



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# **UNIVERSIDAD DE SONORA**

---

## **DIVISIÓN DE INGENIERÍA**

### **POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**TIOSULFATO DE SODIO Y GLICINA-TIOSULFATO  
DE SODIO EN LA LIXIVIACIÓN DE UN MINERAL  
OXIDADO CON VALORES METÁLICOS DE ORO Y  
PLATA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

**MANUEL ARNULFO RAMÍREZ GARZÓN**

**DIRECTOR: DR. GUILLERMO TIBURCIO MUNIVE**

**Hermosillo, Sonora**

**Octubre, 2018**

# Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

# UNIVERSIDAD DE SONORA

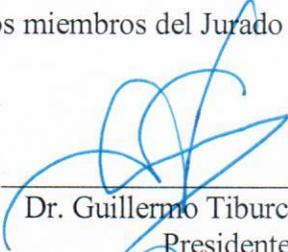
## APROBACION DEL JURADO

de la tesis presentada por:

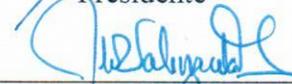
**Manuel Arnulfo Ramírez Garzón**

Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del Jurado y por mayoría de votos la han encontrado satisfactoria.

10/10/2018  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Guillermo Tiburcio Munive  
Presidente

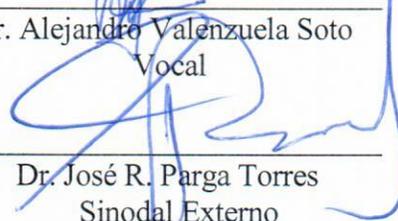
10/10/2018  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Jesús L. Valenzuela García  
Secretario

10/10/2018  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alejandro Valenzuela Soto  
Vocal

10/16/2018  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José R. Parga Torres  
Sinodal Externo



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

## AUTORIZACIÓN DEL EXAMEN DE GRADO

Octubre 22 de 2018.

Por la presente se hace constar que el estudiante: **MANUEL ARNULFO RAMÍREZ GARZON**, ha cumplido satisfactoriamente con los requisitos académicos correspondientes para la realización del Examen de grado del Programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería.

*Abraham Rogelio Martín García*  
DR. ABRHAM ROGELIO MARTIN GARCÍA

COORDINADOR



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

POSGRADO EN  
CIENCIAS DE  
LA INGENIERÍA:  
INGENIERÍA QUÍMICA

## RESUMEN

Uno de los principales problemas en la lixiviación con tiosulfato de sodio, es el alto consumo de este. Esto es causado principalmente por la adición de  $\text{Cu}^{2+}$  en la solución. Los aminoácidos forman complejos con el  $\text{Cu}^{2+}$ , lo que reduce la interacción entre el cobre y el tiosulfato de sodio, por lo tanto, hay una disminución en los consumos del tiosulfato de sodio. Entre los aminoácidos está la glicina, que posee un grupo carboxilo ( $\text{COOH}$ ), un grupo amino ( $\text{NH}_3^+$ ) y un hidrogeno en su cadena lateral. La glicina no es volátil, no es dañina para el medio ambiente o las personas, es de bajo costo y abundante.

Se llevaron a cabo estudios de velocidad de disolución a temperatura ambiente, con diferentes tamaños de partícula, porcentaje de sólidos y concentración de reactivo. Se observó que en la mayoría de las pruebas la presencia de glicina, mejora las extracciones de oro y plata, y bajo ciertas condiciones reduce el consumo de tiosulfato de sodio. Los casos más notables fueron cuando el porcentaje de sólidos es del 25%, y la concentración de tiosulfato de sodio es de 20 g/L y de glicina es de 5 g/L, y cuando el porcentaje de sólidos es del 20% y la concentración de tiosulfato de sodio es de 30 g/L y de glicina es de 5 g/L.

## ABSTRACT

One of the main problems in leaching with sodium thiosulfate is his high consumption. This is mainly caused by the addition of  $\text{Cu}^{2+}$  in the solution. The amino acids complex with  $\text{Cu}^{2+}$  which reduces the interaction between copper and sodium thiosulfate, therefore there is a decrease in the consumption of sodium thiosulfate. Among the amino acids is glycine that has a carboxyl group ( $\text{COOH}$ ), an amino group ( $\text{NH}_3^+$ ) and a hydrogen in its side chain. Glycine is not volatile, is not harmful to the environment or people, is inexpensive and abundant.

Dissolution speed studies were carried out at room temperature with different particle sizes, percentage of solids and concentration of reagent. It was observed that in most of the tests the presence of glycine improves gold and silver extractions, and under certain conditions it reduces the consumption of sodium thiosulfate. The most notable cases were when the percentage of solids is 25% and the concentration of sodium thiosulfate is 20 g/L and glycine is 5 g/L, and when the percentage of solids is 20% and the concentration of sodium thiosulfate is 30g/L and glycine is 5 g/L.

---

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificación .....	2
1.2 Objetivo General.....	2
1.3 Objetivos Específicos.....	2
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>3</b>
<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Breve Descripción de un Procesos Hidrometalúrgicos.....	3
2.2 El Proceso de Lixiviación .....	6
2.3 Complejos de Oro .....	9
2.4 Minerales de Oro .....	12
2.5 Lixivante alternativo: Tiosulfato .....	14
2.5.1 Aminoácido glicina para estabilizar el cobre .....	17
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>20</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>20</b>
3.1 Materiales.....	20
3.2 Equipo .....	20
3.3 Métodos .....	21
3.3.1 Caracterización de la muestra .....	21
3.3.2 Análisis granulométrico.....	21
3.3.3 Pruebas de lixiviación con tiosulfato de sodio.....	22
3.3.4 Pruebas de lixiviación con cianuro de sodio .....	22
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>24</b>

---

<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1 Caracterización de la Muestra.....</b>	<b>24</b>
<b>4.2 Pruebas con Tiosulfato de Sodio y Glicina.....</b>	<b>32</b>
4.2.1 Porcentajes de Extracción de Oro y Plata .....	32
4.2.2 Consumos de Tiosulfato de Sodio en Presencia y Ausencia de Glicina.....	41
<b>4.3 Pruebas con Cianuro de Sodio .....</b>	<b>45</b>
4.3.1 Porcentajes de extracción de oro y plata.....	45
4.3.2 Cianuro libre .....	50
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>53</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>53</b>
<b>5.1 Conclusiones.....</b>	<b>53</b>
<b>5.2 Recomendaciones.....</b>	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>55</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>58</b>

---

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Reacción química del oro (adaptado de Marsden y House, 2006) .....	4
<b>Figura 2.</b> Distribución de los átomos donadores “blandos” y “duros” en la tabla periódica de acuerdo a la teoría ácido-base duro-blando de Pearson (Martell y Hancock, 1996).....	11
<b>Figura 3.</b> Complejo de cianuro de oro(I) y cloruro de oro(III) (Adaptado de Marsden y House, 2006). .....	11
<b>Figura 4.</b> Clasificación de los minerales de oro. La refractoridad aumenta de arriba hacia abajo y el free-milling de abajo hacia arriba. Por lo general los minerales del 1 al 6 no requieren molienda (free-milling) (Adaptado de Adams, 2016). .....	13
<b>Figura 5.</b> Clasificación del oro por forma y portador. ....	14
<b>Figura 6.</b> Estructura de la glicina, el cuadrado encierra la cadena lateral que en el caso de la glicina es un hidrógeno (Adaptado de Wade Jr., 2012).....	17
<b>Figura 7.</b> Posibles modos de coordinación del aminoácido glicina (Adaptado de Lawrance, 2010). .....	18
<b>Figura 8.</b> Patrón de difracción de rayos X del mineral estudiado. ....	24
<b>Figura 9.</b> Fotomicrografía del SEM del mineral estudiado.....	25
<b>Figura 10.</b> Espectros EDS del mineral estudiado. ....	25
<b>Figura 11.</b> Fotomicrografía del SEM de la partícula A. ....	27
<b>Figura 12.</b> Espectros EDS de la partícula A.....	27
<b>Figura 13.</b> Fotomicrografía del SEM de la partícula B. ....	29
<b>Figura 14.</b> Espectros EDS de la partícula B.....	29
<b>Figura 15.</b> Distribución en porcentaje de los valores de oro y plata por malla. ....	32
<b>Figura 16.</b> Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50%, con 3 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	34
<b>Figura 17.</b> Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50%, con 3 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	34
<b>Figura 18.</b> Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación a un porcentaje de sólidos del 33.33%, con 10 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	36

---

<b>Figura 19.</b> Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33%, con 10 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	36
<b>Figura 20.</b> Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25%, con 20 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	38
<b>Figura 21.</b> Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25%, con 20 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	38
<b>Figura 22.</b> Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20%, con 30 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	40
<b>Figura 23.</b> Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20%, con 30 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	40
<b>Figura 24.</b> Consumos de tiosulfato de sodio por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50%, con 3 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia 5 g/L de glicina (Tio = tiosulfato de sodio, Gli-Tio = Glicina y Tiosulfato de sodio). ....	41
<b>Figura 25.</b> Consumos de tiosulfato de sodio por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33%, con 10 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia 5 g/L de glicina (Tio = tiosulfato de sodio, Gli-Tio = Glicina y Tiosulfato de sodio).....	42
<b>Figura 26.</b> Consumos de tiosulfato de sodio por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25%, con 20 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia 5 g/L de glicina (Tio = tiosulfato de sodio, Gli-Tio = Glicina y Tiosulfato de sodio).....	43
<b>Figura 27.</b> Consumos de tiosulfato de sodio por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20%, con 30 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia 5 g/L de glicina (Tio = tiosulfato de sodio, Gli-Tio = Glicina y Tiosulfato de sodio).....	44
<b>Figura 28.</b> Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50% y con 1 g/L de cianuro de sodio. ....	46

---

<b>Figura 29.</b> Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50% y con 1 g/L de cianuro de sodio.....	46
<b>Figura 30.</b> Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33% y con 1 g/L de cianuro de sodio.....	47
<b>Figura 31.</b> Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33% y con 1 g/L de cianuro de sodio.....	47
<b>Figura 32.</b> Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25% y con 1 g/L de cianuro de sodio.....	48
<b>Figura 33.</b> Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25% y con 1 g/L de cianuro de sodio.....	48
<b>Figura 34.</b> Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20% y con 1 g/L de cianuro de sodio.....	49
<b>Figura 35.</b> Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20% y con 1 g/L de cianuro de sodio.....	49
<b>Figura 36.</b> Cianuro de sodio libre por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50% y con 1 g/L de cianuro de sodio.....	51
<b>Figura 37.</b> Cianuro de sodio libre por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33% y con 1 g/L de cianuro de sodio. ....	51
<b>Figura 38.</b> Cianuro de sodio libre por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25% y con 1 g/L de cianuro de sodio.....	52
<b>Figura 39.</b> Cianuro de sodio libre por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20% y con 1 g/L de cianuro de sodio.....	52

---

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Valores pKa para algunos complejos hidratados (Constable, 1996).....	8
<b>Tabla 2.</b> Características esenciales y deseables para un sistema de lixiviación exitoso (Adaptado de Gupta, 2003).....	9
<b>Tabla 3.</b> Constantes de estabilidad para complejos de oro(I) y oro(III). (Adaptada de Nicol, Fleming y Paul, 1987).....	10
<b>Tabla 4.</b> Constantes de estabilidad del amoníaco y la glicina con iones de cobre.....	19
<b>Tabla 5.</b> Variables de las pruebas de lixiviación con agitación. ....	23
<b>Tabla 6.</b> Porcentaje en peso de los elementos presentes en el mineral, obtenidos de los espectros EDS. ....	26
<b>Tabla 7.</b> Porcentaje en peso de los elementos presentes en la partícula A, obtenidos de los espectros EDS. ....	28
<b>Tabla 8.</b> Porcentaje en peso de los elementos presentes en la partícula B, obtenidos de los espectros EDS. ....	30
<b>Tabla 9.</b> Análisis químico de la muestra por vía húmeda y seca. ....	30
<b>Tabla 10.</b> Análisis granulométrico de la muestra.....	31
<b>Tabla 11.</b> Porcentaje de extracción de oro y plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50%, con 3 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	33
<b>Tabla 12.</b> Porcentaje de extracción de oro y plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33%, con 10 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	35
<b>Tabla 13.</b> Porcentaje de extracción de oro y plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25%, con 20 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	37
<b>Tabla 14.</b> Porcentaje de extracción de oro y plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20%, con 30 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina. ....	39
<b>Tabla 15.</b> Porcentaje de extracción de oro y plata por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, con distintos porcentajes de sólidos y utilizando 1 g/L de cianuro de sodio. ....	45
<b>Tabla 16.</b> Cianuro de sodio libre por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, con distintos porcentajes de sólidos y utilizando 1 g/L de cianuro de sodio. ....	50

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La tecnología del procesamiento del oro, ha cambiado significativamente para hacer frente a la creciente escasez de oro, y la complejidad de sus minerales. Hoy en día, 1 tonelada de material tiene que ser procesado para recuperar algunos gramos de oro. Cuanto más escaso es el metal, más sofisticado debe ser la tecnología de extracción del oro, por lo tanto, se han mejorado y modificado continuamente las técnicas de procesamiento, para hacer frente a la creciente complejidad de los minerales de los cuales se debe recuperar el oro (Tran, 1992).

El oro se ha lixiviado principalmente por cianuración de minerales de fuentes secundarias y, de oro contenido en menas. Pero en la actualidad, el aumento de los accidentes ambientales en los diversos procesos de recuperación de oro alrededor del mundo, y la grave contaminación de los recursos naturales en el agua, por la utilización de cianuro, ha motivado la búsqueda de agentes lixiviantes que sean más económicos y amigables con el medio ambiente (Syed, 2012).

Un lixivante alternativo, es el tiosulfato, cuya química es más compleja, ya que requiere además de un oxidante y de un estabilizador para el oxidante. En el sistema de lixiviación con tiosulfato, comúnmente se utiliza como oxidante el Cu(II), y como estabilizador del oxidante el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Sin embargo, el amoníaco se pierde por volatilización y las pérdidas aumentan al agrega a la solución aire u oxígeno, o al elevar la temperatura (Marsden y House, 2006). Otra opción al amoníaco es la glicina, la cual forma complejos más estables con el cobre que el amoníaco, no es volátil, no es dañina para el medio ambiente o las personas, es de bajo costo y abundante (Eksteen y Oraby, 2015). El amoníaco, ya sea como gas o solución, puede representar un peligro para el medio ambiente y la salud (Marsden y House, 2006).

## 1.1 Justificación

Procesar minerales auríferos de manera más amigable con el ambiente.

## 1.2 Objetivo General

Evaluar los efectos que tiene la glicina durante la lixiviación por agitación con tiosulfato de sodio de un mineral oxidado.

## 1.3 Objetivos Específicos

- Seleccionar una muestra de mineral, caracterizarla para encontrar como se encuentra asociada, y someterla a pruebas de lixiviación por agitación con tiosulfato de sodio, bajo distintas condiciones experimentales en presencia y ausencia de glicina.
- Determinar el efecto que tiene el tamaño de partícula, el porcentaje de sólidos, la concentración de tiosulfato de sodio y glicina en la velocidad de disolución de valores de oro y plata.
- Determinar el consumo de tiosulfato de sodio en solución de lixiviación y los porcentajes de extracción de oro y plata.

