

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ



Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales

**“BENEFICIO DE CONCENTRADOS DE MINERALES REFRACTARIOS DE ORO
POR BIOOXIDACIÓN – LIXIVIACIÓN CON TIOSULFATO EN LA PLANTA DON
RAFO – NUEVA BONANZA”**

Tesis

Para optar el título profesional de Ingeniero Metalurgista y de Materiales

Presentado por:

Antony Mayco Flores Rodriguez

Lincoln Gervacio Ordaya Montero

Huancayo-Perú

2022



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

Huancayo, 18 de enero del 2023

OFICIO N° 001-2023-JPEG-FIMM/UNCP

Señor : Dr. Rubén Enrique FABIAN RUIZ

Director de la Escuela Académico Profesional de la FIMM

Presente. -

ASUNTO : REMITO INFORME DE ORIGINALIDAD DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO
(TURNITIN) DE TESIS PARA TÍTULO PROFESIONAL

INTERASADOS : FLORES RODRIGUEZ Antony Mayco

ORDAYA MONTERO Lincoln Gervacio

REFERENCIA : Oficio N° 001–2023-TR-DEAP/FIMM

Me dirijo a usted, a fin de hacerle llegar un cordial saludo y al mismo tiempo informarle que habiendo recepcionado el oficio de la referencia, en el cual se remite la tesis “**BENEFICIO DE CONCENTRADOS DE MINERALES REFRACTARIOS DE ORO POR BIOOXIDACIÓN – LIXIVIACIÓN CON TIOSULFATO EN LA PLANTA DON RAFO – NUEVA BONANZA**”, presentado por los bachilleres **FLORES RODRIGUEZ Antony Mayco** y **ORDAYA MONTERO Lincoln Gervacio** con la finalidad de emitir el informe de originalidad.

Que, habiendo revisado la tesis en mención con el software antiplagio (TURNITIN), se ha obtenido como resultado un 17% de similitud, dando la conformidad respectiva y remitiendo los archivos digitales del software para la culminación del trámite respectivo.

Sin otro en particular, aprovecho la oportunidad para expresarle las muestras de mi especial consideración y estima personal.

Atentamente,


Ing. Jean Pierre ESPEZ AGAVILÁN
Asesor

BENEFICIO DE CONCENTRADOS DE MINERALES REFRACTARIOS DE ORO POR BIOOXIDACIÓN – LIXIVIACIÓN CON TIOSULFATO EN LA PLANTA DON RAFO – NUEVA BONANZA

INFORME DE ORIGINALIDAD

17 %	17 %	1 %	0 %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	6 %
2	www.joyeriaplaor.com Fuente de Internet	4 %
3	cip.org.pe Fuente de Internet	2 %
4	es.scribd.com Fuente de Internet	1 %
5	id.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
6	repositorio.udea.edu.co Fuente de Internet	<1 %
7	dgsa.uaeh.edu.mx:8080 Fuente de Internet	<1 %
8	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1 %

9	repositorio.unjfsc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	cyberleninka.org Fuente de Internet	<1 %
11	Rocío García Aboal. "Propiedades optoelectrónicas en perovskitas halogenadas y su aplicación en energía y sensores", Universitat Politecnica de Valencia, 2021 Publicación	<1 %
12	patents.google.com Fuente de Internet	<1 %
13	search.scielo.org Fuente de Internet	<1 %
14	www.ptolomeo.unam.mx:8080 Fuente de Internet	<1 %
15	www.ing.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
16	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
17	www.jove.com Fuente de Internet	<1 %

TITULO

**“BENEFICIO DE CONCENTRADOS DE MINERALES REFRACTARIOS DE ORO
POR BIOOXIDACIÓN – LIXIVIACIÓN CON TIOSULFATO EN LA PLANTA DON
RAFO – NUEVA BONANZA”**

ASESOR

M.Sc. JEAN PIERRE ESPEZA GAVILAN

DEDICATORIA

Me encuentro muy orgulloso de poder hacer mención a mi madre, Melecia Montero y a mi padre, Gervacio Ordaya, por el sacrificio que hicieron y el apoyo incondicional en la etapa de mi formación como persona y profesional, también al resto de mi familia y a todos los que me dieron la fortaleza y los ánimos para poder cumplir esta meta.

Lincoln Gervacio Ordaya Montero

Dedico este trabajo a mi madre por brindarme su apoyo incondicional, a mis hermanos quienes siempre estuvieron presentes, acompañándome en esta etapa de mi vida

Antony Mayco Flores Rodriguez

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser nuestro guía, darnos salud y vida.

A nuestros padres, la gratitud eterna, por ser promotores de nuestra formación profesional y persona.

A nuestro asesor, M.Sc. Jean Pierre Espeza Gavilán.

A todos nuestros maestros de la grandiosa Facultad de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, a quienes viven y, a quienes partieron en el camino.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO	V
RESUMEN.....	XI
INTRODUCCIÓN	XII
CAPITULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 ACERCA DE LA EMPRESA SMRL DON RAFO 2.....	1
1.2 UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD DE LA PLANTA	2
1.3 GEOGRAFÍA.....	2
1.4 EVALUACIÓN GEOLÓGICA	3
1.5 LITOLOGÍA Y GEOLOGÍA ESTRUCTURAL:	3
1.6 MINERALIZACIÓN Y ALTERACIÓN:.....	3
1.7 EXPLORACIÓN Y PREPARACIÓN DE LABORES:	4
1.8 ABASTECIMIENTO DE AGUA Y ENERGÍA.	4
1.9 CLIMA.....	4
1.10 ABASTECIMIENTO Y DESCARGA DEL MINERAL.....	4
1.11 INFORMACIÓN ACERCA DE LA OCURRENCIA DEL ORO.....	5
1.12 PROPIEDADES DEL ORO.....	6
1.13 USOS DEL ORO.....	7
1.14 QUÍMICA DEL ORO	9
CAPITULO II	10
FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	10
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10

2.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	11
2.2.1	Problema General.....	11
2.2.2	Problemas Específicos	12
2.3	OBJETIVOS	12
2.3.1	Objetivo General.....	12
2.3.2	Objetivos Específicos.....	12
2.4	JUSTIFICACIÓN	12
2.5	PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS	14
2.5.1	Hipótesis General.....	14
2.5.2	Hipotesis Específicas	14
2.6	VARIABLES:	14
2.6.1	Variables Independientes:	14
2.6.2	Variable Dependiente:	15
CAPITULO III.....		16
MARCO TEÓRICO		16
3.1	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	16
3.1.1	Productos específicos de biooxidación y flotación de oro refractario	16
3.2	PROCESO DE PRETRATAMIENTO EN MINERALES DE ORO REFRACTARIOS CON AS	18
3.3	PRETRATAMIENTO DE OXIDACIÓN POR TOSTACIÓN	20
3.4	TRATAMIENTO QUÍMICO	22
3.5	PRETRATAMIENTO DE LIXIVIACIÓN ALCALINA	23
3.6	TRATAMIENTO ÁCIDO	24
3.7	CLORACIÓN HÚMEDA	25
3.8	MÉTODO DE DESCOMPOSICIÓN DE OXIDACIÓN CATALIZADORA DE HNO ₃	25
3.9	OXIDACIÓN A PRESIÓN	26

3.10	PREOXIDACIÓN BACTERIANA.....	27
3.11	ANÁLISIS DEL PROCESO PROPUESTO.....	29
CAPITULO IV		32
METODOLOGIA EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN		32
4.1	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	32
4.1.1	Materiales.....	32
4.1.2	Equipos	33
4.1.3	Método	33
4.2	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	34
4.2.1	Materiales.....	34
4.3	CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DEL CONCENTRADO	35
4.4	PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN	37
4.5	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	39
4.5.1	Prueba de cianuración	39
4.5.2	Pretratamiento de biooxidación del concentrado.....	40
4.5.3	Lixiviación de tiosulfato después del tratamiento	42
CONCLUSIONES.....		50
RECOMENDACIONES		51
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		52

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1: UBICACIÓN DE LA EMPRESA DON RAFO - NUEVA BONANZA.	2
FIGURA 2: OPCIONES GENERALES DE PRETRATAMIENTO PARA MINERALES DE ORO REFRACTARIO.....	19
FIGURA 3:DIAGRAMA DE BOQUES DEL DIAGRAMA DE TOSTADO EN 2 ETAPAS.....	21
FIGURA 4: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN QUÍMICA.	23
FIGURA 5:DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PREOXIDACIÓN BACTERIANA.	28
FIGURA 6: PATRÓN XRD DEL CONCENTRADO.....	35
FIGURA 7:FOTOGRAFÍA MICROSCÓPICA DEL CONCENTRADO SEM (AU; ORO; PY: PIRITA; APY: ARSENOPIRITA).....	36
FIGURA 8: IMÁGENES DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL RESIDUO DE LIXIVIACIÓN DE CIANURO (AU: ORO; PY: PIRITA; APY: ARSENOPIRITA;)	40
FIGURA 9: IMÁGENES DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) DEL RESIDUO DE LIXIVIACIÓN POR BIOOXIDACIÓN (AU: ORO; PY: PIRITA; APY: ARSENOPIRITA; P: CUARZO; JRS: JAROSITA).....	42
FIGURA 10: EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE TIOSULFATO EN LA EXTRACCIÓN DE ORO Y CONSUMO DE TIOSULFATO	44
FIGURA 11: EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE IONES DE COBRE EN LA EXTRACCIÓN DE ORO Y EL CONSUMO DE TIOSULFATO.....	45
FIGURA 12: EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE AMONÍACO EN LA EXTRACCIÓN DE ORO Y CONSUMO DE TIOSULFATO.	47
FIGURA 13: EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFITO EN LA EXTRACCIÓN DE ORO Y CONSUMO DE TIOSULFATO.	49

INDICE DE TABLAS

TABLA 1: PROPIEDADES DEL ORO.	6
TABLA 2: ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN ELEMENTAL DEL CONCENTRADO.....	34
TABLA 3:CONDICIONES EXPERIMENTALES PARA LA CIANURACIÓN DEL CONCENTRADO.....	38
TABLA 4: COMPORTAMIENTO DE BIOOXIDACIÓN DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS (As, Fe, S) EN DIFERENTES ETAPAS.....	41

RESUMEN

Se investigó un proceso de biooxidación seguido de lixiviación con tiosulfato de oro a partir de concentrado de oro refractario. Los estudios mineralógicos del concentrado mostraron que los granos de oro muy finos ($< 10 \mu\text{m}$) estaban encapsulados en los minerales de pirita y arsenopirita, mientras que la cantidad de oro monómero era solo del 21%. Se identificó como un concentrado de oro refractario de tipo envuelto de tamaño fino con alto contenido de azufre. La eficiencia de lixiviación directa con cianuro del oro fue solo del 59.86%. Después del pretratamiento de biooxidación, los minerales de sulfuro se descompusieron casi por completo, el 92 % de las partículas minerales del residuo de biooxidación se redujeron a $< 38 \mu\text{m}$ y la cantidad de monómero de oro en el residuo de biooxidación superó el 86%. Mientras tanto, el contenido de oro en el residuo de biooxidación se enriqueció a 55.60 g/t y los contenidos de S, Fe y As se redujeron a aproximadamente 19.8, 6.97 y 0.13% en peso, respectivamente. Se utilizó tiosulfato amoniacal para la extracción de oro del residuo de biooxidación del concentrado de oro refractario. Los resultados mostraron que las condiciones óptimas del reactivo fueron tiosulfato 0.18 M, cobre (II) 0.02 M, amoníaco 1.0 M y sulfito 0.24 M. En estas condiciones se obtuvo una eficiencia máxima de lixiviación de oro del 85.05%.

INTRODUCCIÓN

Durante siglos el metal precioso oro ha sido un elemento ligado al bienestar. La codicia por el oro fue motivo de muchas guerras y del exterminio de naciones enteras. En el siglo XIX, la fiebre del oro resultó en una migración masiva de personas a los principales campos de oro. Incluso las fluctuaciones actuales en el precio del oro a menudo terminan en importantes consecuencias sociales y ecológicas, especialmente en los países donde existen este metal. A medida que aumenta la escasez de depósitos de mineral de oro de óxido, también aumenta la demanda de formas más eficientes de procesar minerales de oro sulfuroso refractarios. La mayoría de los depósitos en muchos países productores se consideran sulfuros refractarios. Mientras que, sin la oxidación del recubrimiento sulfuroso, la recuperación de oro estaría limitada a alrededor del 15-30%. La recuperación puede incrementarse hasta un 85-95% mediante un proceso de oxidación previo, atacando la matriz encapsulante. Dependiendo de la mineralogía (la composición) del mineral, se aplican varios tipos de procedimientos de oxidación.

Si bien en épocas anteriores el método de oxidación dominante comercialmente utilizado ha sido el tostado, las regulaciones ambientales a nivel mundial y las preocupaciones sociales sobre la emisión de gases de efecto invernadero y otros gases conducen a un replanteamiento gradual en la preferencia de selección del método de oxidación aplicado. En estos procesos, la matriz de encapsulación que cubre las partículas de oro se oxida y se convierte en iones de azufre o sulfato elementales. Sin embargo, el problema es que los procesos hidrometalúrgicos suelen ser más caros. Esta tesis describirá y detallará el proceso hidrometalúrgico basado en el uso de bacterias y microbios para preparar los minerales refractarios para el proceso de lixiviación en la Planta Nueva Bonanza.

Observando esta situación, proponemos como objetivo de esta tesis, Determinar la alternativa tecnológica que puede ser empleada para beneficiar adecuadamente los concentrados de minerales refractarios de oro en la Planta Nueva Bonanza y la hipótesis planteada es: Los concentrados de minerales refractarios de oro en la Planta Nueva Bonanza pueden ser beneficiados adecuadamente empleando en primer lugar la biooxidación seguido por la lixiviación con tiosulfato.

La estructuración de la tesis que hemos considerado incluyen un primer capítulo donde se indican las generalidades, el segundo la formulación de la investigación, el tercero considera el marco teórico y en el cuarto la parte fundamental que incluye la investigación experimental, al final se exponen las conclusiones y recomendaciones.

En este sentido es nuestra intención cumplir con las expectativas técnica científica y ponemos a disposición de nuestros jurados el presente estudio que nos permita obtener el título de Ingeniero Metalurgista y de Materiales.

CAPITULO I

GENERALIDADES

La Empresa SMRL DON RAFO 2, está dedicada a la explotación minero metalúrgica de minerales auríferos, al realizar esta investigación vinculada a los procesos metalúrgicos que se vinculan a esta tesis, a continuación, indicamos algunas generalidades.

1.1 Acerca de la Empresa SMRL DON RAFO 2

La empresa SMRL DON RAFO 2, surge como un trabajo profesional y comercial en equipo de los ingenieros de minas, que visionaron el desarrollo del país en la industria minera. El sector minero contribuir con el desarrollo del país, por eso están creando más oportunidades de trabajo y bienestar. En el año 2002 se realiza la concesión minera DON RAFO 2, y en junio del 2004 se constituye SMRL DON RAFO 2 con la participación de los socios, en la ciudad de Lima a través del INACC hoy INGENMET. Con un capital inicial arranca las operaciones en octubre del 2004, donde se proyectó y diseño la planta de procesamiento de oro, con una capacidad media de 10TM/DIA. En la actualidad la planta ha sido modificada para obtener una programación de procesamiento 40 TM/Día.

