

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**LIXIVIACIÓN DE MINERALES ÓXIDOS DE COBRE CON REACTIVO
GLICINA PARA RECUPERACIÓN DE COBRE DEL YACIMIENTO PUCARÁ
PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

JOSÉ GILMER ANCHAPURI CALDERON

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

LIXIVIACIÓN DE MINERALES ÓXIDOS DE COBRE CON REACTIVO
GLICINA PARA RECUPERACIÓN DE COBRE DEL YACIMIENTO
PUCARÁ PUNO

PRESENTADA POR:

JOSÉ GILMER ANCHAPURI CALDERON

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO



APROBADA POR:

PRESIDENTE :


M.Sc.. CIRO HERNAN VERA ALATRISTA

PRIMER MIEMBRO :


Dra. LIDIA ENSUEÑO ROMERO IRURI

SEGUNDO MIEMBRO :


Ing. RENE JUSTO QUISPE FLORES

DIRECTOR / ASESOR :


M.Sc. GERMAN QUILLE CALIZAYA

ÁREA: Hidrometalurgia

TEMA: Lixiviación de minerales óxidos de cobre con reactivo glicina

LÍNEA: Ingeniería de Procesos

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 25 de julio de 2019

DEDICATORIA

A mi padre, quien con su ejemplo me enseñó a ser una mejor persona cada día.

A mi madre, por darme su apoyo incondicional en mi formación como profesional.

A mis hermanos por estar siempre ahí Ayudándome cuando lo necesite,

Finalmente a todos a quienes me apoyaron y me dieron fuerza en todo momento para poder culminar mi carrera y todos los logros alcanzados. Les estoy infinitamente agradecida por brindarme el apoyo incondicional

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas las personas e instituciones que, en la forma de orientación, ayuda y estímulo fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Mi familia, por el apoyo incondicional, la cual me ha permitido lograr mis objetivos tan anhelados.

A la Universidad Nacional del Altiplano y Facultad de Ingeniería Química por la formación profesional brindada

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
I. INTRODUCCIÓN	12
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
1.2 HIPÓTESIS.....	13
1.2.1 HIPÓTESIS GENERAL.....	13
1.2.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICO.....	13
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
II. REVISIÓN DE LITERATURA	14
2.1 ANTECEDENTES	14
2.2 LA GLICINA.....	16
2.3 MINERALES DE COBRE.....	18
2.4 CONCEPTO DE LIXIVIACIÓN	20
2.5 LIXIVIACIÓN DEL COBRE	20
2.5.1 AGENTES DISOLVENTES	21
2.5.2 MÉTODOS DE LIXIVIACIÓN.....	21
2.6 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA LIXIVIACION DE MINERALES DE COBRE.....	24
2.6.1 NATURALEZA DEL MINERAL	24
2.6.2 TAMAÑO DE PARTÍCULA	24
2.6.3 CONCENTRACIÓN DEL DISOLVENTE.....	25
2.6.4 TIEMPO DE CONTACTO.....	25
2.6.5 TEMPERATURA DEL DISOLVENTE	25
2.6.6 pH.....	25
2.6.7 VELOCIDAD DE AGITACIÓN	26
2.6.8 CINÉTICA DE LA LIXIVIACIÓN.....	26

2.7	LIXIVIACIÓN DE MINERAL OXIDADO DE COBRE EN MEDIO AMONICAL.....	27
2.8	LIXIVIACIÓN DE SULFUROS DE COBRE CON CIANURO	27
2.9	LIXIVIACIÓN DE SULFUROS DE COBRE EN MEDIO CLORURO.....	28
2.10	LIXIVIACIÓN DE COBRE CON GLICINA.....	29
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1	UBICACIÓN DE ZONA DE ESTUDIO.....	31
3.2	MATERIAL EXPERIMENTAL	31
3.3	RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE MINERAL.....	32
3.4	PREPARACIÓN FÍSICA Y ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	33
3.5	ANÁLISIS DE COBRE POR VOLUMETRÍA.....	33
3.6	METODOLOGÍA POR OBJETIVOS	34
3.3.1.	METODOLOGÍA PARA OBJETIVO 1.....	34
3.3.2.	METODOLOGÍA PARA OBJETIVO 2.....	35
3.3.3.	METODOLOGÍA PARA OBJETIVO 3.....	35
3.7	DISEÑO EXPERIMENTAL Y FACTORES SELECCIONADOS.....	35
3.8	DISEÑO EXPERIMENTAL BOX-BEHNKEN	36
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.1.	PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN DE COBRE POR AGITACIÓN	38
4.2.	RESULTADOS POR OBJETIVOS	40
4.2.1.	EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE GLICINA	40
4.2.2.	EFFECTO DE LA VARIABLE pH	41
4.2.3.	EFFECTO DE TIEMPO DE LIXIVIACIÓN	41
4.3.	EFFECTOS ESTIMADOS POR PROGRAMA STATGRAPHICS.....	42
4.4.	ANALISIS DE VARIANZA.....	44
4.5.	COEFICIENTES DE REGRESION Y MODELO MATEMATICO.....	46
V.	CONCLUSIONES	48
VI.	RECOMENDACIONES	49
	ANEXOS	53

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura A.1: Diagrama de Pareto estandarizado	53
Figura A.2: Efectos principales	53
Figura A.3: Superficie de respuesta estimada.....	54
Figura A.4: superficies de contorno.....	54
Figura A.5: Gráfica de residuos.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Especies mineralógicas de cobre	19
Tabla 2:	Complejos de glicina cobre y sus constantes de estabilidad.....	30
Tabla 3:	Resultados de análisis granulométrico.....	33
Tabla 4:	Diseño Box-Behnken para tres variables.....	36
Tabla 5:	Valores máximos y mínimos	37
Tabla 6:	Variables reales del Diseño Box-Behnken y resultados	38
Tabla 7:	Resultados de cantidad de cobre obtenidos en lixiviados.....	39
Tabla 8:	Resultados de porcentaje de extracción de cobre	40
Tabla 9:	Efecto de la concentración de glicina	40
Tabla 10:	Efecto de pH	41
Tabla 11:	Efecto de tiempo	41
Tabla 12:	Efectos estimados para extracción de cobre (%)	42
Tabla 13:	Análisis de varianza para extracción de cobre.....	44
Tabla 14:	Coefficiente de regresión para extracción de cobre	46

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

A	: Concentración de glicina
B	: pH
C	: Tiempo de lixiviación
C8	: Porcentaje de extracción de cobre
Cu	: Cobre
t	: tiempo
h	: horas
min	: minutos
mg	: miligramos
L	: Litros
M	: Molar
mM	: milimol
g	: gramos
µm	: micrómetro
LogK	: Logaritmo de constante de equilibrio
S/L	: Sólido/líquido

RESUMEN

En la técnica de extracción de cobre con solución de ácido sulfúrico genera contaminación ambiental, debida que en solución ácida se disuelve la mayoría de los metales contenidos como impurezas en el mineral. El objetivo del presente trabajo de investigación es determinar el porcentaje de recuperación de cobre en la lixiviación de minerales oxidados de cobre con reactivo orgánico glicina en medio alcalino y comprobar su capacidad de disolución de cobre, ya que esta técnica de extracción con reactivo glicina es menos tóxico y amigable al medio ambiente. Las muestras de mineral en estudio fueron tomadas de la Mina Pucará Puno. La preparación física del mineral se inició con las operaciones de chancado y molienda para ello se utilizó una chancadora de quijada y molino de bolas. Se hizo los cuarteos sucesivos de mineral molido hasta obtener una muestra representativa y de granulometría adecuada 69%-malla 200. La extracción de cobre se realizó por el método de lixiviación por agitación, la velocidad de agitación fue mantenida a 400 rpm. Se ha preparado solución de glicina como lixivante, la concentración óptima determinada fue 0,5 M. Para ajustar el pH de la solución lixivante glicina se utilizó lechada de cal el mismo que fue preparado al 30%, el pH óptimo determinado fue 11. Además, se determinó el tiempo de lixiviación de cobre por agitación siendo óptimo de 24 horas. Bajo estas condiciones el porcentaje de extracción de cobre por el método de lixiviación por agitación alcanzó al 82,14% de Cu. Los materiales experimentales utilizados para la lixiviación de cobre fueron: equipo agitador mecánico con paletas, balanza analítica, pH metro, equipo de filtración, mineral de cobre, cal, glicina entre otros.

En la parte estadística se aplicó el diseño Box-Behnken para tres variables el mismo que se ajustó a un modelo de regresión cuadrática cuya ecuación es:

$$\begin{aligned} \text{Extracción de cobre} = & 10,8237 + 263,467 * \text{Concentración} - 4,30292 * \text{pH} + \\ & 1,81276 * \text{Tiempo} - 199,583 * \text{Concentración}^2 - 9,825 * \text{Concentración} * \text{pH} + \\ & 2,125 * \text{Concentración} * \text{Tiempo} + 0,471667 * \text{pH}^2 + 0,00388889 * \text{pH} * \text{Tiempo} - \\ & 0,0604115 * \text{Tiempo}^2. \end{aligned}$$

Las pruebas experimentales se realizaron en el laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano.

PALABRAS CLAVES: Lixiviación, cobre, glicina, alcalino y mineral oxidado.

ABSTRACT

In the technique of extraction of copper with sulfuric acid solution generates environmental pollution, because in acid solution dissolves most of the metals contained as impurities in the mineral. The objective of this research work is determine the copper recovery percentage in the oxidized copper leaching ores with organic reagent glycine in alkaline medium and to check its copper dissolution capacity, since this extraction technique with glycine reagent is less toxic and friendly to the environment. The mineral samples under study were taken from the Pucará Puno Mine. The ore physical preparation began with the crushing and grinding operations for which a jaw crusher and ball mill was used. The successive quartzes of ground ore were made until obtaining a representative sample with a suitable granulometry of 69% - 200 mesh. The copper extraction was carried out by the agitation leaching method, the agitation speed was maintained at 400 rpm. Glycine solution has been prepared as a leaching agent, the optimum concentration determined was 0.5 M. To adjust the pH of the glycine leaching solution, the same lime was used, which was prepared at 30%, the optimum pH was 11. In addition, the copper leaching time was determined by agitation being optimal for 24 hours. Under these conditions, the percentage of copper extraction by the agitation lixivation method reached 82.14% of Cu. The experimental materials used for the copper leaching of were: mechanical agitator equipment with pallets, analytical balance, pH meter, filtration equipment, copper ore, lime, glycine among others.

In the statistical part, the Box-Behnken design was applied for three variables, the same one that was adjusted to a quadratic regression model whose equation is:

$$\text{Copper Extraction} = 10,8237 + 263,467 * \text{Concentration} - 4,30292 * \text{pH} + 1,81276 * \text{Time} - 199,583 * \text{Concentration}^2 - 9,825 * \text{Concentration} * \text{pH} + 2,125 * \text{Concentration} * \text{Time} + 0,471667 * \text{pH}^2 + 0.00388889 * \text{pH} * \text{Time} - 0.0604115 * \text{Time}^2.$$

The experimental tests were carried out in the quality control laboratory of the Chemical Engineering Faculty of the National University of the Altiplano.

