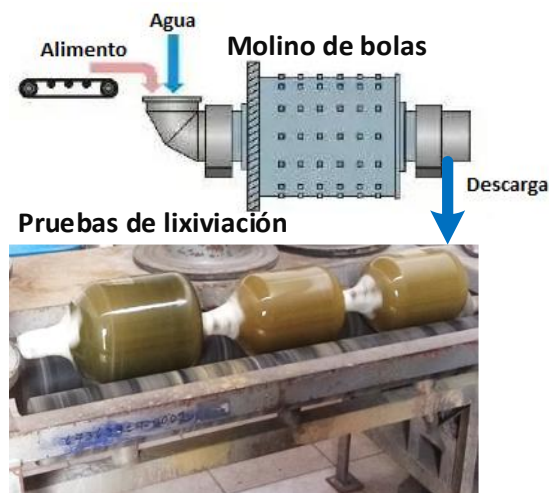
| Prueba | Ácido sulfúrico g/L | Cloruro de sodio g/L | Sulfato férrico g/L |
|---------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 10 | 100 | 83,6359 |
| 2 | 18,409 | 100 | 50 |
| 3 | 15 | 150 | 30 |
| 4 | 5 | 50 | 30 |
| 5 | 5 | 50 | 70 |
| 6 | 1,59104 | 100 | 50 |
| 7 | 10 | 15,9104 | 50 |
| 8 | 5 | 150 | 70 |
| 9 | 5 | 150 | 30 |
| 0 | 10 | 184,09 | 50 |
| 11 | 10 | 100 | 16,3641 |
| 12 | 15 | 150 | 70 |
| 13 | 15 | 50 | 30 |
| 14 | 15 | 50 | 70 |
| 15 | 10 | 100 | 50 |
| 16 | 10 | 100 | 50 |
| 17 | 10 | 100 | 50 |

Bajo esta premisa, se prepararon las 17 pruebas, previa molienda en molino de bolas de laboratorio, tal como se muestra en la Figura 11, donde el mineral muestra se muele en seco, luego se mezcla con los reactantes oxidantes adecuadamente y se transfiere a la botella, luego se agrega un volumen de 1 litro de agua de mar para obtener una pulpa, la cual es agitada a velocidad constante y un tiempo constante de 1 hora. Las

botellas y los recipientes de los cuales se recolectaron 50 mL de muestra de PLS procedente de cada prueba, así mismo se tomó el pH en cada caso y se dejó sedimentar hasta aclarar para proceder a filtrar la muestra, previo lavado, empleando papel filtrante grueso para obtener la muestra para análisis. Las muestras de PLS se analizaron en el laboratorio de Análisis Químico-Metalúrgico por absorción atómica de la ESME, obteniendo así la recuperación de cobre para cada prueba.

Figura 11

Molienda y Lixiviación por agitación en botella



Nota. Sistema de molienda y lixiviación en botella. Cobre sulfu-oxidado.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

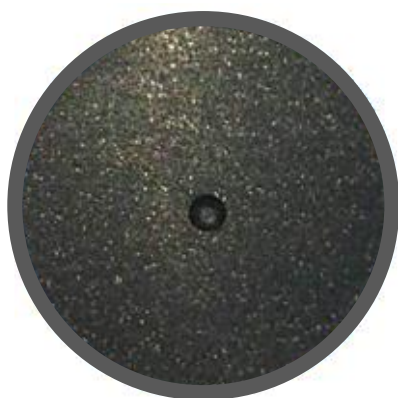
4.1.1. Resultados

Minerografía

Para análisis con el microscopio electrónico de barrido, SEM/EDX, se preparó 3 muestras probeta con mineral de granulometría -malla 200, que se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Probeta para análisis por SEM/EDX



Nota: Probeta preparada para microanálisis en el SEM de ESME-FAIN.

En las Figuras 13 y 14 se puede observar tenorita, cuprita, malaquita, crisocola, covelita y calcosita, además silicatos, alúmina y óxidos de hierro. Es decir, el mineral muestra es un sulfu-óxido de cobre o mixto.

Figura 13

Microestructura y microanálisis de la muestra 1 en VGA TESCAN (SEM/EDX).

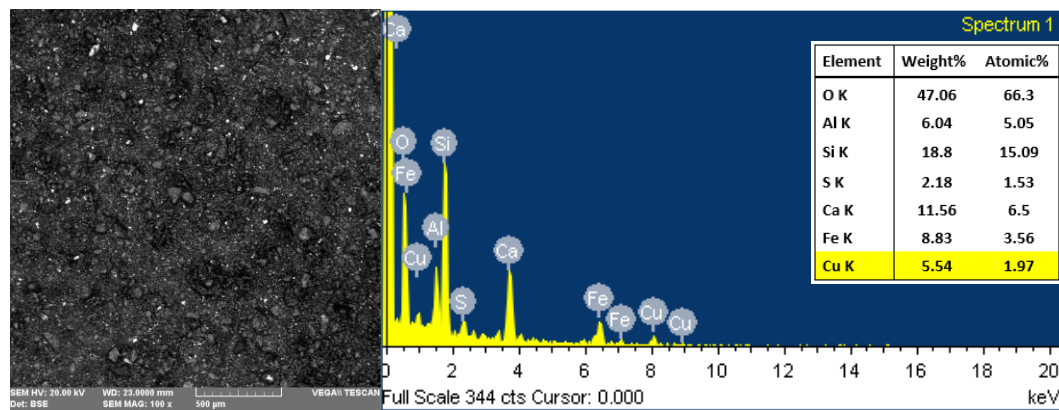
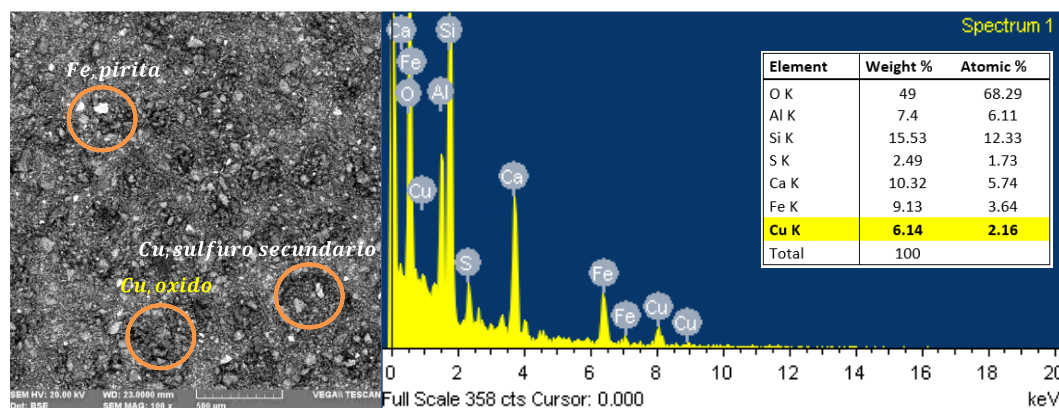


Figura 14

Microestructura y microanálisis de la muestra 3 VGA TESCAN (SEM/EDX).



En la Tabla 8 se expresan los resultados de las 3 muestras, de iguales características, que se sometieron a evaluación. Siendo el promedio de porcentaje de cobre por muestra de 5,52 % Cu.

Tabla 8

Resultados del microanálisis con el SEM/EDX

| Elemento | Muestra 1 | | Muestra 2 | | Muestra 3 | |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | % en peso | % atómico | % en peso | % atómico | % en peso | % atómico |
| O K | 47,06 | 66,3 | 51,54 | 69,98 | 49 | 68,29 |
| Al K | 6,04 | 5,05 | 6,45 | 5,19 | 7,4 | 6,11 |
| Si K | 18,8 | 15,09 | 16,9 | 13,07 | 15,53 | 12,33 |
| S K | 2,18 | 1,53 | 2,34 | 1,58 | 2,49 | 1,73 |
| Ca K | 11,56 | 6,5 | 10,09 | 5,47 | 10,32 | 5,74 |
| Fe K | 8,83 | 3,56 | 7,8 | 3,04 | 9,13 | 3,64 |
| Cu K | 5,54 | 1,97 | 4,88 | 1,67 | 6,14 | 2,16 |
| Totales | 100 | | 100 | | 100 | |

Nota. Análisis con microscopio electrónico de barrido

Cobre soluble y cobre total

La ley anterior fue diluida con mineral mixto previo a las pruebas de determinación del cobre soluble y cobre total, a fin de tener una muestra representativa. De ese modo, los resultados de la evaluación de cobre soluble y cobre total por absorción atómica, con muestras preparadas por digestión acida, se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9*Resultados del Análisis de Cobre Soluble y Cobre Total*

| | Cobre total | Cobre soluble |
|--------------------|--------------------|----------------------|
| Peso de la muestra | 1,0030 g | 1,0017 g |
| Concentración | 1,1913 ppm | 0,1340 ppm |
| Concentración real | 297,82 mg/L | 33,5 mg/L |
| % de cobre total | 2,97 | 0,33 |

Nota. Análisis por digestión ácida.

Densidad real y aparente

Las pruebas por volumetría y por el método del picnómetro arrojaron que la densidad aparente del mineral trabajado es de 2,028 g/cm³ y la densidad real es de 3,27 g/cm³.

Constantes experimentales

En la planificación de desarrollo de las pruebas experimentales de lixiviación, se tomó como constantes experimentales las siguientes:

| | |
|--------------------------------------|--|
| Muestra de mineral | : 1000 g (1 kg). |
| Agua de mar | : 1000 mL (1 L). |
| Porcentaje de sólidos (Cw) | : 50 % |
| Malla de molienda (P ₈₀) | : 733 μm |
| pH | : Variable (función de los reactantes) |
| Tiempo de lixiviación | : 60 minutos (1 h) |
| Ley de cabeza | : 2,97 % Cu (ensayada vía AAS) |

Pruebas de lixiviación

Los resultados producto del análisis del PLS muestra de cada prueba, por absorción atómica, y, a manera de ejemplo, se consideran algunas pruebas y su cálculo, las cuales se presentan en la Tabla 10 y en la Figura 15 se pueden apreciar dichas muestras. Los valores de pH también fueron tomados durante la ejecución de las pruebas (ver anexo A).

Tabla 10

Resultados de los análisis de muestras de PLS

| Muestra | Muestra | Concentración | Volumen | Cobre en | Ley % | Extracción % |
|---------|---------------|---------------|-------------|----------|---------------|---------------|
| | PLS | de cobre | de la fiola | muestra | | |
| | μL | ppm | L | mg | | |
| M2 | 10 | 3,3997 | 0,1 | 3399,7 | 0,0115 | 10,148 |
| M4 | 50 | 2,577 | 0,05 | 128,85 | 0,0010 | 7,693 |
| M6 | 10 | 1,2615 | 0,1 | 1261,5 | 0,0046 | 3,766 |
| M7 | 10 | 2,0521 | 0,05 | 513,025 | 0,0040 | 6,126 |
| M9 | 50 | 3,8474 | 0,1 | 769,48 | 0,0028 | 11,485 |
| M11 | 50 | 3,6397 | 0,1 | 727,94 | 0,0027 | 10,865 |
| M13 | 10 | 1,7338 | 0,1 | 1733,8 | 0,0063 | 5,176 |
| M16 | 10 | 3,8369 | 0,05 | 959,225 | 0,0074 | 11,453 |
| M17 | 10 | 4,1368 | 0,05 | 1034,2 | 0,0079 | 12,349 |

Figura 15

Muestras de PLS Procedentes de Cada Prueba de Lixiviación



Nota. Fiolas de 100 y 50 mL conteniendo el PLS de cada prueba.