En la elaboración de tratamientos de minerales, la empresa SMRL DON RAFO 2 opera por el método de lixiviación CIL para realizar una recuperación más conveniente, con la debida responsabilidad que otorgaba la empresa en la seguridad de cada personal que operan con el debido cuidado en las operaciones unitarias.

1.2 Ubicación y Accesibilidad de la Planta

Se encuentra ubicado en el distrito de Atico, provincia de Caraveli, departamento de Arequipa, a 57 km. en dirección NE a partir del desvío de la carretera panamericana que va a Caraveli, se encuentra a una altitud media 2 226 m.s.n.m.

La planta de procesamiento de SMRL DON RAFO 2, está a 1600 m.s.n.m en el paraje quebrada seca, y la mina por encima de 2000 m.s.n.m,

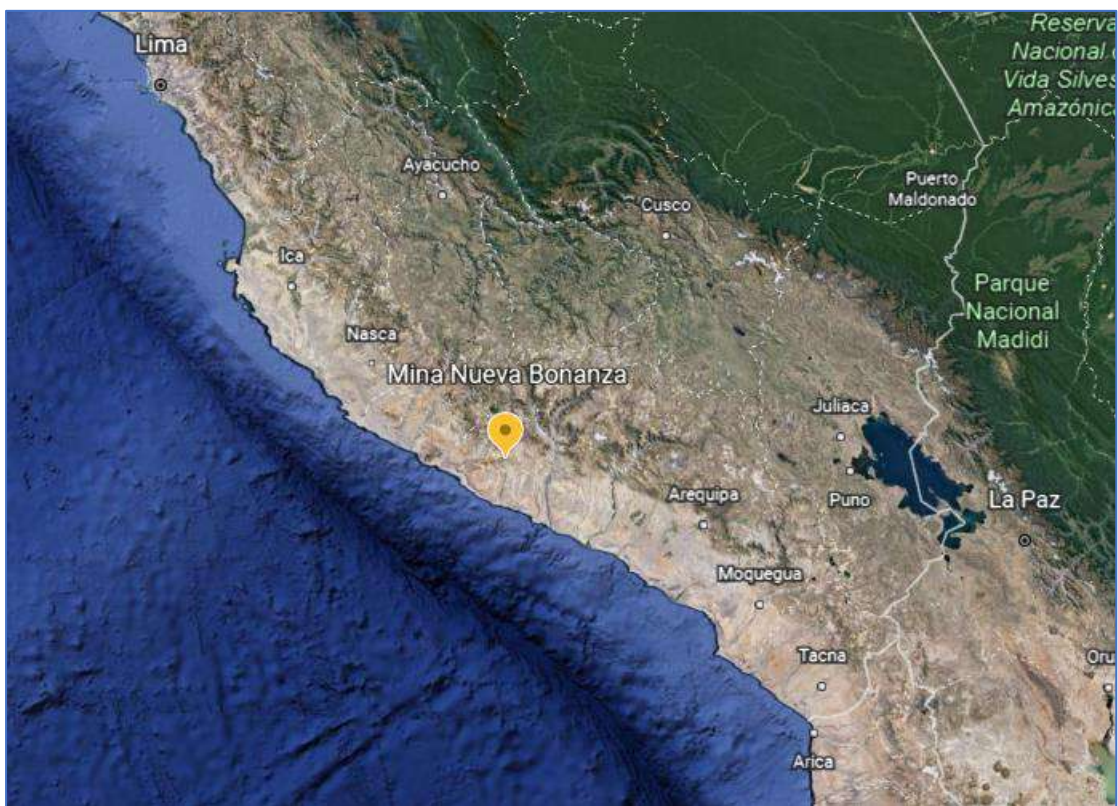


Figura 1: Ubicación de la empresa Don Rafo - Nueva Bonanza.

1.3 Geografía

El relieve es mayormente redondeado, la roca predominante en Nueva Bonanza es la andesita hipabisal y el post derrame volcánico que en algunas elevaciones

predominantes se encuentra solamente como pequeños remantes. El medio en donde está la Mina Don Rafo 2 está conformado por elevaciones y depresiones de origen Volcánico que han dado origen a cerros y quebradas que fluctúan entre 1600 a 3400 m.s.n.m. Las elevaciones más importantes son: Quebrada pampa redonda, Quebrada Seca, Quebrada Pozo Guanaca y Quebrada Cachica.

1.4 **Evaluación Geológica**

Dentro de los trabajos realizados por Geología, es el levantamiento topográfico de las labores de Exploración, Preparación, Desarrollo y Explotación de los diferentes niveles, dentro de los cuales es trabajado por los microcontratistas y mineros artesanales.

Las dos zonas principales dentro de la concesión minera de Arturo 2006, se encuentran la zona de principal y la lomada, las que aportan mineral a la planta.

1.5 **Litología y Geología Estructural:**

Roca Andesítica de bloques poco rígidos competentes, los cuales han sido desplazados por fallas transversales y longitudinales a la estructura con buzamientos de alto ángulo.

Las estructuras tienen un azimut que va desde los N275°E a N340°E.

1.6 **Mineralización y Alteración:**

En la veta dentro del Nv 0 presenta mayormente zona de cuarzo + sulfuros, en el Nv 1 presenta zona de cuarzo + óxidos y en el Nv 2 presenta zona de cuarzo + óxidos. El oro está hospedado en los criaderos y dentro del sulfuro fino. La alteración dentro de las labores es de Argilización, Sericitización, Silicificación, Piritización y Caolinización las que son más abundantes.

1.7 Exploración y Preparación de Labores:

En el ramal techo de La veta principal del Nv 1, se está proyectando un avance de exploración de 50 m. siguiendo la veta, para reconocer mejor su comportamiento y conocer la ley que tiene dentro de su trayecto del cual nos saldrá las toneladas a aportar, (ver plano adjunto) se estará proyectando realizar una labor de preparación de 30 m. la cual cortará el ramal techo.

Se tiene los planos de las labores que se han trabajado y los avances de las mismas las cuales adjuntaremos al informe.

1.8 Abastecimiento de agua y energía.

El abastecimiento del agua se efectúa aprovechando una fuente natural subterránea existente en la quebrada da Cachica, el transporte del líquido elemento se realiza por medio de una cisterna de una capacidad de 20 m³, el agua es almacenado en una poza de 100 m³ que se utiliza para del tratamiento de la planta.

1.9 Clima

Tiene un clima seco y árido durante todo el año, con lluvias ocasionales en los meses de enero a marzo.

1.10 Abastecimiento y Descarga del Mineral

El abastecimiento de mineral es por medio de pequeñas compañías que vende a la empresa que se transporta por medio de fuso de la empresa o privada que se descarga y se pesa media una balanza por un numero de costales de minerales y se enumera los lotes para luego ser chancado y colocar en la cancha de relave según como llega el mineral, según su tipo mineralógica y composición química del mineral.

1.11 Información Acerca de la Ocurrencia del Oro

Las características mineralógicas y su forma de ocurrencia desde el punto de vista geológico condicionan la naturaleza de las propiedades físicas y químicas que determinan la elección de un proceso de tratamiento para la óptima recuperación del metal valioso.

Las características naturales del oro o de sus minerales portadores, son principalmente su granulometría y sus asociaciones con los minerales de la ganga. La eficacia de los métodos gravimétricos es limitada por el porcentaje de partículas inferiores a 10 micras. Esta dimensión se ve limitada a menudo por la forma de las partículas del oro a recuperar: granos, lentejuelas, filamentos, etc.

Por otro lado, y con esta limitación, la concentración por cicloneo (concentradores Knelson y Falcon), la flotación y la cianuración quedan como los únicos métodos de tratamiento disponibles.

La flotación exige una liberación completa del compuesto o mineral a recuperar, por lo tanto, en este caso se impone la operación de molienda, salvo que el oro se encuentre extremadamente fino y el material de ganga (portadora) no sea tan denso (porosa).

En el caso que la cianuración requiera de molienda, es posible extraer el 95% de oro a una granulometría de 80% menos 75 micras; ya que es necesario que una parte de ésta, esté accesible a la solución de ataque.

En las operaciones de molienda, interviene otra propiedad del oro: la ductilidad. Los granos de oro a causa de esta ductilidad no se muelen y tienden a laminarse y concentrarse en el molino; se elimina este inconveniente, recuperando el oro grueso del under del clasificador mediante operaciones gravimétricas.

En fin, la naturaleza de la asociación del oro con los minerales de la ganga interviene en la aplicabilidad de los métodos de tratamientos, influyendo notablemente sobre su liberación.

1.12 Propiedades del Oro

Es uno de los elementos metálicos más valiosos, es casi dos veces más denso que la plata. Se halla en la naturaleza en una proporción bajísima, el 0,0000005% en peso. Es un metal de color amarillo característico, dúctil, extremadamente maleable, puede batirse hasta convertirlo en l minas tan finas que lleguen a ser translúcidas (puede llegarse hasta una diezmilésima de milímetro de espesor) que se conoce como pan de oro, que se utilizan para dorar. No se oxida, pues es completamente inalterable a la acción del aire, del agua o de cualquier ácido o álcali. Una mezcla concentrada de los ácidos clorhídrico y nítrico (agua regia) lo disuelve, debido a que tal mezcla produce cloro libre, elemento que se combina con el oro. Siendo un metal excesivamente blando para los usos ordinarios, se alea generalmente con el cobre y la plata. Las propiedades de este metal pueden resumirse como sigue:

Tabla 1: Propiedades del oro.

COMPOSICION QUÍMICA	Metal. Símbolo químico Au
SISTEMA CRISTALINO	Cúbico Isométrico
DUREZA	2,5 a 3 en la escala de Mohs, muy dúctil
PESO ESPECÍFICO	19,3 g/cm ³
TEXTURA	Textura maciza y constituye pequeños individuos de forma irregular
BRILLO	Metálico, es un metal muy brillante
COLOR	Amarillo dorado

PUNTO DE EBULLICIÓN	2700°C. Es algo volátil por debajo de su punto de ebullición.
PUNTO DE FUNDICIÓN	1063°C
PESO Y NÚMERO ATÓMICO	Peso Atómico: 19.72 No. A: 79
OTRAS PROPIEDADES	<p>Es el más maleable y dúctil de todos los metales. Se puede transformar en hilos, barras y chapas, pueden hacerse láminas transparentes, con espesor de 0.00001 mm con facilidad o estirarlo en alambres con pesos de 0.5 mg/m.</p> <p>El oro es muy inactivo. No le afecta el aire (no pierde lustre, ni se quema al aire), el calor, la humedad ni la mayoría de los disolventes. Sólo es soluble en agua de cloro, agua regia o una mezcla de agua y cianuro de potasio. Es inerte en soluciones fuertemente alcalinas y en todos los ácidos puros, menos el ácido selénico. El oro se disuelve con facilidad en mercurio para formar amalgamas</p> <p>El Oro tiene grandes propiedades de resistencia a la corrosión, maleabilidad, ductilidad y reflectividad.</p> <p>Antiguamente sólo se conocían seis metales: el hierro, el cobre, el estaño, el plomo, el oro y la plata, los cuales siguen siendo los más conocidos y los más aplicados. En general este metal es sólido, no deja pasar la luz, es muy buen conductor de la electricidad y el calor,</p>

1.13 Usos del Oro

Cerca de tres cuartas partes de la producción mundial del oro se consume en joyería. Sus aplicaciones industriales, especialmente en electrónica, consumen 10-15%. El remanente está dividido entre los empleos médicos y dentales, acuñación y reservas para el gobierno y particulares. Las monedas y demás objetos decorativos de oro son en realidad aleaciones porque el metal es muy blando (2.5-3 en la escala de Mohs) para

ser útil con un manejo frecuente. En forma coloidal; se usa en el coloreado de vidrio y cerámica.

El ^{198}Au radiactivo se utiliza en radiaciones medicinales, en diagnóstico y en algunas aplicaciones industriales como trazador. También se usa como trazador en el estudio del movimiento de sedimentos sobre el fondo oceánico y en los alrededores de los puertos.

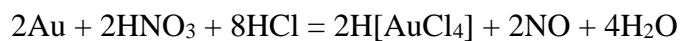
Las propiedades del oro hacia la energía radiante han permitido el desarrollo de reflectores eficientes para calentadores infrarrojos y hornos, así como para retención y enfoque de calor en procesos industriales. El oro se utiliza como filtro de los rayos solares y del calor, pues es el aislante térmico más ligero conocido.

En la metalurgia. Piezas de acero sometidas a altas temperaturas y ambientes hostiles deberán ser soldadas con oro. También son cubiertos por una capa de oro los reactores nucleares o los cables de conexión telefónica asentados en las profundidades marinas. En electrónica la mayoría de los contactos, casi todas las soldaduras y algunos circuitos están hechos con oro.

En el espacio es un elemento indispensable. Todas las partes externas de los trajes espaciales y los módulos lunares están cubiertas por una fina capa de oro. El oro es un elemento más de los cristales de las fachadas de los edificios que deben defenderse de la radiación solar. En los modernos aviones a reacción, el parabrisas está cubierto de una fina capa de este material con un grosor de cinco millonésimas de milímetro, evitando con ello la formación de escarcha y vaho y protegiendo a los pilotos de las radiaciones solares, que a elevadas alturas pueden resultar muy peligrosas.

1.14 Química del Oro

El oro al ser un metal noble, no es atacado por los ácidos minerales, pero se disuelve fácilmente en agua regia, mediante la siguiente reacción general:



El oro también se solubiliza en agua de cloro y de bromo formando respectivamente AuCl_3 y AuBr_3 , que se combinan con el cloruro de potasio y bromuro de potasio dando el auricloruro cristalino, $\text{K}[\text{AuCl}_4]$, y el auribromuro de K, $\text{K}[\text{AuBr}_4]$, respectivamente.

El metal comercial está aleado comúnmente con cobre y/o plata.

Se conocen dos óxidos: el auroso, Au_2O , y el áurico, Au_2O_3 . El último es el más estable y presenta una tendencia marcada a formar sales complejas del tipo $\text{R}[\text{AuX}_4]$.

CAPITULO II

FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio que se presenta en base a un problema en la mayor parte de las plantas de beneficio de minerales auríferos se basa en desarrollar metodológicamente el sistema de desarrollo de esta investigación, desde el punto de vista científico, implicando que en primer lugar planteemos la problemática, luego indicar los objetivos y justificaciones, luego proponer las hipótesis respectivas con sus variables de investigación.

2.1 Planteamiento del problema

Los minerales de oro se consideran refractarios si las extracciones de oro de un proceso de cianuración convencional son inferiores al 80 % incluso después de una molienda fina. Estas bajas extracciones normalmente no permiten la recuperación económica del metal. Estos recursos pueden consistir en minerales, concentrados de flotación, barandillas de molino y otras reservas. Con frecuencia, los metales preciosos están encerrados y finamente diseminados en minerales de sulfuro de hierro (principalmente pirita y/o arsenopirita).