KEY WORDS: Leaching, copper, glycine, alkaline and oxidized mineral.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los avances de la ciencia y tecnología en la hidrometalurgia del cobre requieren una investigación continua en los diferentes procesos unitarios y su aplicación industrial. Necesitamos entender mejor cómo lixiviar un mineral de cobre y extraer sus metales contenidos sin contaminar el medio ambiente. Hoy en día se viene investigando el uso de nuevos reactivos lixiviantes inorgánicos y orgánicos menos contaminantes para la extracción de cobre a partir de minerales oxidados y sulfurados.

Actualmente, se utilizan lixiviantes ácidos como el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico los mismos que son reactivos fiscalizados y no son fáciles de adquirir en el mercado nacional, y por el otro lado dichos lixiviantes ácidos disuelven metales como hierro, magnesio, calcio, aluminio, etc. Dificultan en los posteriores procesos de concentración y purificación de cobre. Además, tienen la desventaja de disolver metales que son altamente tóxicos como cadmio y arsénico.

Frente al problema ambiental que se genera en medio ácido, se realizó la lixiviación de mineral de cobre con un aminoácido llamado glicina. La glicina es una sustancia no tóxica y amigable al medio ambiente

Planteamiento del problema general

Para el presente trabajo de investigación se formula como problema general lo siguiente:

¿Cuál será el porcentaje de recuperación de cobre en la lixiviación con reactivo orgánico glicina a partir de minerales oxidados de cobre en medio alcalino?

Planteamiento del problema específico

En el problema específico se plantea los siguientes interrogantes:

¿Cuál será la concentración de glicina adecuada en la extracción de cobre a partir de minerales oxidados de cobre?

¿Cuál será el pH óptimo en la lixiviación de cobre con reactivo glicina?

¿Cuál será el tiempo de lixiviación adecuado en la lixiviación de cobre con reactivo glicina?

¿Cuál será el modelo matemático a obtener del diseño Box-Behnken aplicado al proceso de lixiviación de cobre en función de las variables?

1.2 HIPÓTESIS

1.2.1 HIPÓTESIS GENERAL

El cobre se recupera en la lixiviación de minerales oxidados de cobre con reactivo orgánico glicina en medio alcalino

1.2.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICO

- La disolución del mineral de cobre depende de la concentración de glicina en la solución lixivante
- La solución lixivante glicina en pH alcalino disuelve minerales de cobre oxidado.
- A mayor tiempo de lixiviación mayor disolución de cobre
- El diseño Box-Behnken aplicado al proceso de lixiviación permite obtener modelo matemático en función de las variables.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el porcentaje de recuperación de cobre en la lixiviación de minerales oxidados de cobre con reactivo orgánico glicina en medio alcalino.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la concentración de lixivante glicina en la disolución de mineral de cobre
- Determinar el pH óptimo de lixiviación de cobre con lixivante glicina.
- Encontrar el tiempo óptimo de lixiviación
- Determinar el modelo matemático a partir del diseño Box-Behnken en función de las variables de trabajo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

B.C. Tanda et al (2018), la calcocita natural (Cu_2S) se lixivió con soluciones de glicina alcalina oxigenada. Se evaluaron la influencia de la concentración de glicina, la velocidad de agitación, el tamaño de partícula, la concentración de oxígeno disuelto y la temperatura en la velocidad de disolución del cobre. En todas las condiciones, la tasa de lixiviación de cobre fue muy rápida en las primeras 6 h de lixiviación, después de lo cual se registraron tasas significativamente más lentas. La influencia de la molienda fina P100-20 μm fue notable con hasta 78% de Cu extraído durante 6 h de lixiviación en comparación con solo 40% para fracción de 38-53 μm en las mismas condiciones.

E.A.Oraby y J.J.Eksteen (2014), se estudió un proceso de lixiviación selectiva como alternativa para minerales de cobre a partir del concentrado gravimétrico de cobre y oro (3,75% de Cu, 11,6% de Fe, 11,4% de S y 0,213% de Au) usando soluciones de glicina alcalina. El lixivante que contiene glicina y peróxido ha permitido una disolución total de cobre del 98% en 48 h en condiciones ambientales y a un pH de 10.5-11.

J.J. Eksteen et al (2017), la lixiviación del concentrado de flotación de calcopirita en soluciones de glicina se realizó a diferentes condiciones en un reactor de lixiviación de 1,25 L con una suspensión agitada y concentración controlada de oxígeno disuelto (OD). En presencia de aire, oxígeno o peróxido de hidrógeno o una mezcla de los mismos, la glicina puede disolver el cobre de la calcopirita a temperatura ambiente o elevada (40-60°C) y presión atmosférica. La extracción de cobre del concentrado de flotación de calcopirita “tal como se recibió”, a un tamaño de partícula de 100% -45 μm , en soluciones que contienen 0,4 M de glicina a 60°C con 25 ppm de OD, fue del 40,1% después de 24 h. El concentrado de calcopirita se sometió a una molienda ultrafina y con preoxidación alcalina el 92% del cobre se lixivía dentro de las 17 horas a 60°C.

P.J. Tauetsile et al (2018), ha demostrado que las soluciones alcalinas de glicina /glicinato tienen un potencial significativo en la lixiviación de oro y cobre de minerales, concentrados y desechos que contienen estos metales. Se intentó comprender el comportamiento de adsorción del complejo de glicinato de oro sobre carbón activado en presencia de cobre para un sistema de glicina/glicinato alcalino puro, después de que el

oro se ha disuelto usando peróxido de hidrógeno como oxidante y soda cáustica como modificador de pH.

Aphichart et al (2014), la extracción de cobre utilizando medios de haluro es más rápida que en los medios de sulfato, y los iones cuprosos resultantes requieren menos energía para la electrólisis que los iones cúpricos de los medios de sulfato. La calidad del depósito está fuertemente influenciada por la rugosidad del depósito, que se controla mediante el transporte masivo. Por lo tanto, la lixiviación con haluro acoplado de calcopirita y la posterior electrodeposición con transporte masivo controlado brindan una oportunidad para una producción de cobre más sostenible. Este documento presenta nuevos conocimientos sobre la extracción de cobre y los métodos de recuperación del mineral de calcopirita en medios acuosos de cloruro mediante lixiviación y electro extracción.

Alfaro y Ordoñez(2013), realizó la extracción de cobre y zinc a nivel de laboratorio y de planta piloto, en un proceso de lixiviación en medio básico, empleando hipoclorito como agente oxidante y amoníaco como agente complejante de los cationes metálicos. En el caso del cobre, su extracción y recuperación a partir de minerales complejos tales como óxidos con altos contenidos de carbonatos y con la presencia de cobre nativo, oro y plata, la lixiviación básica efectuada en condiciones normales, ha demostrado ser una opción técnico-económico viable.

Hedjazi y Monhemius (2018), presenta una descripción de la planta de lixiviación de agitación utilizada para tratar minerales de oro y cobre en la mina Gedabek de Anglo Asian Mining en Azerbaiyán. El trabajo previo sobre el uso de amoníaco en los sistemas de lixiviación de cianuro de cobre y oro. En la planta de lixiviación se encontró que la extracción de cobre se redujo a la mitad mediante el uso de amoníaco, lo que condujo a reducciones significativas en la cantidad de cianuro consumido en el sistema de lixiviación a gran escala.

Shenghua Yin et al (2018), en el presente estudio para recuperar metales valiosos y reducir la contaminación, se exploró un método de extracción de metales más limpio a partir de relaves de sulfuro de cobre usando un método de lixiviación combinado empleando solución de amoníaco y una nueva cepa de bacterias en condiciones alcalinas. Una lixiviación comparativa con bacterias alcalinas, amoníaco o una combinación de ambos indicó claramente que la recuperación de cobre fue

notablemente mejor con la combinación de que la tasa de extracción de Cu aumentó de 4.42% (48 días, lixiviación de amoníaco) o aproximadamente 20% (30 días, lixiviación bacteriana alcalina) al 29.57% (30 días, lixiviación combinada). Se confirmó un efecto sinérgico entre las bacterias alcalinas y la solución de amoníaco, especialmente a una concentración más baja de amoníaco (30 g/L a 60 g/L). Además, una concentración alta de amoníaco (> 60 g/L) inhibió la actividad bacteriana e incluso mató a las bacterias.

Aleksandar et al (2018), el objetivo de la investigación es desarrollar un proceso de tratamiento que implica el uso de bacterias para oxidar los sulfuros minerales y producir ácido sulfúrico. Este artículo examina el efecto de las condiciones, específicamente temperatura, pH, Eh y densidad de sólidos. Se determinó que la temperatura tuvo el efecto más significativo en la extracción de cobre y hierro mientras que el pH, Eh o la densidad de sólidos no tuvieron un efecto apreciable en la extracción de cobre o hierro en las condiciones de reciclado de lixiviación probadas.

Pankaj et al (2018), en el presente estudio, se ha descrito el desarrollo de una nueva ruta de oxidación para convertir la calcopirita en tenorita para lixiviar el cobre. Inicialmente, la calcopirita se convirtió en óxido de tenorita / cobre (CuO) en una región alcalina utilizando cloro electrogenerado como oxidante. Se investigaron diversos parámetros del proceso tales como velocidad de burbujeo de cloro, temperatura y tiempo de reacción. Se encontró que el 93.8% de calcopirita se convirtió a tenorita a 60 ° C en 300 min cuando la tasa de burbujeo de cloro fue de 0.69 mmol/min, mientras que se mantuvo la densidad de pulpa de 10g /L y el pH de la solución entre 11-12.7 usando solución de hidróxido de sodio. La muestra oxidada que contenía la fase de tenorita se lixivió en una solución diluida de ácido sulfúrico a 30°C y una densidad de pulpa de 10 g/L durante 60 min. Se observó que el pH de la solución juega un papel crucial para mejorar la recuperación selectiva de cobre. Casi el 88% del cobre junto con el 43.1% de hierro se lixiviaron cuando el pH de la solución de lixiviación varió entre 0.9-1.2. Sin embargo, se observó una disolución insignificante de hierro con casi el mismo porcentaje de lixiviación de cobre (88.2%) con la solución que tenía pH 2.7-3.2. Se logró una eficiencia mejorada de lixiviación de cobre de hasta 99.3% en el mismo rango de pH (2.7-3.2) a 60°C en 30 min.

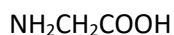
2.2 LA GLICINA

La glicina es uno de los aminoácidos que forman las proteínas. Es el aminoácido más

pequeño y el único no esencial de los 20 aminoácidos que encontramos dentro de las células.

La glicina fue aislada por primera vez a partir de la gelatina en el año 1820 por el director del jardín botánico en Nancy, Henri Braconnot, y desempeña múltiples funciones en el organismo humano (*Solomons, 2000*).

La fórmula de la glicina es:



Como se puede apreciar que la estructura molecular de la glicina, está compuesta por un átomo de carbono central, al que va unido un radical carboxilo (COOH) y uno amino (NH₂). Los otros dos radicales son de hidrógeno. Se trata por tanto del único aminoácido con dos radicales iguales; no tiene isomería óptica.