Los resultados obtenidos de extracción de cobre del mineral por la acción y reacción con los reactivos oxidantes utilizados en cada prueba, se efectuó utilizando la siguiente expresión:

$$\%E_{Cu} = \frac{C_i - C_{PLS}}{C_i} * 100 \quad [25]$$

Donde C_i es la concentración inicial y C_{PLS} es la concentración en solución rica (PLS).

Resultados del diseño experimental central compuesto (CCD)

El resultado de la corrida de las 17 pruebas en base a los datos dados en la Tabla 6, utilizando el Software StatGraphic Centurion XVII.2 da lugar a la matriz de las tres variables consideradas: X_1 = Ácido sulfúrico,

X2 = Cloruro de sodio y X3 = Sulfato férrico, tal como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11

Matriz de valores reales del diseño central compuesto

| Ac Sulfúrico g/L X1 | NaCl (g/L) X2 | Sulfato Férrico (g/L) X3 | Extracción de Cu % (Y) |
|------------------------------------|------------------------------|---|---------------------------------------|
| 5,0 | 150,0 | 70,0 | 9,675 |
| 10,0 | 100,0 | 16,3641 | 10,865 |
| 15,0 | 50,0 | 70,0 | 14,360 |
| 5,0 | 50 | 30 | 7.693 |
| 10 | 100 | 83,6359 | 15,363 |
| 10 | 184.09 | 50 | 9,354 |
| 18,409 | 100 | 50 | 10,148 |
| 5 | 50 | 70 | 9,563 |
| 15 | 150 | 30 | 6,527 |
| 15 | 50 | 30 | 5,176 |
| 10 | 15,9104 | 50 | 6,126 |
| 5 | 150 | 30 | 11,485 |
| 15 | 150 | 70 | 13,759 |
| 1,59104 | 100 | 50 | 4.766 |
| 10 | 100 | 50 | 10,759 |
| 10 | 100 | 50 | 11,453 |
| 10 | 100 | 50 | 12,347 |

Diagrama de Pareto y ANOVA

El Diagrama de Pareto se muestra en la Figura 16, donde se muestra la importancia de las variables consideradas, pudiendo deducirse que la variable más importante o significativa es la dosificación del sulfato férrico

y la interacción de la variable ácido sulfúrico y sulfato férrico al 95 % de significancia.

Figura 16

Diagrama de Pareto al 95 % de significancia

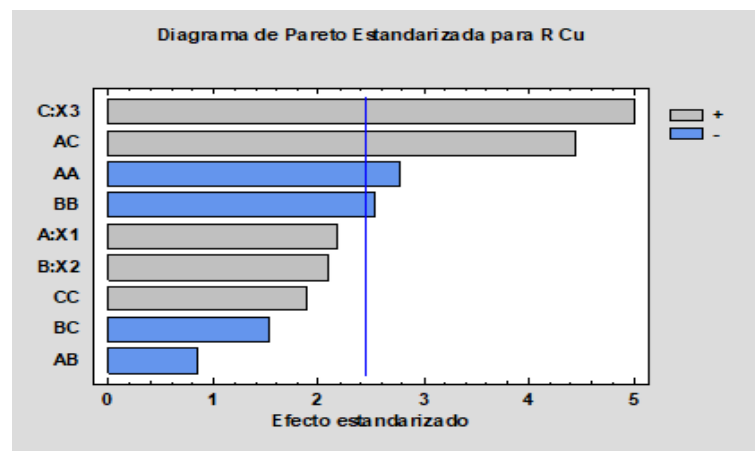


Tabla 12

Análisis de Varianza para Extracción Cu (ANOVA)

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| A:X1 | 8,0076 | 1 | 8,0076 | 4,73 | 0,0727 |
| B:X2 | 7,4442 | 1 | 7,4442 | 4,39 | 0,0809 |
| C:X3 | 42,3139 | 1 | 42,3139 | 24,97 | 0,0025 |
| AA | 13,0451 | 1 | 13,0451 | 7,70 | 0,0322 |
| AB | 1,24346 | 1 | 1,24346 | 0,73 | 0,4245 |
| AC | 33,4398 | 1 | 33,4398 | 19,73 | 0,0044 |
| BB | 10,938 | 1 | 10,938 | 6,45 | 0,0440 |
| BC | 3,96493 | 1 | 3,96493 | 2,34 | 0,1770 |
| CC | 6,12668 | 1 | 6,12668 | 3,62 | 0,1060 |
| Error total | 10,1676 | 6 | 1,6946 | | |
| Total (corr.) | 150,789 | 15 | | | |

Nota: $R^2 = 93,2571\%$. R^2 (ajustada por g.l.) = $83,1426\%$. Error estándar del est. = $1,30177$. Error absoluto medio = $0,649287$. Estadístico Durbin-Watson = $1,82025$ ($P = 0,4154$).

La Tabla 12 del ANOVA se observa que 4 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0 %, siendo de mayor interés los de límite superior, y que el modelo obtenido cuenta con un R² de 93,26 %, el cual explica la variabilidad de las respuestas del porcentaje de cobre extraído en el PLS.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$R_{(Cu)} = 4.76974 + 0.237911*X_1 + 0.152663*X_2 - 0.249345*X_3 - 0.0474658*X_1^2 - 0.001577*X_1*X_2 + 0.020445*X_1*X_3 - 0.000434636*X_2^2 - 0.000704*X_2*X_3 + 0.00203306*X_3^2 \quad [26]$$

Donde

X_1 = Ácido Sulfúrico (g/L)

X_2 = Cloruro de sodio (g/L)

X_3 = Sulfato férrico (g/L)

Además, debe observarse que los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Ahora, al maximizar la respuesta bajo esta ecuación, arroja un valor 20,32 % de extracción de cobre como PLS que oscila entre ácido sulfúrico = 18.4 g/L, Cloruro de sodio = 74,32 g/L y sulfato férrico = 83,64 g/L. En la Figura 17 se observan las extracciones previas a la maximización, que corresponde a la superficie respuesta en tres y dos dimensiones.

Figura 17

Superficie respuesta espacial y planar para la extracción de Cu

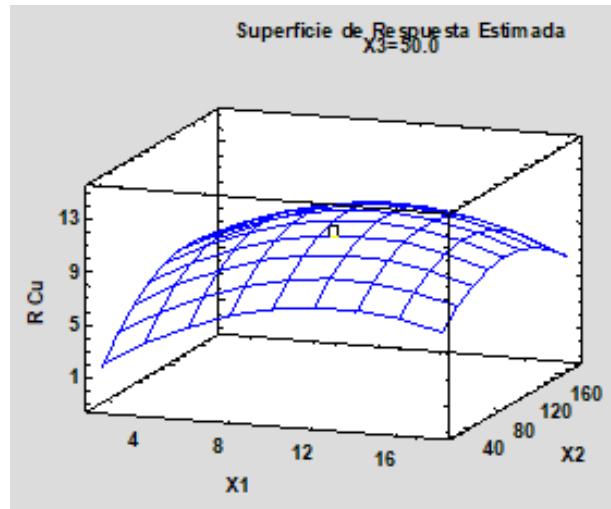
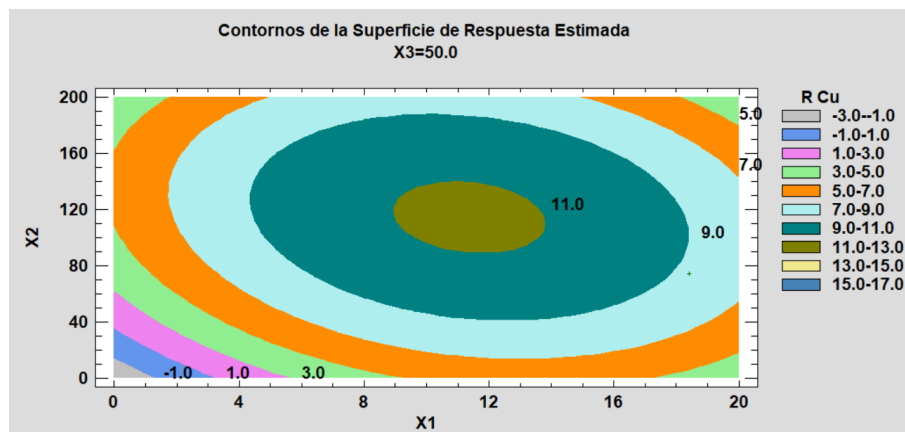


Figura 18

Superficie respuesta planar para la extracción de Cu



Las Figuras 17 y 18 muestra el efecto de la Concentración de sulfato férrico y la interacción del ácido sulfúrico y el sulfato férrico se ve mejorada su acción oxidante y por ende una mayor disolución de las distintas

especies mineralógicas de la muestra en estudio. Este resultado corresponde a un tiempo de lixiviación de 1 hora. Para poder validar la maximización de estos resultados, se construye la Tabla 13.

Tabla 13

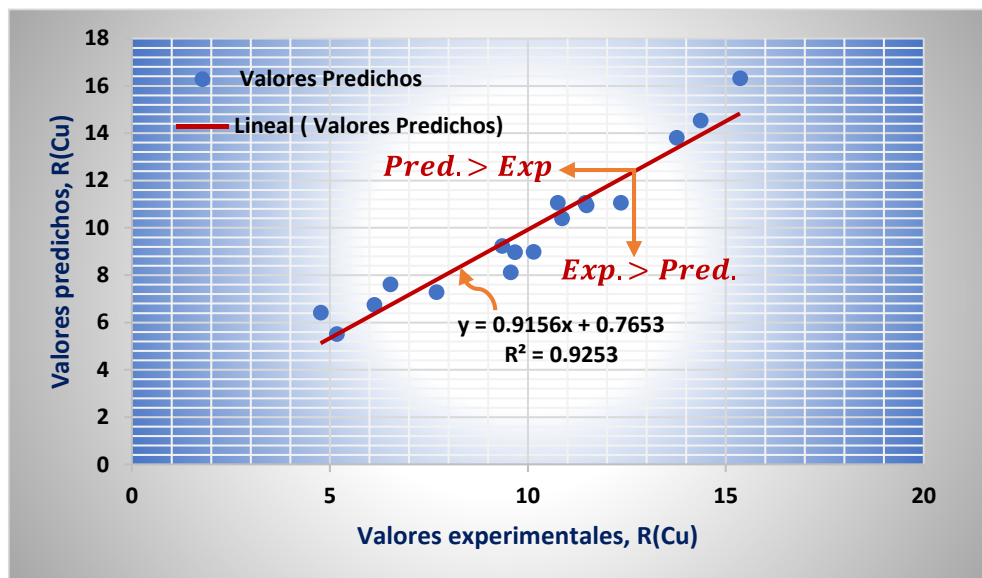
Resultados Estimados para R Cu usando el modelo de la ec. 26

| Fila | Valores Experimentales | Valores predichos |
|------|------------------------|-------------------|
| 1 | 9,675 | 8,982 |
| 2 | 10,865 | 10,403 |
| 3 | 14,36 | 14,5335 |
| 4 | 7,693 | 7,285 |
| 5 | 15,362 | 16,323 |
| 6 | 9,354 | 9,2314 |
| 7 | 10,148 | 8,994 |
| 8 | 9,563 | 8,124 |
| 9 | 6,527 | 7,612 |
| 10 | 5,176 | 5,516 |
| 11 | 6,126 | 6,748 |
| 12 | 11,485 | 10,958 |
| 13 | 13,759 | 13,813 |
| 14 | 4,766 | 6,419 |
| 15 | 10,759 | 11,063 |
| 16 | 11,453 | 11,063 |
| 17 | 12,349 | 11,063 |

A partir de los datos de la Tabla 13 se construye la Figura 19.