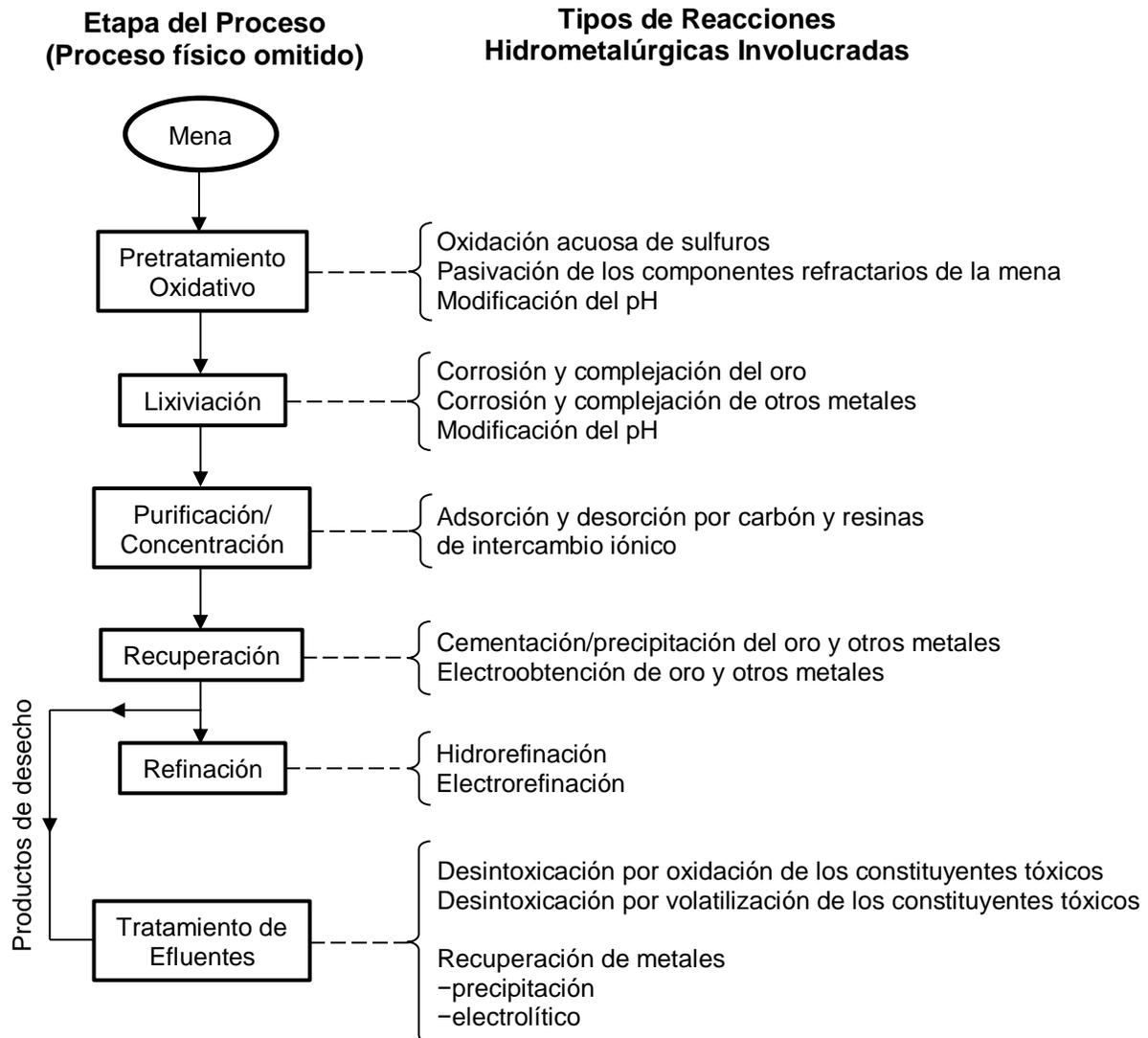
## CAPÍTULO 2

### REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Breve Descripción de un Procesos Hidrometalúrgicos

Se utilizan procesos hidrometalúrgicos para extraer, concentrar y recuperar metales del mineral o compuesto, de manera selectiva en sistemas acuosos. La concentración del metal, las características mineralógicas, las reacciones químicas y los fenómenos físico-químicos que se manifiesten durante el tratamiento de una mena, determinarán la complejidad del proceso hidrometalúrgico (Marsden y House, 2006).

Aunque dependen del tipo de mineral, en la mayoría de los procesos hidrometalúrgicos se incluyen las siguientes etapas: pretratamiento oxidativo, lixiviación, purificación y concentración, recuperación, refinación y tratamiento de efluentes (ver figura 1).



**Figura 1.** Reacción química del oro (adaptado de Marsden y House, 2006)

El material molido al tamaño de partícula deseado puede pasar directamente a lixiviación, pero en algunos casos requiere pretratamiento oxidativo. Un pretratamiento oxidativo, es necesario cuando la liberación de los valores de oro es muy baja, o los consumos de reactivos es muy alta durante una lixiviación convencional. Las menas sulfurosas, carbonáceas o cualquier mineral (como la arsenopirita, pirrotita y la marcasita), donde se consuman elevadas cantidades de reactivo, requieren un pretratamiento oxidativo para hacer económicamente viable su explotación. La tostación, oxidación a presión, oxidación biológica, clorinación o varios procesos

basados en ácido nítrico, se utilizan como pretratamiento oxidativo para mejorar las extracciones del oro durante la lixiviación.

En la etapa de lixiviación, idealmente, se produce una solución cargada con los valores metálicos y un sólido (ganga o estéril), que está libre de cualquier constituyente de interés. Sin embargo, la lixiviación no es selectiva, por lo que compuestos indeseables se presentan en el licor, en tales casos se requerirá purificación. La lixiviación típicamente se realiza con agitación o en montones. En la lixiviación en montones, la disolución ocurre cuando la solución de lixiviación se filtra hacia arriba o hacia abajo a través del cuerpo mineral. En la lixiviación con agitación, el mineral molido se mantiene en suspensión por agitación neumática o mecánica. La lixiviación también se puede utilizar para eliminar impurezas de concentrados (Gupta, 2003).

Muchas veces se puede recuperar los valores metálicos directamente de los licores de lixiviación, pero frecuentemente una etapa intermedia de concentración y purificación es utilizada. Las soluciones provenientes de lixiviación, por lo general tienen compuestos indeseables y bajas concentraciones de oro. El carbón activado o las resinas de intercambio iónico son usadas para adsorber el oro y la plata de los licores de lixiviación y así, producir una solución de menor volumen, más concentrada y limpia de impurezas. La purificación de la solución cargada elimina la necesidad de espesar y/o filtrar los residuos de lixiviación (Marsden y House, 2006).

El oro que se encuentra en la solución, que ha sido sujeta o no a una etapa de concentración y purificación, se puede recuperar por precipitación, cementación con zinc o electrolisis. La electrolisis, es utilizada en soluciones con altas concentraciones de valores metálicos, para producir cátodos cargados y depósitos catódicos que necesitan poco o nada de refinación adicional. En el proceso de precipitación o cementación con zinc, la solución es clarificada y desoxigenada, después se añade el polvo de zinc para precipitar el oro (Marsden y House, 2006).

En la etapa de refinación se produce un doré o lingote de oro que tiene una pureza entre el 90 y 99%. El producto obtenido a través de la precipitación con zinc o electrolisis por lo general se funde directamente. El refinamiento adicional es llevado a cabo en una refinería comercial (Marsden y House, 2006).

En el proceso de extracción de oro, se generan residuos que deben eliminarse de la solución, por motivos ambientales y económicos. Los reactivos y metales presentes en los residuos

pueden representar un peligro para el medio ambiente, pero se pueden recuperar y regresar al proceso en la mayoría de los casos. Por lo general se regresa toda o una parte de los residuos al sistema, las colas regresan a molienda y se depositan en los patios de lixiviación, y la solución estéril se recircula junto con la solución de lixiviación. Otra opción, que es económicamente menos favorable, es el tratamiento de toda o una parte del efluente en un proceso dedicado (Marsden y House, 2006).

## 2.2 El Proceso de Lixiviación

La lixiviación al ser una extracción sólido-líquido, se puede definir como la extracción de uno o más constituyentes solubles de un sólido, por medio de un disolvente. Pero en el contexto de este trabajo, la lixiviación consiste en la disolución selectiva de los metales o minerales valiosos, presentes en una mena o concentrado, al ponerse en contacto con una solución acuosa (Richardson, Harker y Backhurst, 2002; Gupta, 2003; Marsden y House, 2006).

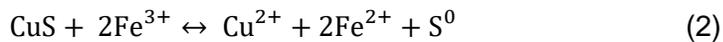
Una forma simple para disolver una sustancia sólida es poniéndola en contacto con agua. El agua es el solvente más utilizado, pues es abundante, barata y se puede considerar no corrosiva. La capacidad del agua de disolver reactivos o compuestos, se debe a su polaridad y a su habilidad para formar enlaces de hidrogeno. No obstante, a causa de que el agua generalmente no disuelve solutos no iónicos, como metales con un número de oxidación de cero, y a que no todos los solutos iónicos son solubles (como el  $\text{CaCO}_3$ ), se necesita adicionar especies químicas, para solubilizar el ion o compuesto de interés. El agua tampoco disuelve compuestos no polares, y esta característica es aprovechada por el proceso de extracción por solventes (Gupta, 2003).

Cuando el solvente es agua y la adición de uno o varios solutos resulta en una mezcla homogénea, se le llama solución acuosa. Así pues, la solución está constituida por las partículas del soluto y del solvente. Las propiedades químicas de la solución, dependen de las proporciones relativas (soluto/solvente o soluto/solución) y las características de sus componentes (Trujillo, 2004).

En el momento en el que la solución acuosa entra en contacto con el mineral, una reacción química debe de ocurrir, para que los valores metálicos se solubilizan. Para lograr esto, en la solución acuosa deben estar presentes un oxidante, capaz de convertir el metal neutro en un

cación, y un ligando, que forme un complejo estable con dicho catión (Gupta, 2003; Free, 2013). El tipo de ligando y oxidante a utilizar, depende de las propiedades y características del metal, además de cómo se presenta en el mineral.

En la corteza terrestre, los metales se presentan en su estado nativo o en los compuestos químicos que forman un mineral. Los metales nativos tienen átomos con un número de oxidación de cero. Para separarlo, se necesita de un oxidante capaz de remover por al menos un electrón, y así convertirlo en un catión. Los iones metálicos generalmente son solubles en agua. Se pueden encontrar metales ya oxidados en un mineral, en tales casos puede o no que se requiera de oxidación adicional. Por ejemplo, el cobre presente en la tenorita (CuO) no requiere oxidación (Ec. 1), pero si lo requiere cuando está presente en la covelita (CuS) (Ec. 2) (Free, 2013).



Es importante mencionar que, los iones o moléculas disueltos están rodeados por moléculas de agua, es decir, se encuentran como complejos hidratados (véase Tabla 1) (Constable, 1996; Trujillo, 2004). Por ejemplo, en solución acuosa, el ion de Cu(II), existe como el complejo hidratado  $[\text{Cu}(\text{OH}_2)_6]^{2+}$ , y los iones de Au(I) y Au(III), se hallan como los complejos hidratados  $[\text{Au}(\text{OH}_2)_2]^+$  y  $[\text{Au}(\text{OH}_2)_4]^{3+}$  respectivamente. Los complejos hidratados de oro, son de baja estabilidad por lo que serán reducidos por el agua a oro metálico. Por lo tanto, en el caso del oro, se requieren ligandos capaces de sustituir las moléculas de agua, para obtener un complejo metálico más estables en solución acuosa (Nicol, Fleming y Paul, 1987).

**Tabla 1.** Valores pKa para algunos complejos hidratados (Constable, 1996).

Complejo	pKa	Complejo	pKa
$[\text{Pd}(\text{OH}_2)_6]^{2+}$	1.4	$[\text{Fe}(\text{OH}_2)_6]^{3+}$	2.2
$[\text{Al}(\text{OH}_2)_6]^{3+}$	5.0	$[\text{Cu}(\text{OH}_2)_6]^{2+}$	8.0
$[\text{Zn}(\text{OH}_2)_6]^{2+}$	9.0	$[\text{Co}(\text{OH}_2)_6]^{2+}$	9.7
$[\text{Ni}(\text{OH}_2)_6]^{2+}$	9.9	$[\text{Mn}(\text{OH}_2)_6]^{2+}$	10.6

Un complejo metálico, es el resultado de la combinación de un ion metálico y un anión o molécula polar, conocida como ligando. La unión se produce cuando uno de los átomos del ligando dona un par de electrones al metal, para formar un enlace de coordinación (F. Bell, 1980). Se requiere tanto de un ligando como de un oxidante, para tener velocidades de lixiviación aceptables. La disolución del oro, generalmente se realiza utilizando como ligando al cianuro y como oxidante al oxígeno (Marsden y House, 2006).

Normalmente, las reacciones químicas de disolución se presentan durante la lixiviación, estas afectan los consumos de reactivo y la precipitación de los valores metálicos, y de cualquier especie (como el Hg y el Cu), que pueda o no afectar adversamente en las etapas posteriores del proceso. En el caso del oro, las propiedades de este, del oxidante y del ligando determinan la naturaleza de las reacciones químicas. Las reacciones químicas que involucran a los metales preciosos y a las especies mineralógicas que se consideran ganga, son las de mayor importancia, debido a que determinan la eficiencia de la extracción de los metales preciosos y el diseño del proceso (Marsden y House, 2006). En la Tabla 2, se muestran las características esenciales y deseables de un reactivo lixivante.

**Tabla 2.** Características esenciales y deseables para un sistema de lixiviación exitoso (Adaptado de Gupta, 2003).

Características esenciales	Características deseables
El metal valioso debe ser soluble en un solvente económico.	El mineral de ganga no debe consumir excesiva cantidad de lixivante.
El metal debe ser económicamente recuperable de la solución	El lixivante debe ser recuperable (o capaz de ser regenerado) para su reciclaje.
Las impurezas presentes en el licor de lixiviación deben ser removibles.	El material alimentado debe estar libre de materiales arcillosos (dificultan la separación del licor de lixiviación de los sólidos tratados).
	El material de alimentación debe ser poroso a la solución, permitir el contacto directo entre el lixivante y la fase a disolver, y proporcionar un área líquida/sólida alta para que tome lugar la reacción.
	El lixivante debe ser preferiblemente no corrosivo y no tóxico.

### 2.3 Complejos de Oro

El oro es el más inerte de los elementos metálicos, pero es soluble en presencia de un oxidante y un agente complejante (ligando). Por ejemplo, el oro se disuelve en una mezcla de ácido nítrico (oxidante) y ácido clorhídrico (ligando) que se conoce como agua regia.

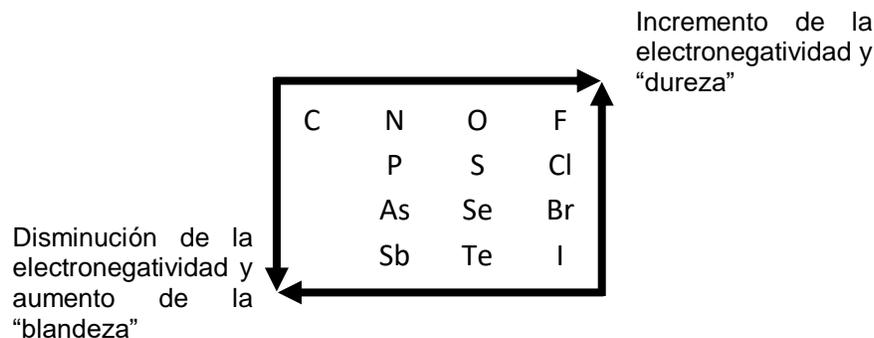
El número de oxidación del oro, puede estar entre -I y +V, pero casi siempre se le encuentra con un estado de oxidación de +I y +III. El resto de los estados de oxidación del oro son solo de interés académico. Por lo tanto, los iones de oro de interés hidrometalúrgico serán el Au(I) y el

Au(III) (Nicol, Fleming y Paul, 1987; Marsden y House, 2006). En la Tabla 3 se muestran las especies que forman complejos estables con el oro(I) y oro(III).

**Tabla 3.** Constantes de estabilidad para complejos de oro(I) y oro(III). (Adaptada de Nicol, Fleming y Paul, 1987).

Oro (I)		Oro (III)	
Complejo	$\beta_2$	Complejo	$\beta_4$
$\text{Au}(\text{CN})_2^-$	$2 \times 10^{38}$	$\text{Au}(\text{CN})_4^-$	$\sim 10^{56}$
$\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$	$5 \times 10^{28}$	$\text{AuI}_4^-$	$5 \times 10^{47}$
$\text{Au}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)_2^+$	$2 \times 10^{23}$	$\text{Au}(\text{SCN})_4^-$	$10^{42}$
$\text{AuI}_2^-$	$4 \times 10^{19}$	$\text{AuBr}_4^-$	$10^{32}$
$\text{Au}(\text{SCN})_2^-$	$1.3 \times 10^{17}$	$\text{AuCl}_4^-$	$10^{26}$
$\text{Au}(\text{Br})_2^-$	$10^{12}$		
$\text{AuCl}_2^-$	$10^9$		

De acuerdo con la teoría ácido-base duro-blando de Pearson, los ligandos con átomos donadores “blandos”, como el S, C, Se y P, forman complejos más estables con el oro(I), y los ligandos que contienen átomos donadores “duros”, como el N, O, Cl y otros halógenos, forman complejos más estables con el oro(III) (Marsden y House, 2006; Đurović, Bugarčić y van Eldik, 2017). Esto explica porque ligandos, como el cianuro, tiourea, tiocianato y tiosulfato, prefieren formar complejos con el oro(I); mientras que otros ligandos, como el amoníaco y los halógenos, prefieren formar complejos con el oro(III) (Marsden y House, 2006).