Otras de sus propiedades son:

- Punto isoelectrico : 5,97
- Punto de fusión: 235,85 °C
- Peso molecular: 75,07 g/mol
- Densidad: 1,6 g/cm³
- Fórmula global: C₂H₅NO₂

La glicina es el aminoácido proteico más simple de todos, motivo por el cual no es - considerado como uno de los aminoácidos esenciales del organismo humano.

De hecho, la diferencia principal entre la glicina y los otros aminoácidos catalogados como esenciales, es que el cuerpo de las personas es capaz de sintetizarla.

De este modo, no es imprescindible incorporar este aminoácido en la dieta diaria, ya que el propio cuerpo puede producir glicina sin necesidad de ingerirlo.

Para sintetizar glicina, existen dos vías diferentes, la fosforilada y la no fosforilada, y el precursor más importante es la serina.

De este modo, mediante una enzima conocida como hidroximetil transferasa, el cuerpo es capaz de transformar la serina en glicina.

2.3 MINERALES DE COBRE

Estado natural del cobre

El cobre es un elemento metálico que proviene de las profundidades de la tierra de hace millones de años, impulsado por los procesos geológicos que esculpieron nuestro planeta. Al llegar cerca de la superficie dio origen a diversos tipos de yacimientos. El cobre se presenta en la naturaleza bajo las formas de: mineral oxidado y sulfurado.

Mineral oxidado

Los minerales oxidados del cobre siempre se encuentran en depósitos superficiales, producto de la oxidación natural en el tiempo, de minerales sulfurados situados debajo de la superficie. Dentro de los minerales oxidados tenemos. La malaquita, azurita, crisocola, cuprita, tenorita entre otras son considerados minerales oxidados de cobre (*Surco, 2012*).

Mineral sulfurado

La calcopirita (CuFeS_2), es la principal especie mineralógica de cobre y se encuentra muchas veces asociada a la piritita (FeS_2), metales preciosos como el oro y plata principalmente. Los minerales sulfurados son ocurrencias primarias de cobre obtenido por minado subterráneo, entre las que tenemos: covelita, bornita, calcosina, entre otras. A continuación mostramos en la tabla N°1 las principales especies mineralógicas de cobre, tanto sulfuradas como oxidadas (*Surco, 2012*).

Tabla 1: Especies mineralógicas de cobre

MINERALIZACIÓN	ESPECIE MINERALÓGICA	FÓRMULA QUÍMICA MÁS FRECUENTE	Cu%
ÓXIDOS DE COBRE	Cuprita	CuO_2	88,8
	Tenorita	CuO	79,9
	Atacamita	$Cu_2(OH)_3Cl$	59,5
	Malaquita	$Cu_2CO_3(OH)_2$	57,5
	Brochantita	$Cu_4SO_4(OH)_6$	56,2
	Azurita	$Cu_3(CO_3)_2OH_2$	55,3
	Antlerita	$Cu_3SO_4(OH)_4$	53,7
	Delafosita	$FeCuO_2$	42,0
	Dioptasa	$CuSiO_2(OH)_2$	40,3
	Crisocola	$CuSiO_3.H_2O$	36,2
	Chalcantita	$CuSO_4.5H_2O$	25,5
	Neotocita	$(Cu_i-Fe_j-Mn_k)SiO_3$	Variable
	Limonita (Pitch)	$(Fe_i-Cu_j)O_2$	Variable
	Copper Wad	$CuMnO_2Fe$	Variable
	Copper pitch	$CuMn_8FeSiO_2$	Variable
COBRE SECUNDARIO	Calcosina	Cu_2S	79,9
	Digenita	Cu_9S_5	78,1
	Covelina	CuS	66,5
	Djurleita	$Cu_{1,95-x}S$	Variable
COBRE PRIMARIO	Bornita	Cu_5FeS_4	63,3
	Tenantita	$Cu_{12}As_4S_{13}$	51,6
	Enargita	Cu_3AsS_4	48,4
	Tetrahedrita	$Cu_{12}Sb_4S_{13}$	45,8
	Calcopirita	$CuFeS_2$	34,6

Fuente: Surco, M. (2012).

2.4 CONCEPTO DE LIXIVIACIÓN

Se denomina lixiviación al proceso de separación del metal por ataque o disolución del mismo a partir de la mena tratada físicamente. Este proceso hidrometalúrgico consiste, en la disolución de mineral en forma iónica de metales valiosos (Cu, Zn, Au, etc.) de los minerales primarios y/o secundarios por reacciones de disolución efectuadas a condiciones de temperatura ambiente por intermedio soluciones acuosas.

Iones: Materia con carga eléctrica que se obtiene al disolver un compuesto químico. Pueden ser de dos clases, con carga positiva o cationes Cu^{2+} , H^+ , Na^+ , etc. Y con carga negativa o aniones SO_4^{4-} , NO_3^{-} , CO_3^{2-} , etc.

El proceso de lixiviación es una etapa fundamental en un proceso hidrometalúrgico, que involucra la disolución del metal a recuperar desde una materia prima sólida, en una solución acuosa mediante la acción de agentes químicos. Esta transferencia del metal hacia la fase acuosa, permite la separación del metal contenido en la fase sólida de sus acompañantes no solubles. En la hidrometalurgia del cobre, dada la variedad de sustancias sólidas que contienen cobre, factibles de beneficiar por lixiviación, complican la extensión de los fundamentos del sistema lixivante (*Hernández, 2007*).

2.5 LIXIVIACIÓN DEL COBRE

La lixiviación ácida es el proceso más utilizado para la recuperación de cobre desde minerales oxidados. La rentabilidad de esta operación va a estar determinada por el consumo de ácido sulfúrico y el grado de extracción de cobre. Se sabe que un aumento en la concentración de ácido en las soluciones lixiviantes impulsa una mayor recuperación de cobre, pero también se produce un elevado consumo de ácido por especies reactivas de la ganga, lo que repercute negativamente en la economía del proceso.

Las fuentes de mayor importancia para la extracción del cobre las constituyen las menas oxidadas y sulfuradas. Aunque el tratamiento convencional de menas sulfuradas es comúnmente realizada por flotación-pirometalúrgica, como es sabido, la vía hidrometalúrgica permite recuperar cobre contenido en las menas mixtas o sulfuradas de baja ley acumuladas en los botaderos o echaderos de los ripios en explotación minera o en el mismo yacimiento (*in situ*) (*Cáceres, 2012*).

2.5.1 AGENTES DISOLVENTES

La selección del agente químico extractante depende de su disponibilidad, costo, estabilidad química, selectividad, facilidad de producir y regenerar y que permita la recuperación del cobre de la solución acuosa en forma económica. Los agentes lixiviantes inorgánicos utilizados son: el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y ácido nítrico.

El ácido sulfúrico es el agente lixiviante más ampliamente usado en la lixiviación del cobre, por las razones de cualidad química, costo de fabricación y disponibilidad. El oxígeno atmosférico y el ion férrico producido por acción bioquímica sobre minerales, son los agentes oxidantes más económicos y empleados en los sistemas lixiviación para el cobre (*Cáceres, 2012*).

En la práctica se utilizan solo algunos agentes lixiviantes; entre ellos se deben mencionar (*Sancho et al., 2000*):

- a) Ácido sulfúrico diluido, utilizable para menas oxidadas de cobre tales como óxidos, carbonatos, sulfatos básicos y silicatos.
- b) Disoluciones de sales de hierro (III), preparadas y formadas in situ en la propia lixiviación en presencia de oxígeno, como el sulfato de hierro (III). Estas disoluciones, como los cloruros, son oxidantes y atacan bien a los sulfuros minerales de cobre. En la lixiviación a presión de menas sulfuradas, el oxígeno sirve para oxidar dicho sulfuro a sulfato o a azufre elemental.
- c) Disoluciones clorhídricas con un oxidante, o cloraciones que atacan con facilidad los sulfuros de cobre basando el cloruro de cobre a disolución.
- d) Disoluciones amoniacales de sales de amonio, como el carbonato de amonio, para menas oxidadas, así como para cobre nativo si las gangas son carbonatos.
- e) Un proceso muy interesante es el de lixiviación bacteriana utilizada para menas de cobre de baja ley y desechos industriales. Ciertas bacterias aceleran la oxidación de los sulfuros de cobre y hierro.

2.5.2 MÉTODOS DE LIXIVIACIÓN

En la industria se practican varios métodos para disolver el mineral con la solución acuosa lixiviante en un espacio confinado. La selección del método de lixiviación depende de:

- Características físicas y químicas de la mena.

- Caracterización mineralógica.
- Ley de la mena.
- Solubilidad del metal útil en la fase acuosa.
- La cinética de la disolución.
- Magnitud de tratamiento.
- Facilidad de operación.
- Reservas de mineral.
- Capacidad de procesamiento.
- Costo de operación y capital.
- Rentabilidad.

Existen varios procedimientos de lixiviación y a continuación se resumen los realizados para el cobre (*Sancho et al., 2000*):

- a) Lixiviación in situ o en lugar.
- b) Lixiviación en echaderos o botaderos.
- c) Lixiviación en pilas o montones.
- d) Lixiviación en bateas o tinajas.
- e) Lixiviación en reactores agitados.
- f) Lixiviación en autoclaves o reactores a presión.

La lixiviación in situ puede ser aplicada a la masa mineral atravesada por antiguas exploraciones mineral hoy ya abandonadas. Algunos sondeos antiguos, otros complementarios y muestras de mano pueden proporcionar el conocimiento de un volumen con una ley media susceptible de explotación. Mediante programas de ordenador se puede optimizar voladuras que permitan obtener licores de lixiviación a partir de la masa mineralizada. Si los estudios hidrológicos y estratigráficos así lo indican, se podrían diseñar posos de recolección de licor de lixiviación. Un bombeo con poco costo pueden llevar el licor rico a la planta de extracción. Las labores dentro de una gran masa mineralizada pueden suministrar solución cuprífera durante varios años.

También la lixiviación de escombreras de mina en in situ en dichos depósitos artificiales se encuentran apiladas millones de toneladas de la actividad minera ya abandonada. Algunos sondeos en dicha escombrera, estratégicamente realizados, pondrán de manifiesto su ley media con una inversión relativamente baja en tubería plástica, aspersores y bombas, así como algunas canalizaciones y la construcción de balsas de

recolección de los licores ricos, se puede conseguir una extracción de cobre contenido en esas enormes masas que tardarán meses o incluso años en ser agotadas. (*Sancho, et al 2000*).

Cuando se decide una actividad minera a cielo abierto para lixiviar menas pobres, se puede pensar en lo que se denomina lixiviación en montones. Una preparación del suelo, una apisonada del suelo, posteriormente impermeabilizado, y en algunos casos utilizando un recubrimiento con plásticos termo soldados, puede permitir preparar múltiples montones para lixiviar en estadios progresivos, hasta su agotamiento. La extracción minera deberá disponer, así mismo, de una planta de tratamiento de mineral para reducirlo al tamaño adecuado, y de grandes máquinas movilizadoras del producto que permitan el acarreo y construcción de los montones, así como la evaluación del residuo una vez agotada la mena. Dentro del diseño del gran patio de lixiviación, se han de proveer canalizaciones para conducir el licor rico en una piscina recolectora. Igualmente, habrá que disponer de conducciones plásticas transportables y aspersores que se irán moviendo de unos montones a otros. La lixiviación por percolación, construidos normalmente de hormigón y recubiertos de un impermeabilizante, se puede realizar para algunas mineralizaciones más ricas que, preparadas convenientemente por extracción, trituración y molienda, se sitúan en dichos montones para ser sometidas a lixiviación. Estos sistemas tratan centenares de toneladas y en general su lixiviación y agotamiento son más rápidos. (*Sancho et al., 2000*).