Un porcentaje significativo de oro en un mineral puede presentarse en forma submicroscópica, ya sea muy finamente diseminado o en una solución sólida con sulfuro. Este modo de ocurrencia puede no ser detectado por microscopía óptica o microanálisis de sonda electrónica. Incluso la molienda fina puede fallar en liberar el oro para su recuperación por lixiviación con cianuro, en cuyo caso lo definimos como refractariedad "física". Este tipo de refractariedad se debe a la incapacidad de los iones

de cianuro para acceder a las partículas de oro de tamaño submicrónico dentro de los densos granos de sulfuro.

A menudo se requiere un proceso de pretratamiento adecuado para superar la refractariedad y hacer que el oro sea accesible a la acción lixivante del cianuro y el oxígeno. Molienda ultrafina, cianuración modificada, tostado, oxidación a presión y oxidación bacteriana son los métodos de pretratamiento que se practican actualmente para minerales y concentrados de oro refractario. La tostación, proceso de etapa simple usando un tostador de lecho fluidizado a alrededor de 650° C, es uno de los métodos más comunes para el tratamiento de concentrados de pirita/arsenopirita y pirrotita que contienen oro para producir calcina porosa y, por lo tanto, aumentar la posibilidad de la cianuración. La oxidación a presión y Los métodos de biooxidación han cobrado importancia en los últimos años principalmente debido a los problemas ambientales (por ejemplo, emisiones de SO₂) asociados con el proceso de tostación.

Esta problemática surge para la Planta Nueva Bonanza, a necesitar ampliar su horizonte de producción de oro a partir de los minerales que va encontrando en su proceso de exploraciones y ampliación de reservas, siendo necesario que se planteen alternativas tecnológicas como la que proponemos en este estudio.

2.2 Formulación del Problema

2.2.1 Problema General

- ✓ ¿Qué alternativa tecnológica puede ser empleada para beneficiar adecuadamente los concentrados de minerales refractarios de oro en la Planta Don Rafo – Nueva Bonanza?

2.2.2 Problemas Específicos

- ✓ ¿Qué características mineralógicas poseen los minerales refractarios de oro de la Planta Don Rafo- Nueva Bonanza?
- ✓ ¿Cuáles son las principales variables que influyen en la lixiviación con tiosulfato de los concentrados biolixiviados de oro en la Planta Don Rafo – Nueva Bonanza?

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo General

- ✓ Determinar la alternativa tecnológica que puede ser empleada para beneficiar adecuadamente los concentrados de minerales refractarios de oro en la Planta Don Rafo – Nueva Bonanza.

2.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Determinar las características mineralógicas poseen los minerales refractarios de oro de la Planta Don Rafo- Nueva Bonanza.
- ✓ Determinar las principales variables que influyen en la lixiviación con tiosulfato de los concentrados biolixiviados de oro de la Planta Don Rafo- Nueva Bonanza.

2.4 Justificación

El proyecto de investigación que se presenta se justifica por los siguientes criterios

- La cianuración de los minerales auríferos como método de beneficio tiene problema vinculados a la toxicidad del cianuro. La tendencia actual, desde el punto de vista tecnológico es encontrar alternativas buenas y menos tóxicas a este

reactivo. La disolución del oro con tiosulfato se considera un proceso no tóxico y la cinética de disolución del oro pueden ser más favorables que en la cianuración convencional. La lixiviación con tiosulfato tiene la capacidad de ser un proceso efectivo y menos peligroso para la extracción del oro a partir de minerales auríferos.

- Los minerales sulfurados considerados como gangas como la pirita y arsenopirita, son minerales comunes asociados con los minerales de oro, lo que requiere de desarrollo de trabajos de investigación, vinculados a buscar
- El proceso de cianuración de oro tiene serios riesgos ambientales si ocurre un accidente en el proceso debido a la toxicidad del cianuro. Los alineamientos políticos y la preocupación por el medio ambiente han sido las razones para encontrar alternativas buenas y menos tóxicas al cianuro. La lixiviación con tiosulfato se considera un proceso no tóxico y las velocidades de disolución del oro pueden ser más rápidas que en la cianuración convencional.
- La pirita es uno de los sulfuros que contienen hierro, siendo el mineral de ganga de esta naturaleza más común asociado con los minerales de oro, requiriendo en ese sentido realizar trabajos de investigación, vinculados al comportamiento de este mineral en la lixiviación del oro con el tiosulfato, y determinar métodos técnicamente viables para resolver a los problemas de proceso vinculados con esta relación.
- El desarrollo de este estudio es beneficioso tanto para determinar la estabilidad del tiosulfato como para determinar los parámetros operativos para una óptima performance de la lixiviación del oro, de tal forma que busque beneficiar tecnológica, económica y socialmente a la Planta Don Rafo – Nueva Bonanza, quienes auspician este tipo de trabajos.

- Plantear alternativas para resolver este tipo de problemas es beneficioso tanto para determinar la metodología adecuada para determinar los parámetros operativos para una óptima performance de la lixiviación del oro, de tal forma que busque beneficiar tecnológica, económica y socialmente a la Planta Nueva Bonanza, quienes auspician este tipo de trabajos.

2.5 Planteamiento de la Hipótesis

2.5.1 Hipótesis General

- ✓ Los concentrados de minerales refractarios de oro en la Planta Don Rafo – Nueva Bonanza pueden ser beneficiados adecuadamente empleando en primer lugar la biooxidación seguido por la lixiviación con tiosulfato.

2.5.2 Hipotesis Específicas

- ✓ El análisis mineralógico del proceso del concentrado muestra que todas las partículas de oro tienen un tamaño fino y están encapsulados en pirita y arsenopirita.
- ✓ Las concentraciones de tiosulfato, ion cobre, amoníaco y sulfito en el proceso de lixiviación son los factores influyentes más importantes para la extracción de oro, desde los concentrados biolixiviados.

2.6 Variables:

2.6.1 Variables Independientes:

- Concentración bacteriana.
- Tiempo de oxidación.
- Concentración del tiosulfato.

- Concentración del ion cobre.
- Concentración del amoníaco.
- Concentración del sulfito.

2.6.2 Variable Dependiente:

- Extracción de oro.
- Consumo del tiosulfato.

CAPITULO III

MARCO TEÓRICO

El análisis previo de todo trabajo de investigación requiere de un análisis de la información de los trabajos desarrollados previamente y que estén vinculados a la problemática planteada previamente, en tal sentido presentamos este marco teórico.

3.1 **Fundamentación teórica**

3.1.1 **Productos específicos de biooxidación y flotación de oro refractario**

Actualmente, un mayor porcentaje de oro se extrae de minerales de oro refractarios de baja ley, luego del agotamiento de la mayoría de los depósitos de alta ley. La creciente complejidad de estos minerales refractarios garantiza una mejora en nuestro conocimiento fundamental y aplicado que sustenta el proceso de extracción de oro comercial sostenible, rentable y la producción de materias primas. A pesar de los numerosos estudios informados sobre la extracción mejorada de oro (mediante lixiviación con cianuro) de minerales complejos de baja ley, todavía existe una falta de conocimiento y comprensión fundamentales sobre la interacción entre las fases minerales primarias y secundarias específicas del mineral refractario, la química de la solución, y las especies interfaciales partícula-solución, las interacciones entre partículas y las reacciones químicas/electroquímicas que sustentan los mecanismos y la cinética del proceso de lixiviación. Todavía no se ha establecido claramente cómo estos factores interactúan sinérgicamente para producir una cinética rápida y una alta recuperación de oro o de manera antagónica (por ejemplo, baja tasa de lixiviación, pasivación/encapsulación, baja recuperación de oro y alto consumo de reactivo) durante el proceso de lixiviación con cianuro alcalino.

La mineralogía del mineral junto con las características físico-químicas juegan un papel crítico en su respuesta al procesamiento de minerales y técnicas de extracción. Se ha investigado la mineralogía y la fisicoquímica integrales de los dos minerales de oro diferentes junto con sus productos de flotación y biooxidación. Era evidente que los dos minerales de oro comprenden minerales comunes como cuarzo, chamosita, albita, efesita, clinozoisita, larnita, ilita, moscovita, rutilo, pirita, arsenopirita, apatita, dolomita y siderita. La diferencia clave observada de los dos minerales fue la variación en los porcentajes de algunos minerales comunes.

Las diferencias características entre los dos minerales reflejan dos tipos de concentrados de flotación, distinguidos únicamente por dos minerales diferentes. Se mejoran la arsenopirita, la moscovita y la pirita para los dos concentrados de flotación en diferentes grados. En un concentrado predominaba la dolomita (en lo sucesivo, concentrado de flotación que contiene dolomita, DC) mientras que en el otro predominaba la apatita (en lo sucesivo, concentrado de flotación que contiene apatita, AC). Tanto la dolomita como la apatita están inicialmente presentes en los dos minerales de alimentación de flotación, sin embargo, sus asociaciones variables y complejas con otros minerales hidrofóbicos definieron su rechazo o inclusión en el concentrado de flotación. DC comprendía más cantidad de minerales hidrofóbicos de sulfuro que AC, que también contenía mayor cantidad de efesita, ilita y albita. La investigación de Evaluación Cuantitativa de Minerales por Microscopía Electrónica de Barrido (QEMSCAN) reveló un tamaño de grano mineral más pequeño en AC en comparación con DC. Esta observación concuerda con la diferente respuesta mineral de los dos minerales de oro refractarios a la flotación.

Después de la biooxidación, AC produjo un producto de biooxidación que contenía jarosita (en lo sucesivo, JC) con un mayor contenido de bassanita, mientras que DC produjo un producto de biooxidación libre de jarosita (en lo sucesivo, JF) con bassanita y yesos presentes en menor cantidad. y montos mayores, respectivamente. Este resultado concuerda con algunos trabajos previos que muestran que los iones de fosfato facilitan la precipitación de la jarosita en las condiciones típicas de biooxidación (p. ej., pH 1,0–1,8). Aunque las bacterias quimiolitotróficas necesitan fósforo para oxidar los concentrados de flotación, la cantidad añadida por los concentrados de flotación que contienen apatita (7,3 kg/t) es mucho mayor que las tasas prescritas por BIOMIN de 0,9 kg/t. La Tabla 2 muestra el contenido de potasio y sodio antes y después de la biooxidación. Evidentemente, el potasio y el sodio se concentraron en los productos de biooxidación con poca diferencia entre JF y JC en términos de porcentaje de actualización. Otros estudios caracterizarán la jarosita encontrada en JC para determinar si es H, Na, K o NH₄.

3.2 **Proceso de Pretratamiento en Minerales de Oro Refractarios con As**

Los minerales de oro se consideran refractarios si las extracciones de oro de un proceso de cianuración convencional son inferiores al 80% incluso después de una molienda fina. El mineral de oro refractario que contiene arsénico tiene partículas extremadamente difíciles de manejar. En las partículas, el oro está encerrado en una matriz mineral de arsénico en forma de red microscópica o submicroscópica. Si utiliza el proceso de extracción de oro por cianuración convencional, la tasa de lixiviación de oro es muy baja. Debido a que el oro en dichos minerales es una partícula muy fina envuelta con arsénico, los reactivos de lixiviación no pueden alcanzarlo en el proceso de lixiviación con cianuro. Los minerales de oro con As deben romperse o

descomponerse en las escamas de partículas de oro, de modo que el oro sea expuesto y luego extraído con el agente de lixiviación de oro apropiado. El proceso de trituración o descomposición antes de la lixiviación del oro se denomina pretratamiento del oro refractario.

Las estadísticas muestran que, en el mundo, alrededor de 2/3 de los recursos de oro pertenecen a los minerales de procesamiento difícil, y alrededor de 1/3 de la producción total de oro mundial se produce a partir de oro refractario. Esta proporción seguirá aumentando en el futuro. Por lo tanto, el pretratamiento del oro refractario que contiene arsénico tiene una importancia extremadamente importante. En los últimos años, las investigaciones se centran principalmente en la lixiviación fácil del oro refractario a través de la eliminación del arsénico para exponer el oro, cambiando la composición, las propiedades físico-químicas y electroquímicas del mineral. Actualmente, existen cuatro métodos principales de pretratamiento de minerales refractarios de oro con As. Las opciones de pretratamiento para tratar con minerales de oro refractarios se ilustran en la Fig. 2 y se describen en detalle a continuación.

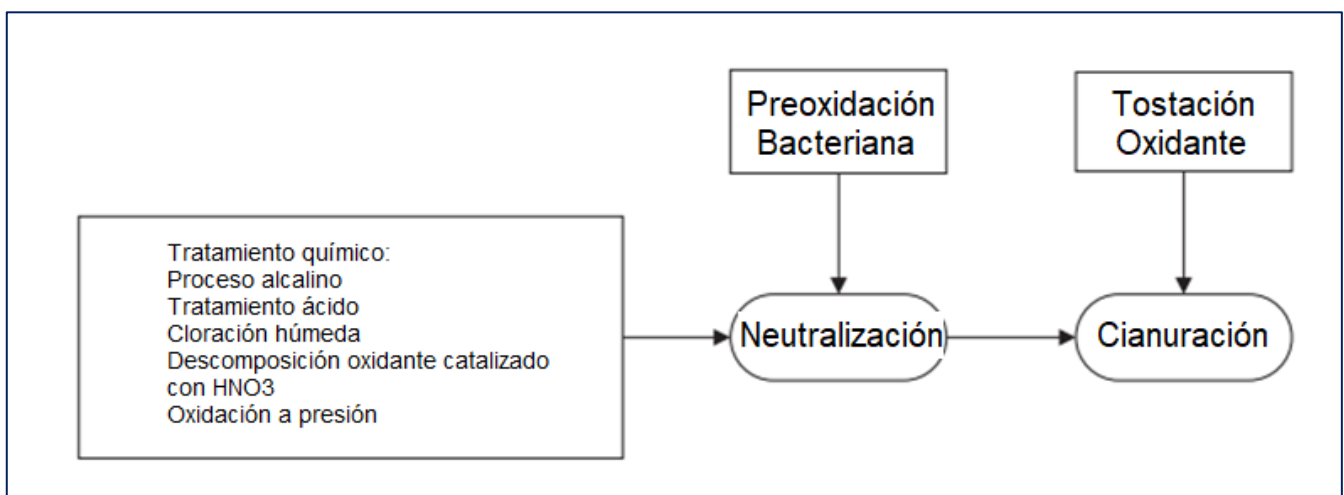
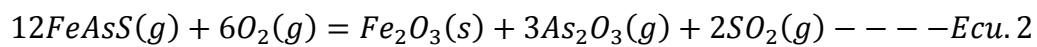
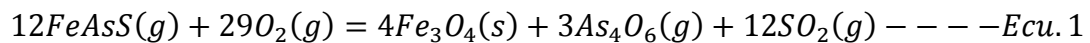


Figura 2: Opciones generales de pretratamiento para minerales de oro refractario.

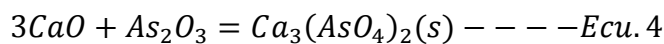
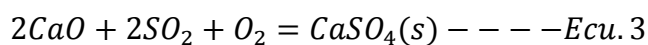
3.3 Pretratamiento de oxidación por tostación

Hasta el momento, la aplicación del pretratamiento de oxidación por tostación tiene una historia de 70 años. El principio es destruir la estructura cristalina de los minerales para hacer que el oro sea expuesto por medio de la tostación del concentrado de flotación.