**Figura 2.** Distribución de los átomos donadores "blandos" y "duros" en la tabla periódica de acuerdo a la teoría ácido-base duro-blando de Pearson (Martell y Hancock, 1996).

La selectividad por el oro y la estabilidad de sus complejos, tiende a disminuir con el aumento de la electronegatividad de los átomos donadores del ligando, por ejemplo, el oxígeno ( $\chi = 3.44$ ) no transmite fácilmente sus electrones a los metales pesados, el nitrógeno ( $\chi = 3.04$ ) los transmite con un poco más de facilidad, y el azufre ( $\chi = 2.58$ ) es el que más fácilmente los transmite (Vandenbossche *et al.*, 2015). El carbono tiene una electronegatividad de 2.55.

El número de moléculas presentes en el complejo, depende del número de coordinación del ion, el cual, por lo general es de 2 para el oro(I) y de 4 para el oro(III). La estructura molecular, que es la disposición de las moléculas alrededor del ion, es lineal en el caso del oro(I) y cuadrado-plana en el caso del oro(III), como se muestra en la figura 3 (Marsden y House, 2006) (Nicol, Fleming y Paul, 1987).



**Figura 3.** Complejo de cianuro de oro(I) y cloruro de oro(III) (Adaptado de Marsden y House, 2006).

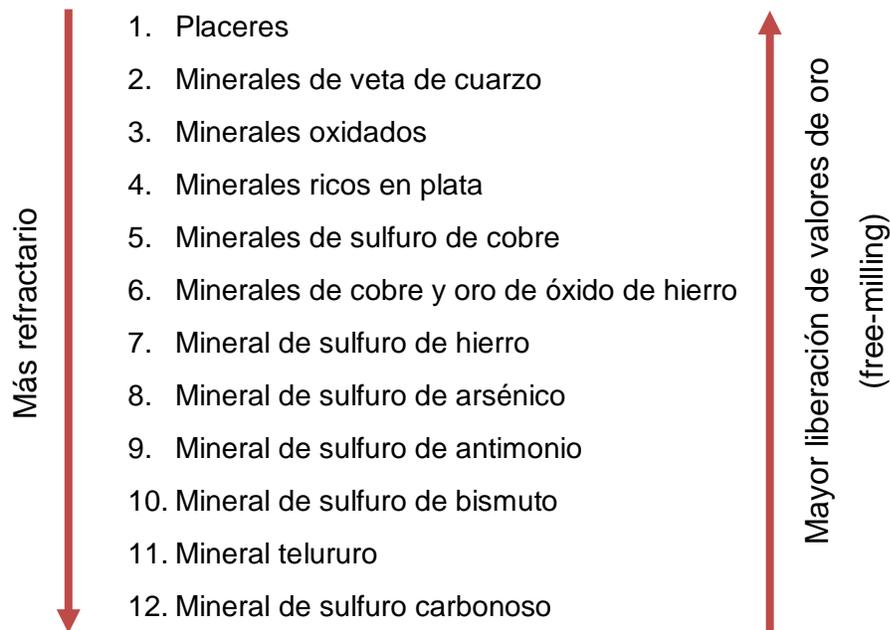
Los ligandos monodentados, como el  $\text{NH}_3$ , solo poseen un átomo donador que se une al metal, pero existen muchas moléculas o iones que poseen más de un átomo donador, estos ligandos

pueden unirse al metal en dos o más puntos, y se les conoce como polidentado. Cuando un ligando polidentado establece dos o más enlaces de coordinación con un metal, se forma un anillo heteroatómico, a este proceso se le conoce como quelación. Los ligandos que actúan de esta manera se conocen como agentes quelantes, y a sus complejos se les llaman quelatos metálicos. La palabra quelato, viene del griego *chele*, que significa pinza de langosta. (F. Bell, 1980).

## 2.4 Minerales de Oro

El oro se encuentra en la naturaleza ya sea como un metal nativo o en aleación, comúnmente con la plata. Otras aleaciones son menos frecuentes, y dependen del tipo de yacimiento, por ejemplo, en pórfidos cupríferos con altas leyes de oro, se esperaría encontrar aurocuprita ( $\text{Cu}_3\text{Au}$ ). Otros minerales de oro comunes, son la aurostibita [ $\text{AuSb}_2$ ], calaverita [ $\text{AuTe}_2$ ] y silvanita [(Au,Ag) $\text{Te}_2$ ]. También, se le puede encontrar encapsulado en minerales, como la arsenopirita [ $\text{FeAsS}$ ] o la piritita [ $\text{FeS}_2$ ], o adsorbido por minerales carbonáceos (Adams, 2016).

Los minerales de oro se pueden ordenar dependiendo de su refractariedad y la facilidad con la que liberan sus valores metálicos, como se puede ver en la figura 4 (Adams, 2016).



**Figura 4.** Clasificación de los minerales de oro. La refractoridad aumenta de arriba hacia abajo y el free-milling de abajo hacia arriba. Por lo general los minerales del 1 al 6 no requieren molienda (free-milling) (Adaptado de Adams, 2016).

Se considera que un mineral libera fácilmente sus valores de oro (free-milling), cuando se obtienen porcentajes de extracción de oro superiores al 90% con cianuración convencional (Adams, 2016). En los minerales refractarios, las extracciones de oro, son menores al 75% (Munive *et al.*, 2011), se consumen elevadas cantidades de reactivo y/o se requiere pretratamiento (Adams, 2016).

Dependiendo de cómo se comporta y se presenta el oro en el mineral, se puede clasificar en tres tipos: oro microscópico, oro submicroscópico y oro superficial (ver figura 5). El oro microscópico, es el oro que se puede ver con un microscopio y se presenta principalmente en los minerales no refractarios. El oro submicroscópico, no se puede ver bajo los microscopios ópticos y de escaneo electrónico, este tipo de oro es el que se encuentra principalmente en minerales refractarios. El oro superficial, esta adsorbido en la superficie del mineral y esto puede suceder durante la formación del mineral o durante un proceso metalúrgico (Adams, 2016).

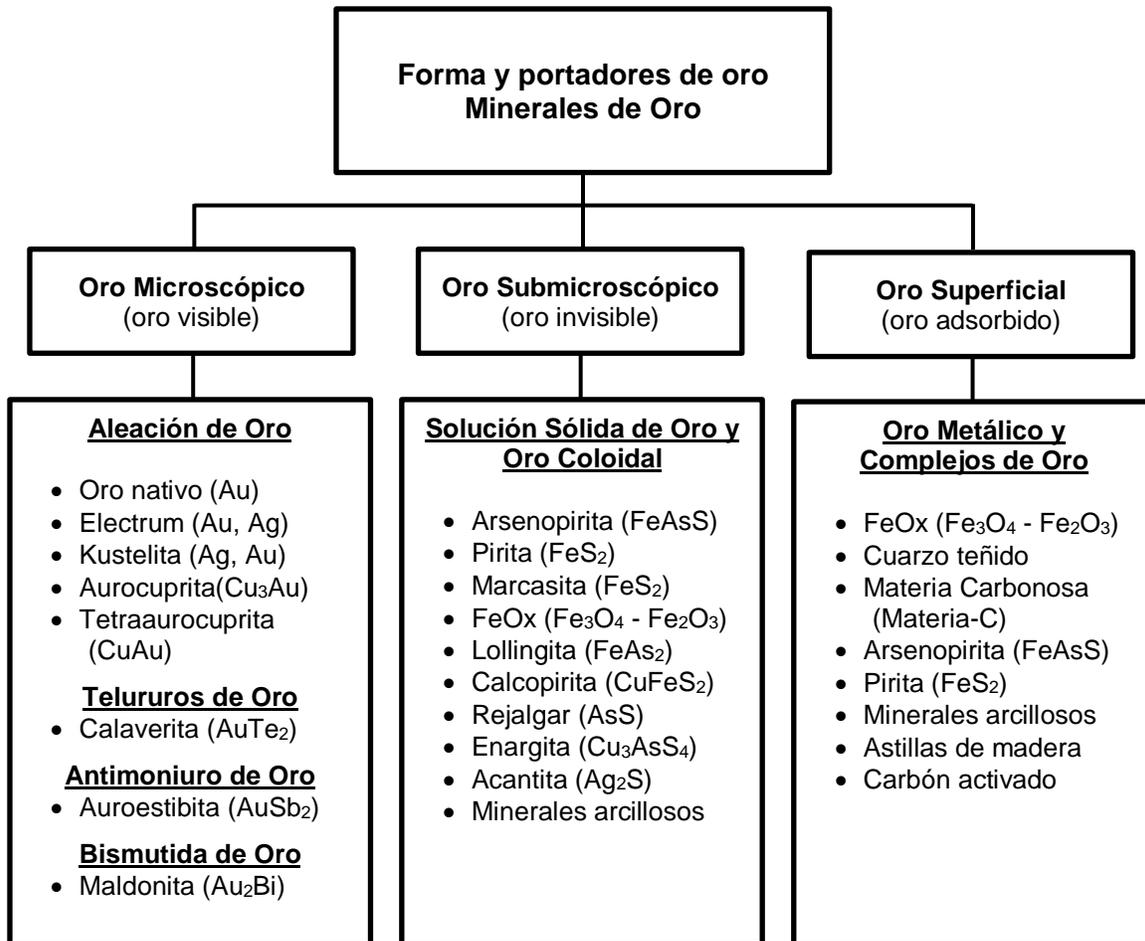


Figura 5. Clasificación del oro por forma y portador.

## 2.5 Lixiviante alternativo: Tiosulfato

El oro se ha lixiviado principalmente con cianuro, pero el aumento de los precios del oro, la explotación de minerales más complejos, y el riesgo que puede representar para la salud y el medio ambiente su mal manejo, ha motivado la búsqueda de lixiviantes alternativos. Entre los lixiviantes propuestos está el tiosulfato (Adams, 2016).

El sistema de lixiviación con tiosulfato es más complicado, debido a que el oxidante utilizado necesita ser estabilizado. Si el oxidante, no está presente o estabilizado con un ligando diferente al tiosulfato, la velocidad de disolución de oro será baja y el consumo de tiosulfato será alto.

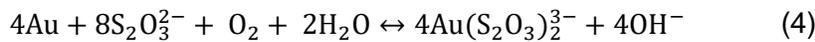
Comúnmente, en el sistema de lixiviación con tiosulfato, se utiliza como oxidante el Cu(II) y como estabilizador del oxidante el amoníaco (NH<sub>3</sub>) (Adams, 2016).

Al igual que el cianuro, el tiosulfato puede disolver oro usando oxígeno como oxidante en solución alcalina (Ec. 3 y 4) (Adams, 2016).

Reacción de oro con cianuro:

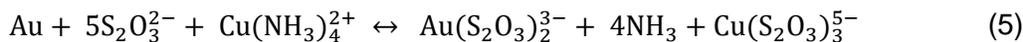


Reacción de oro con tiosulfato:



En el caso del tiosulfato, la reacción ocurre muy lentamente con oxígeno, y si se quiere tener velocidades de disolución comparables con las del cianuro, se necesitará un catalizador, como el Cu(II) estabilizado con amoníaco, y una mayor concentración de reactivo (Marsden y House, 2006; Adams, 2016).

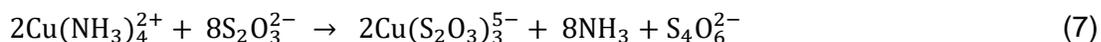
Así la reacción general propuesta para la disolución de oro en presencia de tiosulfato, amoníaco y cobre sería (Adams, 2016):



La regeneración del Cu(II) se logra con la reducción del oxígeno, de acuerdo con la siguiente ecuación (Adams, 2016):



Pero el cobre, aun cuando se encuentra como amoníaco de cobre, puede oxidar el tiosulfato como se muestra en la ecuación 7 (Feng y van Deventer, 2011):



La oxidación del tiosulfato, resulta en la formación politionatos (como S<sub>3</sub>O<sub>6</sub><sup>2-</sup>, S<sub>4</sub>O<sub>6</sub><sup>2-</sup> y S<sub>5</sub>O<sub>6</sub><sup>2-</sup>), sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) y azufre elemental. Si no se controla, la concentración de tiosulfato en solución disminuye, lo que puede provocar la precipitación del oro. Además, los politionatos reducen

significativamente la capacidad del carbón activado y las resinas de intercambio iónico de adsorber el tiosulfato de oro (Adams, 2016).

Otro inconveniente, es que el amoníaco se pierde por volatilización, y las pérdidas aumentan al agrega a la solución aire u oxígeno, o al elevar la temperatura. El amoníaco ya sea como gas o solución, puede representar un peligro para el medio ambiente y la salud (Marsden y House, 2006). En el aire, el valor límite umbral para el amoníaco es de  $14 \text{ mg/m}^3$  (Eksteen y Oraby, 2015). En el agua el amoníaco tiene una toxicidad similar a la del cloro, aunque si se convierte a amonio, se considera de baja toxicidad (Marsden y House, 2006).

En el 2011, Munive y colaboradores realizaron pruebas de lixiviación con cianuro de sodio y tiosulfato de sodio, en una mineral refractario que contenía valores metálicos de oro y placa. Las pruebas fueron realizadas en botella rodante y tuvieron una duración de 48h. Se utilizó hidróxido de amonio para elevar el pH y proporcionar los iones de amoníaco, y sulfato de cobre pentahidratado para suministrar los iones de cobre a la solución de tiosulfato de sodio. Ellos lograron extraer hasta el 15.13% del oro con cianuro de sodio, y el 82.53% del oro con tiosulfato de sodio. Llegaron a la conclusión de que, el tiosulfato de sodio compuesto puede ser una alternativa al cianuro, por su baja toxicidad y a que se puede recuperar y reutilizar. También observaron que, debido a las altas temperaturas presentes en el estado de Sonora, el tiosulfato de amonio se pierde por evaporación y descomposición.

Sin amónico para estabilizar el Cu(II) en solución alcalina, se tienen bajas velocidades de oxidación de oro y altas velocidades de oxidación de tiosulfato (Adams, 2016). Una alternativa al amoníaco, es el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), el cual puede estabilizar el Cu(II) en solución, pero no es costeable su uso cuando el mineral a procesar es un sulfuro multi-metal (Feng y van Deventer, 2011). Otra opción es utilizar Fe(III) estabilizado con EDTA u oxalato. Las desventajas del Fe-EDTA o el Fe-Oxalato es que, tienden a degradarse en presencia de minerales sulfurados. Además, se necesita tiourea para catalizar la reacción cuando se usa el Fe(III), sino la lixiviación del oro es muy lenta (Adams, 2016).

Otra alternativa son los aminoácidos, los cuales reducen la capacidad del Cu(II) de oxidar al tiosulfato, mientras conservan su capacidad catalítica durante la lixiviación. Su adición también mejora las extracciones de oro. Los aminoácidos forman complejos más estables con el Cu(II) que el amoníaco (Feng y van Deventer, 2011).

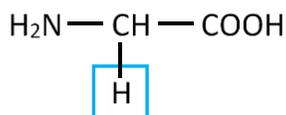
En el 2011, Feng y van Deventer investigaron el uso de diferentes aminoácidos en la lixiviación de un concentrado de pirita. El lixivante utilizado fue el tiosulfato de amonio, el pH fue elevado con hidróxido de amonio, y el sulfato de cobre proporcionó los iones de Cu(II). Las pruebas se realizaron en un reactor PVC y duraron 24h. La adición de aminoácidos aumentó las extracciones de oro y redujo el consumo de tiosulfato.