Procesos tecnológicos para tratamiento de minerales sulfurados de cobre

Después de la extracción de la mina, el mineral de cobre es llevado a la planta de beneficio, donde es chancado, clasificado y molido. Dependiendo de las características mineralógicas y el contenido de cobre, se determina qué tipo de proceso se debe aplicar. Si se trata de un mineral sulfurado de alto contenido de cobre, sigue el proceso de flotación donde se logra concentrar la calcopirita principalmente y otros metales de valor económico considerable, tales como el oro (Au) y plata (Ag). De esta manera obtenemos un concentrado de cobre, siendo este un producto semirrefinado y comercializado internacionalmente para su procesamiento en las unidades de refinación. Si se trata de un mineral oxidado de cobre, sigue el proceso hidrometalúrgico para su tratamiento. Por esta vía (lixiviación y electrodeposición) obtenemos directamente cobre fino de alta pureza, llegando a tener 99,999% de cobre (*Surco, 2012*).

Proceso piro metalúrgico

El concentrado de cobre proveniente de proceso de flotación, se recibe en la fundición, cuya primera etapa industrial es el horno de fusión, donde se recupera el cobre, eliminando el hierro y el azufre mediante oxidación en estado fundido a una temperatura entre 1200 y 1300°C. En el horno el azufre se convierte en gas SO₂, mientras que el cobre y el hierro, conjuntamente con sílice procedente de la arena que se introduce en el horno, permaneces en estado líquido.

En esta fase líquida del cobre, por su mayor densidad, se deposita en la parte inferior y se extrae del horno formado parte de un producto que se denomina mata de cobre, con un contenido de 30% a 55% de cobre, mientras que la mezcla de hierro y sílice en forma de silicato permanece en la parte superior del horno y se extrae en forma de escoria aparatos electromagnéticos y sistemas de comunicaciones.

Es también el mejor conductor de calor lo que explica su uso en situaciones en las que se desee calentar o enfriar rápidamente como refrigerantes, intercambiadores de calor, pailas, utensilios de cocina, etc. (*Surco, 2012*).

2.6 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA LIXIVIACION DE MINERALES DE COBRE

La lixiviación de cobre depende de diversos factores que también son comunes en otros metales.

2.6.1 NATURALEZA DEL MINERAL

La lixiviación depende de las propiedades físicas y químicas del mineral. La naturaleza de la ganga, también influye decisivamente. Si es muy calcárea (mayor de 10%), el consumo de ácido se hace antieconómico, o si es muy silicosa es muy rebelde al ataque del disolvente

2.6.2 TAMAÑO DE PARTÍCULA

El objeto de triturar el mineral antes de la lixiviación, es desde luego facilitar el contacto del disolvente con el mineral, así como la separación posterior del solvente en un tiempo razonable.

La granulometría del mineral está en función de:

- El tipo de mineralización.
- Porosidad del mineral.

- Forma de distribución del mineral.
- Porcentaje de finos producidos en el chancado.

Los minerales densos se lixivian más lentamente que los porosos. Y los minerales de grano fino por lo general se lixivian mejor que aquellos que tienen grano grueso. Si el mineral es muy poroso no necesita ser de grano fino. (Cortez, 2012).

2.6.3 CONCENTRACIÓN DEL DISOLVENTE

Es otro factor importante que va a incidir en el costo del proceso. Por lo tanto, es vital encontrar el consumo óptimo del ácido para cada etapa del proceso. Para elegir tanto la concentración de la solución como el disolvente que se va a utilizar, es cuestión de buscar el equilibrio de algunos factores. (Cortez, 2012).

2.6.4 TIEMPO DE CONTACTO

El tiempo de contacto es un valor muy importante, especialmente cuando se lixivian sulfuros cuya solubilidad es lenta. Generalmente el “tiempo de contacto” se refiere tan solo al tiempo durante el cual el mineral está en contacto con el líquido lixiviante recién preparado. Cada etapa lleva un control de tiempo dependiente de las variables que coexisten en el proceso y orientado a lograr la máxima recuperación en el menor tiempo posible. (Cortez, 2012).

2.6.5 TEMPERATURA DEL DISOLVENTE

La temperatura es importante, puesto que la solubilidad de los sulfuros de cobre aumenta considerablemente cuando se aumenta la temperatura del disolvente agregado. La temperatura influye en la mayoría de los casos en la cinética de lixiviación, mayor temperatura mayor disolución del mineral. (Cortez, 2012).

2.6.6 pH

Los procesos de lixiviación se realizan a pH ácidos y alcalinos dependiendo de la composición de la ganga y método de lixiviación. En soluciones acuosas, la escala de pH varía de 0 a 14. Son ácidas las disoluciones con pH menores que 7 y alcalinas de pH superiores a 7. La acidez de la solución es muy importante para los posteriores procesos de recuperación del cobre, el pH de la solución debe estar entre los 1,8 y 2. En proceso alcalino el pH está en el rango de 10 y 11. (Cortez, 2012).

2.6.7 VELOCIDAD DE AGITACIÓN

La velocidad de agitación es un parámetro importante en la extracción de cobre por el método de lixiviación por agitación. La velocidad debe ser lo suficientemente alta para mantener los sólidos por suspensión en la pulpa. Una velocidad muy alta no es adecuada porque no permite el contacto suficiente entre el mineral y el lixivante. La velocidad de agitación recomendada es de 250 a 400 rpm. (Cortez, 2012).

2.6.8 CINÉTICA DE LA LIXIVIACIÓN

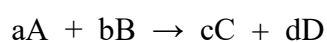
La velocidad con que se llega al estado de equilibrio de una fase, involucrada en un proceso de un determinado elemento se denomina cinética.

En cinética se acostumbra a distinguir a dos tipos de reacciones; homogéneas y heterogéneas. El primer término se refiere a reacciones que ocurren dentro de una sola fase, es decir, entre las moléculas de un gas o en una solución.

Una reacción se denomina heterogénea si hay más de una fase involucrada. Por ejemplo, la corrosión de un metal, disolución de un mineral o precipitación de un mineral con hidrogeno puede incluir difusión en una solución.

En un sistema cinético complejo el progreso de la reacción puede seguirse ya sea midiendo la velocidad de desaparición de reactivos o la velocidad de aparición de productos. La cantidad de cada uno dependerá de la estequiometria global de la reacción. Esto se puede expresar mejor en términos de la velocidad racional (r_r) que es la velocidad de aparición o desaparición de un componente dado dividido por su coeficiente estequiométrico. (Cáceres, 2012).

Reacción general:



$$r_r = \frac{dn_A}{a} = \frac{dn_B}{b} = -\frac{dn_C}{c} = -\frac{dn_D}{d}$$

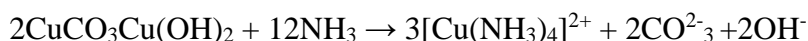
En general, para reacciones heterogéneas la etapa controlante de la velocidad puede ser una sola o una combinación de las siguientes etapas:

- Difusión de reactivos desde el seno de la solución a la superficie del sólido.
- Reacción de los reactivos en o con la superficie sólida.
- Difusión de productos desde la superficie al seno de la solución.

- Si la reacción produce un sólido o deja un residuo sólido poroso hay dos etapas adicionales que son:
 - Difusión de reactivos a través de la capa de producto sólido.
 - Difusión de productos a través de la capa de producto sólido.

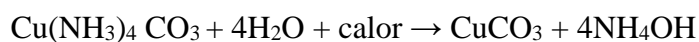
2.7 LIXIVIACIÓN DE MINERAL OXIDADO DE COBRE EN MEDIO AMONICAL

En presencia de una ganga calcárea incrementa el consumo de ácido, haciéndolo antieconómico, por lo tanto, se emplean otros reactivos como el amoníaco, en la forma de carbonato e hidróxido de amonio- Por ejemplo si el mineral tiene una ganga calcárea y mineralización de azurita, se tiene:



En presencia de amoníaco en la práctica se entiende que se proporcionará en la forma de hidróxido de amonio, NH_4OH . Posteriormente con la adición de NH_3 se forma aminas de cobre, complejos de fórmula $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$.

El anión que acompaña al cobre en la especie oxidada del mineral, en condiciones carbonáceas será como CO_3^{2-} . El carbonato resultante resulta muy inestable frente al calor y se descompone de acuerdo a las reacciones siguientes:



Del mismo modo ocurre con los demás reactivos y los productos intermedios de hidróxido de amonio ácido carbónico, los que así se recuperan, permitiendo que recircule el amoníaco al inicio del proceso.

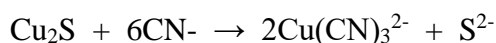
Posteriormente de filtrar y desechar la ganga, la solución es hervida de forma que las reacciones de la lixiviación son revertidas. El proceso amoníaco y dióxido de carbono son absorbidos desde la fase gaseosa, para iniciar un nuevo ciclo, y el carbonato básico de cobre se recupera por filtración, para ser seguidamente calcinado a CuO . (Roldan, 2015).

2.8 LIXIVIACIÓN DE SULFUROS DE COBRE CON CIANURO

El cianuro de sodio, ha sido también propuesto como agente disolvente-complejante, particularmente para los sulfuros de cobre. En general, todos los sulfuros de cobre son solubles, en mayor o menor grado, en soluciones alcalinas de cianuro, excepto la

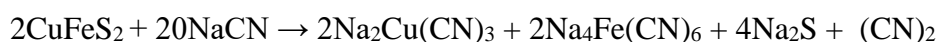
calcopirita que es casi totalmente insoluble. La mayor diferencia se establece en las respectivas cinéticas de disolución relativas.

Las soluciones de cianuro son capaces de disolver al sulfuro de cobre en ausencia de un agente oxidante, por ejemplo:



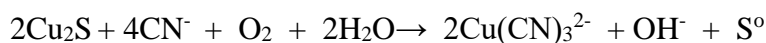
El azufre elemental no se forma en ausencia de un agente oxidante. En presencia del ion cianuro, el ion cuproso no será oxidado a cúprico debido a que el ion cianuro estabiliza el estado cuproso en la solución. La calcosita es disuelta en la solución de cianuro rápidamente, pero la calcopirita no es apreciablemente atacada, ni la pirita.

La reacción de la calcopirita en medio cianuro es:



En presencia de oxígeno el ion sulfuro puede ser oxidado a azufre elemental, el cual tiende a acumularse sobre la superficie del mineral. La velocidad de disolución puede ser disminuida.