Figura 19

Validación estadística del modelo de la Ec. 26



Como puede observarse en la Figura 18, hay una buena concordancia entre los valores predichos y los valores experimentales (valor R^2 de 0,9253 para la recuperación o extracción de cobre en el PLS), lo cual es tecnológicamente aceptable. Sin embargo, se ha realizado otro set de pruebas en una zona más estrecha al óptimo escalado estadísticamente a fin de dar una conclusión definitiva sobre este estudio. Ello se puede ver al escalar siguiendo una ruta de pendiente ascendente que fue simulado con ayuda del software Statgraphic Centurion XVII.2, que se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14*Camino de Máximo Ascenso para Extracción Cu*

| H₂SO₄ (g/L) | NaCl (g/L) | Fe₂(SO₄)₃ (g/L) | Predicción para Extracción Cu (%) |
|--|-----------------------------|---|--|
| 24,0 | 61,000 | 180,000 | 95,522 |
| 25,25 | 70,1881 | 225,117 | 98,719 |
| 26,5 | 73,7969 | 221,922 | 92,314 |
| 27,75 | 76,1515 | 220,699 | 85,596 |
| 29,0 | 77,9489 | 220,093 | 78,115 |
| 30,25 | 79,4214 | 219,778 | 69,678 |
| 31,5 | 80,6775 | 219,631 | 60,182 |
| 32,75 | 81,7772 | 219,59 | 49,559 |
| 34,0 | 82,7578 | 219,623 | 37,764 |

Para este set de 18 pruebas se tomó como base las mismas constantes experimentales y se eligió la zona de mejor acercamiento al valor óptimo la primera fila de la Tabla 14 como valor central de cada variable, para establecer el intervalo de variación y se estableció los valores de la Tabla 15.

Tabla 15*Rangos de los Factores en evaluación*

| Variables independientes | Símbolos | | Niveles y rangos | | | | |
|---|-----------------|-------------------|-----------------------------|------------|----------|------------|-----------------------------|
| | V. real | Codificada | -α | - 1 | 0 | + 1 | +α |
| H ₂ SO ₄ | X1 | λ_1 | 20,6364 | 22 | 24 | 26 | 27,3636 |
| NaCl | X2 | λ_2 | 55,9546 | 58 | 61 | 64 | 66,0454 |
| Fe ₂ (SO ₄) ₃ | X3 | λ_3 | 163,182 | 170 | 180 | 190 | 196,818 |

Utilizando el Software Statgraphic Centurion XVII.2 se obtuvo la siguiente matriz de datos experimentales, provenientes de cada prueba, dado en la Tabla 16.

Tabla 16

Matriz del set de pruebas para lixiviación

| Prueba | Ácido sulfúrico | Cloruro de sodio | Sulfato férrico | Ext. Cu |
|--------|-----------------|------------------|-----------------|---------|
| | g/L | g/L | g/L | % |
| 1 | 27,3636 | 61 | 180 | 96,8 |
| 2 | 22 | 64 | 170 | 93,1 |
| 3 | 22 | 58 | 170 | 91,6 |
| 4 | 24 | 61 | 196,818 | 95,8 |
| 5 | 22 | 64 | 190 | 96,2 |
| 6 | 26 | 58 | 190 | 95,1 |
| 7 | 24 | 55,9546 | 180 | 90,2 |
| 8 | 24 | 61 | 163,182 | 91,3 |
| 9 | 24 | 66,0454 | 180 | 95,2 |
| 10 | 26 | 64 | 190 | 96,7 |
| 11 | 22 | 58 | 190 | 95,1 |
| 12 | 20,6364 | 61 | 180 | 92,8 |
| 13 | 26 | 64 | 170 | 93,5 |
| 14 | 26 | 58 | 170 | 91,8 |
| 15 | 24 | 61 | 180 | 96,1 |
| 16 | 24 | 61 | 180 | 95,4 |
| 17 | 24 | 61 | 180 | 93,8 |
| 18 | 24 | 61 | 180 | 94,9 |

Resultado

Los resultados de % Ext. Cu se obtuvo usando la ecuación (25). El tratamiento de estos datos en referencia al diseño central compuesto de la metodología de superficie respuesta, es el instrumento válido para su análisis, que se desarrolla en este estudio.

Se trata de optimizar la Extracción de cobre (Ext. Cu) estudiando el efecto de la concentración de los factores o variables a un rango más estrecho, e informáticamente se obtuvo los efectos de cada una de las variables, cuyos resultados se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17

Efectos estimados para Ext Cu (%)

| Efecto | Estimado | Error Estd. |
|--------------------|-----------------|--------------------|
| Promedio | 95,0361 | 0,582113 |
| A: Ácido sulfúrico | 0,85337 | 0,631000 |
| B: NaCl | 2,38839 | 0,631000 |
| C: Sulfato férrico | 3,31965 | 0,631000 |
| AA | -0,052470 | 0,655649 |
| AB | 0,675000 | 0,824442 |
| AC | 0,475000 | 0,824442 |
| BB | -1,53738 | 0,655649 |
| BC | -0,62500 | 0,824442 |
| CC | -0,936346 | 0,655649 |

Nota: Errores estándar basados en el error total con 8 g.l.

Para el mismo efecto, se realizó el análisis de varianza (ANOVA), el cual se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18

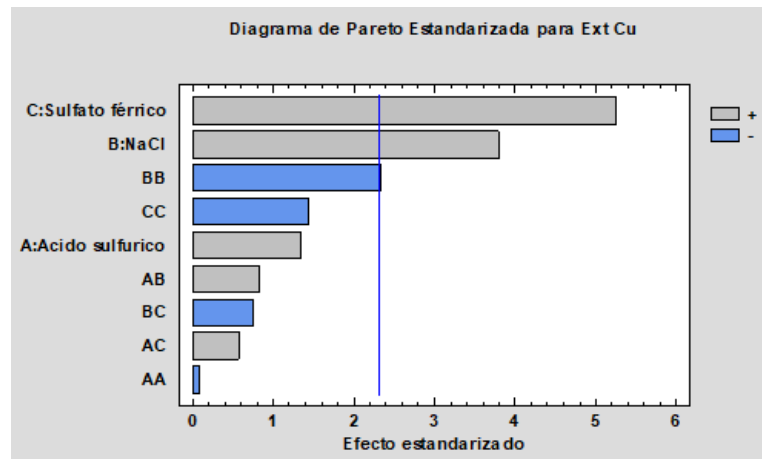
Análisis de Varianza para la Extracción de Cu en el PLS

| Fuente | Suma de Cuadrados | GL | Cuadrado Medio | Razón-F | Valor-P |
|--------------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| A: Ácido sulfúrico | 2,48638 | 1 | 2,48638 | 1,83 | 0,2132 |
| B: NaCl | 19,4761 | 1 | 19,4761 | 14,33 | 0,0053 |
| C: Sulfato férrico | 37,6251 | 1 | 37,6251 | 27,68 | 0,0008 |
| AA | 0,00870634 | 1 | 0,00870634 | 0,01 | 0,9382 |
| AB | 0,91125 | 1 | 0,91125 | 0,67 | 0,4366 |
| AC | 0,45125 | 1 | 0,45125 | 0,33 | 0,5804 |
| BB | 7,4743 | 1 | 7,4743 | 5,50 | 0,0471 |
| BC | 0,78125 | 1 | 0,78125 | 0,57 | 0,4701 |
| CC | 2,77255 | 1 | 2,77255 | 2,04 | 0,1911 |
| Error total | 10,8753 | 8 | 1,35941 | | |
| Total (corr.) | 81,8111 | 17 | | | |

Nota: R-cuadrada = 86,7068 %

Figura 20

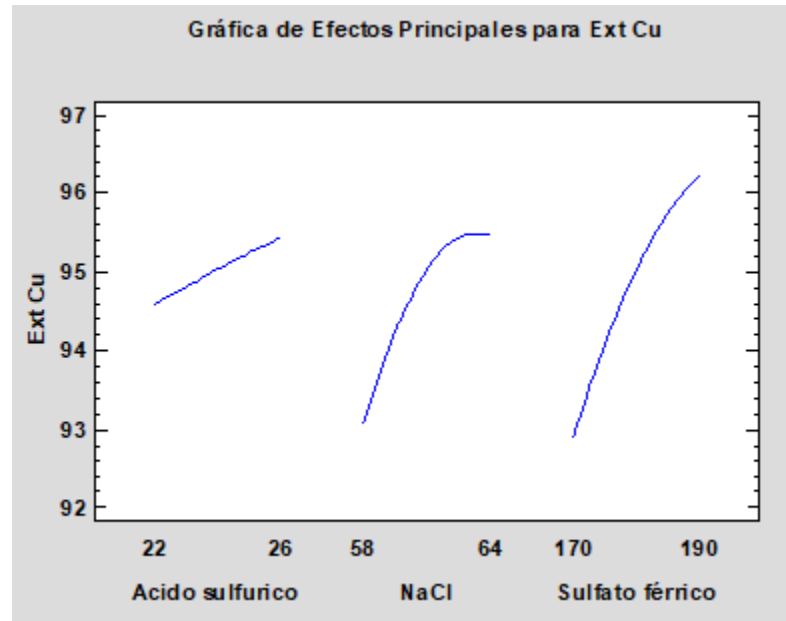
Gráfica de Pareto para la Ext. Cu



En la Figura 20, a través del diagrama de Pareto, puede deducirse la significancia de los factores o variables Sulfato férrico y Cloruro de sodio en la lixiviación de minerales sulfu-oxidados de cobre.

Figura 21

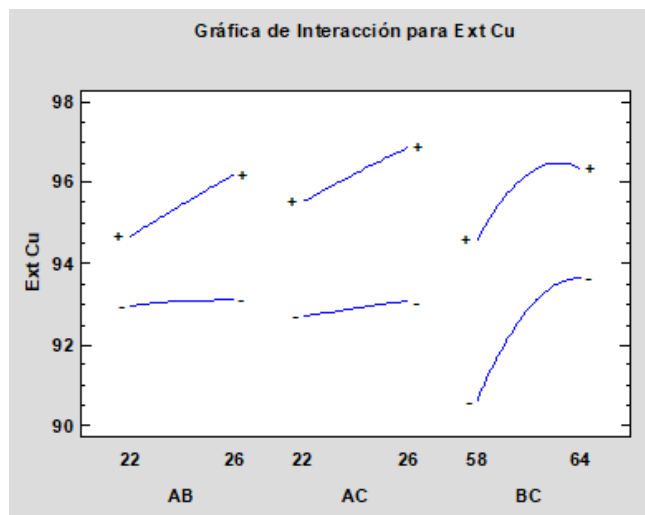
Efectos medios de los factores en la Ext. Cu



En la Figura 21 se puede observar que el ácido sulfúrico por ser un potencial oxidante solo será necesario dosificarlo para pasivar al hierro y formar ácido clorhídrico y cloro nascente que reaccione con los minerales sulfu-óxidos de cobre y maximiza su extracción, es necesario maximizarlo ya que está actuando como coadyuvante, que es lo que se está buscando es este trabajo. En cuanto a los reactantes, el cloruro de sodio y sulfato férrico están en el valor más alto o punto máximo de extracción del cobre, a las condiciones estudiadas, que para su aplicación sólo requieren de un adecuado control.