Las principales reacciones químicas son:



En la tostación por solidificación, el sulfato y el arsenato sólidos se producen por oxidación de azufre y arsénico con adición de piedra caliza o descomposición de dolomita en los minerales.



Puede mejorar drásticamente la cinética de lixiviación con cianuro de oro. El tostado tiene ventajas de tecnología madura y confiable, operación simple, adaptabilidad, etc. Pero es fácil formar una envoltura secundaria para reducir la cinética de lixiviación de oro en el proceso de tostado, y al mismo tiempo produce gases de SO₂ y As₂O₃ que contaminan seriamente el medio ambiente. En minerales con alto contenido de sulfuro este tratamiento implica la producción de ácido sulfúrico. Esta es una característica indeseable, debido al mercado ya saturado de ácido sulfúrico. En minerales con bajo contenido de sulfuros requiere equipo de purificación de gases. En algunos casos, este método de preoxidación puede resultar en una mala recuperación del metal. El diagrama de flujo del proceso es como se muestra en la Fig. 3.

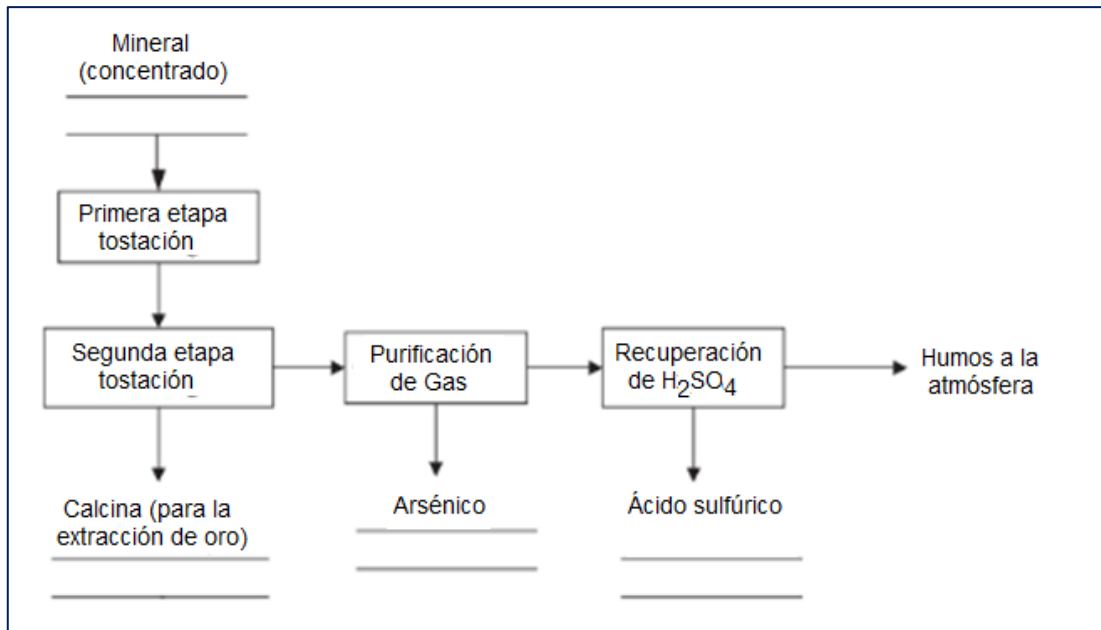


Figura 3: Diagrama de bloques del diagrama de tostado en 2 etapas.

Con el fin de resolver el tostado insuficiente, el tostado excesivo y la contaminación ambiental y otros defectos, los trabajadores científicos y técnicos han estado investigando para explorar para mejorar y desarrollar el proceso y el equipo de tostación durante muchos años. Para los dispositivos, desarrollaron hornos de un hogar a múltiples, la tostación desde lecho fijo a lecho fluidizado hasta tostado rápido. En cuanto a tecnología, se desarrolló de una etapa a dos, de aire a tostación enriquecida con oxígeno. Además, se desarrollan sobre la base del proceso tradicional, tostación por reducción, tostación por cloración, fijación de azufre salino y tostación para arsénico.

La tostación oxidante inevitablemente emitirá una cierta cantidad de gases tóxicos y nocivos en el proceso. La tostación en microondas es un nuevo pretratamiento para resolver el problema. Utiliza propiedades de absorción de minerales para calentar minerales. De esta forma, el oro, el arsénico y el azufre pueden separarse de los minerales. Las ventajas técnicas del tostado por microondas son materiales de calentamiento selectivo, velocidad de calentamiento rápida y alta eficiencia de

calentamiento. El calentamiento por microondas tiene el efecto de reducir la temperatura de la reacción química. Por lo que puede evitar la generación de gases de SO_2 y As_2O_3 controlando la temperatura adecuadamente.

Se han estudiado el papel de las microondas en el proceso de extracción de oro del mineral de oro refractario que contiene arsénico. Liu Qunjun etc. hicieron una prueba para una mina de oro en la provincia de Guizhou. El mineral sin tratamiento previo con microondas difícilmente podría lixiviarse en cianuro. Por otro lado, la lixiviación con cianuro del mineral de oro aumentó al 86.53 %. WeiMingan, Ma Shaojian, etc. también investigaron el pretratamiento con microondas del concentrado de oro y lograron buenos resultados.

3.4 **Tratamiento químico**

El tratamiento químico es otra rama del pretratamiento del mineral y tiene las ventajas que no tiene el proceso de tostación. Esos no son problemas difíciles de lixiviación secundaria causados por la tostación insuficiente y la oxidación excesiva, bien adaptados y seleccionando diferentes reactivos de acuerdo con diferentes minerales. El proceso de tratamiento químico es como se muestra en la Fig. 3.3

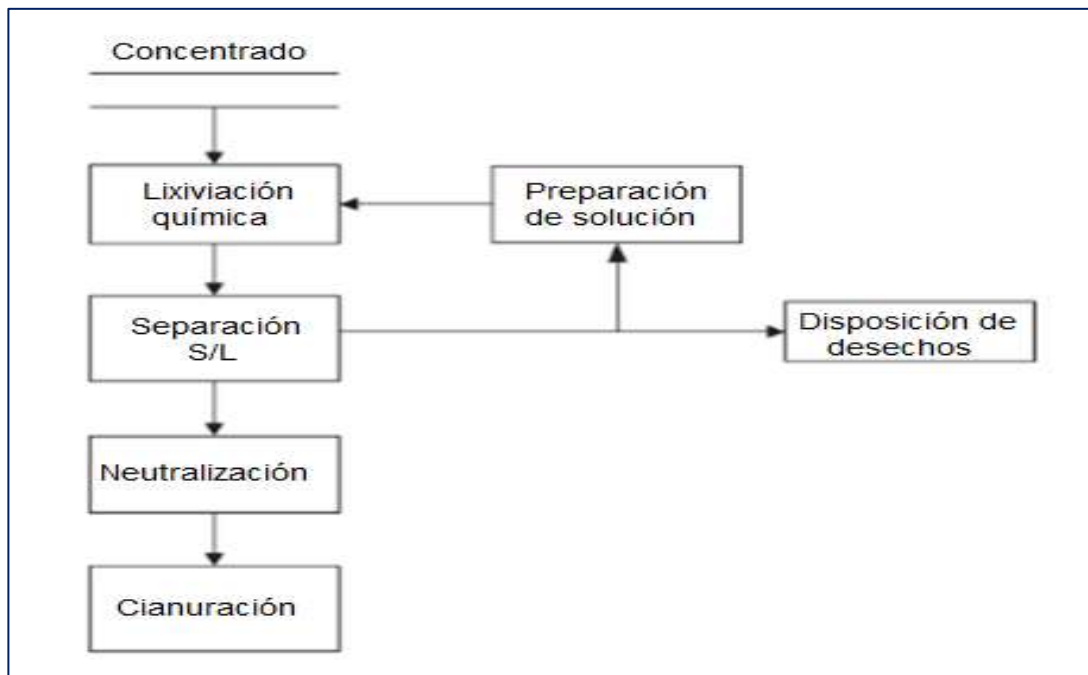


Figura 4: Diagrama de bloques del proceso de lixiviación química.

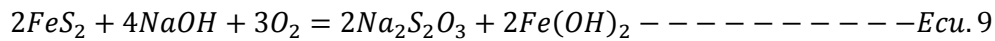
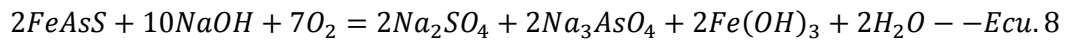
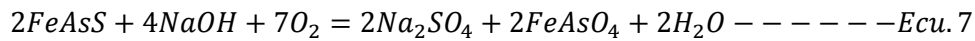
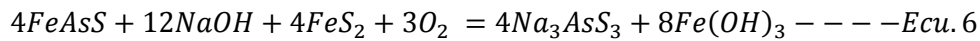
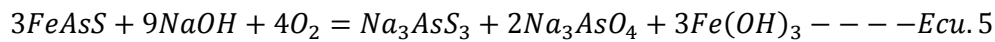
La disponibilidad y el costo de los reactivos, los materiales de construcción, las preocupaciones ambientales y el progreso del desarrollo contribuyen a limitar la aplicación de estas técnicas. Según los diferentes medios, el pretratamiento se puede dividir en pretratamientos de lixiviación alcalina y ácida. Dependiendo de las condiciones de reacción, se puede dividir en pretratamientos a presión atmosférica y a presión caliente.

3.5 Pretratamiento de lixiviación alcalina

El pretratamiento de lixiviación alcalina es un proceso de pretratamiento químico que puede oxidar y eliminar componentes del mineral mediante la adición de reactivos químicos.

Se han investigado para fortalecer el pretratamiento de lixiviación alcalina en un concentrado de oro con As a temperatura y presión normales. El concentrado de oro tiene muchos minerales metálicos con sulfuros como los principales. Son principalmente pirita, arsenopirita, mineral de hierro, etc. En el experimento, el mineral

se separa por métodos físicos y químicos y se encuentra en molienda ultrafina. Luego, use un tanque agitado para fortalecer el pretratamiento de lixiviación alcalina a temperatura y presión normales. La eliminación de azufre y arsénico separa completamente el oro y el sulfuro. Finalmente, lixivia el oro con cianuro y alcanza el propósito de la extracción de oro de manera eficiente. Las principales reacciones químicas son:



Bajo ciertas condiciones, el $Na_2S_2O_3$ y Na_3AsS_3 se oxidan aún más a Na_2SO_4 y Na_3AsO_4 , $Fe(OH)_2$ se oxida a $Fe(OH)_3$, $Fe(OH)_3$ se descompone a Fe_2O_3 .

Este método es protección del medio ambiente, proceso simple, flujo corto, pequeña inversión, etc.

3.6 Tratamiento ácido

El tratamiento con ácido atmosférico generalmente usa ácido permonosulfúrico para oxidar el mineral de oro refractario con As. Se dice que el método no es adecuado para todos los minerales de oro refractarios, pero tiene buenos resultados en el tratamiento del mineral de oro de arsenopirita simbiótico. Porque la arsenopirita se oxida fácilmente.

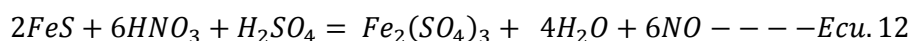
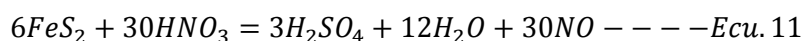
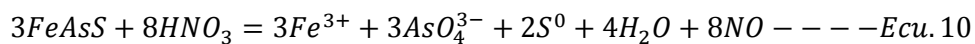
En comparación con el pretratamiento de tostación y la oxidación a presión, el tratamiento con ácido tiene un costo bajo. Aun así, este método aún no se ha utilizado en aplicaciones industriales debido a algunos problemas de tecnología y equipo.

3.7 Cloración Húmeda

La cloración húmeda utiliza cloro (o cloro oxidante) para eliminar el mineral de oro refractario que contiene arsénico. Es un método eficaz para el mineral de oro refractario al carbono y se utiliza en el preproceso de mineral de oro con alto contenido de arsénico. El Instituto General de Investigación de Minería y Metalurgia de Beijing ha estudiado un mineral de oro refractario con alto contenido de arsénico en Guizhou. Usó cloración de agua para lixiviar el oro y la tasa de lixiviación de oro alcanzó el 91.48%. El alto costo de los cloruros y la corrosión grave de los equipos son los factores clave para restringir la aplicación de la cloración húmeda.

3.8 Método de descomposición de oxidación catalizadora de HNO₃

El ácido nítrico es el oxidante más eficaz para la pirita, la arsenopirita y el sulfuro de metales no ferrosos. En este método, el ácido nítrico oxida la pirita y la arsenopirita como catalizador en condiciones de baja temperatura y presión. Las reacciones son las siguientes:

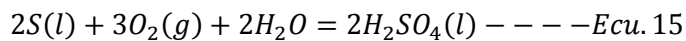
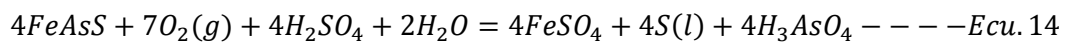
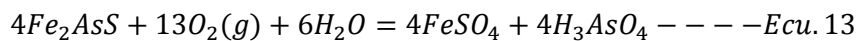


La oxidación de HNO₃ es una tecnología de pretratamiento mejorada. La corporación Cigna ha realizado experimentos en el mineral de oro de la mayoría de los depósitos

del mundo. El resultado mostró que el efecto sobre el mineral que contenía azufre del 1% al 50% fue bueno y el tiempo de pretratamiento de oxidación fue breve. Pero no está más allá del alcance de alta temperatura y presión. Y el problema de la regeneración del ácido nítrico no se ha resuelto. La superioridad de la tecnología aún no ha sido confirmada por las prácticas de producción industrializada.

3.9 Oxidación a Presión

El proceso de oxidación a presión es más maduro, oxida y descompone el sulfuro que contiene oro para producir oro expuesto a partir de minerales en condiciones de alta temperatura y presión. Las principales reacciones químicas son:



El azufre puede envolver la liberación de oro nuevamente en la reacción y es malo para la lixiviación por cianuración. Las altas temperaturas y presiones son buenas para evitar la generación de azufre.

El proceso puede llevarse a cabo no solo en medio ácido sino también en medio alcalino. También se ocupa de minerales en bruto y concentrados. Tiene las siguientes ventajas: primero, producto de oxidación soluble y reacción de descomposición completa; segundo, no liberar gases nocivos; tercero, adecuado para una gran fábrica de oro. Las desventajas son los altos requisitos para la calidad de los equipos y materiales, los riesgos de seguridad, la operación y el mantenimiento cuidadosos. Cuando las condiciones están mal controladas, puede producir azufre, afectar el proceso

y reducir la recuperación del oro. El método no es apropiado para el mineral de oro refractario que contiene carbono orgánico.