La reacción de calcosita es:



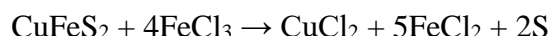
El excesivo consumo, el costo de regeneración y el peligro del cianuro hacen que este método sea poco aplicable industrialmente en la recuperación de cobre. (*Domic, 2001*).

2.9 LIXIVIACIÓN DE SULFUROS DE COBRE EN MEDIO CLORURO

La disolución de sulfuros utilizando cloruro férrico es un procedimiento utilizado desde hace tiempo y cuya base es el efecto oxidante de ion férrico que pasa a disolución el cobre de los sulfuros pero con una ventaja clara, que el azufre de dichos compuestos queda en forma de azufre elemental.

Hay muchos procesos de base cloruro que extraen el cobre con disolventes orgánicos (o-hidroxiariloxima) pero si se propone el paso de la disolución base cloruro de lixiviación a una disolución sulfato por medio de la reextracción se ocasiona contaminación sulfato- cloruro y no se consiguen disoluciones concentradas. La técnica se desarrolló un reactivo con selectividad para uso en medio cloruro y para obtener concentraciones elevadas. La carga y descarga de cobre dependen de la concentración

del ion cloruro a altas concentraciones se hace la extracción y abaja la reextracción. El cobre se había extraído en medio cuproso pero no en medio cúprico. Un procedimiento que se basa en este tipo de reacción es el denominado proceso cuprex desarrollado hasta el nivel industrial a pesar de no haberse construido hasta la fecha ninguna planta. La base de este proceso supone la lixiviación a 95°C con una solución de cloruro férrico, obteniéndose una disolución en la que el cobre está como ion cúprico y el azufre como azufre elemental:



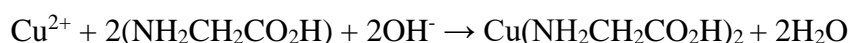
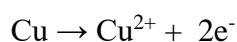
Otros sulfuros sufren procesos similares a los descritos en la reacción para la calcopirita. El azufre y los elementos no atacables forman un residuo del que se pueden recuperar metales preciosos. (*Sancho et al., 2000*).

2.10 LIXIVIACIÓN DE COBRE CON GLICINA

Los minerales oxidados de cobre son lixiviados con aminoácidos principalmente con la glicina el cual es un aminoácido simple que tiene átomos de hidrógeno cuya fórmula es $\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{COOH}$. En solución acuosa la glicina se presenta en dos formas dependiendo del pH. Por debajo de pH 2,35 es predominante el catión $^+\text{H}_3\text{NCH}_2\text{COOH}$ y por encima de pH 9,78 es predominante el anión $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COO}^-$ (*Rega et al., 1998*).

El uso de glicina en la forma de complejo estable con cobre es bien establecido tanto en la industria electrónica y farmacéutica.

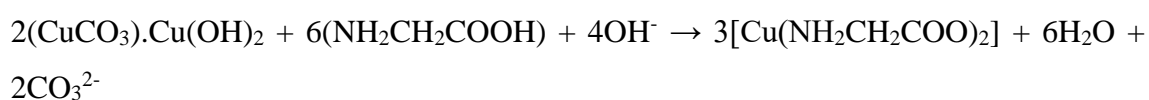
El propósito de mecanismo de lixiviación para la disolución de cobre incluye la oxidación de cobre a iones cúprico seguido por complejación de iones cúpricos con glicina en una solución alcalina como se da en la ecuación siguiente:



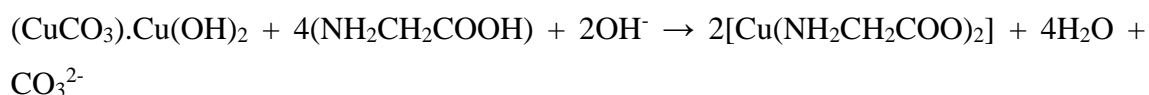
Por consiguiente, considerando la ventaja de la glicina que es selectivo para minerales de cobre que contiene ganga alcalina como carbonatos.

Las reacciones de minerales de azurita, malaquita, cuprita y crisocola con glicina ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) pueden ser presentadas por las ecuaciones siguientes (*Aksu and Doyle, 2001*).

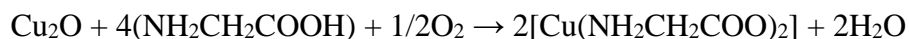
Azurita



Malaquita



Cuprita



Crisocola

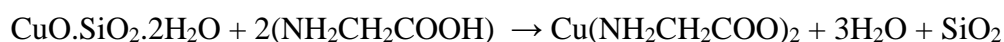


Tabla 2: Complejos de glicina cobre y sus constantes de estabilidad

Ion cobre	Complejo cobre-glicina	LogK
Cu^{2+}	$\text{Cu}((\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COOH})_2)$	15,6
Cu^+	$\text{Cu}(\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COOH})_2^-$	10,1
Cu^{2+}	$\text{Cu}(\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COOH})^+$	8,6

Fuente: Aksu and Doyle, 2001.

MARCO CONCEPTUAL

LIXIVIACIÓN

Se define como un proceso mediante el cual el mineral se disuelve en solución acuosa mediante un agente lixivante inorgánico u orgánico.

LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN

Es la disolución del mineral donde la pulpa es mantenida en suspensión por agitación mecánica.

MINERALES OXIDADOS DE COBRE

Son minerales que se encuentra en forma de óxidos como la malaquita, azurita, tenorita, cuprita y crisocola.

GLICINA

Es un aminoácido que tiene la fórmula $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COOH}$.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio es la mina Socsan que está ubicada a 7 Km al sur del Distrito de Pucará, de la Provincia de Lampa, Departamento de Puno, con las siguientes coordenadas geográficas:

Latitud: 15°05'06.2''S

Longitud: 70°21'54.3''W

Coordenadas: -15.085056, -70.365094

El yacimiento tiene formación de minerales sulfurados y oxidados, las muestras experimentales fueron tomadas de la zona oxidada. Los ensayos de lixiviación se realizaron en el Laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química.

3.2 MATERIAL EXPERIMENTAL

EQUIPOS Y MATERIALES

- Estufa eléctrica
- Balanza analítica
- Agitador magnético
- Agitador mecánico
- Equipo de tamiz
- pH metro
- Embudos 500 mL
- Papel filtro
- Fiolas de 100 mL
- Pipetas
- Vaso precipitado
- Cronómetro
- Termómetro
- Soporte universal
- Porta embudo

REACTIVOS E INSUMOS

- Minerales oxidados de cobre
- Glicina
- Cal
- Hidróxido de sodio
- Ácido perclórico
- Ácido Clorhídrico
- Carbonato de amonio
- Hidróxido de amonio
- Tiosulfato de sodio
- Fluoruro de sodio
- Almidón
- Agua destilada

3.3 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE MINERAL

Las muestras del mineral de cobre han sido tomadas de la zona oxidada del yacimiento de la Mina Pucará Puno. El socavón tiene una longitud aproximado de 40 metros zona oxidada a más profundidad es la zona de mineral sulfurado. De cada 4 metros lineales se ha tomado 1 Kg de muestra de mineral zona oxidada, el número de puntos de muestreo fue 10, es decir el número de muestras tomadas fueron 10, obteniéndose una muestra total de 10 Kg. Las muestras de mineral se recogieron en bolsas de plástico. Como herramienta de trabajo se utilizaron pico y pala.

El mineral fue triturado y molido utilizando una chancado de quijada y molino de bolas de la Facultad de Ingeniería Química cuyos equipos se encuentran instaladas en la planta piloto de Salcedo Puno.

La técnica de muestreo consiste en la excavación de un canal estrecho y continuo, bien a lo largo de la capa o vena. Las dimensiones de la acanaladura suelen ser del orden de 8-10 cm de anchura por 2-3 cm de profundidad, manteniéndose estas dimensiones lo más constantes posible. Se toma como muestra el total del material excavado en la acanaladura. Este se recoge en plástico extendido al pie del lugar de la toma. Si se juntan varias muestras de una ranura para constituir una única muestra, la cantidad de cada una debe ser proporcional a la veta o capa respectiva. La separación o distancia

entre acanaladuras depende de las irregularidades o variaciones dentro de la masa mineralizada, no siendo aconsejable, por pérdida de la representatividad de las muestras, separaciones que superen los 5 metros.

3.4 PREPARACIÓN FÍSICA Y ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Para la preparación física del mineral se ha utilizado una chancadora de quijada de laboratorio y molino de bolas, cuyas operaciones unitarias se ejecutaron en el laboratorio de control de calidad de la Escuela Profesional de Ingeniería Química UNA-Puno.

Análisis granulométrico del mineral de cobre

Peso de mineral : 60 g

Tiempo de sacudimiento : 15 minutos

Tabla 3: resultados de análisis granulométrico

Malla	Apertura (micrones)	Peso (g)	%Peso	%Ac(+)	%Ac(-)
60	250	0,5210	0,87	0,87	99,13
70	210	0,7420	1,24	2,11	97,89
80	180	5,2180	8,70	10,81	89,19
200	75	12,1168	20,19	31,0	69,0
-200	-	41,4022	69,00	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de análisis granulométrico.

En la tabla 3, nos muestra los resultados de análisis granulométrico del mineral de cobre. El tamaño de mineral utilizado para la lixiviación de cobre es de 69% malla - 200.

3.5 ANÁLISIS DE COBRE POR VOLUMETRÍA

Titulación de la solución:

- Adicionar acetato de sodio hasta llegar a una coloración marrón una cantidad de 20-25 ml.

- Agregar fluoruro de sodio hasta observar una coloración celeste 15-20 ml
- Adicionar yoduro de potasio 10 ml (la solución se torna a un color mostaza), luego agitar.
- Agregar 7 ml de almidón, este sirve como indicador (se observa un color negro-gris oscuro)
- Titular con tiosulfato de sodio hasta obtener un color blanco.
- Leer y anotar el volumen de gasto o volumen consumido de tiosulfato de sodio.
- Con este dato se puede hacer el cálculo de % de cobre.

Procedimiento:

- Pesar 0,25 gramos muestra de cobre
- Agregar 40 ml de ácido sulfúrico al 5%
- Luego se pone a calentar no debe hervir dejar enfriar un poco
- Seguidamente agregar 25 ml de hidróxido de amonio se pone a filtrar en un matraz se deja enfriar
- Luego se agrega 15 ml de bifluoruro de amonio al 10%
- Agregar 10 ml de ml de yoduro de potasio al 25%
- Seguidamente agregarle 10 ml de almidón al 0.5 %
- Finalmente, titular con tiosulfato de sodio.

$$\%cobre = \frac{\text{gasto de la titulación}}{\text{peso de la muestra}} \times \text{factor (\%)}$$

3.6 METODOLOGÍA POR OBJETIVOS

3.3.1. METODOLOGÍA PARA OBJETIVO 1

Preparación de 1000 mL de solución glicina 0,5 M

Peso molecular de glicina (PM) : 75,07 g/mol

$W = M \cdot PM \cdot V$

$W = 0,5 \text{ mol/L} \times 75,07 \text{ g/mol} \times 1 \text{ L}$

$W = 37,535 \text{ g de glicina}$

- Pesar en balanza analítica 37,535 g de glicina y transferir en vaso precipitado de 250 mL.