Figura 22

Interacción de los factores en la Ext. Cu



Al observar la Figura 22, se puede concluir que no existe interacción entre los factores o variables, por lo que deja la posibilidad de poder manejarlos individualmente para optimizar la extracción de cobre en el PLS.

La ecuación del modelo ajustado que estima el promedio de la extracción de cobre, en base a los reactivos oxidantes empleados en medio acuoso (el agua de mar sin desalinizar) está dado por la ecuación (27). Dicho modelo explica el 86,7 % de la variabilidad en las respuestas expresadas en porcentaje de extracción del cobre (Tabla 18).

$$\begin{aligned} \text{Ext Cu} = & -418.245 - 5.04058 \cdot \mathbf{A} + 11.3431 \cdot \mathbf{B} + 2.20182 \cdot \mathbf{C} - 0.0065588(\mathbf{A})^2 \\ & + 0.05625 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} + 0.011875 \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} - 0.0854101 \cdot (\mathbf{B})^2 - \\ & 0.0104167 \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{C} - 0.00468173 \cdot (\mathbf{C})^2 \end{aligned} \quad [27]$$

en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades reales, siendo A = ácido sulfúrico, B = Cloruro de sodio y C = Sulfato férrico. En consecuencia, este modelo informático con un coeficiente de correlación operacionalmente aceptable se visualiza en las Figuras 23 y 24 que la máxima extracción de cobre se encuentra mostrada con el signo + que está dentro de la zona entre las líneas que corresponden de 96 a 97 %, la cual dependerá de una adecuada dosificación de las sales oxidantes para alcanzarla.

Figura 23

Respuesta espacial de extracción de cobre

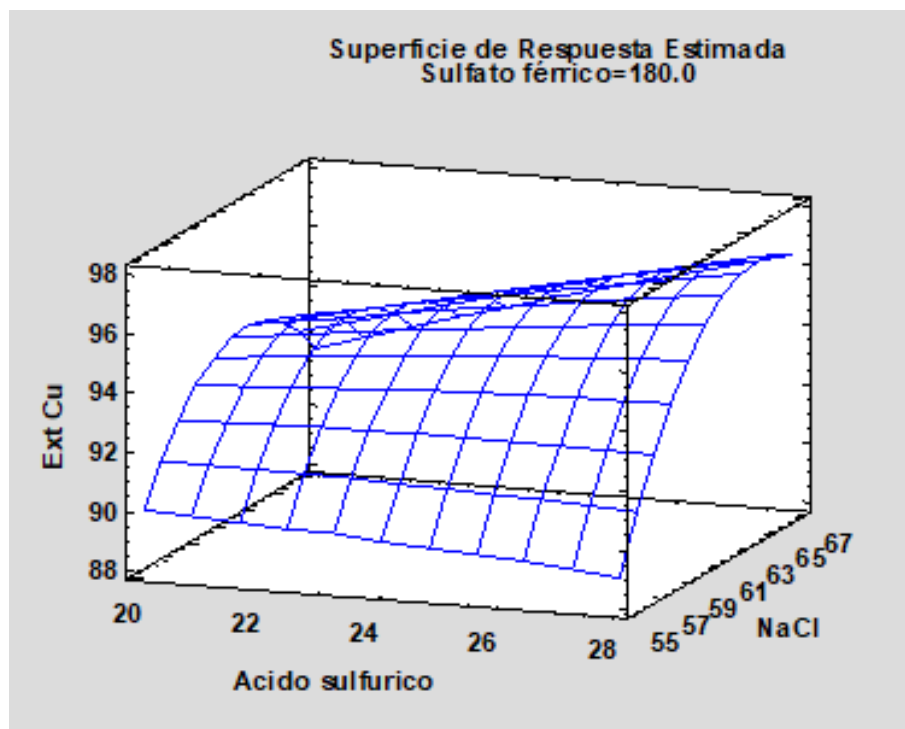
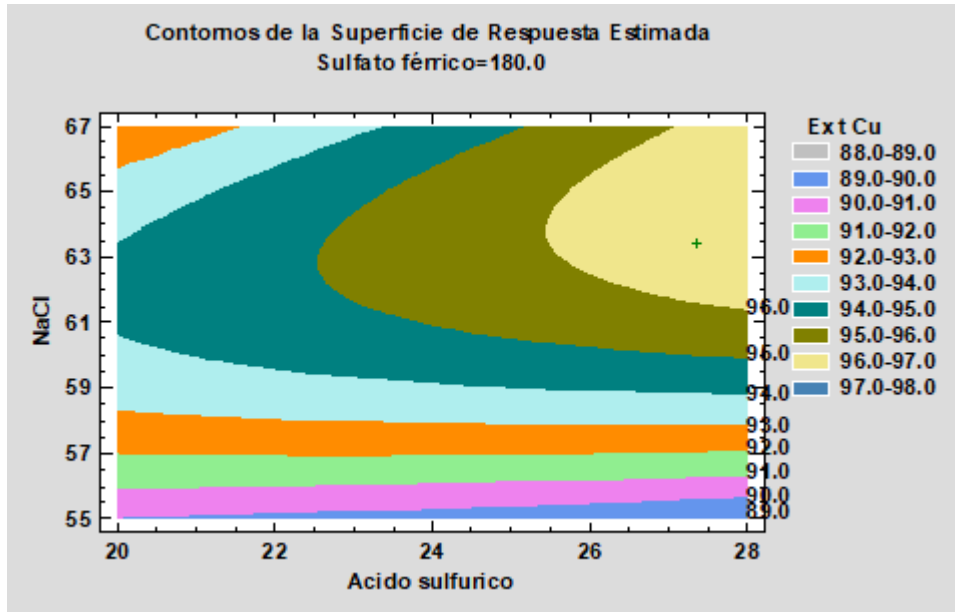


Figura 24

Respuesta planar de extracción de cobre con punto optimo



Los factores de respuesta en cualquier régimen del intervalo del presente diseño experimental, puede calcularse a partir de la ecuación (27) la recuperación de los valores observados que se dan en la Tabla 18 a fin de determinar su concordancia. Los valores observados y los valores predichos de la extracción de cobre se dan en la Tabla 19.

A partir de estos datos se obtiene la Figura 25, que representa el grado de concordancia al nivel de confianza del 95 %. Del mismo modo, la probabilidad normal que los datos obtenidos de las pruebas experimentales son confiables.

Tabla 19

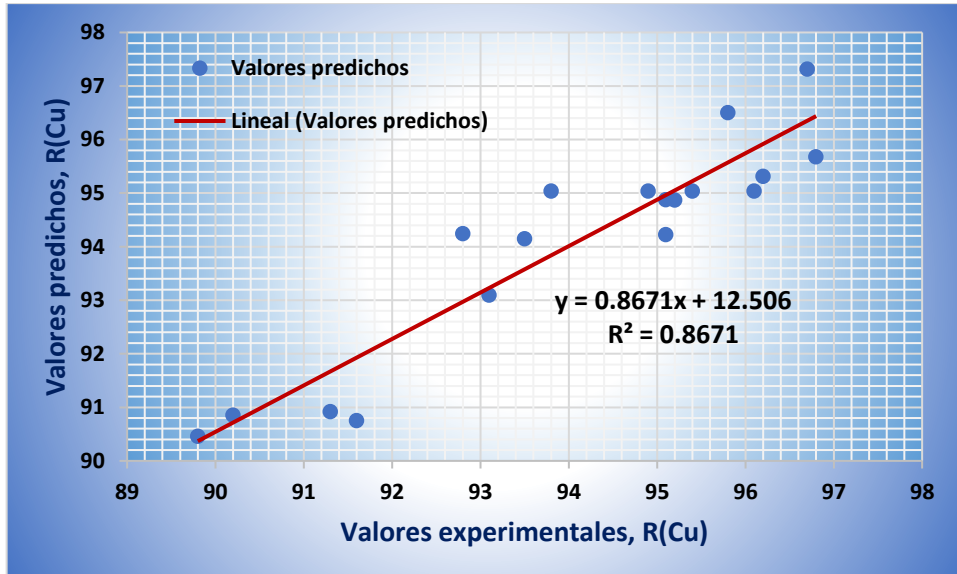
Relación entre los valores de recuperación experimentales y los predichos utilizando la Ecuación (27)

| Fila | Valores experimentales | Valores predichos |
|------|------------------------|-------------------|
| 1 | 96,8 | 95,6795 |
| 2 | 93,1 | 93,0932 |
| 3 | 91,6 | 90,7548 |
| 4 | 95,8 | 96,5034 |
| 5 | 96,2 | 95,3128 |
| 6 | 95,1 | 94,8778 |
| 7 | 90,2 | 90,8535 |
| 8 | 91,3 | 90,9204 |
| 9 | 95,2 | 94,8703 |
| 10 | 96,7 | 97,3162 |
| 11 | 95,1 | 94,2245 |
| 12 | 92,8 | 94,2443 |
| 13 | 93,5 | 94,1466 |
| 14 | 89,8 | 90,4582 |
| 15 | 96,1 | 95,0361 |
| 16 | 95,4 | 95,0361 |
| 17 | 93,8 | 95,0361 |
| 18 | 94,9 | 95,0361 |

Como puede verse en la Figura 25, hay una buena concordancia entre los valores predichos y los puntos de datos observados o experimentales al presentar un coeficiente de correlación R^2 de 0,867 para la extracción de cobre, demostrando que los datos experimentales obtenidos del set de pruebas de este estudio son confiables.

Figura 25

Relación entre los valores de extracción experimental y predichos utilizando la Ecuación (27)



Ahora, al maximizar la respuesta bajo la ecuación (27), arroja un valor de 98,32 % de extracción de cobre como PLS que oscila entre ácido sulfúrico = 27,36 g/L, Cloruro de sodio = 63,42 g/L y Sulfato férrico = 196,82 g/L.

Cinética de lixiviación con sales oxidantes y agua marina

Se sabe que la velocidad de reacción entre una partícula sólida que incluye sulfuro de cobre y una solución lixivante se puede representar principalmente por los modelos de núcleo sin reaccionar heterogéneo (SCM) según la reacción (28). Porque, los modelos SCM pueden

aproximarse a las partículas reales más estrechamente que otros modelos en una inmensa diversidad de situaciones (Nozari y Azizi, 2020, Mubarak, 2020). Por lo tanto, la modelización cinética basada en el modelo SCM se llevó a cabo para identificar el mecanismo del proceso y una mejor comprensión del comportamiento de la lixiviación del mineral sulfu-óxido de cobre (ver anexo B).



en donde A y B son los reactivos en el fluido (solución lixivante) y sólido (partículas de mineral sulfu-óxido de cobre) y b representa el factor estequiométrico (número de moles de metal disuelto por mol de lixivante).