3.10 Preoxidación Bacteriana

La investigación de la peroxidación bacteriana es bastante activa. La tecnología comenzó a procesar minerales en la década de 1950 y, al principio, lixiviaba para recuperar cobre a partir del mineral de cobre de baja ley o del mineral de cobre marginal. A mediados de la década de 1980, se construyó en Sudáfrica la primera planta comercial que aplicaba oxidación bacteriana para pretratar minerales de oro refractarios. Después de la oxidación bacteriana, la descomposición del sulfuro, el arsénico entra en la solución para eliminar el arsénico. El proceso se muestra en la Fig.

4. Las reacciones son las siguientes:

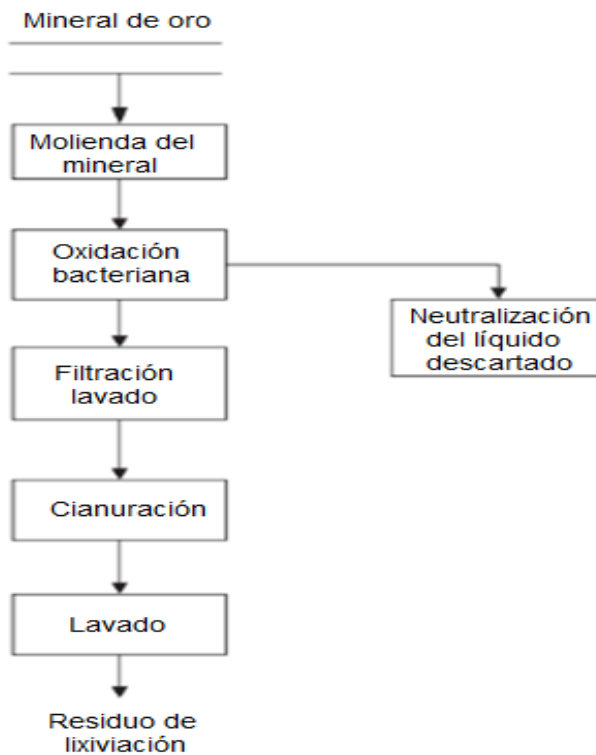
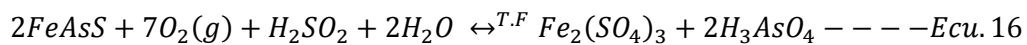
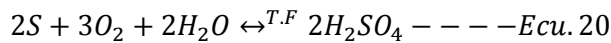
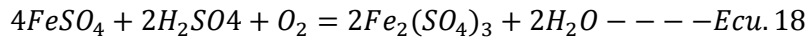
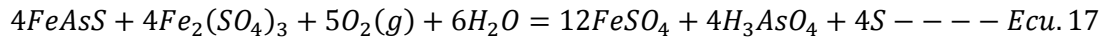


Figura 5: Diagrama de bloques de la preoxidación bacteriana.

El sulfato férrico es un oxidante fuerte que se produce en la reacción y reacciona con el sulfuro arsénico.



Las ventajas son pequeña inversión, bajo costo, método simple, fácil operación, sin contaminación ambiental, etc. La peroxidación bacteriana también se puede usar en arsénico que contiene minerales de baja ley, lo que aumenta en gran medida la tasa de lixiviación de la lixiviación en pilas. Con la contaminación ambiental cada vez más grave, hoy en día, la oxidación bacteriana se denomina "proceso metalúrgico verde" y es popular para convertirse en una nueva esperanza para el futuro de la ingeniería metalúrgica.

El proceso de oxidación bacteriana para lixiviar oro se divide aproximadamente en tres etapas: (1) usar medio de cultivo de bacterias para cultivar thiobacillus ferroxidans, etc. y preparar la solución de lixiviación de bacterias de ácido sulfúrico de Ph=1.5–2.5; (2) bacterias que catalizan, oxidan y eliminan el arsénico y el azufre; (3) el residuo de la cianuración del pretratamiento (u otros métodos) para lixiviar el oro, la solución del pretratamiento se puede reciclar después de la activación bacteriana. El diagrama de flujo del proceso es el siguiente.

Sin embargo, el proceso de oxidación bacteriana todavía tiene algunos defectos que mejorar, como la baja densidad de la pulpa, la fácil corrosión del hierro, los requisitos de tolerancia a la temperatura de las bacterias y la baja velocidad de procesamiento.

A. D. Bailey, etc. han ideado una biooxidación por lotes para aumentar la densidad de la pulpa. Hizo que la densidad de la pulpa alcanzara el 40% o incluso el 50%, se aplicó a mineral de oro refractario con sulfuro de bajo grado.

A. Mazuelos, etc. han diseñado un reactor de lecho empacado inundado.²⁵) El reactor separa la oxidación bacteriana en Fe^{+2} de la oxidación bacteriana y de hierro férrico en minerales refractarios de oro, y mejora la eficiencia del biorreactor. El instituto de Microbiología de la Academia de Ciencias de China ha realizado muchas investigaciones sobre la oxidación bacteriana. En 1980, el instituto realizó pruebas en concentrados de mineral de oro y arsénico para eliminar el arsénico en Guangxi.

3.11 **Análisis del Proceso Propuesto**

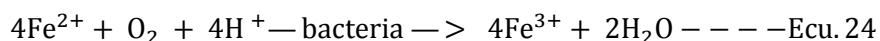
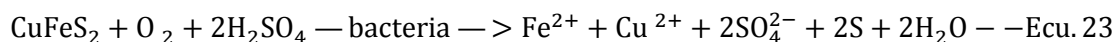
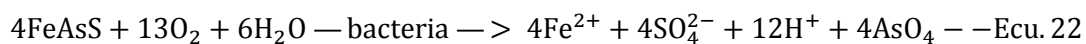
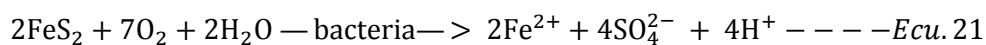
Durante los últimos cien años, la cianuración ha sido el método más común para la extracción de oro de mineral aurífero o concentrado debido a su estabilidad química, alta tasa de lixiviación y bajo costo. El riesgo, sin embargo, la toxicidad del cianuro ha generado una creciente preocupación ambiental y pública sobre su uso. Mientras tanto, Los minerales de oro refractarios, como los minerales que contienen carbono y cobre y los minerales encapsulados, son difíciles de lixiviar con cianuro. Sobre esta base, varios reactivos de lixiviación sin cianuro como el cloruro, la tiourea y el tiosulfato han sido propuestos y ampliamente estudiados en las últimas décadas. Se demostró que el tiosulfato en presencia de amoníaco y cobre (II) es un reactivo alternativo adecuado al cianuro para la lixiviación que contiene carbono y minerales que contienen cobre. El tiosulfato no solo es barato y no tóxico, sino que también puede formar complejos de

oro estables. También es adecuado para la lixiviación de minerales de oro oxidados típicos.

Sin embargo, con la lixiviación de ciertos minerales sulfurados con tiosulfato, estudios previos han demostrado que mientras que se consume una gran cantidad de tiosulfato, solo se obtiene una pobre tasa de lixiviación. Se cree que los minerales sulfurados tienen una fuerte afinidad por las especies de azufre acuoso y propiedades semiconductoras, que pueden acelerar la reacción entre el tiosulfato y el oxígeno a través de la banda de conducción de los sulfuros. En particular, el oro fino las partículas que están encapsuladas dentro de minerales sulfurados compactos no pueden ser extraídas por cianuro o tiosulfato. La extracción de oro a partir de muestras minerales de sulfuro auríferos depende no solo del comportamiento de disolución de oro, sino también, críticamente, en el comportamiento de los minerales asociados. Por lo tanto, para extraer oro más fácilmente, la red de sulfuro debe oxidarse y descomponerse. Los pretratamientos de minerales de oro refractarios, como tostación, oxidación química, oxidación a presión, molienda ultrafina u oxidación biológica se pueden utilizar para exponer el encapsulado oro y permitir un aumento en la tasa de recuperación de oro.

Extensas campañas de laboratorio y a escala piloto han demostrado la capacidad de pretratamiento de la biooxidación para mineral de oro finamente diseminado encapsulado refractario. En comparación con la tostación, la oxidación química o la presión oxidación, la biooxidación tiene las ventajas de bajo costo, bajos requisitos de equipo, fácil control, baja energía consumo y respeto al medio ambiente. El mecanismo de biooxidación es muy complejo. proceso en el que los minerales de sulfuro (como la pirita (FeS_2), arsenopirita (FeAsS) y calcopirita (CuFeS_2) puede ser oxidado a hierro

férrico, sulfato o azufre elemental, ya sea directa o indirectamente, como se expresa en las Ecs. (21–24).



La mayoría de los minerales de sulfuro y las impurezas (como Cu, As, Sb, Zn y Ni) se pueden disolver y eliminar mediante biooxidación y múltiples lavados.

A pesar de que se ha estudiado la lixiviación con cianuro y pretratamiento con tiosulfato en varios minerales de sulfuro, rara vez tiene una investigación detallada que haya sido reportado sobre la mineralogía del proceso de lixiviación de minerales/concentrados. Por lo tanto, la presencia y asociación de oro dentro del concentrado fueron investigadas por un detallado estudio mineralógico. Además, según las características del concentrado, un medio ambiente y Se propone tecnología eficiente. El concentrado de sulfuro refractario fue pretratado por biooxidación. Luego tiosulfato se utilizó para reemplazar la cianuración para la extracción de oro. En las pruebas de lixiviación con tiosulfato, los efectos de las concentraciones de Se investigaron el tiosulfato, el ion de cobre, el amoníaco y el sulfito en la extracción de oro.

CAPITULO IV

METODOLOGIA EXPERIMENTAL DE LA INVESTIGACIÓN

Los minerales de oro, de acuerdo a su forma de beneficio, se pueden clasificar en términos generales como "free milling o minerales con oro libre" y "refractarios" según su respuesta a la lixiviación con cianuro. Se puede lograr fácilmente una recuperación de oro de >90 % con una lixiviación con cianuro convencional de minerales de molienda libre (free milling). Sin embargo, los minerales de oro refractarios a menudo se caracterizan por las bajas extracciones de oro (<50-80%) en la lixiviación con cianuro, el modo de presencia y asociación de oro y materia carbonácea presente, por esta razón queremos desarrollar el proceso de investigación experimental con la finalidad de demostrar nuestras hipótesis desde el punto de vista experimental, para poder establecer las conclusiones finales de este estudio.

4.1 Métodos de Investigación

4.1.1 Materiales

El concentrado de mineral aurífero refractario, fue obtenido a partir del mineral muestreado de uno de los yacimientos de la Empresa Minera Don Rafo, el cual fue procesado íntegramente en una planta piloto de flotación, siendo el material principal para nuestro trabajo experimental.

Como reactivos a emplear en los experimentos se han considerado:

- ✓ Mezcla bacteriana HQ0211 (Acidithiobacillus ferrooxidans, Ferroplasma acidiphilum, Leptospirillum ferriphilum)
- ✓ Medio de cultivo (mezcla de sales inorgánicas).

- ✓ H_2SO_4
- ✓ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- ✓ NH_4OH
- ✓ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- ✓ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- ✓ Na_2SO_3
- ✓ Agua desionizada

4.1.2 Equipos

Para la biooxidación de los minerales refractarios se empleará en un reactor de biooxidación continua multietapa, un phmetro digital, sistema de agitación magnética, sistema de filtrado, secado. Para la lixiviación con tiosulfato un matraz de tres bocas de 1,0 L como reactor experimental discontinuo con un volumen de trabajo de 0,8 L un phmetro digital, sistema de agitación magnética. Para los análisis químicos de soluciones y sólidos: equipo de espectroscopia de absorción atómica, equipo de difracción de rayos X y microscopio electrónico de barrido.

4.1.3 Método

Las muestras de concentrados de mineral refractario aurífero, luego de haber sido obtenido en una planta piloto de flotación, son almacenadas y conducidas al laboratorio hidrometalúrgico, en primer lugar, se corren las pruebas de biooxidación, luego el residuo es procesado por lixiviación con tiosulfato, con las especificaciones y parámetros de acuerdo a la planificación experimental.

4.2 Procedimiento Experimental

4.2.1 Materiales

La muestra de concentrado aurífero se obtuvo por flotación de mineral sulfurado aurífero originario de la Planta Don Rafo – Nueva Bonanza. El concentrado se molió en un molino de bolas de laboratorio. Posteriormente, el concentrado del molino de bolas se secó a 60 °C durante 24 h. Análisis del tamaño de partícula de la muestra molida por un láser de mejor tamaño de partícula El analizador mostró que el 86% en peso de las partículas de la muestra eran más pequeñas que 38 µm. El contenido de oro fue determinado por ensayo al fuego, y otros elementos fueron determinados por ensayo de fuego o espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente (ICP-OES).

La Tabla 2 muestra el análisis de la composición elemental del concentrado aurífero. la muestra fue determinada como rico en oro, con un contenido de 28.9 g/t Au. El concentrado consistía predominantemente en 35.1% S, 37.9% Fe y 15% Si. El análisis de difracción de rayos X (Fig. 1) indica que la pirita, la arsenopirita y el cuarzo son los principales minerales en el concentrado con trazas de calcopirita, galena y esfalerita.

Tabla 2: Análisis de composición elemental del concentrado.