### 2.5.1 Aminoácido glicina para estabilizar el cobre

Los aminoácidos son ligandos bidentados, compuestos por un grupo ácido, un grupo básico y una cadena lateral. Forman complejos estables con diversos iones metálicos, a través de su grupo amino, grupo carboxilo y en algunos casos con su cadena lateral. Cada uno de los veinte aminoácidos comunes tiene una cadena lateral diferente, y esta determina sus propiedades físicas y químicas (Wade Jr., 2012; Vandenbossche *et al.*, 2015).

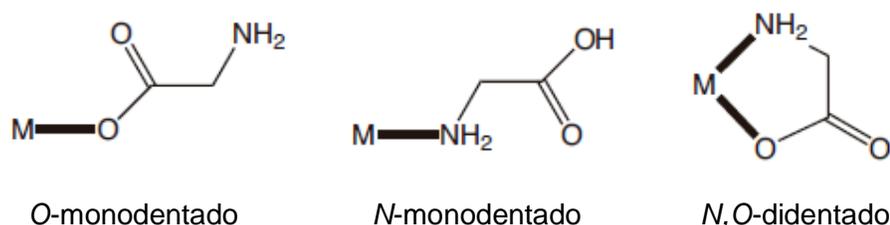
Algunas propiedades de los aminoácidos: son anfóteros, por lo que pueden reaccionar como ácidos o como bases dependiendo del pH; son tampones, ya que pueden aceptar o donar protones; son sólidos cristalinos no volátiles, que se funden con descomposición a temperaturas relativamente elevadas, y son más solubles en agua que en éter, diclorometano y otros disolventes orgánicos comunes (Morrison y Boyd, 1998; Wade Jr., 2012).

El más sencillo de los aminoácidos, es la glicina, la cual se caracteriza por tener un único átomo de hidrógeno en su cadena lateral y por ser el único aminoácido quiral. En solución acuosa y dependiendo del pH, la glicina puede tener una carga positiva, negativa o poseer ambas. A un pH menor de 2.3, la glicina se presenta en su forma catiónica ( $^+H_3NCH_2COOH$ ); a un pH entre 2.3 y 9.6, se encuentra en su forma zwitteriónica ( $^+H_3NCH_2COO^-$ ), y a un pH superior a 9.6, su forma es aniónica ( $H_2NCH_2COO^-$ ) (Wade Jr., 2012).



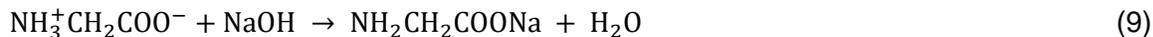
**Figura 6.** Estructura de la glicina, el cuadrado encierra la cadena lateral que en el caso de la glicina es un hidrógeno (Adaptado de Wade Jr., 2012).

La glicina puede actuar como un ligando monodentado, al unirse solamente su grupo carboxilo ( $-\text{COO}^-$ ) o grupo amino ( $-\text{NH}_2$ ) al metal, o como ligando bidentado (quelato) al unirse al metal con ambos grupos funcionales (figura 7) (Lawrance, 2010). Nótese que para que el grupo carboxilo, se pueda unir al metal este debe estar desprotonado.



**Figura 7.** Posibles modos de coordinación del aminoácido glicina (Adaptado de Lawrance, 2010).

La glicina puede reaccionar con el HCl o NaOH para formar sales. El grupo básico ( $-\text{NH}_2$ ) de la glicina puede reaccionar con el HCl para formar un clorhidrato de glicina (Ec. 8). El grupo carboxilo ( $-\text{COO}^-$ ) reacciona con el NaOH para formar glicina sódica (Ec. 9) (Das, 2005).



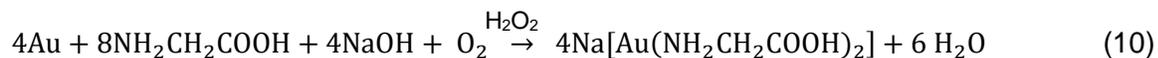
La capacidad de la glicina para quelar el cobre le permite formar complejos más estables con el Cu(II) que el amoníaco (ver Tabla 4).

**Tabla 4.** Constantes de estabilidad del amoniaco y la glicina con iones de cobre.

	Log $K_1$	Log $K_2$	Log $K_3$	Log $K_4$	Log $K_5$	Referencia
<b>Amoniaco</b>						
Cu(I)	5.93	10.86				(Speight, 2005)
Cu(II)	4.31	7.98	11.02	13.32	12.86	(Speight, 2005)
<b>Glicina</b>						
Cu(I)		10.1				(Oraby y J. J. Eksteen (b), 2015)
Cu(II)	8.60	15.54	16.27			(Speight, 2005)

La glicina no es volátil, no es dañina para el medio ambiente o las personas, es de bajo costo y abundante. Se ha demostrado que una solución alcalina de glicina con peróxido de hidrógeno como oxidante, puede lixiviar el oro y la plata, y la adición de Cu(II) a la solución mejora las velocidades de disolución del oro (Eksteen y Oraby, 2015). También se observó que, el carbón activado adsorbe el oro y la plata presentes en las soluciones de glicina (Oraby y J. J. Eksteen (a), 2015). Sin embargo, para tener velocidades de solución aceptables, utilizando solamente glicina, se debe operar a temperaturas de entre 40 a 60°C, lo que hace poco atractivo el proceso.

El mecanismo exacto de disolución de oro con glicina es incierto, pero una propuesta realizada es (Oraby y J. J. Eksteen (b), 2015):



En este trabajo se utiliza glicina para estabilizar los iones de Cu(II) y el hidróxido de sodio para elevar el pH. Todo esto con el fin evitar usar amoniaco. También se resalta que durante la preparación de la solución se añaden los iones de cobre, después la glicina y finalmente el tiosulfato de sodio.

## CAPÍTULO 3

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Materiales

1. Mineral con asociaciones de oro y plata
2. Hidróxido de sodio
3. Hidróxido de calcio
4. Tiosulfato de sodio
5. Cianuro de Sodio
6. Glicina
7. Nitrato de plata
8. Rodamina
9. Yoduro de Potasio

#### 3.2 Equipo

1. Pipetas
2. Buretas
3. Vaso de precipitado de 3 litro
4. Agitador de paleta con velocidad controlada

5. Medidor de pH
6. Equipo de Absorción Atómica
7. Equipo de molienda
8. Cuarteador tipo Jones
9. Mallas Tyler

### **3.3 Métodos**

#### **3.3.1 Caracterización de la muestra**

Para obtener información sobre la mineralogía y composición de la muestra, se llevaron a cabo análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos X (DRX), espectroscopia de absorción atómica (AA), espectrofotómetro de transformada de Fourier (FTIR) y ensayos al fuego.

La espectroscopia de absorción atómica se realizó para conocer la concentración de los valores metálicos en la muestra mineral, en las soluciones de lixiviación y en las colas. Las leyes de cabeza se corroboraron con ensayos al fuego.

Para determina el consumo de tiosulfato de sodio, se utilizó el método de titulación con yoduro de potasio, y para determinar el cianuro de sodio libre se empleó el método de titulación con nitrato de plata.

#### **3.3.2 Análisis granulométrico**

Para determinar en qué fracción se encuentran los valores de liberación de oro y plata, se realizó un análisis de mallas en seco a 1 Kg del mineral previamente homogenizado y triturado, utilizando las mallas Tyler número 1/4, 10, 20, 30, 60, 80, 100, 140 y 200.

### **3.3.3 Pruebas de lixiviación con tiosulfato de sodio**

Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente, y el material destinado a lixiviación se hizo pasar por las mallas Tyler 100, 170 o 200 hasta tener la cantidad necesaria para cada prueba. Las condiciones se detallan en la Tabla 5.

Se preparó la solución de lixiviación con de agua corriente del laboratorio, se agregó la glicina, después se elevó el pH a más de 11, se añadió el sulfato de cobre pentahidratado y finalmente se adicionó la cantidad correspondiente de tiosulfato de sodio. Para las pruebas de lixiviación con agitación, se depositaron 500 g de muestra con el tamaño de partícula requerido en un vaso de precipitado de 3 litros, se agregó la solución de lixiviación hasta obtener el porcentaje de sólidos deseado, y se puso a agitar a 500 rpm. Cada 4, 8, 12 y 24 horas se midió el pH, y se tomó una muestra de aproximadamente 10 ml, la cual fue filtrada y depositada en un tubo de ensaye para posteriormente determinar el consumo de tiosulfato de sodio, y los valores de oro y plata. El pH se ajustó cuando fue necesario.

### **3.3.4 Pruebas de lixiviación con cianuro de sodio**

Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente, y el material destinado a lixiviación se hizo pasar por las mallas Tyler 100, 170 o 200 hasta tener la cantidad necesaria para cada prueba. Las condiciones se detallan en la Tabla 5.

Se preparó la solución de lixiviación con agua corriente del laboratorio, a la cual se le agregó hidróxido de calcio comercial, hasta elevar su pH a más de 11, posteriormente se le añadió una 1 g de cianuro de sodio y se aforó a un litro. Para las pruebas de lixiviación con agitación, se depositaron 100 g de muestra con el tamaño de partícula requerido en un vaso de precipitado de 1 litro, después se agregó solución de lixiviación hasta obtener el porcentaje de sólidos deseado, y se puso a agitar a 500 rpm. Cada 6, 24 y 48 horas se midió el pH y se tomó una muestra de aproximadamente 10 ml, la cual fue filtrada y depositada en un tubo de ensaye para posteriormente determinar el cianuro libre, y los valores de oro y plata. El pH se ajustó cuando fue necesario.

**Tabla 5.** Variables de las pruebas de lixiviación con agitación.

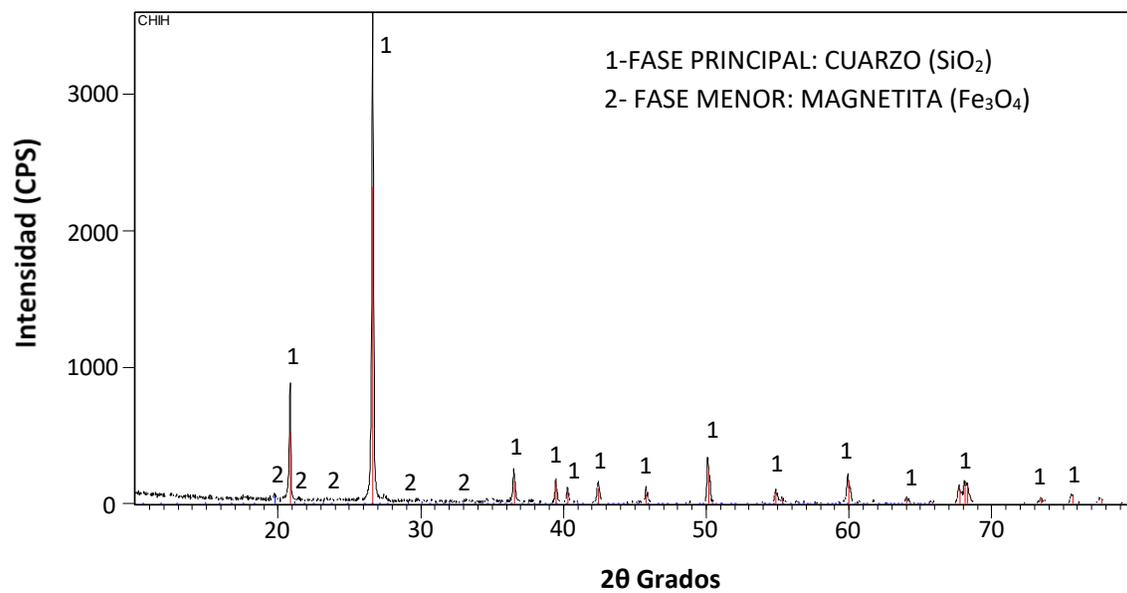
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Sólidos (%)	50, 33.33, 25, 20
Tamaño de partícula (# malla)	-100, -170, -200
Agitación (rpm)	500
Tiempo de residencia (h):	
Pruebas con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	24
Pruebas con NaCN	48
[ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ]	3, 10, 20, 30 g/L
[NaCN]	1 g/L
[Gli]	5 g/L
[Cu]	70 mg/L

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

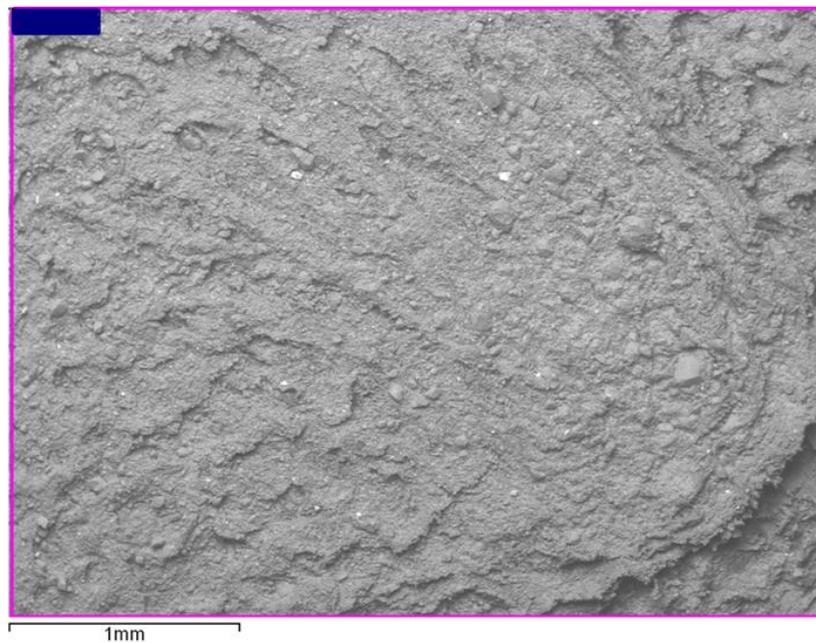
#### 4.1 Caracterización de la Muestra

En la figura 8, se presenta el patrón de difracción del mineral en estudio, donde se puede apreciar que la fase principal es de cuarzo y la fase menor es la magnetita.

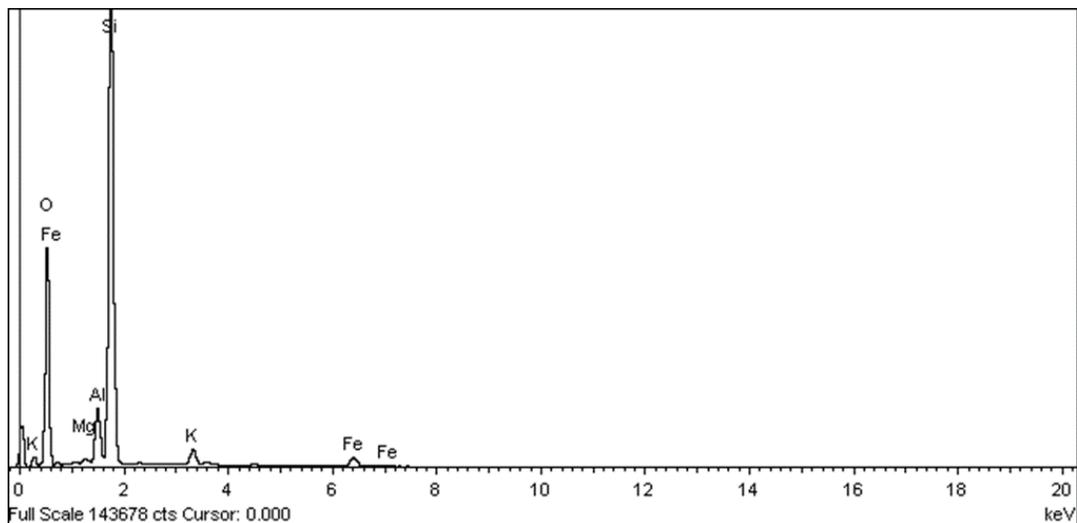


**Figura 8.** Patrón de difracción de rayos X del mineral estudiado.

En la figura 9, se muestra una fotomicrografía del SEM del mineral; en la figura 10, su espectro de energía dispersiva y en la Tabla 6, los porcentajes en peso de sus elementos (obtenidos por los espectros EDS). Estos resultados permiten comprobar las fases mineralógicas mencionadas anteriormente.