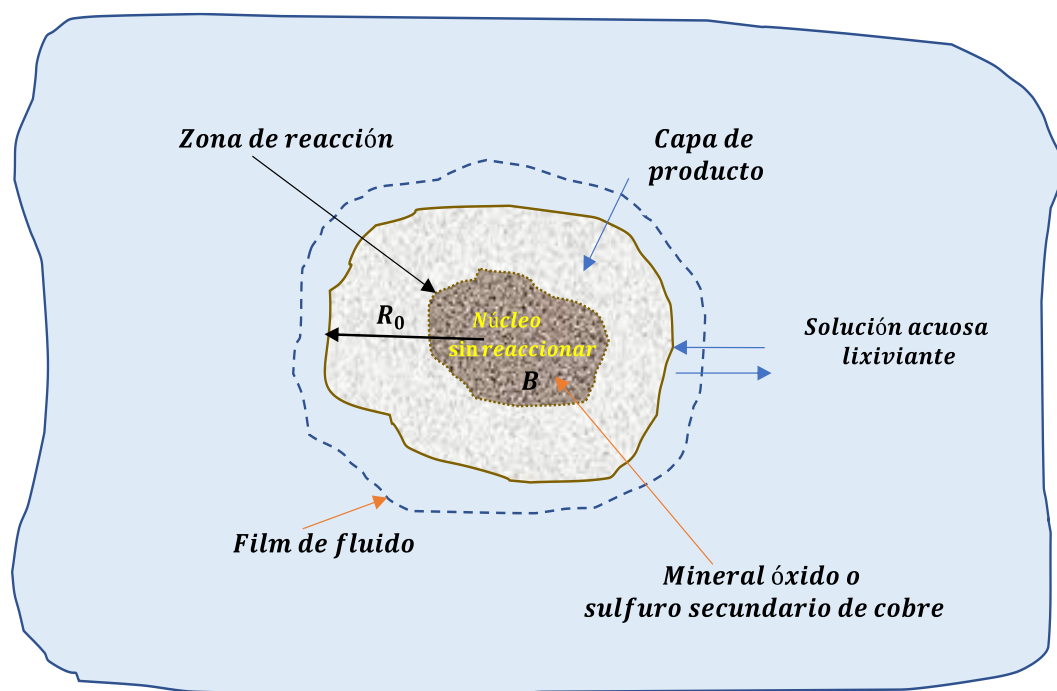
En los modelos SCM heterogéneos, se supone que las partículas que reaccionan son esféricas y de tamaño invariable, tal como se muestra en la Figura 26. Además, la reacción entre las partículas de mineral y la solución de lixiviación ocurre en la superficie exterior de las partículas.

En este trabajo, se ajustaron los datos de lixiviación a tres modelos de núcleo sin reaccionar que incluyen la reacción química en la superficie, Ecuación (29), la difusión en la película líquida, Ecuación (30) y la difusión a través de una capa de producto, Ecuación (31) y, en consecuencia, se midieron los parámetros cinéticos que consisten en las constantes de

velocidad aparente y el paso que controla la velocidad en el sistema de disolución del cobre.

Figura 26

Esquema de la lixiviación de minerales cobre por el método SCM



En estos gráficos, la pendiente de las líneas rectas da la constante de velocidad, dada en min^{-1} .

$$1 - (1 - x)^{\frac{1}{3}} = k_{sc} * t \quad [29]$$

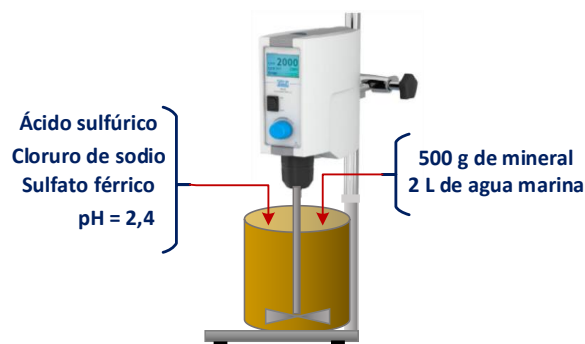
$$1 - (1 - x)^{\frac{2}{3}} = k_{lf} * t \quad [30]$$

$$1 - 3(1 - x)^{\frac{2}{3}} + 2(1 - x) = k_{pd} * t \quad [31]$$

en la que x denota la fracción de cobre lixiviado, t representa el tiempo de lixiviación (min), y k_{sc} , k_{lf} y k_{pd} son las constantes de velocidad aparente del modelo químico de superficie, la difusión por la película líquida y por la capa de producto (min^{-1}), respectivamente. También hay que señalar que la velocidad del proceso puede controlarse a través del más lento de estos pasos secuenciales. La prueba se llevó a cabo en un reactor de vidrio de 3L con agitador mecánico a 400 rpm (Figura 27) y a temperatura ambiente, al cual se agregó 2 L de agua de mar sin desalinizar y los 500 g de mineral mezclado ya con las sales de cloruro de sodio (99,5 %) y el sulfato férrico (97 % pentahidratado), luego se añadió el ácido sulfúrico (98 %).

Figura 27

Esquema del reactor de lixiviación



Se tomó muestras de solución cada 10 minutos, para análisis. Los resultados se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20
Datos de análisis por cobre

| Tiempo | [g/L] |
|--------|-------|
| 0 | 0 |
| 10 | 0,765 |
| 20 | 1,014 |
| 30 | 1,164 |
| 40 | 1,340 |
| 50 | 1,446 |
| 60 | 1,545 |

A partir de los datos de la Tabla 20 se determina la tasa de conversión o disolución del mineral sulfu-óxido de cobre x, teniendo en cuenta que para determinar las extracciones por lixiviación (conversión de la fracción de cobre, x) se utilizó la siguiente fórmula (Mostafa et al., 2021):

$$x = \frac{C_f * V}{C_i * m} \quad [32]$$

donde C_i es el contenido de cobre en la muestra de mineral de sulfu-óxido de cobre (%); m es el peso de la muestra del mismo mineral (g); V es el volumen de la solución de lixiviación (L); y C_f representa la concentración de cobre en la solución rica (PLS) de lixiviación (g/L).

Muestra: 500 g de mineral con una ley promedio de 2,97 % Cu.

Masa de cobre

$$m_{Cu} = 0,0297 * 500 = 14,85 \text{ g}$$

Volumen de solución = V = 2L

Luego, de la ecuación (32) se obtiene:

$$x = \frac{[Cu, g/L] * V}{m_{Cu}} = \frac{2L * [Cu, g/L]}{14,85} = 0,13468 * [Cu, \frac{g}{L}] \quad [33]$$

A partir de la expresión (33) se obtiene la Tabla 21.

Tabla 21

Cálculo del factor de conversión x

| Tiempo | concentración | m _{Cu} . | Conversión |
|---------------|---------------|-------------------|------------|
| minutos | [g/L] | g | x |
| 0 | 0 | 0 | 0,000 |
| 10 | 0,765 | 1,530 | 0,103 |
| 20 | 1,014 | 2,028 | 0,137 |
| 30 | 1,164 | 2,328 | 0,157 |
| 40 | 1,34 | 2,680 | 0,180 |
| 50 | 1,446 | 2,892 | 0,195 |
| 60 | 1,545 | 3,09 | 0,208 |
| Relave (% Cu) | 0,062 | 0,302 | |
| 484 g | | | |

Reemplazando el valor de x mostrado en la Tabla 21 en las ecuaciones (29), (30) y (31) se obtiene la Tabla 22.

Tabla 22

Valores experimentales de $F(x)$ para cada modelo cinético

| Tiempo min | x | F(x) | | |
|---------------|-------|-------------------|------------------------------|---------------------------|
| | | Modelo químico | Difusión película líquida | Difusión capa producto |
| 0 | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,00000 |
| 10 | 0,103 | 0,03559 | 0,06992 | 0,00371 |
| 20 | 0,137 | 0,04776 | 0,09325 | 0,00663 |
| 30 | 0,157 | 0,05525 | 0,10745 | 0,00882 |
| 40 | 0,180 | 0,06418 | 0,12426 | 0,01183 |
| 50 | 0,195 | 0,06965 | 0,13446 | 0,01388 |
| 60 | 0,208 | 0,07481 | 0,14404 | 0,01596 |

Figura 28

Modelo de control químico de superficie

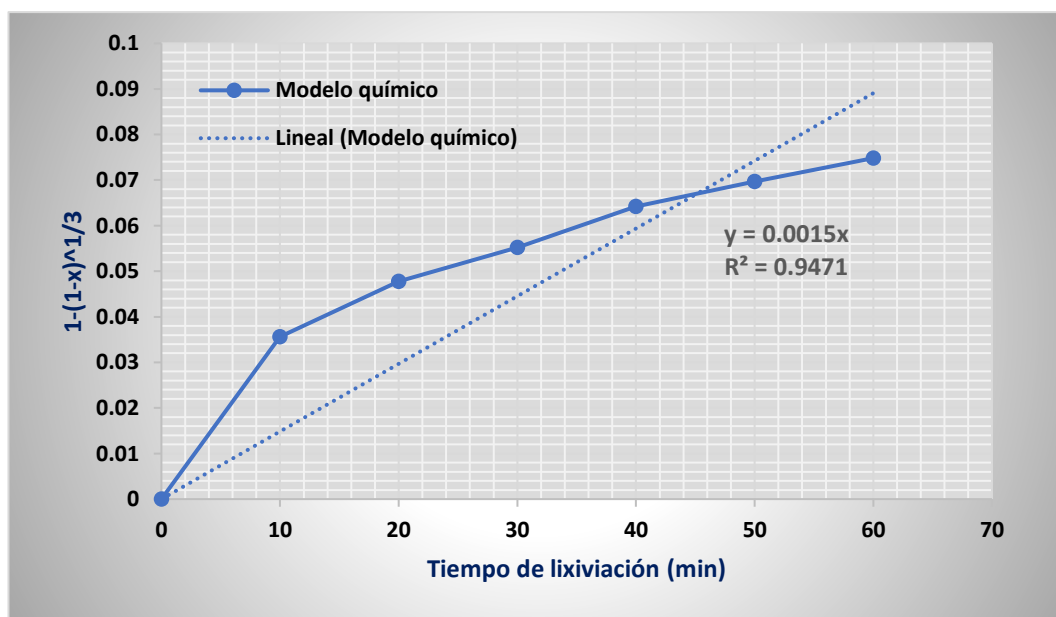


Figura 29
Difusión a través de la película líquida

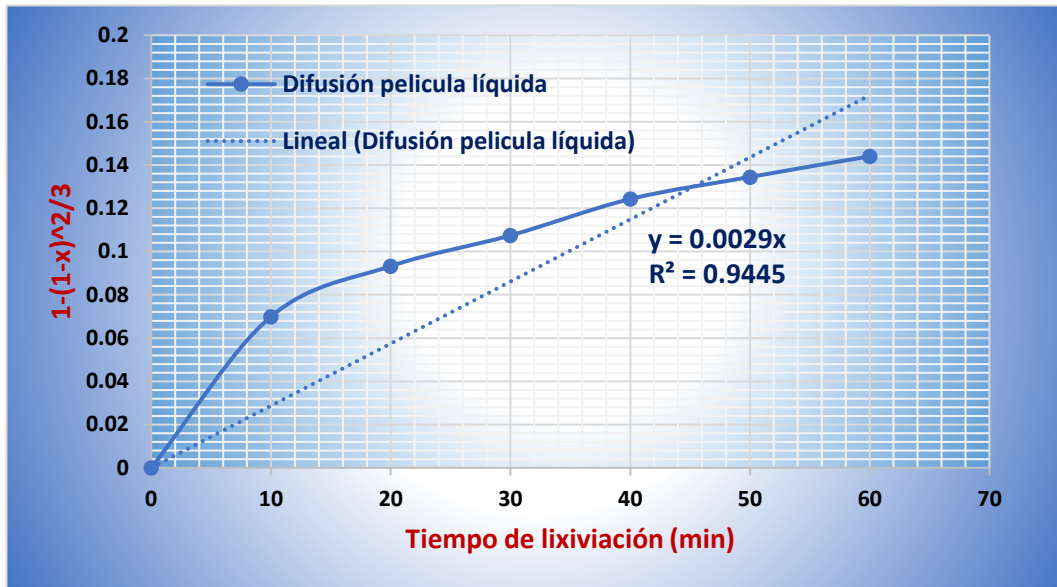
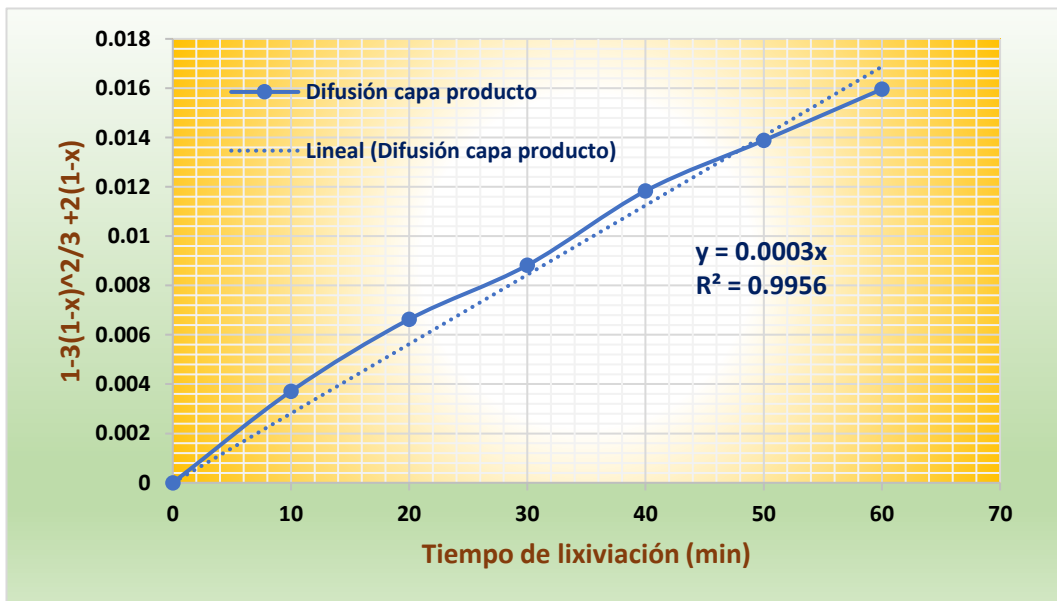