Elemento	Mg	Al	Si	S	Ca	Cr
Muestra (%)	2.46	5.68	15	35.1	1.68	0.12
Fe	Cu	Zn	As	Pb	Au (g/t)	Ag (g/t)
37.9	0.07	0.16	1.72	0.11	28.9	20.1

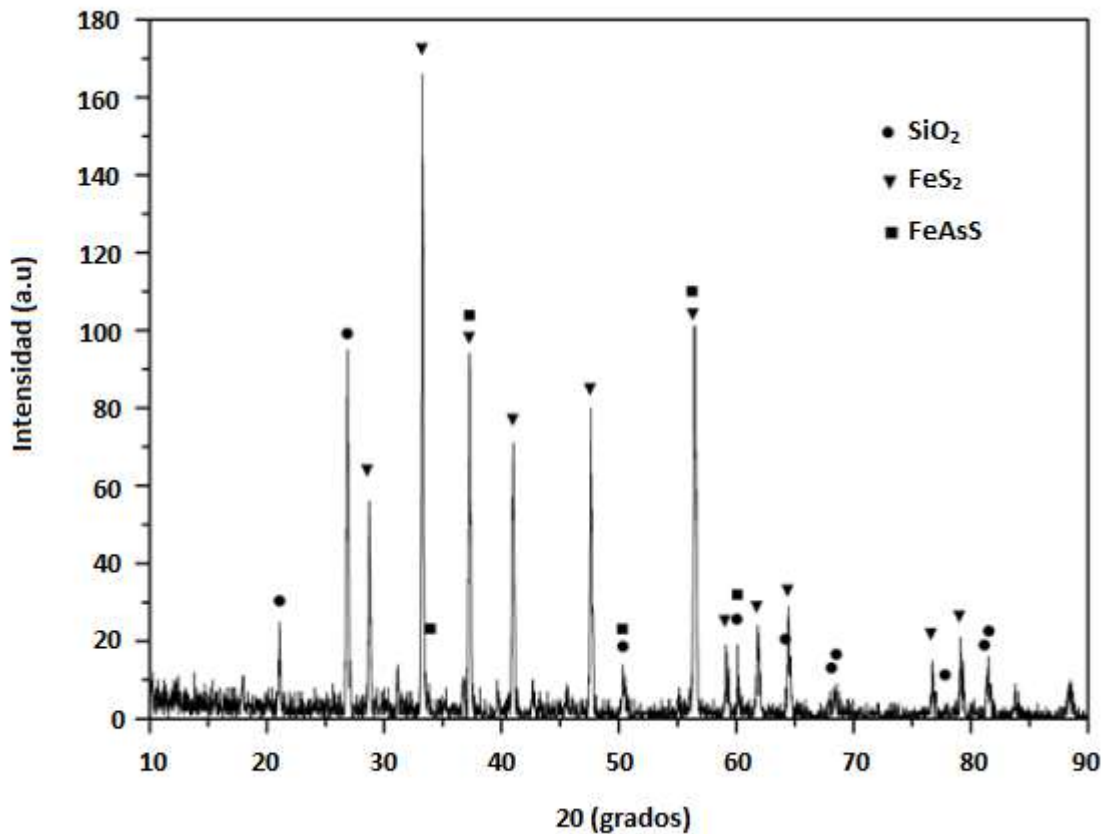


Figura 6: Patrón XRD del concentrado

4.3 Caracterización mineralógica del concentrado

Los resultados de un análisis mineralográfico de una sección pulida de muestras de concentrado por SEM-EDS son representado en la Fig. 7. Los minerales de oro son predominantemente oro nativo, cuyo oro en partículas y submicroscópico fue las solo dos fracciones. La pirita y la arsenopirita son los principales minerales auríferos. Partículas de oro microgranuladas ($< 10 \mu\text{m}$) se encapsularon completamente en la pirita, como se muestra en la Fig. 7 (a y b). Parte del oro monomérico se distribuyó en forma de oro intergranular en el borde de pirita de arsénico (Fig. 7c). Mientras tanto, solo una pequeña cantidad de oro. estaba presente en el concentrado en forma de monómero de oro (Fig. 7d). Según el análisis estadístico, el oro submicroscópico con un tamaño de partícula $< 1 \mu\text{m}$ representa el 39.28%,

y el 79% de las partículas de oro fueron encapsulado en concentrado. Por lo tanto, de acuerdo con los resultados del análisis de composición elemental (Tabla 2), análisis de difracción de rayos X (Fig. 6) y análisis minerográfico (Fig. 7), se puede ver que la muestra tiene un alto contenido de azufre concentrado de oro tipo envuelto de tamaño fino.

Además, hay una gran cantidad de minerales en formas entrelazadas y encapsuladas. pirita granular xenomorfo se disemina en ganga mineral, como se muestra en la Fig. 7. El tamaño de partícula de pirita en el mineral de ganga es irregular y parte de la pirita fina y microfina es difícil de disociar en monómero durante el proceso de molienda. Numerosas partículas brillantes de arsenopirita fueron incluidas o intercrecidas con grandes fragmentos granulares de pirita, lo que aumentó aún más la dificultad de lixiviación del concentrado.

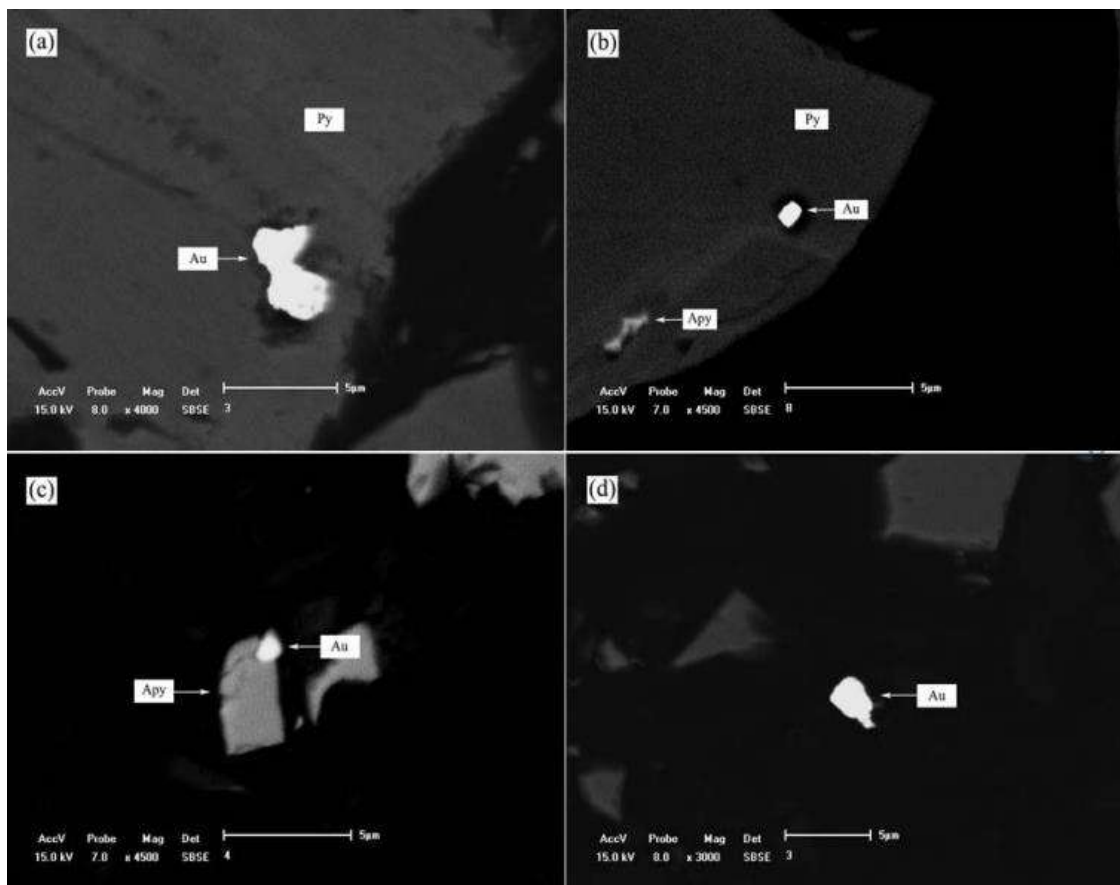


Figura 7: Fotografía microscópica del concentrado SEM (Au; Oro; Py: Pirita; Apy: Arsenopirita)

4.4 Pruebas de lixiviación

Se realizó una prueba de lixiviación con cianuro para estimar la naturaleza refractaria del concentrado y contrastarlo con otras técnicas de lixiviación. Se usó un concentrado molido con bolas de 220 g para la lixiviación con cianuro bajo condiciones experimentales, condiciones que se muestran en la Tabla 2. Se tomaron muestras de solución a intervalos regulares para la medición de concentración de CN^- durante 48 h de lixiviación.

La concentración de cianuro se mantuvo en 3.0 g/L. La concentración de cianuro se determinó realizando una titulación con nitrato de plata, usando rodanina y timolftaleína como indicador. Después 48 h, el residuo de cianuro se lavó y se secó para el análisis de oro.

En el presente estudio se utilizaron bacterias HQ0211, que fueron cultivadas y domesticadas por un Laboratorio de Biometalurgia, adquirido por la empresa materia de este estudio. Las bacterias se cultivaron en un medio 9K que contenía 3.0g/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 0.1 g/L KCl, 0.5 g/L K_2HPO_4 , 0.5 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.01 g/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, y 9 g/L $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ como fuentes de energía para las bacterias. La biooxidación se llevó a cabo en un reactor de biooxidación continua multietapa durante 120 h. con una densidad del 15% (p/v), 46 °C, aireación de 60 L·min⁻¹ y una velocidad de agitación de 750 rpm. Durante el proceso de lixiviación, el pH de la pulpa se monitoreó continuamente y se mantuvo en 1.5 usando H_2SO_4 . Después de la biooxidación, el El residuo de oxidación se filtró a través de múltiples lavados y se secó a 60 °C durante 24 h.

La muestra de concentrado biooxidado se lixivió con tiosulfato en un matraz de tres bocas de 1.0 L como un reactor experimental batch con un volumen de trabajo de 0.8

L. Una cantidad moderada de tiosulfato de sodio pentahidratado se disolvió en agua destilada. Luego ciertas cantidades de solución de amoníaco, sulfato de amonio y sulfato de cobre pentahidrato se añadieron a la solución, seguido de una cantidad pesada de sulfito. Un medidor de pH digital (Rex, PHS-3E) para medir el pH. El pH inicial de la solución de lixiviación se ajustó a 10-10,5 por hidróxido de sodio o ácido sulfúrico. Luego la mezcla se agitó mecánicamente (IKA, RW20 digital) a 400 rpm.

Los reactivos utilizados en este estudio fueron todos analíticamente puros. La concentración de oro se determinó por espectroscopía de absorción atómica (AAS) (HITACHI, Z-2300). La concentración de tiosulfato se midió con un método yodométrico con la adición de EDTA (0,1 M) para eliminar la interferencia de la tetraamina cúprica complejo y formaldehído (20%) para eliminar la interferencia del sulfito. Las morfologías y cualitativas las composiciones de concentrado, residuo de cianuro y residuo de biooxidación se determinaron por difracción de rayos X (RigakuD/max 2550VB+18kW) y microscopía electrónica de barrido (SHIMADZU, CamScan SSX-550).

Tabla 3: Condiciones experimentales para la cianuración del concentrado.

Parámetro	Cianuración
Temperatura, °C	20
Tiempo de lixiviación, h	48
Concentración de NaCN, g/l	3.0
pH	10-10.5
Densidad de la pulpa, (w/v), %	25
Agitación, rpm	950

4.5 Presentación y Discusión de Resultados

4.5.1 Prueba de cianuración

Las pruebas de cianuración revelaron que solo el 59.86% del oro puede lixiviarse del concentrado refractario, incluso aunque el 86% en peso de las partículas de la muestra eran más pequeñas que 38 μm . Para averiguar las causas de la baja tasa de lixiviación, El análisis minerográfico del residuo de lixiviación con cianuro fue realizado por SEM-DES. Como se muestra en la Fig. 8, hubo poco monómero de oro visible. Las partículas de oro restantes quedaron todas atrapadas en la arsenopirita y la pirita después 48 horas de lixiviación. Mientras tanto, era difícil disociar el oro de los minerales de sulfuro, porque el tamaño de la mayoría de la inclusión de partículas de oro fue $< 3 \mu\text{m}$. Por lo tanto, era difícil hacer reaccionar el cianuro con inclusión de oro y luego disolverlo en el lixiviado. Finalmente, la ley de oro en el residuo de lixiviación seguía siendo de 11.6 g/t.

Según el análisis anterior, la muestra es un concentrado de oro refractario de tipo tamaño fino envuelto con alto contenido de azufre. Para reciclar las partículas y el oro de inclusión submicroscópica, los minerales de sulfuro en el concentrado deben ser descompuestos.

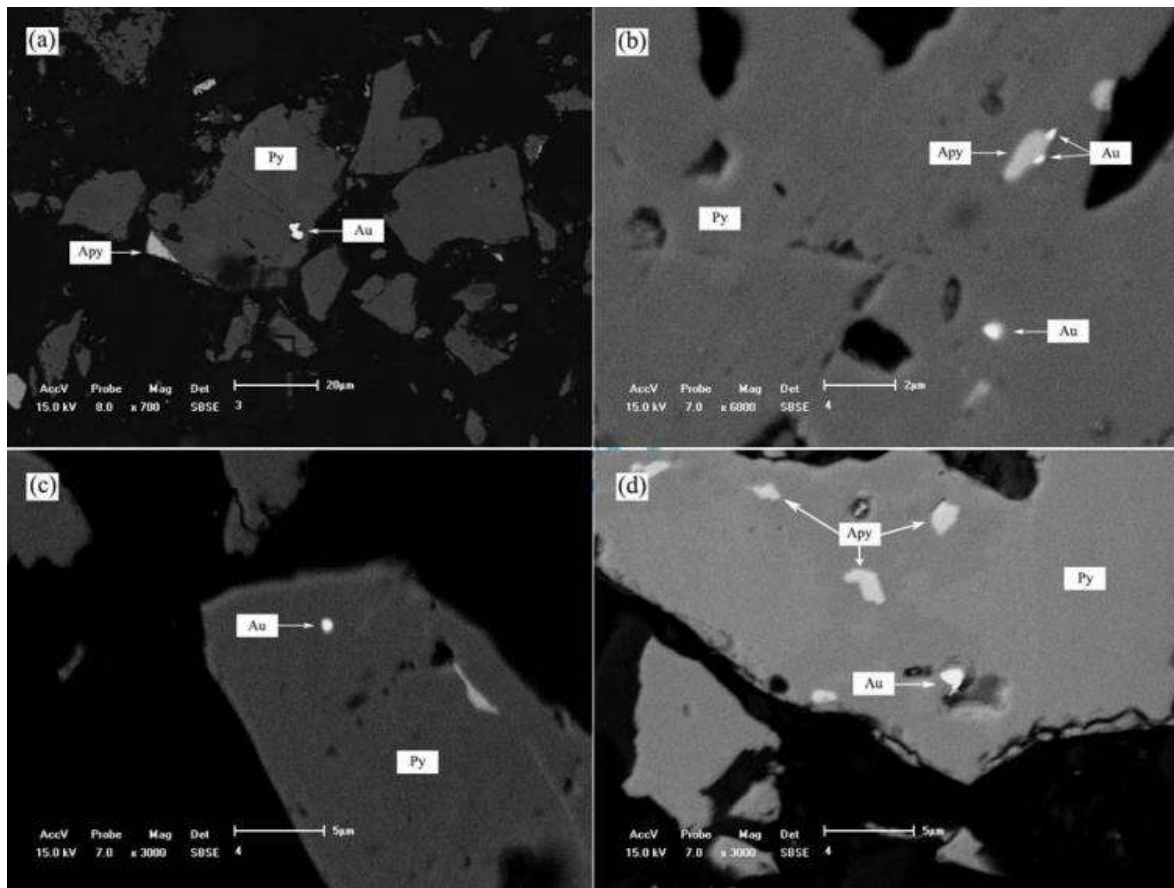


Figura 8: Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) del residuo de lixiviación de cianuro (Au: Oro; Py: Pirita; Apy: arsenopirita;)

4.5.2 Pretratamiento de biooxidación del concentrado

Se utilizó un proceso de biooxidación para pretratar el concentrado para garantizar que el oro fuera apto para la lixiviación. Después biooxidación, el 92% de las partículas minerales eran menores de 38 μm . El comportamiento de oxidación de los elementos principales. (As, Fe, S) del concentrado se evaluó durante el experimento de biooxidación, como se muestra en la Tabla 4. Casi toda la pirita y arsenopirita se oxidaron en 120 h. Parte de la pirita no se descompuso porque estaba atrapado en la ganga (cuarzo) y no pudo entrar en contacto con la solución, como se muestra en la Fig. 9 (b). De acuerdo con la Tabla 4, tal cual se oxida más rápido que el Fe, porque el

potencial de oxidación de la arsenopirita es menor que el de la pirita. Después del proceso de biooxidación, el contenido de S, As y Fe en el residuo de biooxidación alcanzó 19.8, 0.13 y 6.97% en peso, respectivamente y el contenido de Au fue de 55.60 g/t.