**Figura 9.** Fotomicrografía del SEM del mineral estudiado.

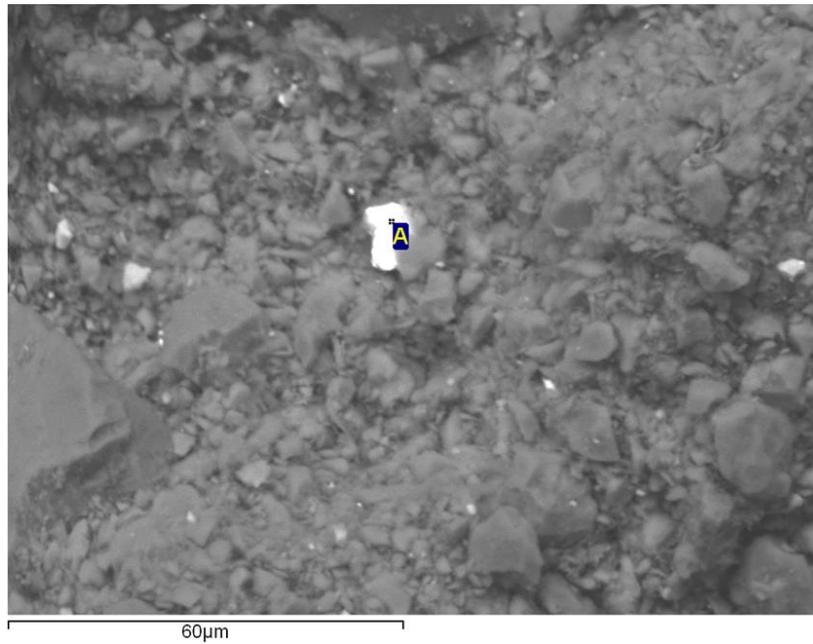


**Figura 10.** Espectros EDS del mineral estudiado.

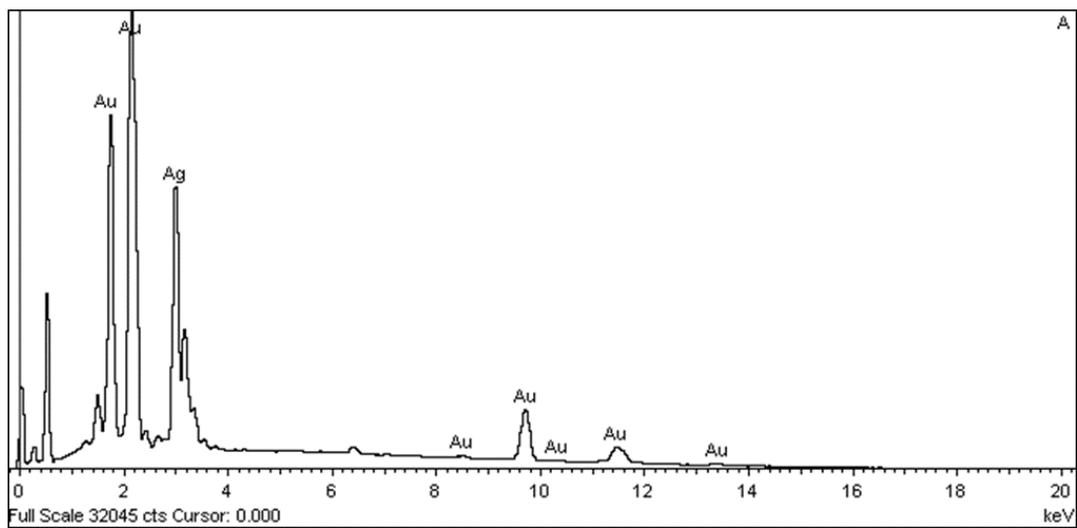
**Tabla 6.** Porcentaje en peso de los elementos presentes en el mineral, obtenidos de los espectros EDS.

<b>Elemento</b>	<b>%Peso</b>
Mg	0.41
Al	4.47
Si	39.41
K	2.14
Fe	3.10
O	50.47
Total	100.00

En la figura 11, se puede observar la partícula A, cuyo espectro EDS (figura 12) indica que está compuesta de oro y plata (Tabla 7).



**Figura 11.** Fotomicrografía del SEM de la partícula A.

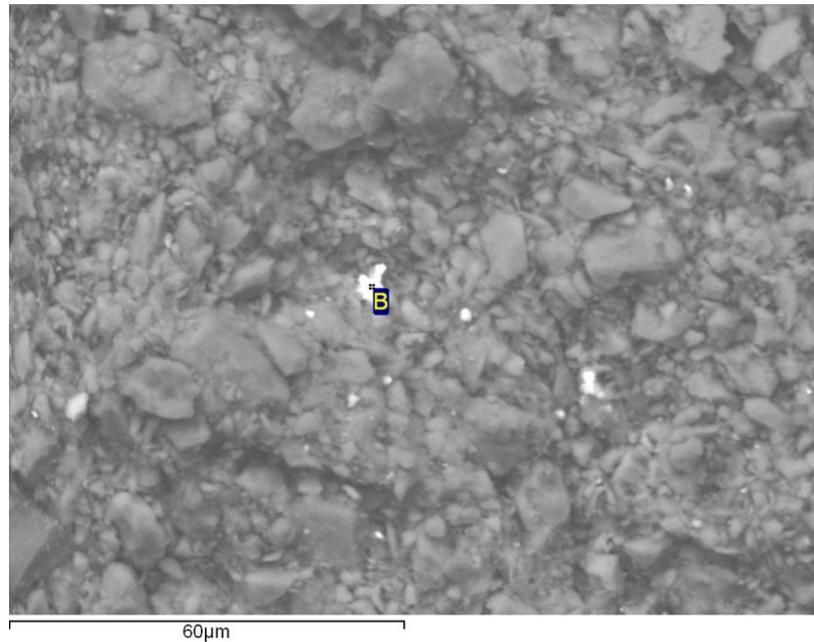


**Figura 12.** Espectros EDS de la partícula A.

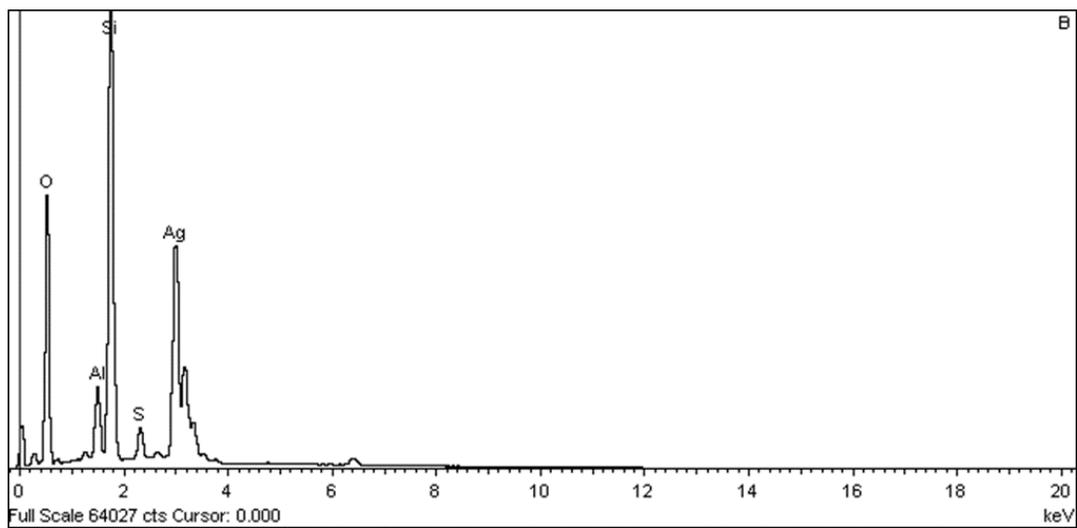
**Tabla 7.** Porcentaje en peso de los elementos presentes en la partícula A, obtenidos de los espectros EDS.

<b>Elemento</b>	<b>%Peso</b>
Ag	38.42
Au	52.35
O	9.23
Total	100.00

En la figura 13, se puede observar la partícula A, cuyo espectro EDS (figura 14) indica que está compuesta de oro y plata (Tabla 8).



**Figura 13.** Fotomicrografía del SEM de la partícula B.



**Figura 14.** Espectros EDS de la partícula B.

**Tabla 8.** Porcentaje en peso de los elementos presentes en la partícula B, obtenidos de los espectros EDS.

Elemento	%Peso
O	54.99
Al	2.73
Si	16.25
S	1.43
Ag	24.60
Total	100.00

Los resultados del análisis químico de la muestra (Tabla 9) indican que, por el método de vía húmeda, se obtiene una ley de oro es de 41.96 y la ley de plata de 114.16 g/T, y por el método de vía seca, se obtiene una ley de oro de 45.9 g/T y de plata de 120 g/T. Las leyes obtenidas por estos métodos son cercanas a los obtenidos en el análisis granulométrico de la muestra (ver Tabla 10). Para calcular los porcentajes de extracción de oro y plata, se utilizaron las leyes de oro y plata obtenida por el método de vía húmeda. La distribución en porcentaje de las leyes de oro y plata se muestran en la figura 15.

**Tabla 9.** Análisis químico de la muestra por vía húmeda y seca.

Método	g/T		Porcentaje en Peso		
	Au (g/T)	Ag (g/T)	%Cu	%Pb	%Fe
Vía Húmeda	41.96	114.16	0.01	0.28	3.00
Vía Seca	45.8	120.0	-	-	-

**Tabla 10.** Análisis granulométrico de la muestra.

<b>Malla</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Ley Au (g/T)</b>	<b>Ley Ag (g/T)</b>	<b>Contenido Metálico Au (g/T)</b>	<b>Contenido Metálico Ag (g/T)</b>
+1/4	565	56.50	0.51	1.60	28.59	90.40
-1/4 +10	260	26.00	0.35	0.80	9.18	20.80
-10+20	70	7.00	0.25	0.73	1.77	5.13
-20+30	20	2.00	0.26	0.60	0.52	1.20
-30+60	30	3.00	0.27	0.60	0.82	1.80
-60+80	10	1.00	0.28	0.60	0.28	0.60
-80+100	5	0.50	0.19	0.73	0.10	0.37
-100+140	10	1.00	0.38	0.80	0.38	0.80
-140+200	10	1.00	0.48	0.90	0.48	0.90
-200	20	2.00	0.36	0.87	0.72	1.73
<b>TOTAL</b>	<b>1000</b>	<b>100.00</b>	<b>--</b>	<b>--</b>	<b>42.84</b>	<b>123.73</b>

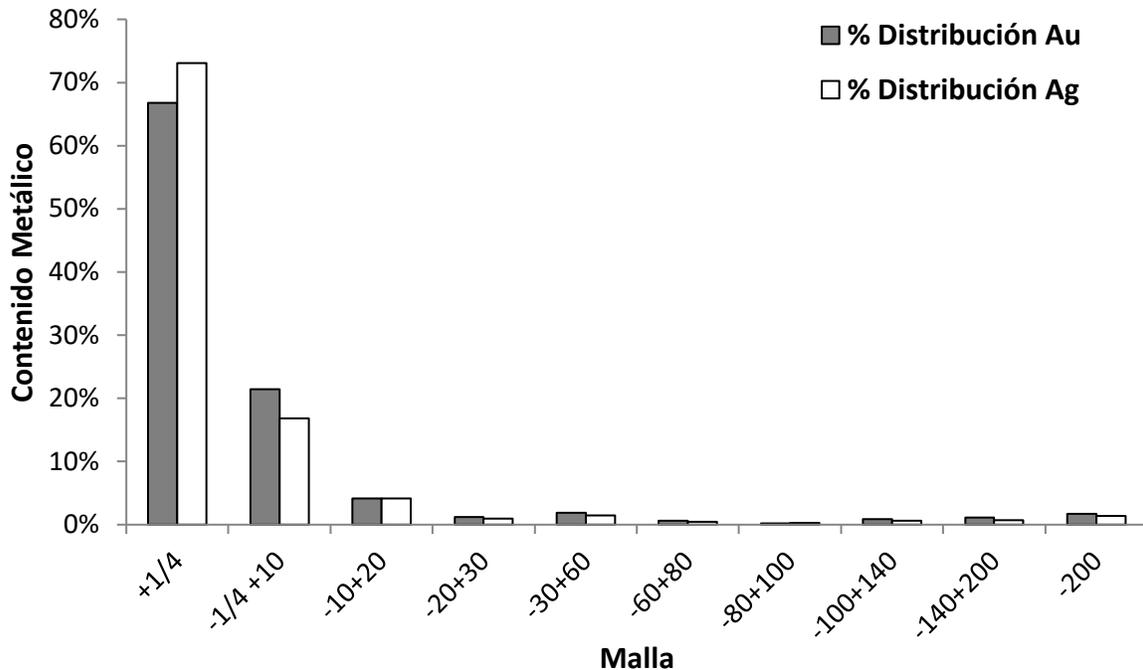


Figura 15. Distribución en porcentaje de los valores de oro y plata por malla.

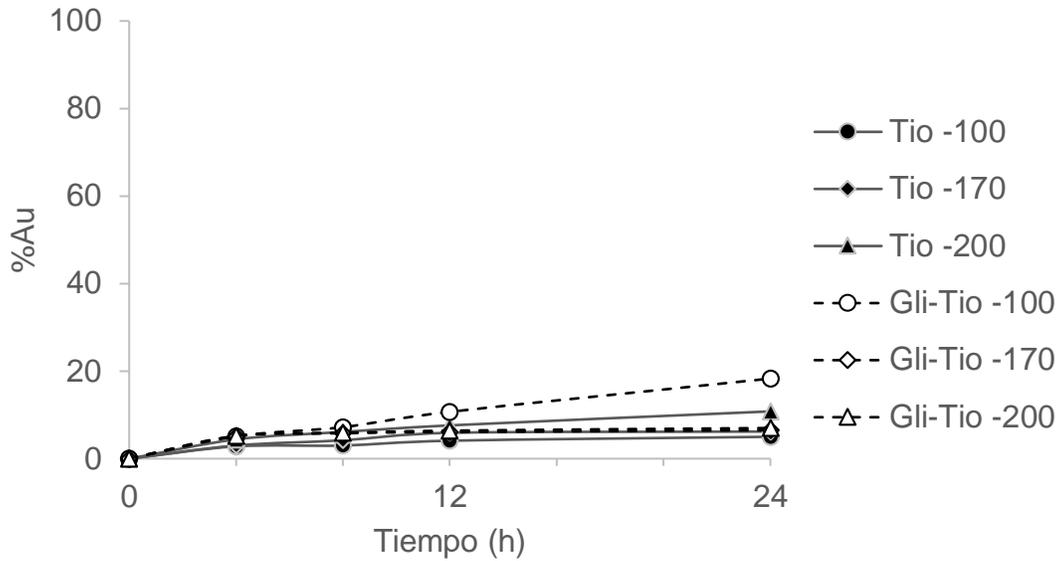
## 4.2 Pruebas con Tiosulfato de Sodio y Glicina

### 4.2.1 Porcentajes de Extracción de Oro y Plata

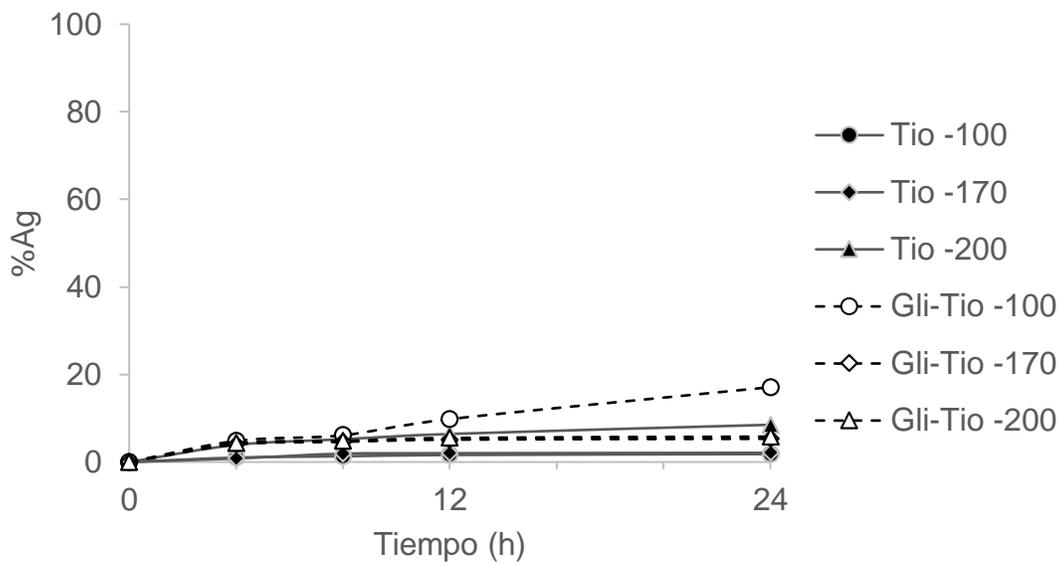
En la Tabla 11, se puede ver que después de 24 horas de lixiviación, la presencia de glicina no tuvo un gran efecto en los porcentajes de extracción de oro y plata, sin embargo, un caso sobresale sobre los demás. Cuando el porcentaje de sólidos es del 50%, la concentración de tiosulfato de sodio es de 3 g/L, y el mineral ha pasado por la malla 100; en ausencia de glicina, el porcentaje de extracción de oro fue de 5.0% y el de plata fue de 1.8%, y en presencia de glicina, el porcentaje de extracción de oro fue de 18.3% y el de plata fue de 17.1%. Estos porcentajes de extracción de oro y plata son todavía bajos.