- Agregar agua destilada al vaso precipitado y disolver
- Transferir en matraz fiola de 1000 mL y aforar
- Colocar la solución de glicina en vaso precipitado de 1000 mL
- Medir el pH de la solución de glicina
- Ajustar la solución de glicina a pH 11 con lechada de cal
- La solución esta lista para el proceso de lixiviación

3.3.2. METODOLOGÍA PARA OBJETIVO 2

Preparación de 100 mL de solución de cal al 30%

- Pesar en balanza analítica 30 gramos de cal y disolver
- Transferir en fiola de 100 mL y aforar
- Ajustar la solución lixivante de glicina a pH 9 y 11 agregando gota a gota la solución de lechada de cal al 30%, se utilizó un pH metro para medir el pH de la solución.

3.3.3. METODOLOGÍA PARA OBJETIVO 3

- Se coloca en un vaso de 1000 mL la solución lixivante de glicina.
- Se ajusta la solución a pH 11 con lechada de cal.
- Se pesa 100 g de mineral molido 69% --malla 200 y se agrega sobre la solución preparada
- Se instala el equipo de agitación mecánica tomando el tiempo $t=0$, se inicia la lixiviación con agitación continua durante 6 y 24 horas.
- Terminado el tiempo de lixiviación se filtra la pulpa lavando los sólidos con agua destilada y luego se seca el sólido.
- Se analiza el cobre tanto en sólido y lixiviado por el método de titulación volumétrica.
- Se realiza los cálculos para determinación de cobre.

3.7 DISEÑO EXPERIMENTAL Y FACTORES SELECCIONADOS

El diseño BOX-BEHNKEN considera tres factores cada uno de ellos a dos niveles una interacción de tres factores además con tres réplicas en el punto central.

Elaborar una ecuación estadística – matemática que permita controlar la lixiviación de cobre con glicina en función de las variables más importantes. El porcentaje de extracción de cobre es la variable respuesta.

Se han tomado tres variables independientes que son:

Variables independientes

- a. Concentración de glicina
- b. pH
- c. Tiempo de lixiviación

Variable Dependiente

Porcentaje de extracción de cobre

3.8 DISEÑO EXPERIMENTAL BOX-BEHNKEN

Es un diseño esférico, con todos los puntos localizados en una esfera de radio $\sqrt{2}$. Asimismo no contiene ningún punto en las vértices de la región cúbica creada por los límites superior e inferior de cada variable. Cochran, W. G., Cox, G. M., (1997).

Tabla 4: Diseño Box-Behnken para tres variables

Corridas	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	1	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Fuente: Cochran, W. G., Cox, G. M., (1997), Diseños experimentales.

Tabla 5: valores máximos y mínimos

Factores	Unidad	Niveles	
		Mínimo (-)	Máximo (+)
A: Concentración de glicina	M	0,3	0,5
B: pH	Escala	9	11
C: Tiempo de lixiviación	Horas	6	24

Fuente: Elaboración propia en base a variables mínimos y máximos

Ecuación de regresión

El modelo de la ecuación es:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1X_2 + b_5X_1X_3 + b_6X_2X_3 + b_7X_1X_2X_3$$

Donde:

Y = Variable respuesta

X₁ = Concentración de glicina

X₂ = pH

X₃ = Tiempo de lixiviación

b₀, b₁, b₂, b₃, b₄, b₅, b₆ y b₇ coeficientes de correlación lineal de la ecuación

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN DE COBRE POR AGITACIÓN

Condiciones de operación

Peso de mineral	: 100 g
Ley de cobre	: 6,39 %
Granulometría de mineral	: 69% -malla 200
Velocidad de agitación	: 400 rpm

Tabla 6: Variables reales del Diseño Box-Behnken y resultados

N° de Corridas	X ₁ Concentración de glicina (M)	X ₂ pH	X ₃ Tiempo (Horas)	Concentración de Cu en lixiviado (mg/L)
1	0,3	9	15	4350
2	0,3	11	15	4729
3	0,5	9	15	4920
4	0,5	11	15	5048
5	0,3	10	6	3834
6	0,3	10	24	4492
7	0,5	10	6	4102
8	0,5	11	24	5249
9	0,4	9	6	3973
10	0,4	9	24	5112
11	0,4	11	6	4037
12	0,4	11	24	5185
13	0,4	10	15	4931
14	0,4	10	15	4854
15	0,4	10	15	4793

Fuente: Elaboración propia en base a matriz de diseño Box-Behnken

Tabla 7: Resultados de cantidad de cobre obtenidos en lixiviados

N° de corridas	Concentración de Cu en lixiviado (mg/L)	Concentración de Cu en lixiviado (g/L)	Gramos de cobre en lixiviado (g)
1	4350	4,350	4,350
2	4729	4,729	4,729
3	4920	4,920	4,920
4	5048	5,048	5,048
5	3834	3,834	3,834
6	4492	4,492	4,492
7	4102	4,102	4,102
8	5249	5,249	5,249
9	3973	3,973	3,973
10	5112	5,112	5,112
11	4037	4,037	4,037
12	5185	5,185	5,185
13	4931	4,931	4,931
14	4854	4,854	4,854
15	4793	4,793	4,793

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos de cantidad de cobre

CÁLCULO DE PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE COBRE

$$\% \text{ Extracción de Cu} = \frac{\text{Gramos de Cu en lixiviado}}{\text{Gramos de cobre en mineral}} \times 100$$

Gramos de cobre en mineral = 6,39 g de Cu

Tabla 8: Resultados de porcentaje de extracción de cobre

N° de Corridas	X ₁ Concentración (M)	X ₂ pH	X ₃ Tiempo (horas)	% Extracción Cu
1	0,3	9	15	68,08
2	0,3	11	15	74,01
3	0,5	9	15	77,00
4	0,5	11	15	79,00
5	0,3	10	6	60,00
6	0,3	10	24	70,30
7	0,5	10	6	64,19
8	0,5	11	24	82,14
9	0,4	9	6	62,18
10	0,4	9	24	80,00
11	0,4	11	6	63,18
12	0,4	11	24	81,14
13	0,4	10	15	77,17
14	0,4	10	15	75,96
15	0,4	10	15	75,01

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de extracción de cobre

4.2. RESULTADOS POR OBJETIVOS

4.2.1. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE GLICINA

Tabla 9: Efecto de la concentración de glicina

Concentración de glicina (M)	pH	Tiempo (horas)	% Extracción de Cu
0,3	11	15	74,01
0,4	11	24	81,14
0,5	11	24	82,14

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos

En la tabla 9, nos muestra los resultados para diferentes concentraciones de glicina, al aumentar la concentración de glicina, aumenta el porcentaje de extracción de cobre, el mayor porcentaje de extracción de cobre se obtiene para concentración de 0,5 M que es el valor óptimo.

4.2.2. EFECTO DE LA VARIABLE pH

Tabla 10: Efecto de pH

pH	Concentración de glicina (M)	Tiempo (horas)	% Extracción de Cu
9	0,4	24	80,00
10	0,4	15	77,17
11	0,5	24	82,14

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos

En la tabla 10, nos muestra los resultados para diferentes pH, el mayor porcentaje de extracción de cobre se obtiene para pH 11, que es el valor óptimo.

4.2.3. EFECTO DE TIEMPO DE LIXIVIACIÓN

Tabla 11: Efecto de tiempo

Tiempo (horas)	Concentración de glicina (M)	pH	% Extracción de Cu
6	0,5	10	64,19
15	0,5	11	79,00
24	0,5	11	82,14

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos

En la tabla 11, nos muestra los resultados para diferentes tiempos, cuando aumenta el tiempo de lixiviación el porcentaje de extracción aumenta, el mayor porcentaje de extracción de cobre se obtiene a 24 horas, que es el valor óptimo.

4.3. EFECTOS ESTIMADOS POR PROGRAMA STATGRAPHICS

Analizar Experimento - Extracción de cobre

Tabla 12: Efectos estimados para extracción de cobre (%)

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
Promedio	76,0467	0,972419	
A:Concentración	7,485	1,19097	1,0
B:pH	2,5175	1,19097	1,0
C:Tiempo	16,0075	1,19097	1,0
AA	-3,99167	1,75305	1,011
AB	-1,965	1,68428	1,0
AC	3,825	1,68428	1,0
BB	0,943	1,75305	1,011
BC	0,07	1,68428	1,0
CC	-9.78667	1.75305	1.011

Fuente: Efectos estimados por programa STATGRAPHICS Centurion.16.1

La tabla 12, muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianzas (V.I.F.) más grande, es igual a 1,011. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como

indicativos de confusión seria entre los efectos.

Para graficar los estimados en orden decreciente de importancia, seleccione Diagrama de Pareto de la lista de Opciones Gráficas. Para probar la significancia estadística de los efectos, seleccione Tabla ANOVA de la lista de opciones tabulares. Puede retirar efectos significativos pulsando el botón secundario del ratón, seleccionando Opciones de Análisis, y pulsando el botón de Excluir.

4.4. ANALISIS DE VARIANZA

Tabla 13: Análisis de varianza para extracción de cobre

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Concentración	112,05	1	112,05	39,50	0,0015
B:pH	12,6756	1	12,6756	4,47	0,0882
C:Tiempo	512,48	1	512,48	180,65	0,0000
AA	14,7078	1	14,7078	5,18	0,0718
AB	3,86123	1	3,86123	1,36	0,2960
AC	14,6306	1	14,6306	5,16	0,0723
BB	0,821426	1	0,821426	0,29	0,6136
BC	0,0049	1	0,0049	0,00	0,9685
CC	88,4112	1	88,4112	31,17	0,0025
Error total	14,184	5	2,8368		
Total (corr.)	771,507	14			

Fuente: Análisis de varianza calculada por programa STATGRAPHICS Centurion.16.1

R-cuadrada = 98,1615 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 94,8523 porciento

Error estándar del est. = 1,68428

Error absoluto medio = 0,844778

Estadístico Durbin-Watson = 2,23172 (P=0,5299)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,1698

La tabla ANOVA 13 particiona la variabilidad de extracción de cobre en partes separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P menor que 0,05 indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 98,1615% de la variabilidad en Extracción de cobre. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 94,8523%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 1,68428. El error medio absoluto (MAE) de 0,844778 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%. Las variables de concentración de glicina (A) y tiempo de lixiviación (C) son significativos estadísticamente y la variable pH (B) no es significativo debido a que se ha tomado valores muy cercanos de pH 10 y 11 en el diseño Box-Behnken, y no hay diferencia por lo que considera como valor constante.