La Fig. 9 muestra una imagen SEM de una sección pulida de un residuo de biooxidación. El tamaño de partícula de los minerales en el residuo fue significativamente menor que el del concentrado original. La proporción de ganga (cuarzo) fue aumentado, debido a la oxidación y disolución de los minerales de sulfuro. Como se muestra en la Fig. 9(c) y la Fig. 9(d), la pirita se oxidó en jarosita y casi todo el oro de inclusión quedó expuesto. La proporción de monómero de oro fue más del 86% en el residuo de biooxidación. La reducción del tamaño de las partículas y el aumento de la exposición al oro fueron beneficiosos al proceso de lixiviación de oro.

Tabla 4: Comportamiento de biooxidación de los principales elementos (As, Fe, S) en diferentes etapas.

	Primera etapa	Segunda etapa	Tercera etapa
Tiempo de oxidación/h	72	24	24
Eh (Ag/AgCl)/mV	600-627	610-641	652-686
Concentración bacteriana/(x10 ⁸ , cell/mL)	12-13	13-13.8	15.3-15.9
Tasa de oxidación As/%	88.56	92.28	96.44
Tasa de oxidación S/%	54.73	61.29	72.8
Tasa de oxidación Fe/%	68.79	76.87	90.03

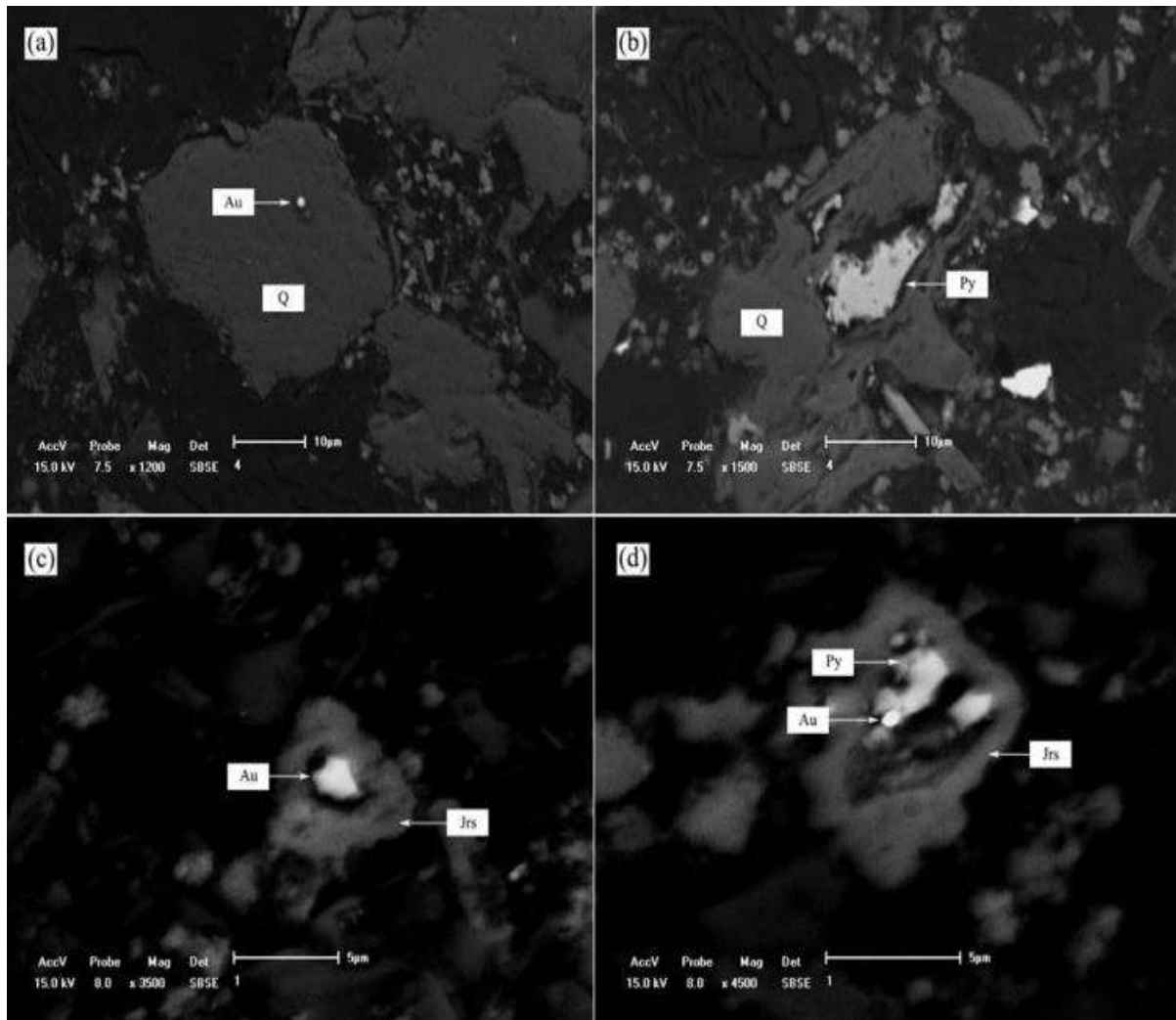


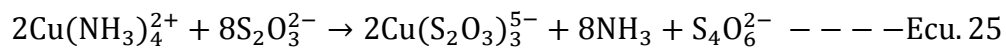
Figura 9: Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) del residuo de lixiviación por biooxidación (Au: oro; Py: pirita; Apy: arsenopirita; P: cuarzo; Jrs: jarosita)

4.5.3 Lixiviación de tiosulfato después del tratamiento

4.5.3.1 Efecto de la concentración de tiosulfato

El efecto de la concentración de tiosulfato en la extracción de oro se muestra en la Fig. 10. La eficiencia de lixiviación de oro fue aumentada a 80.99% en tiosulfato 0.18 M después de 24 h de lixiviación. Cuando la concentración de tiosulfato fue superior a 0.18 M, la eficiencia de extracción de oro disminuyó con el aumento de la

concentración. Mientras tanto, el tiosulfato el consumo aumentó con el aumento de la concentración. Como se muestra en la Fig. 10, el consumo de tiosulfato fue muy baja cuando se usó tiosulfato 0.06 M. Se puede considerar que la cantidad de sulfito es excesiva en comparación con la de tiosulfato, que inhibe en gran medida el consumo de tiosulfato. Cuando la concentración de tiosulfato fue de 0.18 M, el consumo de tiosulfato alcanzó 0.0198 mol. Una mayor concentración de tiosulfato puede reaccionar con el cobre (II) más fácilmente lo que aumenta el consumo de tiosulfato, como se muestra en la ecuación. (25). Además, la descomposición Los productos de tiosulfato, como politionato, tritionato y tetracionato, pueden reducir la concentración de Cu (II), que en a su vez conduce a una disminución en la eficiencia de lixiviación de oro. Por otro lado, la descomposición podría producir 9 precipitados Au⁺ de la solución y forman una capa de pasivación precipitada sobre la superficie del oro en diversos grados. En consecuencia, la concentración de tiosulfato y los productos de descomposición del tiosulfato deben mantenerse bajo para evitar la pérdida de oro de la solución.



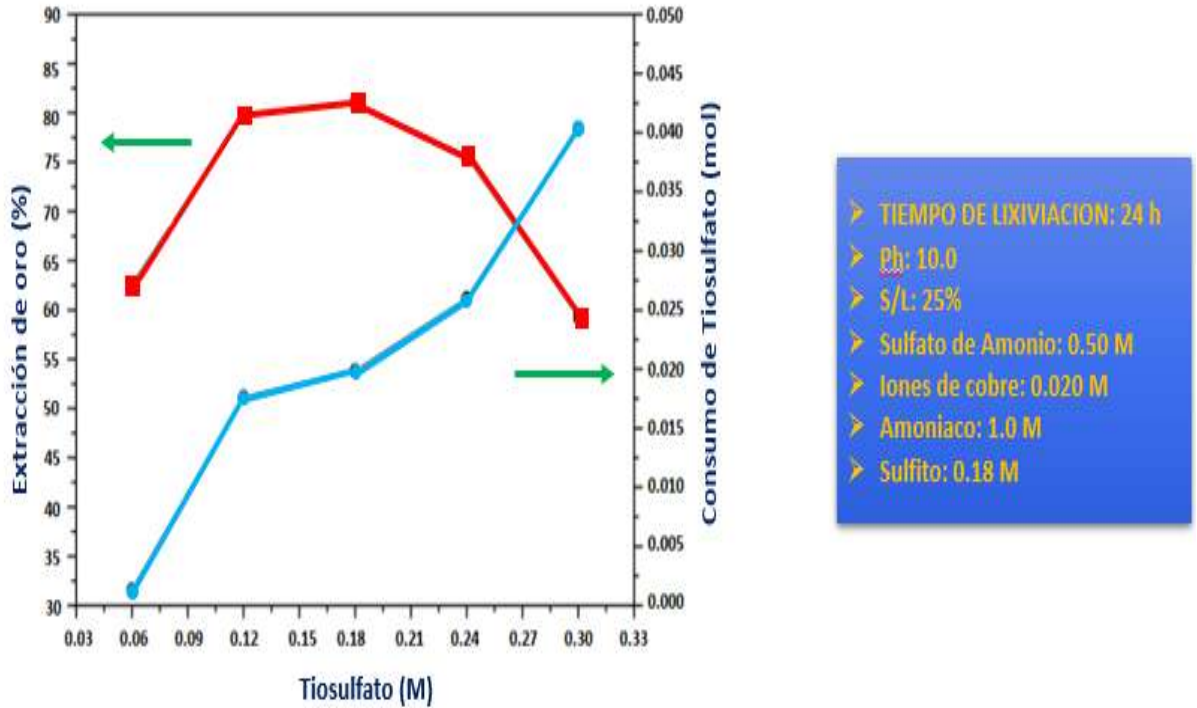
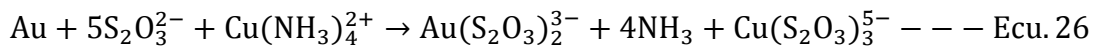


Figura 10: Efecto de la concentración de tiosulfato en la extracción de oro y consumo de tiosulfato

4.5.3.2 Efecto de la concentración de iones de cobre

Se investigó el efecto de la concentración de iones de cobre en la extracción de oro. Como puede verse en la Fig. 11, cuando la concentración de iones de cobre es < 0.02 M, la eficiencia de lixiviación de oro y el consumo de tiosulfato aumentan con concentración. Esto se debe a que el ion de cobre es beneficioso para la formación del complejo de tetraamina cúprica, que puede aumentar la oxidación del oro. Mientras tanto, una mayor concentración de cobre (II) aumenta la reacción probabilidades con tiosulfato, y por lo tanto más tiosulfato es oxidado y descompuesto por cobre (II), como se muestra ecuación (25). La disolución del oro se produce a través de la siguiente ecuación (26):



Cuando la concentración inicial de iones de cobre aumentó aún más de 0.020 a 0.036 M, la concentración de oro posteriormente disminuyó y el consumo de tiosulfato aumentó continuamente. En particular, el consumo de tiosulfato aumentó rápidamente cuando la concentración de cobre (II) aumentó de 0.28 M a 0.36 M. Puede ser considerada que parte del oro lixiviado se precipita. El cobre (II) no solo oxida el tiosulfato a tetrionato, sino que también oxida aún más el tetrionato a tritronato y sulfuro. Por lo tanto, una mayor concentración de cobre eventualmente conduce a la formación de precipitados insolubles y pasivación de la superficie de oro con productos como Au_2S , CuO , Cu_2O , Cu_2S , tetrionato y tritronato. El experimento indicó que la eficiencia de lixiviación de oro alcanzó el máximo cuando se utilizaron iones de cobre 0.020 M en el proceso de lixiviación, y el consumo de tiosulfato era sólo 0.0149 mol.

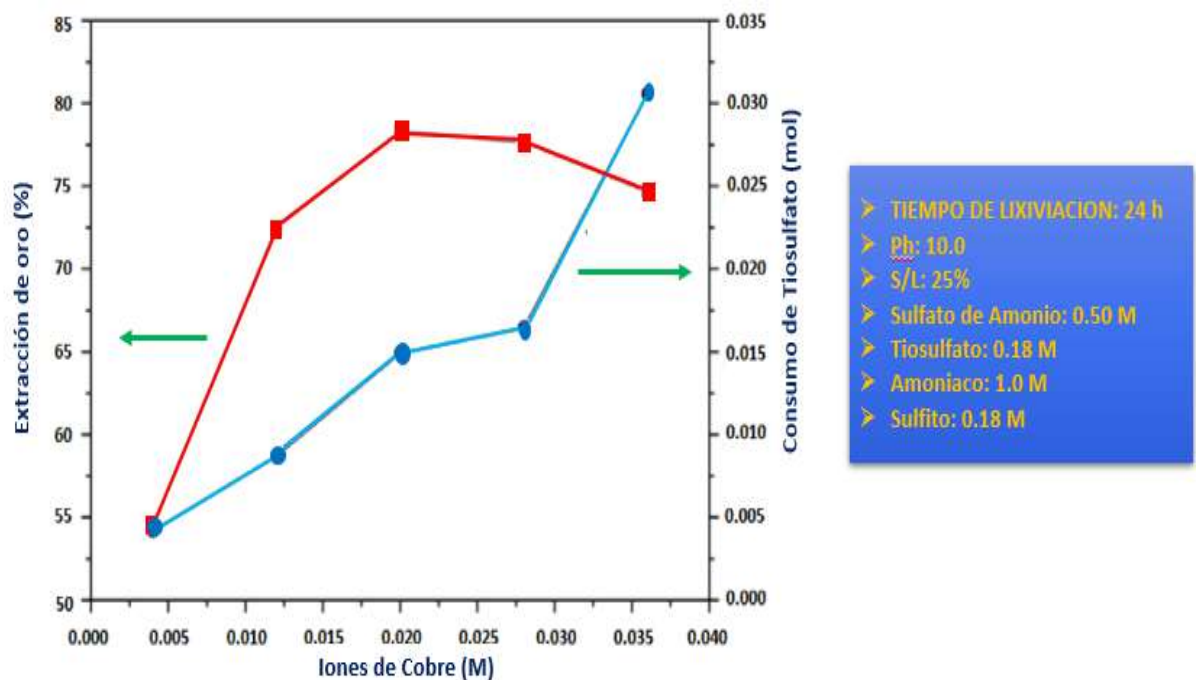


Figura 11: Efecto de la concentración de iones de cobre en la extracción de oro y el consumo de tiosulfato..