**Tabla 11.** Porcentaje de extracción de oro y plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50%, con 3 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.

Prueba	Sistema	Malla	pH 0;h	pH 24;h	%EXT Au 24;h	%EXT Ag 24;h
1	Tio	-100	11.2	10.4	5.0	1.8
5	Tio	-170	11.1	10.5	6.2	2.1
9	Tio	-200	11.0	10.2	10.8	8.5
13	Gli-Tio	-100	11.0	10.1	18.3	17.1
17	Gli-Tio	-170	10.9	10.4	6.5	5.3
21	Gli-Tio	-200	11.0	10.0	7.0	5.8



**Figura 16.** Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50%, con 3 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.

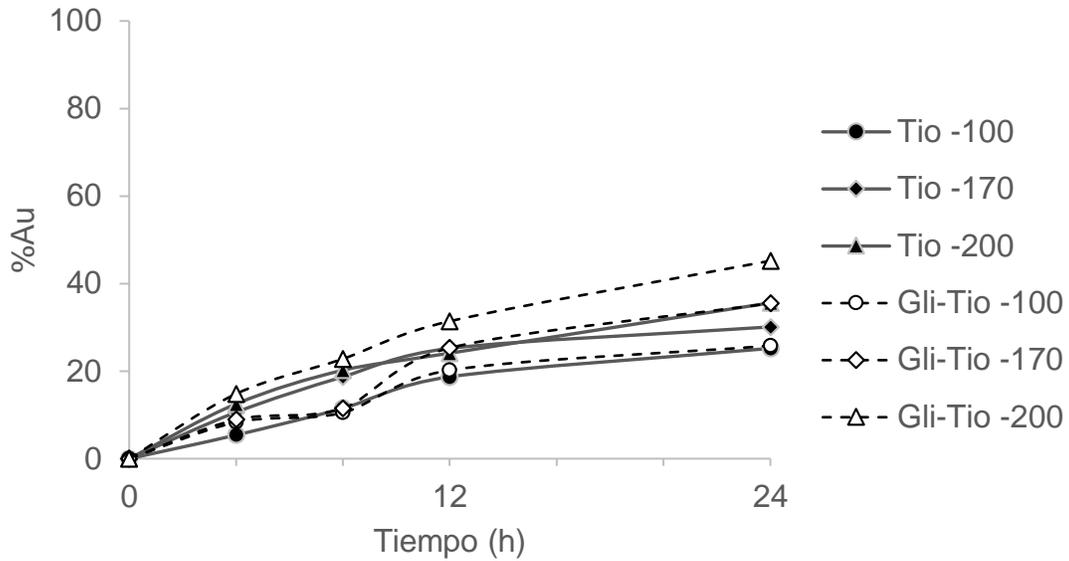


**Figura 17.** Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50%, con 3 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.

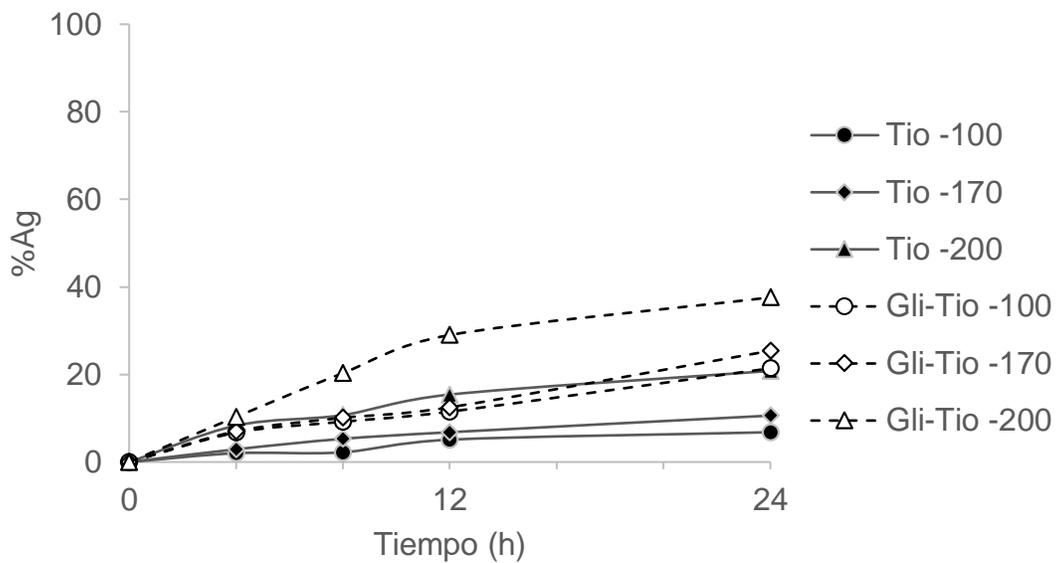
En la Tabla 12, se puede observar que después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33% y con 10 g/L de tiosulfato de sodio, la presencia de glicina mejoró los porcentajes de extracción de oro y plata, en casi todos los casos. A pesar de ello, los porcentajes de oro y plata todavía son bajos.

**Tabla 12.** Porcentaje de extracción de oro y plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33%, con 10 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.

Prueba	Sistema	Malla	pH 0;h	pH 24;h	%EXT Au 24;h	%EXT Ag 24;h
2	Tio	-100	11.2	10.2	25.2	6.8
6	Tio	-170	11.0	10.3	30.1	10.6
10	Tio	-200	11.0	10.4	35.6	20.8
14	Gli-Tio	-100	10.9	10.0	25.8	21.4
18	Gli-Tio	-170	11.0	10.3	35.5	25.4
22	Gli-Tio	-200	10.9	10.0	45.2	37.6



**Figura 18.** Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación a un porcentaje de sólidos del 33.33%, con 10 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.

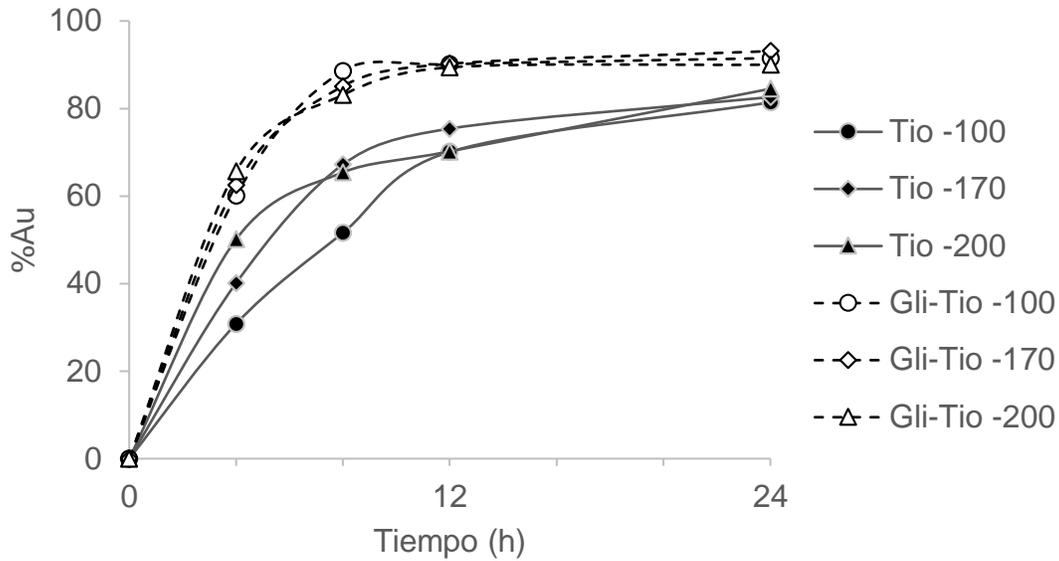


**Figura 19.** Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33%, con 10 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.

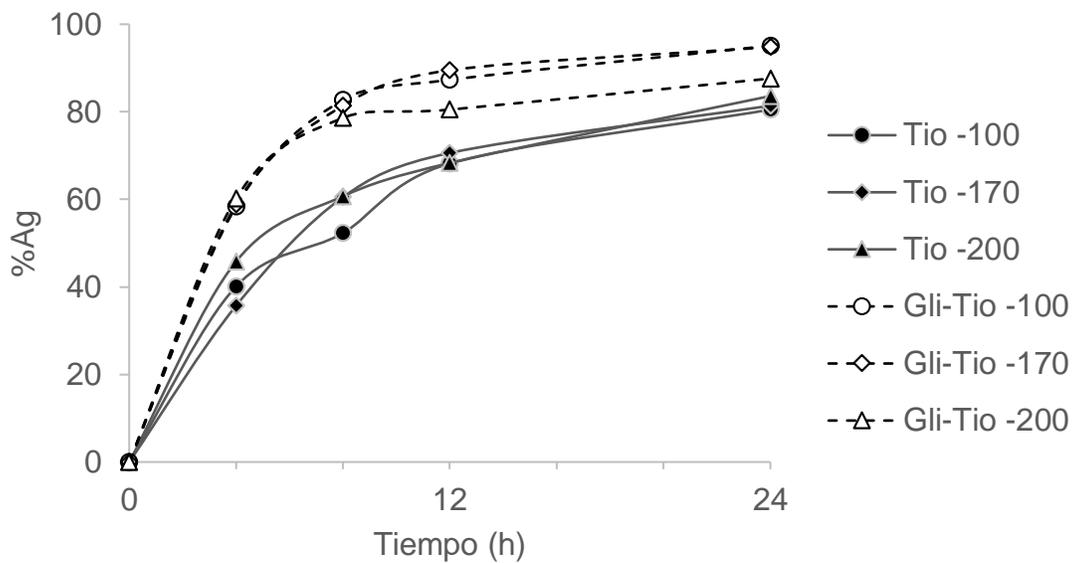
En la Tabla 13, se puede observar que después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25% y con 20 g/L de tiosulfato de sodio, la adición de glicina mejoró las extracciones de oro y plata. En ausencia de glicina, los porcentajes de extracción de oro y plata estuvieron entre 80 y 85%, y en presencia de glicina los porcentajes de extracción de oro y plata estuvieron entre 90 y 95%, excepto por un caso, cuando el mineral pasó por la malla 200 la extracción de plata fue de 87.6%.

**Tabla 13.** Porcentaje de extracción de oro y plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25%, con 20 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.

Prueba	Sistema	Malla	pH 0;h	pH 24;h	%EXT Au 24;h	%EXT Ag 24;h
3	Tio	-100	11.1	10.2	81.4	80.5
7	Tio	-170	11.1	10.4	82.6	81.4
11	Tio	-200	11.1	10.5	84.5	83.6
15	Gli-Tio	-100	10.8	10.1	91.5	95.1
19	Gli-Tio	-170	10.9	10.2	93.1	94.8
23	Gli-Tio	-200	11.0	10.1	90.0	87.6



**Figura 20.** Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25%, con 20 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.

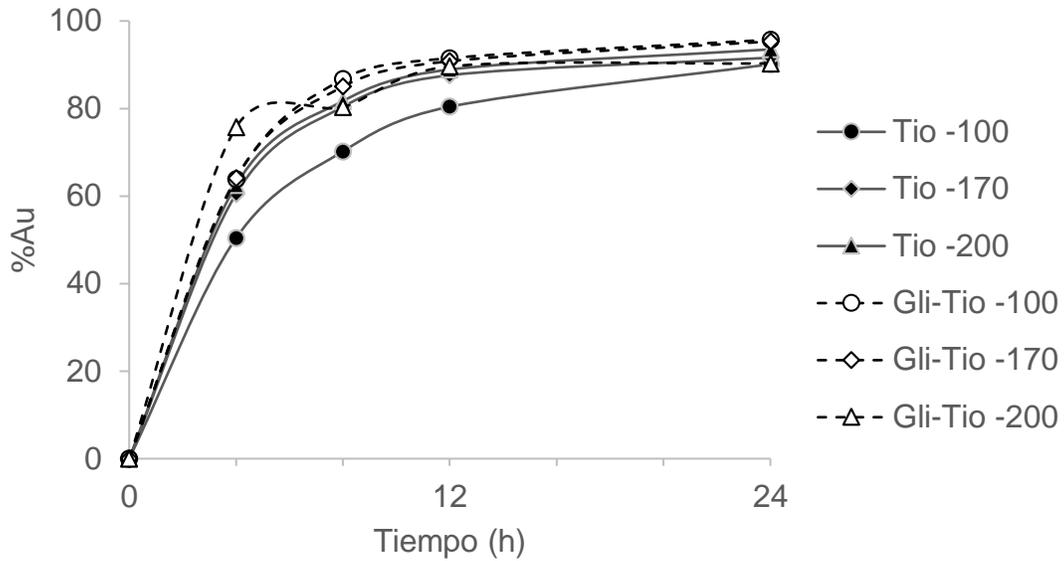


**Figura 21.** Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25%, con 20 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.

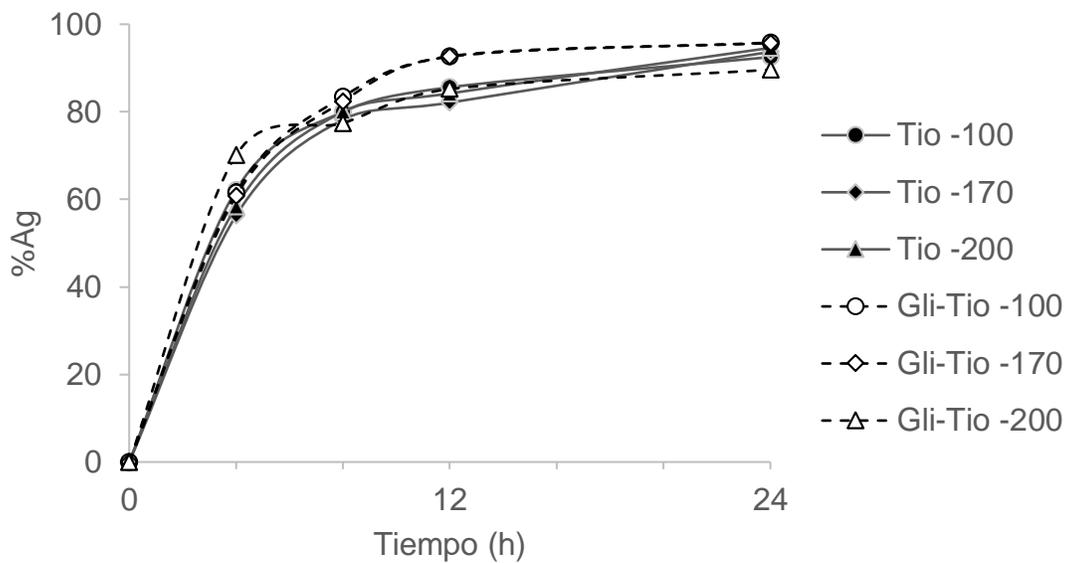
En la Tabla 14, se puede observar que después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20%, y con 30 g/L de tiosulfato de sodio, en presencia o ausencia de glicina, los porcentajes de extracción de oro y plata son cercanos o superiores al 90%.