Figura 30
Difusión a través de la capa de producto



Al observar las Figuras 28, 29 y 30, se concluye que el proceso está controlado por la difusión a través de la capa de producto, sin embargo, es lógico admitir que también están presentes el control químico y el control por difusión a través de la película líquida, debido a que los óxidos responden a una cinética y los sulfuros secundarios presentan una cinética diferente. Ello conlleva a inferir que se está produciendo una cinética de control mixto, para el efecto, se tomó en consideración dos modelos mixtos.

$$1 - 2 * (1 - x)^{\frac{1}{3}} + (1 - x)^{\frac{2}{3}} = k_m t \quad [34]$$

$$\left[(1 - x)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] + \left(\frac{1}{3} \right) \ln(1 - x) = kt \quad [35]$$

La ecuación (34) es un proceso controlado por un proceso mixto (Mostafa et al., 2021) y la ecuación (35) es también un proceso de control mixto (Apua y Madiba, 2021) (una combinación de difusión a través de la película y reacción química, Figura 32). En la Figura 31 se grafica como se da este proceso.

Figura 31

Lixiviación de partículas según el tamaño SCM-constante

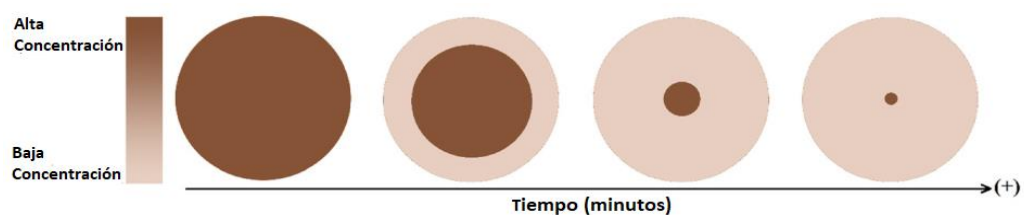


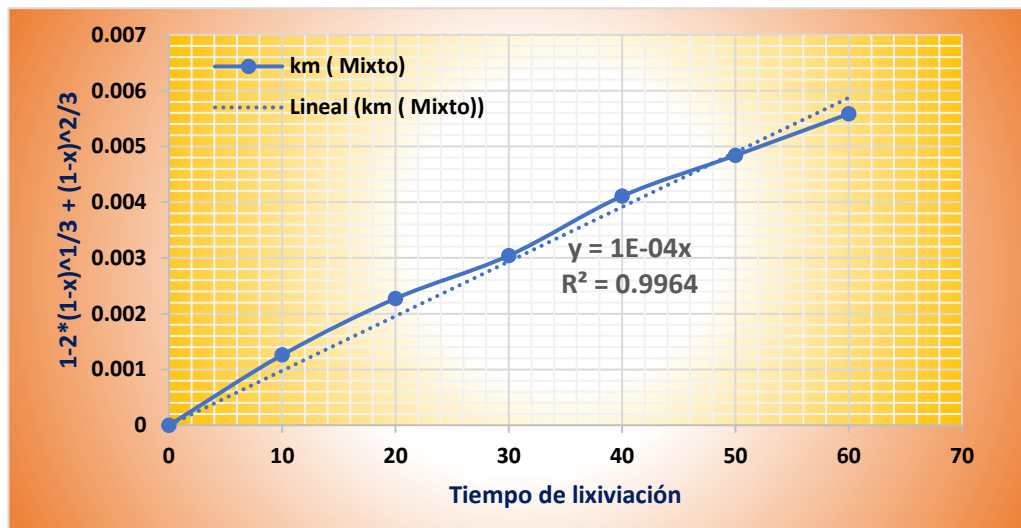
Tabla 23

Conversión x para modelo mixto de control

| Tiempo min | Conversión x | F(x) | |
|---------------|-------------------|------------------------|---------------------|
| | | k_m (Mostafa et al.) | k (Apua & Madiba) |
| 0 | 0,000 | 0 | 0 |
| 10 | 0,103 | 0,00126 | 0,00066 |
| 20 | 0,137 | 0,00227 | 0,00122 |
| 30 | 0,157 | 0,00304 | 0,00165 |
| 40 | 0,180 | 0,00411 | 0,00225 |
| 50 | 0,195 | 0,00484 | 0,00267 |
| 60 | 0,208 | 0,00558 | 0,00310 |

Figura 32

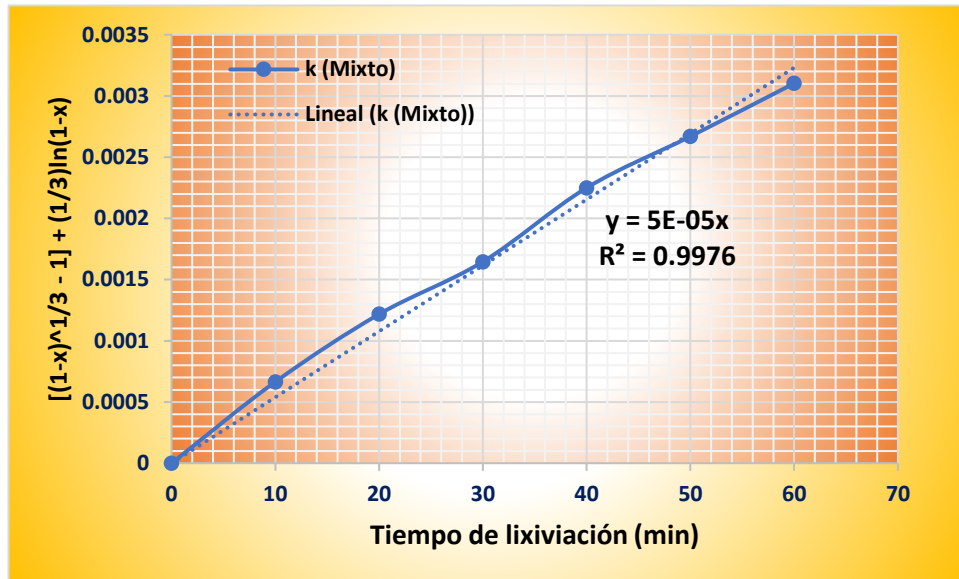
Modelo control mixto



Este modelo muestra que la constante de velocidad $k_m = 0,0001\text{min}^{-1}$ y un $R^2 = 99,64\%$ que resulta ser ligeramente mayor al modelo de difusión a través de producto.

Figura 33

Modelo de control mixto



Este modelo muestra que la constante de velocidad $k_m = 0,00005 \text{ min}^{-1}$ y un $R^2 = 99,76 \%$ que resulta ser ligeramente mayor al modelo mixto usado por Mostafa et al. (2021).

Por consiguiente, los resultados que se presentan en las Figuras 32 y 33, muestran que el mecanismo de control mixto (difusión y reacción química) es el proceso que controla la velocidad de disolución del mineral sulfuro de cobre. En la bibliografía también se han obtenido resultados similares, pero que se han ejecutado unos con agua destilada y otros con agua del lugar.

El balance metalúrgico de la prueba de validación, la cual se realizó en las mismas condiciones operacionales se da en la Tabla 24.

Tabla 24

Balance metalúrgico de la prueba de lixiviación de validación

| Producto | Masa | % y *g/L Cu | Cont. Met Cu | Distribución % |
|----------|-------|-------------|--------------|----------------|
| Cabeza | 500 g | 2,97 | 14,85 | 100,00 |
| Solución | 2 L | 7,274* | 14,549 | 97,97 |
| Relave | 484 g | 0,062 | 0,3001 | 2,03 |

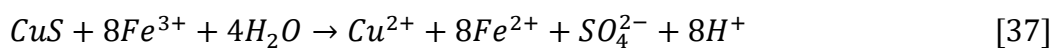
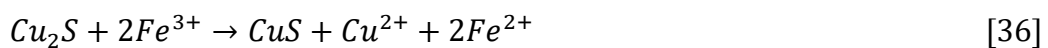
Se observa que al usar los valores óptimos de modelo CCD, se obtiene un 97,97 % de extracción del Cu como PLS, que por sí es aceptable a este nivel de cada una de las variables que se ha estudiado para demostrar que si es posible procesar un mineral sulfu-oxidado de cobre usando como medio acuoso el agua de mar sin desalinizar.

4.1.2. Discusión

El objetivo principal de este estudio era poder lixiviar un mineral de óxidos de cobre con contenido de sulfuros secundarios, que al realizar los estudios microscópicos y mineralógicos se comprobó la existencia de covelita (CuS) y calcosita (Cu₂S) y algo de pirita (FeS₂) con la menor cantidad posible de uso del ácido sulfúrico y eso se ha logrado.

Asimismo, queda demostrado que los reactivos oxidantes utilizando el agua de mar sin desalinizar, a través del uso del diseño central

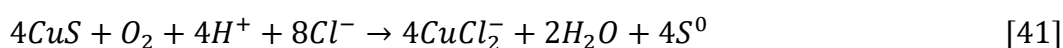
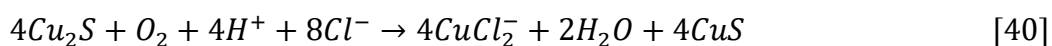
compuesto (CCD) de la metodología de superficie respuesta se ha logrado encontrar los valores óptimos de cada variable a temperatura ambiente, donde se logró un valor máximo de 98,32 % de extracción de cobre y un control cinético mixto, debido a que las sales oxidantes y el ácido sulfúrico han actuado de distinta forma con los óxidos y con los sulfuros secundarios, en concordancia a lo que expresa Castillo et al. (2019), la acción del sulfato férrico con la covelita y la calcosita:



De otro lado, por concepto de reacciones químicas encontradas en la literatura (Cabello-Fuentes, 2004; Ipinza, 2013) la reacción del ácido sulfúrico y el cloruro de sodio produce HCl según la reacción:



Que de acuerdo a lo expuesto por Toro et al. (2021) en un proceso de lixiviación de Cu_2S , añadiendo O_2 al sistema a presión ambiente, siendo el H_2SO_4 el agente de lixiviación, los agentes de lixiviación generados durante la lixiviación en un sistema Cu_2^+/Cl^- son Cu^{2+} , $CuCl^+$, $CuCl_2^-$ y $CuCl_3^-$. La reacción ocurre en dos etapas:



Que confirma los resultados obtenidos en este estudio, ya que los óxidos son mucho más dóciles al lixiviante utilizado que los sulfuros secundarios de cobre.