4.5.3.3 Efecto de la concentración de amoníaco

El efecto de la concentración de amoníaco en la extracción de oro se muestra en la Fig. 12. Es evidente que la extracción de oro aumenta significativamente con un aumento en la concentración de amoníaco hasta 1.0 M. El amoníaco juega un papel importante en estabilización de cobre(II) mediante la formación de complejos de cobre(II)-amina en condiciones alcalinas. Cuando la concentración de amoníaco es bajo, el exceso de cobre (II) se precipita o reacciona con tiosulfato para formar precipitados insolubles y pasivación de la superficie de oro. Sin embargo, cuando la concentración de amoníaco es superior a 1.0 M, la lixiviación de oro baja la tasa. Esto se debe a que el exceso de amoníaco disminuye el potencial de reducción del par cobre(II)/cobre(I), disminuyendo así la capacidad oxidante del cobre (II). Mientras tanto, una alta concentración de amoníaco conduce a valores de pH más altos que reducen la estabilidad termodinámica de $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ y $\text{Cu}(\text{S}_2\text{O}_3)_3^{5-}$, y amplía las regiones de estabilidad termodinámica de CuO y Cu_2O . La precipitación de CuO y Cu_2O dificulta el ataque del tiosulfato cubriendo la superficie de oro. Además, el exceso de amoníaco puede empujar el equilibrio de la ecuación (27) a la izquierda, reduciendo la estabilidad de oro en solución acuosa. Como se muestra en la Fig. 12, el amoníaco tiene poco efecto sobre el consumo de tiosulfato. Tanto las concentraciones de amoníaco más altas como las más bajas no conducen a la estabilidad del cobre (II) en la solución, lo que finalmente conduce a una reducción en el consumo de tiosulfato. El cobre (II) podría formar una amina estable de cobre (II) complejos bajo 1.0 M de amoníaco. Los complejos de cobre y amoníaco adecuados no solo aumentan la lixiviación de oro eficiencia, pero también aumenta el consumo de tiosulfato a 0.0179 mol. Por lo tanto, se consideró amoníaco 1.0 M la concentración óptima de amoníaco y se utilizó para experimentos posteriores.

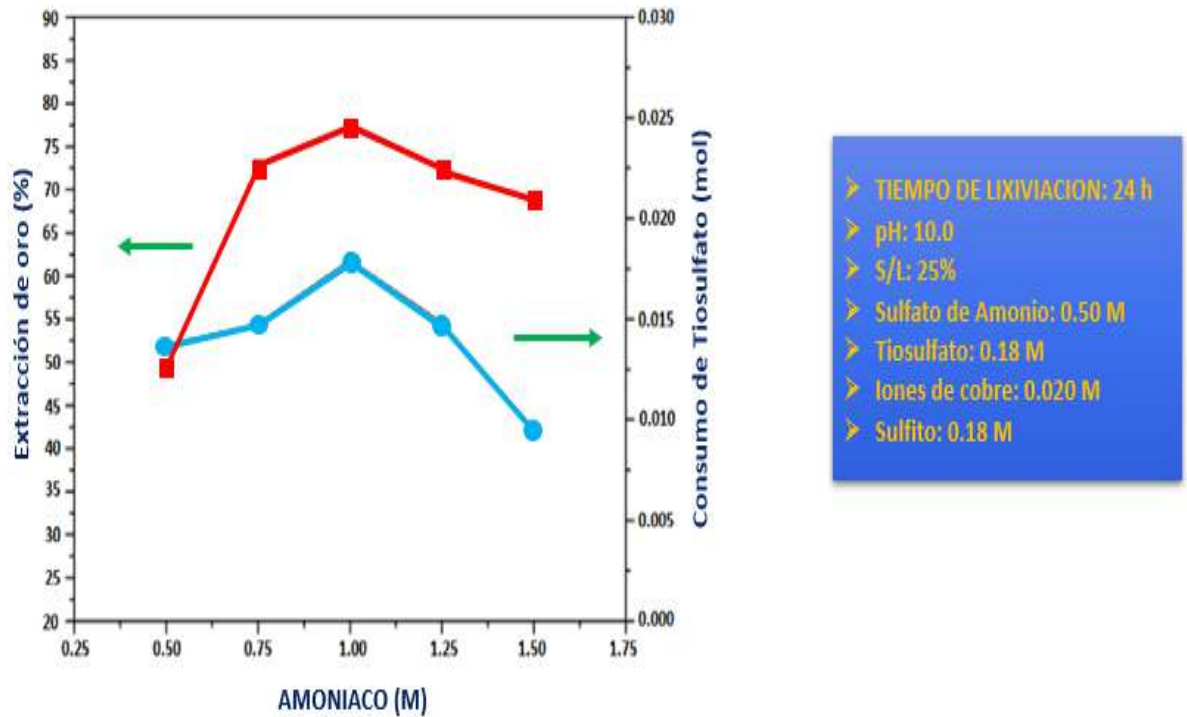
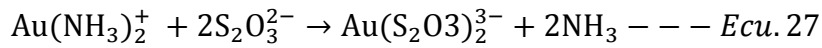
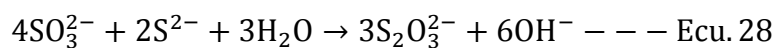
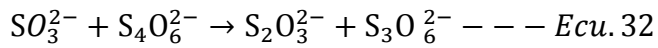
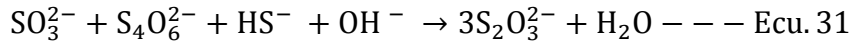
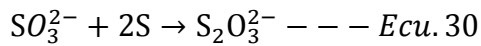
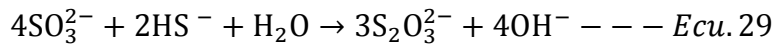


Figura 12: Efecto de la concentración de amoníaco en la extracción de oro y consumo de tiosulfato.

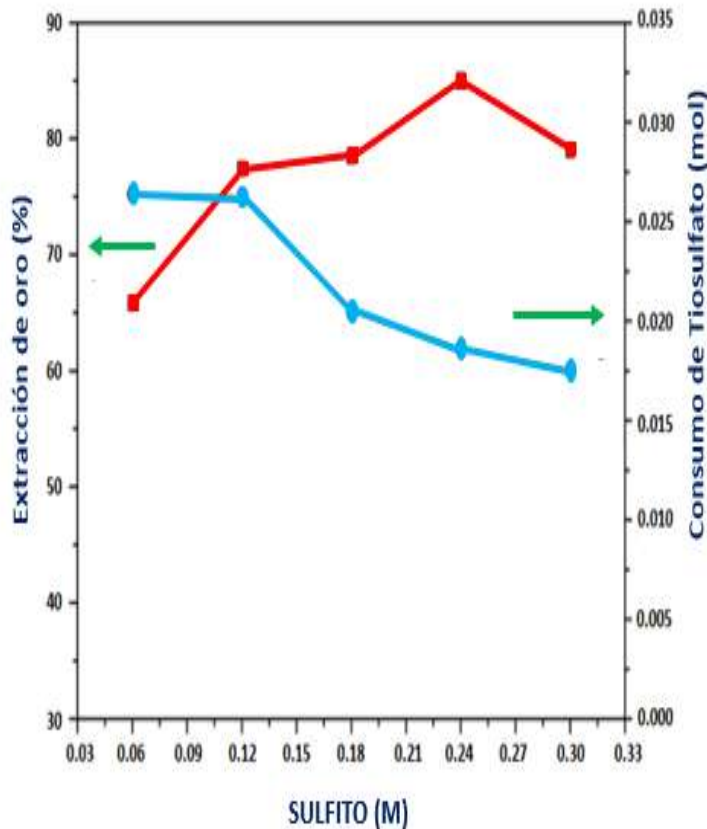
4.5.3.4 Efecto de la concentración de sulfito

Los resultados de la variación de la concentración de sulfito se muestran en la Fig. 13. La extracción de oro aumentó con un aumento en concentración de sulfito de hasta 0.24 M. Esto se debió a la presencia de suficiente sulfito para eliminar el tetrionato, previniendo así la precipitación de oro (Ecs. 31, 32). Mientras tanto, el sulfito de sodio puede reaccionar con S^0 , HS^- y S^{2-} , y luego prevenir la formación de depósitos de azufre y sulfuros en la superficie del oro (Ecs. 28-30).





Con un aumento en la concentración de sulfito de 0.24 a 0.30 M, la eficiencia de lixiviación de oro disminuyó ligeramente. Este es porque el sulfito en alta concentración disminuye el potencial redox, reduciendo el cobre (II) y precipitando el oro de la solución. De acuerdo con la Fig. 13, el consumo de tiosulfato disminuyó con un aumento en el sulfito concentración. El sulfito puede mantener la estabilidad del tiosulfato en el sistema de lixiviación mediante las ecuaciones de reacción. 28–32. El efecto regulador del sulfito es bidireccional, una decisión sobre su uso y determinación del óptimo. la concentración debe basarse en la especie mineral. Por lo tanto, la concentración óptima de sulfito en este caso fue considerado como 0.24 M, en el que la eficiencia de lixiviación de oro final y el consumo de tiosulfato alcanzaron el 85.05% y 0.0186 mol respectivamente.



- TIEMPO DE LIXIVIACION: 24 h
- pH: 10.0
- S/L: 25%
- Sulfato de Amonio: 0.50 M
- Tiosulfato: 0.18 M
- Iones de cobre: 0.020 M
- Amoniaco: 1.0 M

Figura 13: Efecto de la concentración de sulfito en la extracción de oro y consumo de tiosulfato.

Las condiciones óptimas de lixiviación de oro del concentrado biooxidado con tiosulfato son $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.18 M, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.1 M, CuSO_4 0.02 M, amoníaco 1.0 M, pH 10.0, S/L 25% y tiempo de lixiviación 24 h. Sin embargo, solo se obtuvo una eficiencia de lixiviación final del 28.6 % cuando se usó la condición óptima para lixiviar el oro con alto contenido de azufre. concentrarse. La eficiencia de lixiviación de oro del proceso de biooxidación-tiosulfato aumentó en un 29% y un 56.5% en comparación con la cianuración directa y la lixiviación directa del concentrado con tiosulfato, respectivamente.

CONCLUSIONES

1. El análisis mineralógico del proceso del concentrado mostró que todas las partículas de oro eran $< 10 \mu\text{m}$ de tamaño y aproximadamente el 79% del oro estaba encapsulado en pirita y arsenopirita.
2. El pretratamiento de lixiviación por biooxidación puede convertir significativamente las propiedades minerales del concentrado. Casi toda la pirita y la arsenopirita se oxidaron. La proporción de monómero de oro fue más del 86% en el residuo de biooxidación.
3. Se llevaron a cabo experimentos de lixiviación con tiosulfato amoniacal de concentrado de oro oxidado por bacterias afuera. Las concentraciones de tiosulfato, ion cobre, amoníaco y sulfito en el proceso de lixiviación fueron los más importantes factores que influyen en la extracción de oro. La mayor eficiencia de lixiviación de oro de 85.05% fue obtenido después de 24 h usando tiosulfato, cobre (II), concentraciones de amoníaco y sulfito de 0.18 M, 0.02 M, 1.0 M y 0.24 M, respectivamente. La eficiencia de lixiviación de oro de este proceso de biooxidación-tiosulfato aumentó en un 29% y 56,5% en comparación con la cianuración directa y la lixiviación directa del concentrado con tiosulfato.
4. El pretratamiento de biooxidación seguido de la tecnología de lixiviación con tiosulfato amoniacal es muy adecuado para el oro. extracción de concentrado de oro refractario de tipo envuelto de tamaño fino con alto contenido de azufre.

RECOMENDACIONES

1. La propuesta de desarrollar los procesos combinados de biolixiviación y lixiviación convencional de minerales auríferos, necesitan de investigar otras alternativas que faciliten de eliminar las especies mineralógicas o compuestos que impidan se procesen adecuadamente para evitar interferencias cinéticas.
2. Los minerales refractarios de oro como es el caso de este trabajo necesitan de tratamientos especiales para mejorar la recuperación del metal valioso, por esto es necesario continuar realizando investigaciones relacionadas con la optimización tecnológica del procesamiento o beneficio de los minerales de oro, en tal sentido es recomendable indicar a los investigadores, tanto estudiantes como profesores a proseguir con este objetivo.
3. Los estudios que se establezcan deben de ser inducidos para el desarrollo de pruebas experimentales con la finalidad de determinar los procedimientos de aplicación de la tecnología adecuada.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Adams, D. (2016). *Gold Ore Processing: Project Development and Operations*. Elsevier Science & Technology. New York, NY. USA.
2. Botz, M. (2001). *Cyanide Treatment Methods*, in *Mining Environmental Management*. Mining Journal Books. London.
3. CEPECT (1990). "El Oro". Cepect-Concytec, Lima.
4. Dana, H.(1965). "Manual de mineralogía", Editorial Reverté, S.A., Barcelona, España
5. Didier, M and Frenay, J. (1998). *Gold Recovery by Complexation with Thiosulphate and Amino Acids*, International Symposium on Gold Recovery, CIM, Montreal 98, 3-7 May (1998)
6. Gilchirst, J. D. (1978). "Extraction Metallurgy", Pergamon Press, Oxford.
7. Llerena G., López, I. (2018). Cyanide degradation from mining effluent using two reagents: sodium metabisulphite and the metabisulphite mixture with hydrogen peroxide. *Tecciencia*, vol. 13, no. 25, pp. 1–9
8. Marsden,J., House, I. (1993). "The chemistry of gold extraction", Ellis Horwood Ed. , Great Britain.
9. McNulty, T., (2001). Cyanide substitutes. *Mining Magazine*, 2001, Vol 184, Issue 5, pp. 256-261.
10. Misari CH., F.(1993)."Metalurgia Del Oro", CEPECT, Lima - Perú, Tomo I y II.
11. Molleman, E. and Dreisinger, D., (2002). The treatment of copper-gold ores by ammonium thiosulfate leaching. *Hydrometallurgy*, Vol. 66, Issue 1-3, October 2002, pp. 1-21.
12. MUNDO MINERO, (1995). "Oro, Tratamiento De Los Minerales De Oro" Separata del Periódico Mundo Minero, Lima, Perú.

13. Navarro, P., Vargas, C., Villarroel, A., and Alguacil, F.J., (2004), On the use of ammoniacal/ammonium thiosulfate for gold extraction from a concentrate. *Hydrometallurgy*, Vol 65, Issue 1, July 2002, pp. 37-42.
14. Nagy, I y Otros.(1993). "Tratamiento quimico de menas refractarias de oro", NIM, Randburg, South Africa
15. Rosenqvist, T. (1987). "Fundamentos de metalurgia extractiva", Centro Regional de Ayuda Técnica (AID), México.
16. Sohn, H. Y. y Wadsworth, M. E. (1986) "Cinética de los procesos de la metalurgia extractiva". Ed. Trillas, México
17. Van Arsdale, G. (1965). "Hidrometalurgia de los metales comunes", Ed. Uteha, México, 1965.
18. Cyanamid.(1988). Manual De Productos Químicos Para La Minería. Edición Comercial, México.
19. Currie, JM.(1984). Operaciones Unitarias En Procesamiento De Minerales. Trad. por Chia Aquije, J. y Chia Aquije, L., Lima - Perú.
20. Kelly E. , Spottiswood D. (1990). Introducción Al Procesamiento De Minerales. Editorial Limosa S.A., México D.F.
21. Wills, B. A. (1992).Mineral Processing Technology. 5th. Edition, Pergamon Press, Oxford.