**Tabla 14.** Porcentaje de extracción de oro y plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20%, con 30 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.

Prueba	Sistema	Malla	pH 0;h	pH 24;h	%EXT Au 24;h	%EXT Ag 24;h
4	Tio	-100	11.2	10.4	90.1	92.5
8	Tio	-170	11.2	10.6	91.6	93.7
12	Tio	-200	11.0	10.3	93.5	94.6
16	Gli-Tio	-100	11.0	10.5	95.7	95.8
20	Gli-Tio	-170	11.0	10.4	95.3	95.7
24	Gli-Tio	-200	11.0	10.0	90.3	89.6



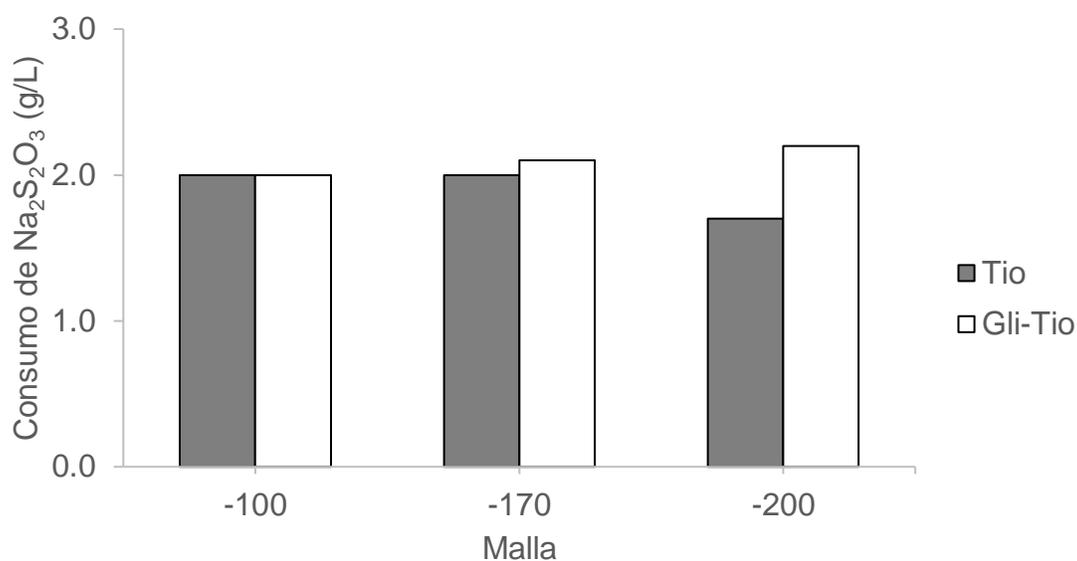
**Figura 22.** Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20%, con 30 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.



**Figura 23.** Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20%, con 30 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia de 5 g/L de glicina.

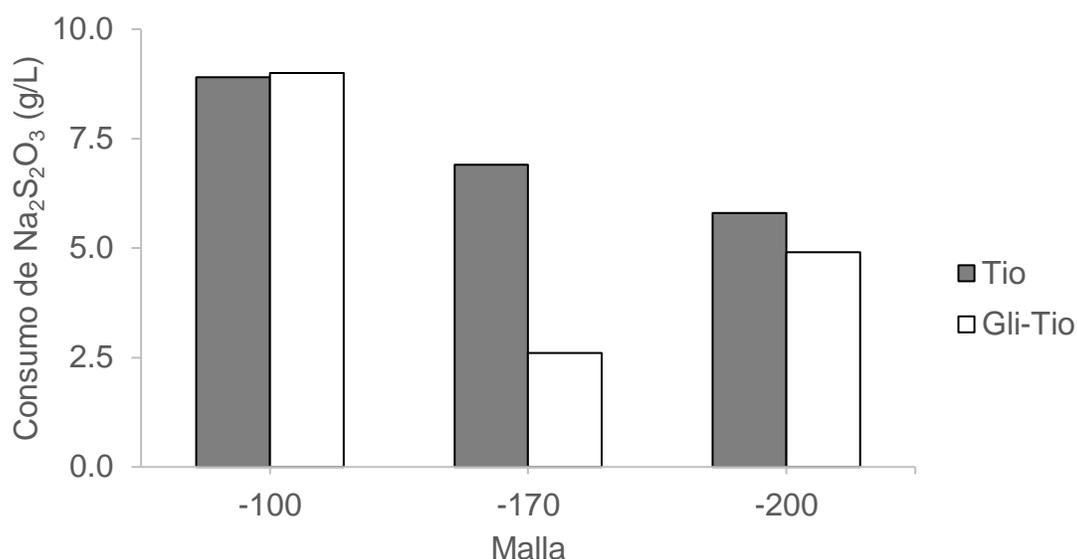
#### 4.2.2 Consumos de Tiosulfato de Sodio en Presencia y Ausencia de Glicina

En la figura 24, se puede ver que después de 24 horas de lixiviación, la adición de glicina no parece tener un efecto significativo en los consumos de tiosulfato de sodio, a un porcentaje de sólidos del 50%, y una concentración inicial de tiosulfato de sodio es de 3 g/L. Un caso resalta, cuando el mineral ha pasado por la malla 200, el consumo de tiosulfato de sodio en ausencia de glicina es de 1.7 g/L, y en presencia de glicina es de 2.2 g/L. Estos valores no están muy alejados del resto de los casos, donde, con o sin glicina, los consumos de tiosulfato de sodio se encuentran en o cercano a 2.0 g/L.



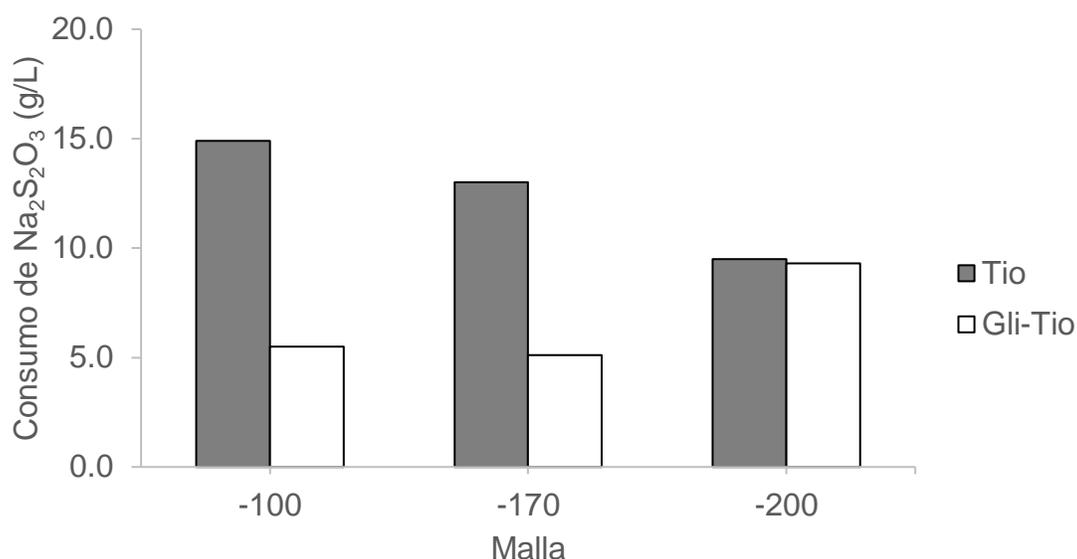
**Figura 24.** Consumos de tiosulfato de sodio por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50%, con 3 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia 5 g/L de glicina (Tio = tiosulfato de sodio, Gli-Tio = Glicina y Tiosulfato de sodio).

En la figura 25, se puede observar que después de 24 horas de lixiviación, la presencia de glicina redujo el consumo de tiosulfato de sodio en dos casos. Cuando el porcentaje de sólidos es del 33.33%, la concentración inicial de tiosulfato de sodio es de 10 g/L, y el mineral ha pasado por la malla 170, el consumo de tiosulfato de sodio, en ausencia de glicina, fue de 6.9 g/L, y en presencia de glicina de 2.6 g/L; bajo las mismas condiciones, pero con el mineral habiendo pasado por la malla 200, el consumo de tiosulfato de sodio, en ausencia de glicina, fue de 5.8 g/L, y en presencia de glicina fue de 4.9 g/L. Cuando el mineral ha pasado por la malla 100, no hay un cambio significativo en el consumo de tiosulfato en presencia de glicina.



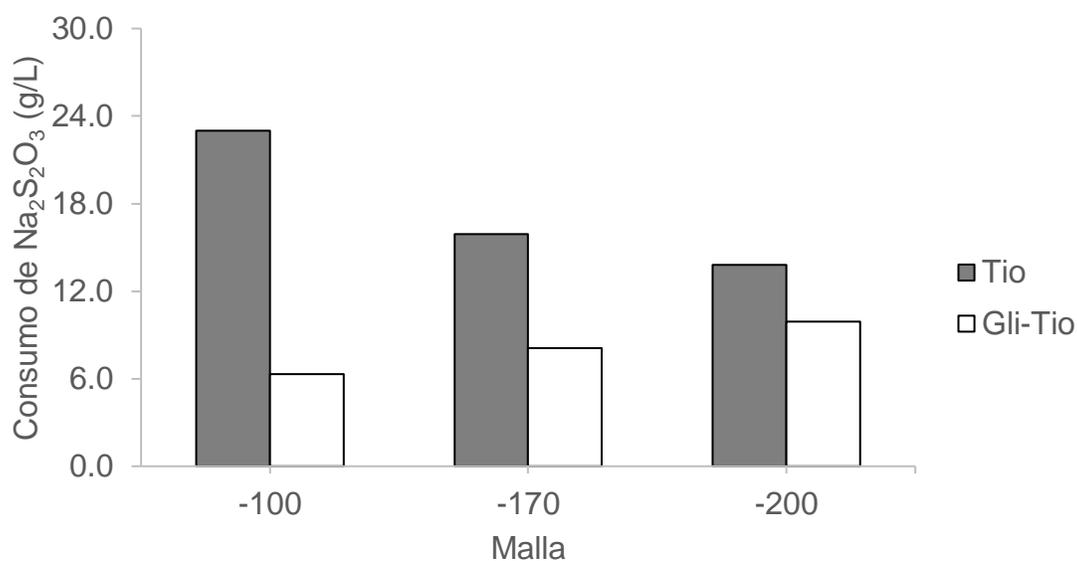
**Figura 25.** Consumos de tiosulfato de sodio por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33%, con 10 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia 5 g/L de glicina (Tio = tiosulfato de sodio, Gli-Tio = Glicina y Tiosulfato de sodio).

En la figura 26, se puede observar que después de 24 horas de lixiviación, la presencia de glicina redujo el consumo de tiosulfato de sodio en dos casos. Cuando el porcentaje de sólidos es del 25%, la concentración inicial de tiosulfato de sodio es de 20 g/L, y el mineral ha pasado por la malla 100, el consumo de tiosulfato de sodio, en ausencia de glicina, fue de 14.9 g/L, y en presencia de glicina de 5.5 g/L; bajo las mismas condiciones, pero con el mineral habiendo pasado por la malla 170, el consumo de tiosulfato de sodio, en ausencia de glicina, fue de 13.0 g/L, y en presencia de glicina fue de 5.1 g/L. Cuando el mineral ha pasado por la malla 200, con o sin glicina, el consumo de tiosulfato de sodio es superior a 9.0 g/L.



**Figura 26.** Consumos de tiosulfato de sodio por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25%, con 20 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia 5 g/L de glicina (Tio = tiosulfato de sodio, Gli-Tio = Glicina y Tiosulfato de sodio).

En la figura 27, se puede observar que después de 24 horas de lixiviación, la presencia de glicina redujo el consumo de tiosulfato de sodio en todos los casos. Cuando el porcentaje de sólidos es del 20%, la concentración inicial de tiosulfato de sodio es de 30 g/L, y el mineral ha pasado por la malla 100, el consumo de tiosulfato de sodio, en ausencia de glicina, fue de 23.0 g/L, y en presencia de glicina de 6.3 g/L; bajo las mismas condiciones, pero con el mineral habiendo pasado por la malla 170, el consumo de tiosulfato de sodio, en ausencia de glicina, fue de 15.9 g/L y en presencia de glicina, fue de 8.1 g/L, por último, cuando el mineral ha pasado por la malla 200, el consumo de tiosulfato de sodio, en ausencia de glicina, fue de 13.8 g/L y, en presencia de glicina fue de 9.9 g/L



**Figura 27.** Consumos de tiosulfato de sodio por tamaño de partícula, después de 24 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20%, con 30 g/L de tiosulfato de sodio, 70 mg/L de cobre y en presencia y ausencia 5 g/L de glicina (Tio = tiosulfato de sodio, Gli-Tio = Glicina y Tiosulfato de sodio).

De la figura 25 a la 27, se puede observar claramente que en ausencia de glicina y a medida que se reduce el tamaño de partícula, se reduce el consumo de tiosulfato de sodio. La presencia de glicina disminuye el consumo de tiosulfato, en algunos casos, pero su efectividad se reduce a medida que decrece el tamaño de partícula, esta tendencia se puede observar mejor en la figura 26 y 27, y en menor medida en la figura 25.

### 4.3 Pruebas con Cianuro de Sodio

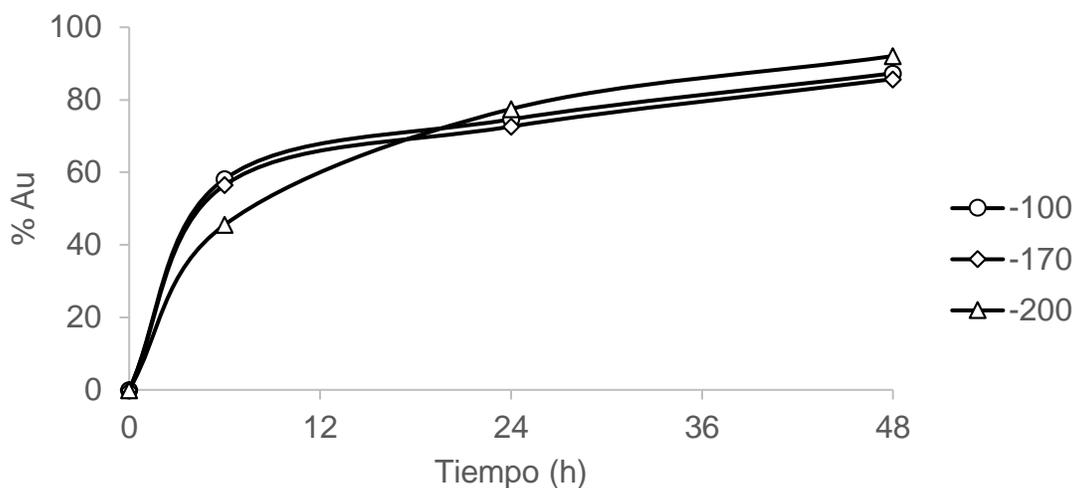
#### 4.3.1 Porcentajes de extracción de oro y plata

En la Tabla 15, se puede observar que los porcentajes de extracción de oro son elevados en casi todos los casos. La mayoría de los porcentajes de extracción de plata son altos cuando se tiene un porcentaje de sólidos menor a 33.33%. Si el porcentaje de sólidos es del 20%, el porcentaje de extracción de oro y plata es superior a 90%. En la Tabla 15, también se puede notar que el porcentaje de sólidos influye más en los porcentajes de extracción de oro y plata que el tamaño de partícula.