4.5. COEFICIENTES DE REGRESION Y MODELO MATEMATICO

Tabla 14: Coeficiente de regresión para extracción de cobre

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
Constante	10,8237
A:Concentración	263,467
B:pH	-4,30292
C:Tiempo	1,81276
AA	-199,583
AB	-9,825
AC	2,125
BB	0,471667
BC	0,00388889
CC	-0,0604115

Fuente: Coeficientes estimados por programa STATGRAPHICS Centurión 16.1

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned} \text{Extracción de cobre} = & 10,8237 + 263,467 * \text{Concentración} - 4,30292 * \text{pH} + \\ & 1,81276 * \text{Tiempo} - 199,583 * \text{Concentración}^2 - 9,825 * \text{Concentración} * \text{pH} + \\ & 2,125 * \text{Concentración} * \text{Tiempo} + 0,471667 * \text{pH}^2 + 0,00388889 * \text{pH} * \text{Tiempo} - \\ & 0,0604115 * \text{Tiempo}^2. \end{aligned}$$

En donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione predicciones de la lista de opciones tabulares. Para graficar la función, seleccione gráficas de respuesta de la lista de opciones gráficas.

DISCUSIONES

En el presente trabajo de lixiviación de minerales oxidados de cobre con lixiviante glicina por el método de lixiviación por agitación alcanzó al 82,14% de extracción de cobre en un tiempo de 24 horas, mientras B.C. Tanda et al (2018), realizó la lixiviación de calcosita natural (Cu_2S) en soluciones de glicina alcalina oxigenada.. En todas las condiciones, la tasa de lixiviación de cobre fue muy rápida en las primeras 6 h de lixiviación, alcanzó al 78% de extracción de cobre. Las investigaciones realizadas por E.A.Oraby y J.J.Eksteen (2014), también aplicó la técnica de lixiviación para minerales de cobre a partir del concentrado gravimétrico de cobre y oro usando soluciones de glicina alcalina. El lixiviante que contiene glicina y peróxido ha permitido una disolución total de cobre del 98% en 48 h en condiciones ambientales y a un pH de 10,5-11.

La lixiviación de minerales de cobre con reactivo glicina a pH alcalino es selectivo y no disuelve otros metales tóxicos, por lo que resulta ser una tecnología limpia y no contaminante.

Se puede mejorar el mayor porcentaje de extracción de cobre con glicina a partir de minerales oxidados y sulfurados utilizando agentes oxidantes como peróxido de hidrógeno, oxígeno y ozono durante el proceso de lixiviación. Por lo que se recomienda para los posteriores trabajos de investigación de extracción de cobre con glicina utilizar agentes oxidantes.

V. CONCLUSIONES

- Se ha determinado que la concentración de glicina óptima en la lixiviación de cobre por agitación es 0,5 M. La solución lixivante de glicina disuelve minerales oxidados de cobre formando complejos de glicinato de cobre.
- La recuperación del cobre mediante la lixiviación por agitación con reactivo glicina fue de 82,14%.
- El pH óptimo es 11 para la lixiviación de cobre por agitación. Por lo que se concluye que mineral de cobre oxidado se disuelve en soluciones de glicina en medio alcalino.
- El tiempo de disolución de cobre por el método de lixiviación por agitación fue de 24 horas. A mayor tiempo de lixiviación mayor disolución de cobre.
- La ecuación del modelo matemático obtenido es:

$$\begin{aligned}
 \text{Extracción de cobre} = & 10,8237 + 263,467 * \text{Concentración} - 4,30292 * \text{pH} \\
 & + 1,81276 * \text{Tiempo} - 199,583 * \text{Concentración}^2 - \\
 & 9,825 * \text{Concentración} * \text{pH} + 2,125 * \text{Concentración} * \text{Tiempo} + \\
 & 0,471667 * \text{pH}^2 + 0,00388889 * \text{pH} * \text{Tiempo} - 0,0604115 * \text{Tiempo}^2
 \end{aligned}$$

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar la prueba de lixiviación de minerales de cobre con reactivo glicina a escala laboratorio por el método de lixiviación en columnas o pilas.
- Aplicar a escala piloto las pruebas de lixiviación de cobre.
- Realizar la lixiviación de cobre con reactivo glicina utilizando agentes oxidantes como peróxido de hidrógeno, oxígeno y ozono con la finalidad de incrementar el porcentaje de extracción de cobre.
- Realizar pruebas de lixiviación a temperaturas mayores a temperatura ambiental.
- Realizar la lixiviación de minerales sulfurados de cobre con reactivo glicina y oxidantes.
- Ensayar la lixiviación de minerales de cobre con otro tipo de aminoácido.
- Utilizar las normas de seguridad de laboratorio en manejo de reactivos.

VII. REFERENCIAS

Aphichart Rodchanarowan, Prashant K. Sarswat, Ravindra Bhide, Michael L. Free. (2014). Production of copper from minerals through controlled and sustainable electrochemistry. *Electrochimica Acta*, volume 140, pages 447-456.

Aksu, S., Doyle, F.M., (2001). Electrochemistry of copper in aqueous glycine solutions. *J. Electrochem. Soc.* 148 (1), B51-B57.

Aleksandar N. Nikoloski, Glen P. O'Malley (2018). The acidic ferric sulfate leaching of primary copper sulfides under recycle solution conditions observed in heap leaching. *Hydrometallurgy*, Volume 178, 2018, Pages 231-239.

Alfaro, D. E., Ordoñez, N. A., (2013). Alternativa de lixiviación de minerales complejos de cobre y minerales óxidos de zinc. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Astucuri T. V., (1984). Principios de Hidrometalurgia y Algunas Aplicaciones Fundamentales. Editorial Gol S.R. Ltda-Perú.

Burriel, M., F., Lucena, C., F., (1989). "Química Analítica Cualitativa", Decimoctava edición, Ed. Thomson, España.

B. C. Tanda, J. J. Eksteen, E. A. Oraby (2018). Kinetics chalcocite leaching in oxygenated alkaline glycine solutions, *Hydrometallurg* Volume 178, Pages 264-273.

B. C. Tanda, J. J. Eksteen, E. A. Oraby (2017). An Investigation into the leaching behaviour of copperoxide minerals in aqueous alkaline glycine solutions. *Hydrometallurgy*. Volume 167, pages 153-162.

Cáceres, G., (2012). Hidrometalurgia y Electrometalurgia. Curso de capacitación, Universidad de Atacama, Copiapó -Chile.

Cochran, W. G., Cox, G. M., (1997), Diseños experimentales, Trillas, 2da edición, México.

Cortez, C. F., (2012). Diseño y construcción de una planta de LIX-SX-TF-EW de mineral de cobre para la producción de 30 TN/mes de cátodo de cobre. Tesis para optar título de Ingeniero Metalurgista. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna-Perú.

Domic, M. (2001). Hidrometalurgia, Fundamentos, Procesos y Aplicaciones. Primera edición, Santa Elena Santiago-Chile.

E. A. Oraby, J. J. Eksteen. (2014). the selective leaching of copper from a gold copper concentrate in glycine solutions, *Hydrometallurgy*, Volume 150, Pages 14-19.

Hedjazi, F. A. Monhemius J. (2018). Industrial application of ammonia-assisted cyanide leaching for copper-gold ores *Mineral Engineering*, Volume 126, Pages 123-129.

Hernández, P. M. (2007). Control de hierro en circuito de extracción por solventes para la Sociedad contractual Minera el Abra, Santiago-Chile.

J. J. Ekstenn, E. A. Oraby, B. C. Tanda (2017). A conceptual process for copper extraction from chalcopyrite in alkaline glycinate solutions, *Minerals Engineering*, volume 108, pages 53-66.

Kamran, H., H., Moradkh, A., D., Sedaghat, M., B., Najafaba, D., R., Behnamf, A., A., (2013). Production of copper cathode from oxidized copper ores by acidic leaching and two-step precipitate on followed by electrowinning. *Hydromet allergy*, 133, 111-117.

Panda, B., C Das, S., (2001). Electrowinning of copper from sulfate electrolyte in presence of sulfurous acid. *Hidrometallurgy*, 59, 55-67.

P. J. Tauetsile, E. A. Oraby, J. J. Eksteen. (2018). Adsoption Behaviour of copper and gold glycinate in alkaline media onto activated carbon. *Hydrometallurgy*, volume 178, pages 202-208.

Pankaj Kumar Choubey, Jae-chun Lee, Min-seuk Kim, Hyung-Seok Kim (2018). Conversion of chalcopyrite to copper oxide in hypochlorite solution for selective leaching of copper in dilute sulfuric acid solution *Hydrometallurgy*, Volume 178, Pages 224-230.

Rega, N., Cossi, M., Barone, V., (1998). Structure and magnetic properties of glycine radical in aqueous solution at different pH values. *J. Am. Chem. Soc.* 120 (23), 5723-5732.

Roldan, F., & Urbina, J. (2015). Lixiviación amoniacal del mineral de cobre tipo crisocola utilizando nitrato de amonio. Universidad Nacional de Trujillo.

Surco, M. (2012). Optimización del proceso de aglomeración y lixiviación en una planta de lixiviación de cobre, Tesis para optar el título de Ingeniero

Químico. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química y Textil. Lima-Perú.

Sancho, J. Verdeja, L. F. Ballester. A., (2000). Metalurgia Extractiva, Volumen I y II Editorial Síntesis, S. A. Madrid.

Shenghua Yin, Leiming Wang, Rongfu Yan (2018). Copper recycle from sulfide tailings using combined leaching of ammonia solution and alkaline bacteria Journal of Cleaner Production, Volume 189, Pages 746-753.

Solomons, T., W., (2000). Química orgánica, segunda edición, editorial Limusa Wiley.México.

ANEXOS

ANEXO A : GRÁFICOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Diagrama de Pareto Estandarizada para Extracción de cobre

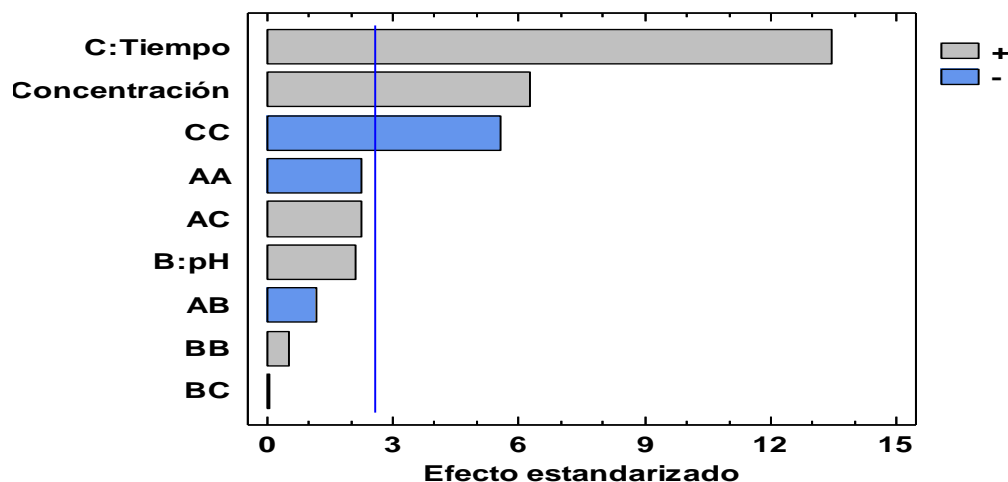


Figura A.1: Diagrama de Pareto estandarizado

En la figura A.1, nos muestra que el factor C (tiempo) es más significativo, seguido del factor A (concentración). El de menor significancia es el factor B (pH), resulta ser no significativo debido a que se ha tomado valores de pH 10 y 11 que son muy cercanos. La interacción CC es significativo y, las interacciones AA y AC tienen menor significancia en la extracción de cobre.