En consecuencia, el presente estudio resulta ser una proposición de innovación tecnológica que puede coadyubar a enfrentar uno de los principales retos que tienen las minas de cobre en la actualidad en el procesamiento de grandes cantidades de sulfu-óxidos de cobre de baja ley de creciente complejidad y elevadas concentraciones de impurezas.

Del mismo modo, en esta zona sur, la mayoría de pequeños mineros, enfrentan el reto que cada día se ve agravado por una serie de problemas relacionados con el agua, como la falta de agua dulce.

Una estrategia potencial para abordar dicho desafío es utilizar agua de mar, que es un agua con elevadas concentraciones de cloruro para la lixiviación por agitación o en pila de óxidos y sulfuros secundarios de cobre y también para los sulfuros primarios, junto con las instalaciones de plantas de extracción por solvente y electro-obtención previamente construidas para el procesamiento de óxidos.

Trabajos futuros de investigación

Para seguir avanzando en la investigación del funcionamiento del proceso de lixiviación propuesto, se están considerando las siguientes vías:

1. Incluir otros modos de operación y modelos analíticos que incorporen más variables operativas al proceso, junto con parámetros que tengan un impacto significativo en la recuperación con algún sistema de extracción por solventes y EW, tales como el efecto de la dilución, el efecto de la temperatura, el efecto del tamaño de partícula, la agitación del reactor, entre otras.
2. Estudiar el impacto a escala piloto de operar el proceso de lixiviación con modos de operación alternados, incluyendo el análisis de los costes de operación y de capital.

4.1.3. Contrastación de hipótesis

Hipótesis principal

H_0 = El comportamiento de los reactivos oxidantes no influye significativamente en la lixiviación de mineral oxidado de cobre utilizando agua de mar a nivel de laboratorio.

H_1 = El comportamiento de los reactivos oxidantes si influye significativamente en la lixiviación de mineral oxidado de cobre utilizando agua de mar a nivel de laboratorio.

En concordancia con los resultados obtenidos, se desecha la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, con lo cual quedan contrastados los resultados del presente estudio a nivel de laboratorio.

CONCLUSIONES

1. El medio acuoso constituido por agua marina es propicio para la lixiviación del mineral sulfu-oxidado de cobre y el reactivo oxidante, sulfato férrico y cloruro de sodio, ha demostrado tener un comportamiento que no es antagónico a la extracción de cobre puesto que a una controlada dosificación de estas variables genera una buena extracción de cobre de minerales mixtos.
2. Las dosificaciones óptimas en la lixiviación en botella, para los parámetros establecidos en un principio, arroja un valor de 98,32 % de extracción de cobre como PLS que oscilan entre ácido sulfúrico = 27,36 g/L, Cloruro de sodio = 63,42 g/L y Sulfato férrico = 196,82 g/L. Y en la prueba de validación se obtuvo una extracción del 97,97 % en las mismas condiciones, pero en reactor abierto.
3. Los resultados obtenidos indican que es posible la recuperación de cobre utilizando agua de mar como medio en la lixiviación de mineral sulfu-oxidado de cobre, lo que representaría una oportunidad de ahorro en la utilización de agua dulce por parte de la industria minera y así reducir el impacto en el recurso hídrico.

4. Permite que los pequeños mineros pueden implementar esta tecnología en sus denuncios mineros, hoy inactivos, debido a una cinética operacionalmente controlable con la dosificación.

RECOMENDACIONES

1. El sector minero del sur del Perú debe abrirse a la posibilidad de incluir agua marina en sus procesos de lixiviación, por ser un método de innovación que ha demostrado ser factible en la evaluación y representa un cambio positivo en el impacto del recurso hídrico y al impacto ambiental.
2. Es necesario realizar un estudio de caracterización del mineral, previo a la evaluación de reactivos, para determinar las especies presentes y los porcentajes de las mismas y de esta forma establecer los parámetros de recuperación a los cuales apunta la evaluación con las sales oxidantes aquí estudiadas.
3. Se compromete a los egresados de metalurgia de la ESME a continuar evaluando la optimización de la presente tecnología y contemplar una evaluación económica del mismo para continuar con esta investigación hacia una aplicación concreta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alejo, J., & Canchan, Y. (2019). *Lixiviación de minerales sulfurados de cobre en medio cloruro-ferroso de los pórfidos del proyecto Lara-Ica-Peru*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio institucional.
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5582/T010_47960277_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Apua, M.C. Madiba, M.S. (2021). *Leaching kinetics and predictive models for elements extraction from copper oxide ore in sulphuric acid*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers.
<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.04.005>
- Azizi, A. Masdarian, M. Hassanzadeh, A. Bahri, Z. Niedoba, T. & Surowiak, A. (2020). *Parametric Optimization in Rougher Flotation Performance of a Sulfidized Mixed Copper Ore*. Minerals 2020, 10, 660;
<http://dx.doi.org/10.3390/min10080660>
- Cabello-Fuentes, J. (2004). Process for the production of hydrochloric acid and neutralized sulfates.

<https://patentimages.storage.googleapis.com/12/6f/8c/e73f1f20590561/US6676917.pdf>

Castillo J. Sepúlveda, R. Giselle Araya, G. Guzmán, D. Toro, N. Pérez, K. Rodríguez, M. and Navarra, A. (2019). Leaching of White Metal in a NaCl-H₂SO₄ System under Environmental Conditions. Minerals. <https://doi.org/10.3390/min9050319>

Chaparro, A. (2009). *Los procesos mineros y su vinculación con el uso del agua*. XXVII Convención Internacional de Minería de la AIMMGM, Veracruz, México. <https://1library.co/document/8yd86ggq-procesos-mineros-vinculacion-uso-agua.html>

Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2019). *Lixiviación “El riego”*. Artículo de su plataforma educativa CODELCO Educa. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocifile/20190109005316/lixiviacion_media_tecnico_080119.pdf

Domic, E. (2001). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?vid=56UDC_INST&docid=alma991002260239703936&context=L

Fernández, S. (2007). *Optimización del proceso de lixiviación clorurante en medio ácido oxidante de concentrados sulfurados de cobre*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio institucional.

https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/801/Fernandez_ss.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gallios, G., & Matis, K. (1998). *Mineral Processing and the Environment*. Volumen 43 de Nato Science Partnership Subseries: 2. Editorial Springer Netherlands.

Gupta, A., & Yan, D. (2016). *Mineral Processing Design and Operation*. (2da edición). Editorial Elsevier Science.

https://es.scribd.com/book/311619444/Mineral-Processing-Design-and-Operations-An-Introduction?utm_medium=cpc&utm_source=google_search&utm_campaign=3Q_Google_DSA_NB_All_Spanish&utm_device=c&gclid=Cj0KCQjwssyJBhDXARIsAK98ITRk56FSUQ68ZfgXxPFCTZ3yCvJCb9-5jH-aBhhS90eGmQzc2xzav7laAktHEALw_wcB

Habashi, F. (1997). *Handbook of Extractive Metallurgy*. (Vol. II). Editorial Wiley-VCH.

Havlík, T. (2008). *Hydrometallurgy Principles and Applications*. Publicado por Cambridge International Science Publishing Limited en asociación con Woodhead Publishing Limited

Hernández, P. (2013). *Estudio del equilibrio sólido-líquido de sistemas acuosos de minerales de cobre con agua de mar, aplicado a procesos*

de lixiviación. [Tesis doctoral, Universidad de Antofagasta].

Repositorio institucional.

http://repositorio.conicyt.cl/bitstream/handle/10533/181737/HERNANDEZ_PIA_2622D.pdf?sequence=1

Hiskey, J. B. (1993). *Chalcopyrite Semiconductor Electrochemistry and Dissolution*. En R. G. Reddy & R. N. Weizenbach (Eds.), *Extractive Metallurgy of Copper, Nickel and Cobalt* (Simposio internacional Paul E.), Vol. I: Fundamental aspects (pp. 949e969). Warrendale, PA: TMS.

House, C. I. (1987). *Potential-pH Diagrams and their Application to Hydrometallurgical Systems*. En G. A. Davies (Ed.), *Separation Processes in Hydrometallurgy* (pp. 3 -19). Chichester: Ellis Horwood.

Ipinza, J. (2013). Experiencias de uso de agua de mar en hidrometalurgia. [Microsoft PowerPoint - 3 Jorge Ipinza, Académico, UTFSM \(sonami.cl\)](#)

Ipinza, J., & Flaquer, J. (2014). *Lixiviación de minerales de calcopirita y enargita en medio cloruro de sodio-ácido sulfúrico*. Presentación en el Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. https://iimp.org.pe/pptjm/jm20140911_KSPeru.pdf

Kuramoto, J., & Glave, M. (2007). *La Minería Peruana: Lo que Sabemos y lo que aún nos Falta Saber*. En, *Investigación, políticas y desarrollo en el Perú*. (pp. 135-181). Lima: GRADE.

<http://www.grade.org.pe/upload/publicaciones/archivo/download/publicaciones/InvPolitDesarr-4.pdf>

Lazarro, I., & Nicol, M. (2003). *The Mechanism of the Dissolution and Passivation of Chalcopyrite: An Electrochemical Study*. En C. A. Young, A. M. Alfantazi, C. G. Anderson, D. B. Dreisinger, B. Harris & A. James (Eds.), *Hydrometallurgy 2003, Vol. 1: Leaching and Solution Purification* (pp. 405 - 417). Warrendale, PA: TMS.

Linares, N. (2017). *Propuesta técnica de procesamiento de minerales utilizando agua de mar para la mejora de la responsabilidad social y sostenibilidad de las comunidades altoandinas de la región Tacna*. [Tesis doctoral, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio institucional. http://tesis.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/3548/42_2017_linares_gutierrez_nm_espg_doctorado_ciencias_ambientales.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Lovera, D. (2005). *Historia, procesos, producción y redes metalúrgicas*. boletín 55 del Consejo Superior de Investigación de la UNMSM (pp. 13-14). <https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/consejo/boletin55/a03.pdf>

Mamani, A. (2019). *Lixiviación de minerales finos oxidados de cobre*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio institucional. http://repositorio.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/3752/1632_2019_mamani_gozme_aj_fain_metalurgia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Mason, R. Gunst, R. & Hess, J. (2003) *Statistical Design and Analysis of Experiments, with Applications to Engineering and Science*. A JOHN WILEY & SONS PUBLICATION.

Ministerio de Energía y Minas. (2020). *2020: Minería Peruana, Motor de Crecimiento en un Contexto de Crisis*. Boletín estadístico minero del MINEM. <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/VARIABLES/2020/BEMdic2020.pdf>

Ministerio de Energía y Minas. (2021). *Infraestructura minera registra incremento en 73%. Reporte de inversiones a julio 2021*. Boletín estadístico minero del MINEM. <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/VARIABLES/2021/BEM%2007-2021.pdf>

Mostafa, H. Zarandi A. E. Pasquier, & L. Azizi, A. (2021). Kinetic Investigation on Leaching of Copper from a Low-Grade Copper Oxide Deposit in Sulfuric Acid Solution: A Case Study of the Crushing Circuit Reject of a Copper Heap Leaching Plant.
<https://doi.org/10.1007/s40831-021-00408-5>

Mubarak, Y. (2020). Kinetics of Hydrochloric Acid Leaching of Copper from its Ore Yousef Mubarak. Volume 8. No. 9, September 2020 International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. e at <http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter19892020.pdf>
<https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/19892020>

Muñoz, M. (2016). *Extracción de metales por hidrometalurgia: Procesamiento de cobre y cinc*. Riunet archivo digital de la Universidad Politécnica de Valencia.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68321/Mu%C3%B1oz%20-%20Extracci%C3%B3n%20de%20metales%20por%20hidrometalurgia:%20Procesamiento%20de%20cobre%20y%20cinc.pdf?sequence=1>

Myers, R.H. Montgomery, D.C. & Anderson-Cook, C.M. (2009). Response surface methodology. Process and product optimization using

designed experiments. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Nicol, M., & Lazarro, I. (2003). *The Role of Non-Oxidative Processes in the Leaching of Chalcopyrite*. En P. A. Riveros, D. Dixon, D. B. Dreisinger & J. Menacho (Eds.), *Copper 2003eCobre 2003*, Vol. VI, Book 1: Hydrometallurgy of Copper (pp. 367e381). Montreal: CIM.

Nozari, I. Azizi, A. (2020). Experimental and Kinetic Modeling Investigation of Copper Dissolution Process from an Iranian Mixed Oxide/Sulfide Copper Ore. *Journal of Sustainable Metallurgy*. Pub Date:2020-09-03, DOI: [10.1007/s40831-020-00291-6](https://doi.org/10.1007/s40831-020-00291-6)

Peters, E. (1976). *Direct Leaching of Sulfides: Chemistry and Applications*. Metallurgical Transactions B, 7, 505e517.

Quezada, V., & Velásquez, L. (2016). *Dissolution Kinetics of Copper Ores and Concentrate with Sea Water and Discard Brine*. Documento de session de la Hydrometallurgy Conference 2016 Sustainable Hydrometallurgical Extraction of Metals. https://www.researchgate.net/publication/306533250_Dissolution_kinetics_of_copper_ores_and_concentrate_with_sea_water_and_discard_brine

- Ramirez, V., & Cantallopts, J. (2020). *Consumo de agua en la minería del cobre 2019*. Informe para la Comisión Chilena del Cobre. https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/2020%2010%2030%20Consumo%20de%20agua%20en%20la%20minería%20del%20cobre%20al%202019_version%20final.pdf
- Ruiz, M. (2013). *Hidrometalurgia*. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Concepción.
- Serrano, V. (2017). *Unidad I “Tipos de Investigación”*. Proyecto de taller de investigación. <https://es.slideshare.net/AnaKarenRamirezGarci/proyecto-detallerdeinvestigacion>
- Sherrit, R., Pavlides, A. G., & Weekes, B. L. (2005). *Design and Commissioning of the Sepon Copper Pressure Oxidation Circuit*. En 1st Extractive Metallurgy Operators’ Conference (pp. 21 e 27). Victoria: Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Toro, N. Moraga, C. Torres, D. Saldaña M. Pérez K & Gálvez, E. (2021). *Leaching Chalcocite in Chloride Media—A Review*. <https://doi.org/10.3390/min11111197>
- Tumialán, P. (2003). *Compendio de yacimientos minerales del Perú. Capítulo I: Historia de la minería del Perú*. Boletín INGEMET N°10.

https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/libros/2007/cyamientos/ca_p01.pdf

Wills, B., & Finch, J. (2015). Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. <https://www.sciencedirect.com/book/9780080970530/wills-mineral-processing-technology>

ANEXOS

ANEXO A

pH de las pruebas

Tabla 25

Valores de pH de las pruebas de diseño experimental central compuesto

| Muestra | pH |
|---------|-----|
| M1 | 2.9 |
| M2 | 3 |
| M3 | 2.9 |
| M4 | 4 |
| M5 | 3.1 |
| M6 | 3.6 |
| M7 | 3.3 |
| M8 | 2.7 |
| M9 | 3.6 |
| M10 | 2.8 |
| M11 | 4.2 |
| M12 | 2.6 |
| M13 | 3.6 |
| M14 | 2.7 |
| M15 | 2.8 |
| M16 | 2.6 |
| M17 | 2.6 |

Figura 34

Valores de pH de las pruebas de diseño experimental central compuesto

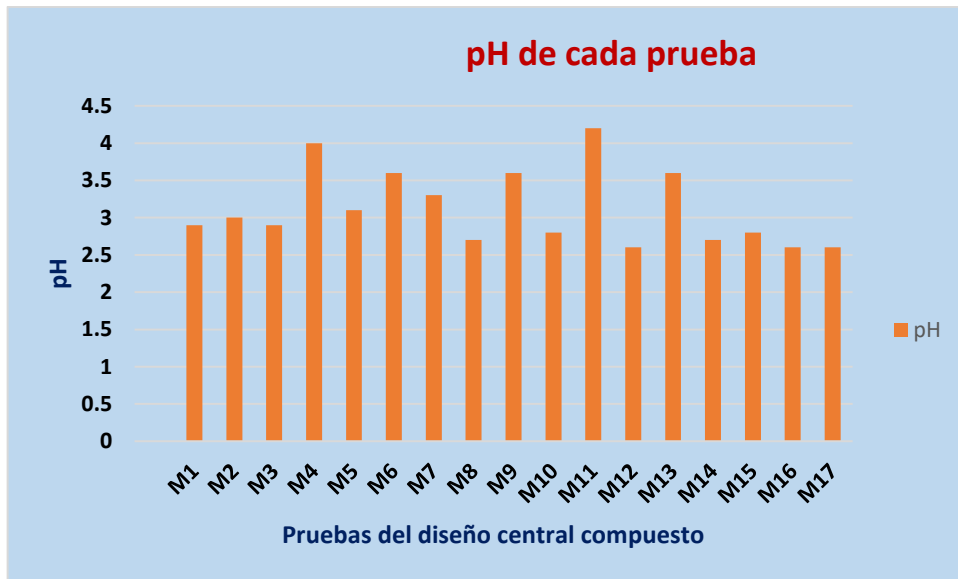
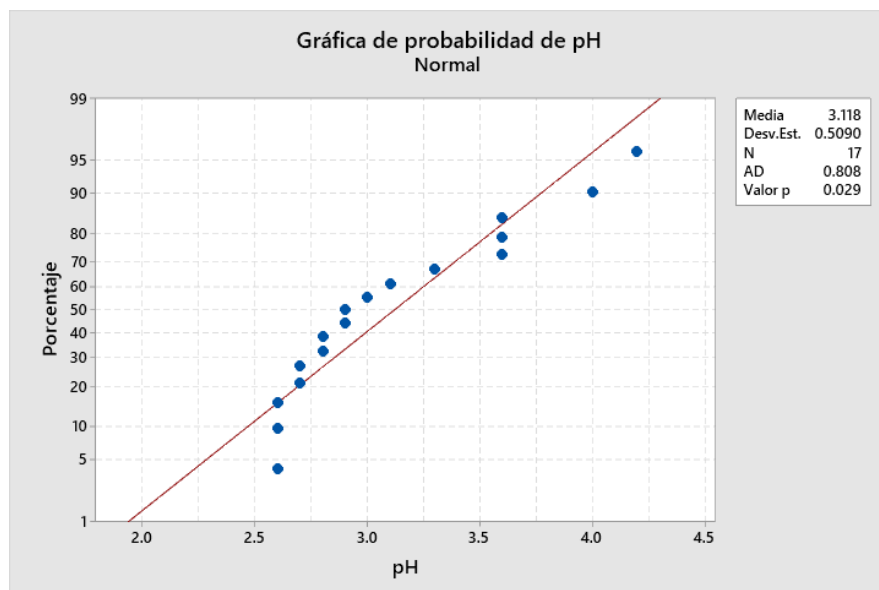


Figura 35

Estadística del pH de las pruebas CCD



ANEXO B

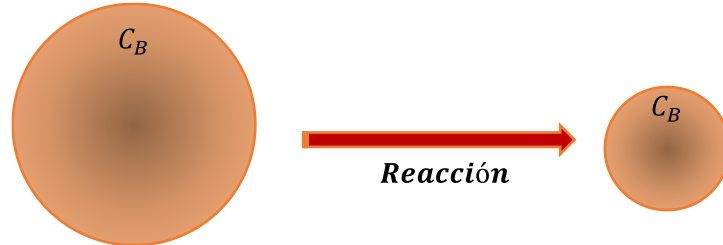
Modelo de cinética heterogénea

Para un ejemplo de control químico para una reacción de primer orden, nos basamos en la reacción general (42) pero trabajamos orientados al caso de control químico con reacción de primer orden como se muestra en la Figura 34.



Figura 34

Reacción con control químico



Nota. Partícula esférica reaccionando con control químico, de M. C. Ruiz, 2013, Hidrometalurgia, p. 88.

En la superficie de una esfera, considerando un radio r , la velocidad de reacción puede expresarse por la ecuación:

$$\frac{dn_A}{dt} = -4\pi r^2 k'_o C_S \quad [43]$$

En la esfera de radio r , el número total de moles n_A se describe por la ecuación (44).

$$n_A = \frac{4\pi r^3}{3V_A} \quad [44]$$

Y dn_A/dt por (45).

$$\frac{dn_A}{dt} = \frac{4\pi r^2}{V_A} \frac{dr}{dt} \quad [45]$$

Reemplazando esta expresión en ecuación (43) se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{4\pi r^2}{V_A} \frac{dr}{dt} &= -4\pi r^2 k'_O C_B \\ \frac{dr}{dt} &= -V_A k_O C_B = -k_l C_B = -R_l \end{aligned} \quad [46]$$

Para el caso de control químico, donde k_l representa la constante específica de velocidad lineal, la cual queda definida por: $k_l = V_A k'_O$ (en $\text{cm}^4 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$) y R_l representa la velocidad de avance de la interfase de reacción (cm/s).

En función de la fracción reaccionada, se puede obtener

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{3k_l C_B}{r_0} (1 - \alpha)^{2/3} \quad [47]$$

En concentración constante se puede integrar la ecuación (47), para dar:

$$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = \frac{k_l C_B}{r_0} t = kt \quad [48]$$

Donde $k = \frac{k_l C_B}{r_0}$

Un gráfico de $1-(1-\alpha)^{1/3}$ versus t resultará en una línea recta de pendiente k
(Ruiz, 2013, pp. 87-88).

Anexo C

Análisis granulométrico del producto de molienda

Tabla 26

Análisis granulométrico del producto de molienda

| Peso retenido (g) | % retenido parcial | % retenido acumulado | % pasante acumulado |
|-------------------|--------------------|----------------------|---------------------|
| Wi | f(Xi) | G(Xi) | F(Xi) |
| 0 | 0,0000 | 0 | 100 |
| 742,5 | 75,1138 | 75 | 25 |
| 86 | 8,7001 | 84 | 16 |
| 43,5 | 4,4006 | 88 | 12 |
| 116,5 | 11,7855 | 100 | 0 |
| 988.5 | | | 52.9 |

Figura 35

Valor del P_{80} del producto de molienda