Gráfica de Efectos Principales para Extracción de cobre

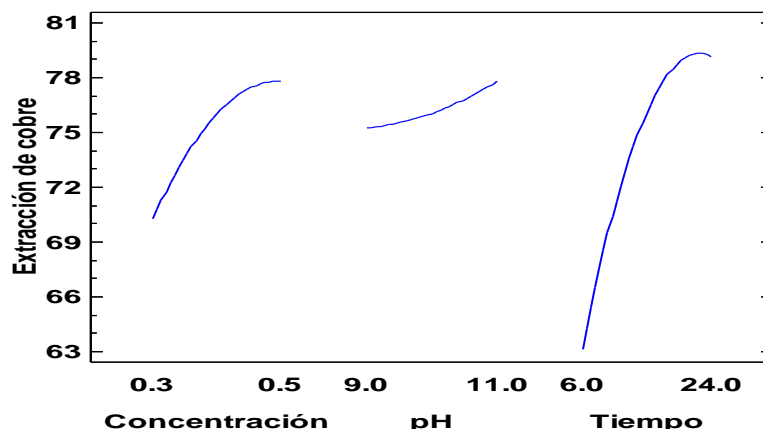


Figura A.2: Efectos principales

En la figura A.2, nos muestra los efectos principales para la extracción de cobre. La curva de concentración tiene pendiente positivo esto nos indica que cuando aumenta la concentración aumenta también la extracción de cobre, lo mismo ocurre con la variable pH. La curva del variable tiempo tiene pendiente más pronunciada lo que nos indica que es directamente proporcional a la extracción de cobre.

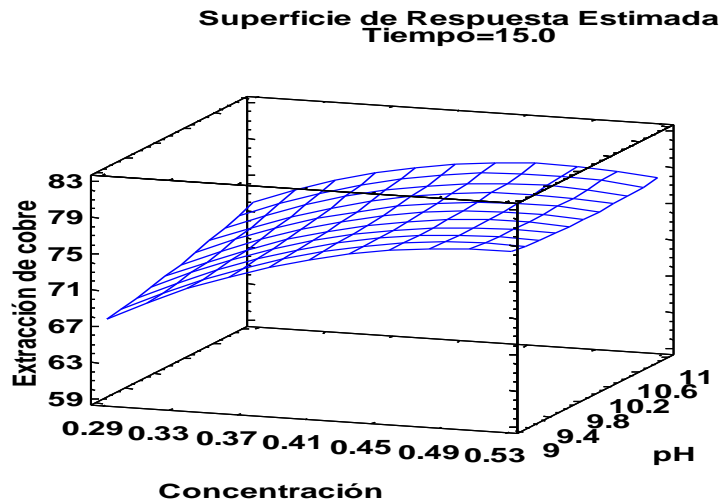


Figura A.3: Superficie de respuesta estimada

La figura A.3, nos muestra contornos de superficie de respuesta para la extracción de cobre. El porcentaje de extracción de cobre es aproximadamente de 83% en función de la concentración de glicina y pH. Manteniendo constante el tiempo de lixiviación de 15 horas..

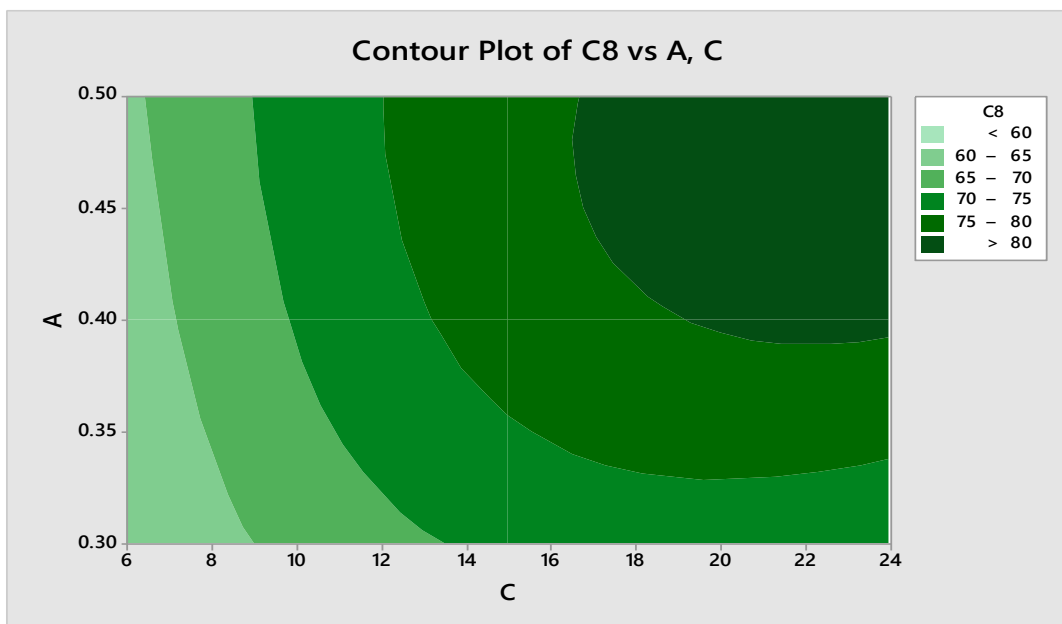


Figura A.4: superficies de contorno

La figura A.4, nos muestra los contornos de ploteo, donde C8 es el porcentaje de extracción de cobre y A (concentración de glicina) y C (tiempo de lixiviación). Según la gráfica el porcentaje de extracción es mayor a 80%.

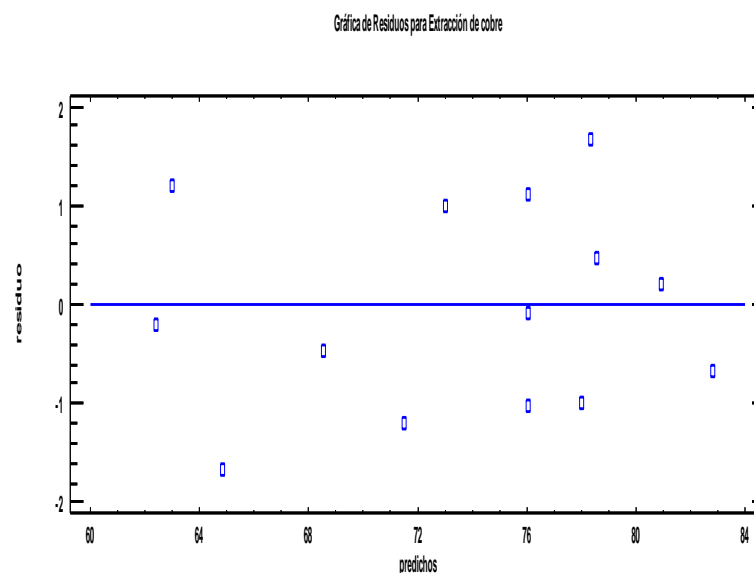


Figura A.5: Gráfica de residuos

La figura A.5, nos muestra los resultados de los residuos. Los puntos dispersos no presentan ningún tipo de linealidad ni curva, por lo tanto el modelo estadístico elegido es adecuado y pertinente.

RESPUESTA OPTIMIZADA DE ACUERDO AL DISEÑO BOX-BEHNKEN

Valor optima = 83,406

Tabla A.1: Parámetros óptimos

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Concentración	0,3	0,5	0,5
pH	9,0	11,0	10,9964
Tiempo	6,0	24,0	23,7687

Fuente: Optimización de respuesta por programa STATGRAPHICS Centurion.16.1

En la tabla A.1 muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza extracción de cobre sobre la región indicada. El máximo porcentaje de extracción de cobre optimizado según el diseño Box-Behnken es 83,406% el cual es próximo al valor obtenido de 82,14% de extracción de cobre. Además, las variables óptimas de concentración de glicina, pH y tiempo son iguales.

ANEXO B: FOTOGRAFÍAS



Foto B.1: Mineral oxidado de cobre molido de la Mina Pucará Puno



Foto B.2: Pesado de mineral de cobre en balanza analítica



Foto B.3: Lixiviación de mineral de cobre por el método de agitación



Foto B.4: Lixiviado de cobre obtenido



Foto B.5: Medición de conductividad



Foto B.6: Frasco con contenido de lixiviado enviado al laboratorio Sur Arequipa para su determinación de cobre

ANEXO C: CERTIFICADOS DE ANÁLISIS



Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Tel: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

INFORME DE ENSAYO LAS-18-07735

Fecha de emisión 21/12/2018

Señores: JOSE GILMER ANCHAPURI CALDERON

Dirección: PUNO

Atención: JOSE GILMER ANCHAPURI CALDERON

Recepción: 19/12/2018

Realización: 19/12/2018

Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*903 Método de ensayo para cobre por Absorción Atómica.

Código Interno LAS	Nombre de muestra	Procedencia de muestra	Descripción de muestra	*903
				Cu mg/L
SS19000031	M-1	Mina Pucará	Solución cobre	4350
SS19000032	M-2	Mina Pucará	Solución cobre	4729
SS19000033	M-3	Mina Pucará	Solución cobre	4920
SS19000034	M-4	Mina Pucará	Solución cobre	5048
SS19000035	M-5	Mina Pucará	Solución cobre	3834
SS19000036	M-6	Mina Pucará	Solución cobre	4492
SS19000037	M-7	Mina Pucará	Solución cobre	4102
SS19000038	M-8	Mina Pucará	Solución cobre	5249
SS19000039	M-9	Mina Pucará	Solución cobre	3973
SS19000040	M-10	Mina Pucará	Solución cobre	5112
SS19000041	M-11	Mina Pucará	Solución cobre	4037
SS19000042	M-12	Mina Pucará	Solución cobre	5185
SS19000043	M-13	Mina Pucará	Solución cobre	4931
SS19000044	M-14	Mina Pucará	Solución cobre	4854
SS19000045	M-15	Mina Pucará	Solución cobre	4793

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

^{ma}<Valor numérico" = Límite de detección del método, ^{mb}<Valor Numérico" = Límite de cuantificación del método.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados solo están relacionados a la muestra ensayada.
Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

**Laboratorios Analíticos del Sur**Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Telf: (054) 443294 Fax: (054) 444582

www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

INFORME DE ENSAYO LAS-18-07734

Fecha de emisión 01/12/2018

Señores: JOSE GILMER ANCHAPURI CALDERON

Dirección: PUNO

Atención: JOSE GILMER ANCHAPURI CALDERON

Recepción: 30/11/2018

Realización: 30/11/2018

Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*538 Método de Ensayo para Cobre por Absorción Atómica 4 Ácidos

Código Interno LAS	Nombre de muestra	Procedencia de muestra	Descripción de muestra	*538
				Cu %
NN18014443	MUESTRA 1	SOCSAN DE PUCARA PUNO	Mineral pulverizado	6,39



Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114428

^{ms}<Valor numérico> = Límite de detección del método, ^{ms}<Valor Numérico> = Límite de cuantificación del método.

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

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