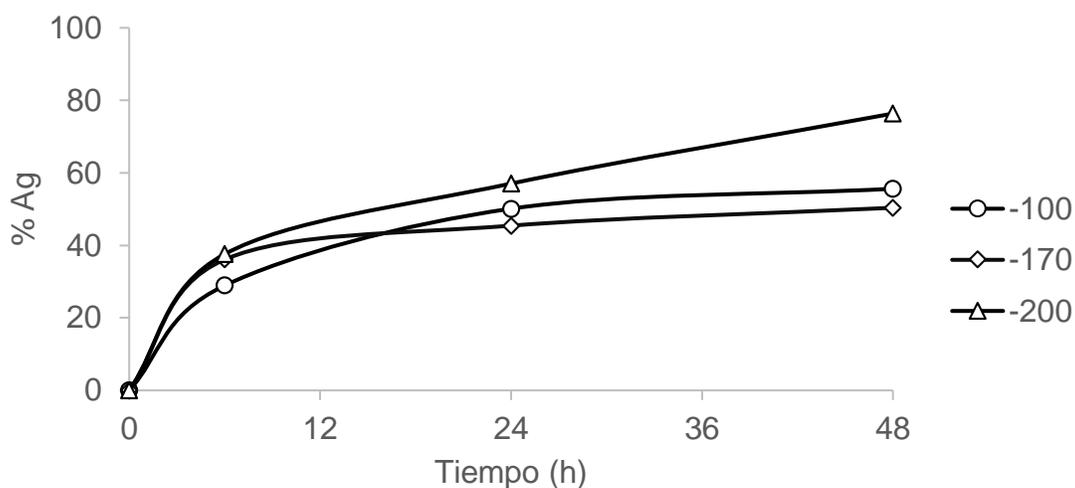
**Tabla 15.** Porcentaje de extracción de oro y plata por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, con distintos porcentajes de sólidos y utilizando 1 g/L de cianuro de sodio.

Prueba	%Sólidos	Malla	%EXT Au 48;h	%EXT Ag 48;h
7	50	-100	87.30	55.62
8	50	-170	85.71	50.36
9	50	-200	92.06	76.35
11	33.33	-100	92.86	82.48
10	33.33	-170	71.91	79.56
12	33.33	-200	95.24	90.36
1	25	-100	84.92	67.30
2	25	-170	95.24	82.48
3	25	-200	95.40	84.82
4	20	-100	95.40	92.99
5	20	-170	96.51	95.04
6	20	-200	95.40	90.36

Cuando el porcentaje de sólidos es del 50%, la concentración de cianuro de sodio es de 1 g/L, y el mineral ha pasado por la malla 100, 170 o 200; el porcentaje de extracción de oro fue superior a 85%; bajo las mismas condiciones, pero con el mineral habiendo pasado por la malla 100 o 170, el porcentaje de extracción de plata fue cercano al 50%, y cuando el mineral pasó por la malla 200, el porcentaje de extracción de plata fue de 76.35%.

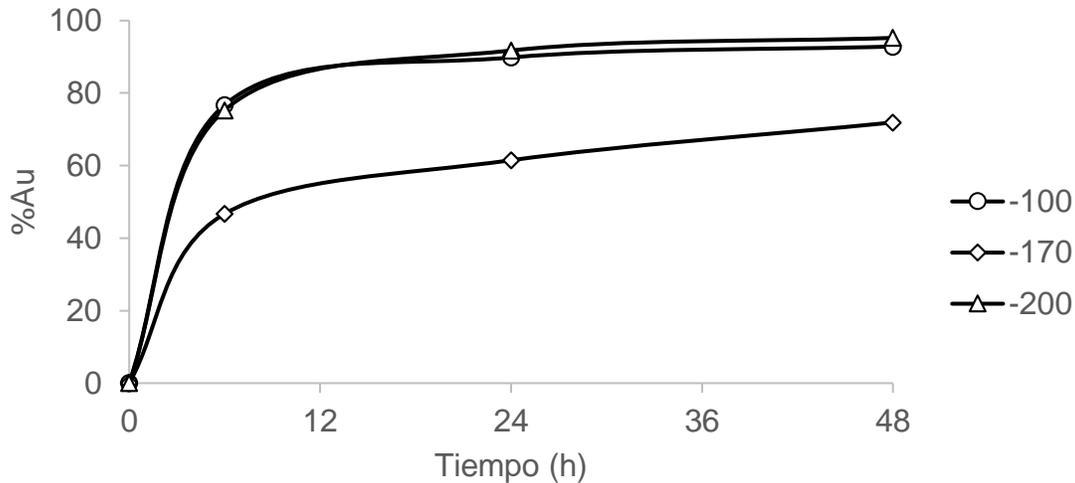


**Figura 28.** Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50% y con 1 g/L de cianuro de sodio.

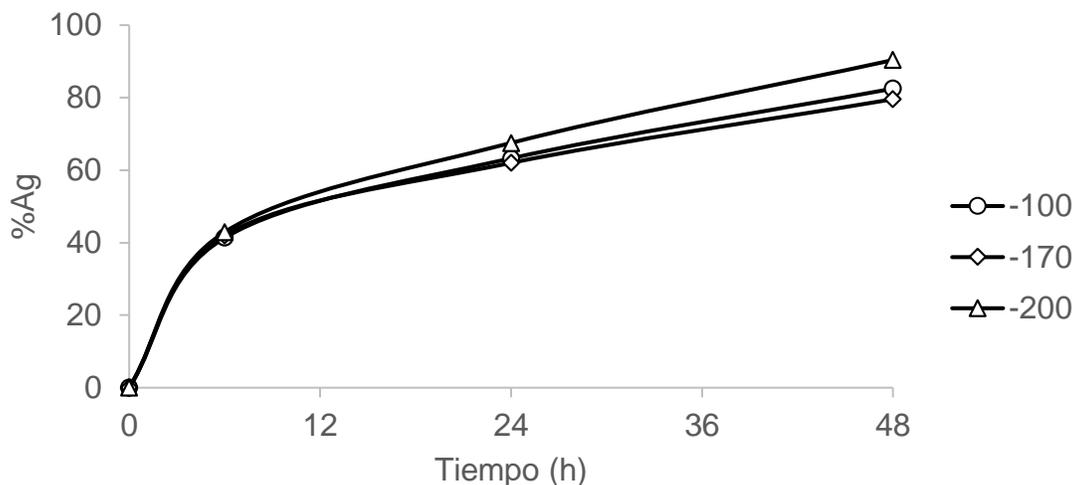


**Figura 29.** Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50% y con 1 g/L de cianuro de sodio.

Cuando el porcentaje de sólidos es del 33.33%, la concentración de cianuro de sodio es de 1 g/L, y el mineral ha pasado por la malla 100 o 200; el porcentaje de extracción de oro fue superior a 90% y cuando el mineral pasó por la malla 170 el porcentaje de extracción de oro fue de aproximadamente 72%; bajo las mismas condiciones, pero con el mineral habiendo pasado por la malla 100 o 170, el porcentaje de extracción de plata fue cercano al 80%, y cuando el mineral pasó por la malla 200, el porcentaje de extracción de plata fue de 90.36%.

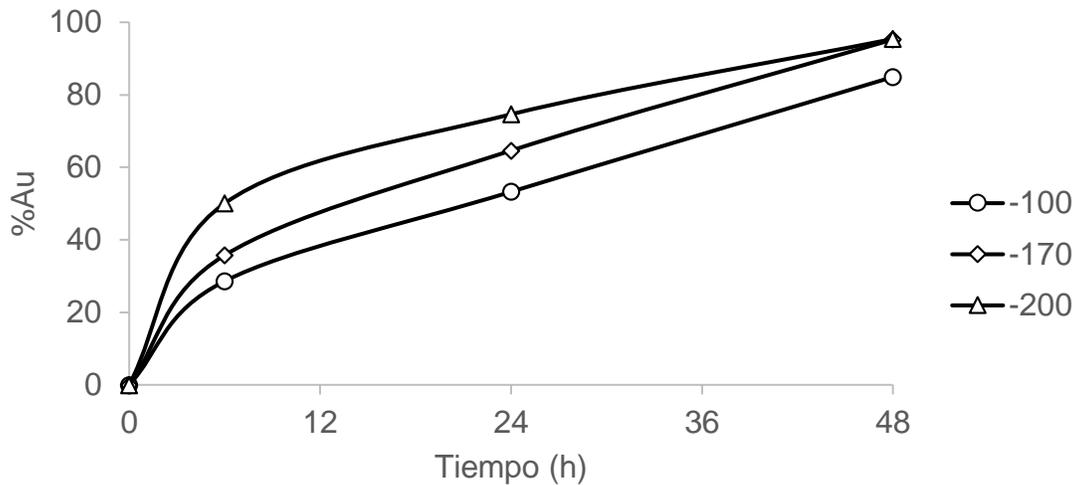


**Figura 30.** Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33% y con 1 g/L de cianuro de sodio.

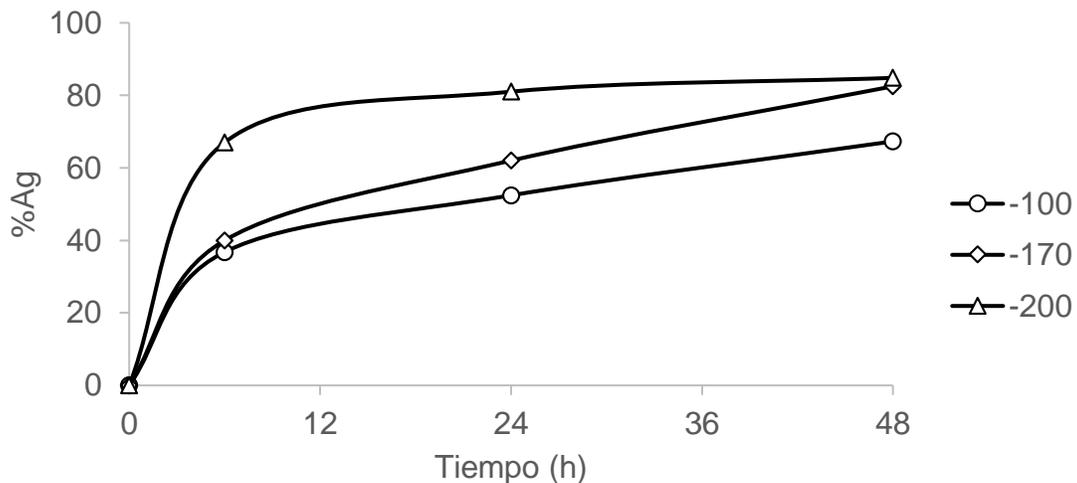


**Figura 31.** Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33% y con 1 g/L de cianuro de sodio.

Cuando el porcentaje de sólidos es del 25%, la concentración de cianuro es de 1 g/L, y el mineral ha pasado por la malla 170 o 200; el porcentaje de extracción de oro fue del 95% y el porcentaje de extracción de plata fue superior a 80%; bajo las mismas condiciones, pero con el mineral habiendo pasado por la malla 100, el porcentaje de extracción de oro fue de aproximadamente 85% y el porcentaje de extracción de plata fue de 67%.

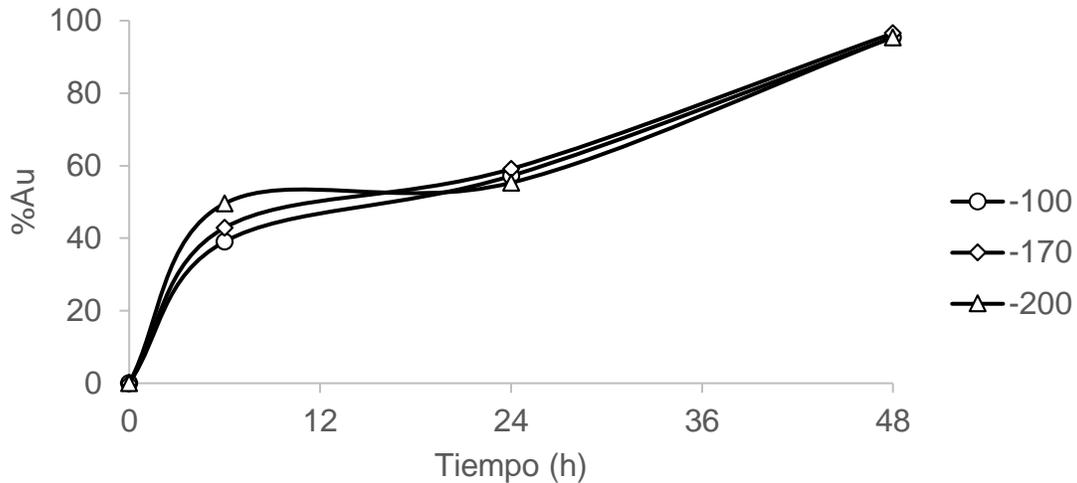


**Figura 32.** Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25% y con 1 g/L de cianuro de sodio.

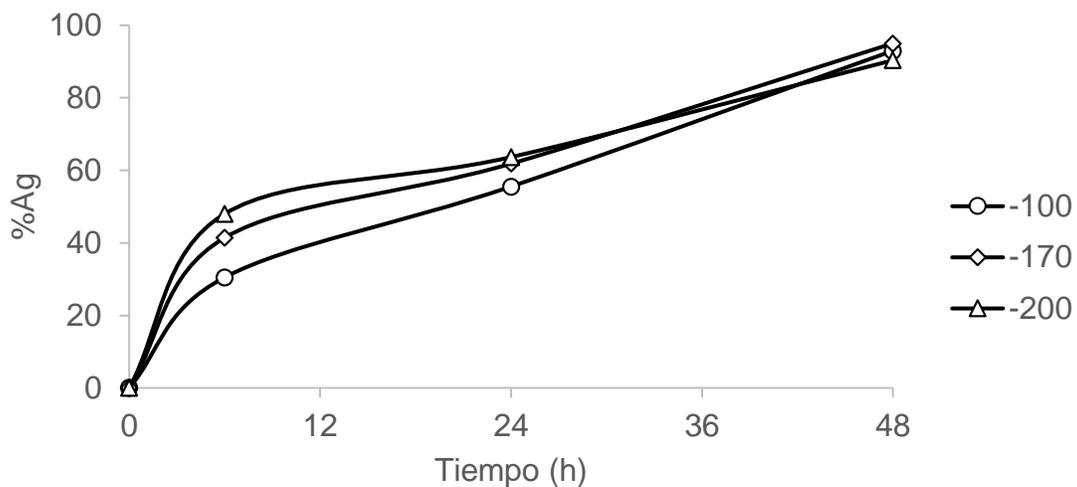


**Figura 33.** Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25% y con 1 g/L de cianuro de sodio.

Cuando el porcentaje de sólidos es del 20%, la concentración de cianuro de sodio es de 1 g/L, y el mineral ha pasado por la malla 100, 170 o 200; el porcentaje de extracción de oro fue del 95% y el porcentaje de extracción de plata fue superior a 90%.



**Figura 34.** Porcentaje de extracción de oro por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20% y con 1 g/L de cianuro de sodio.



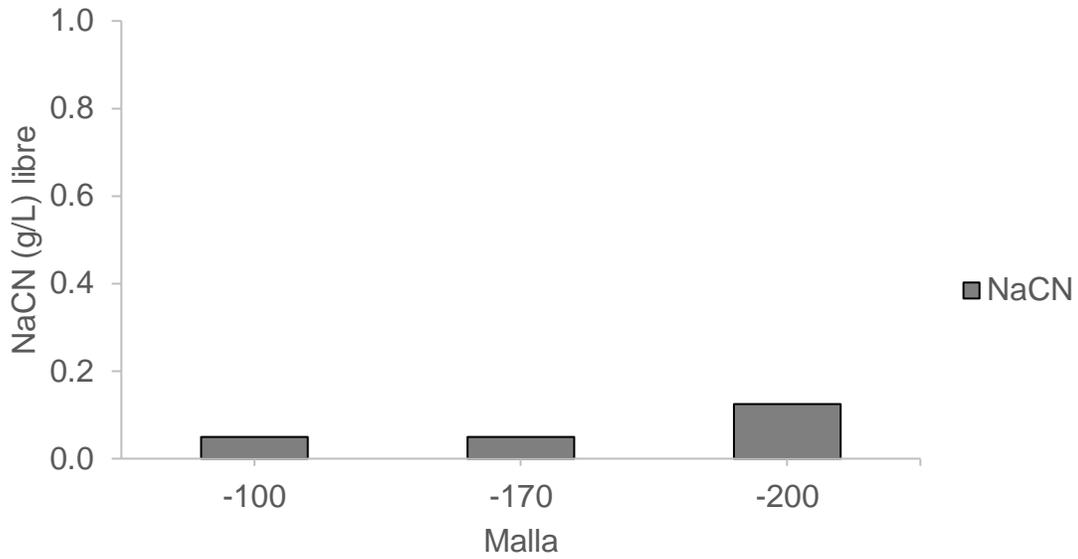
**Figura 35.** Porcentaje de extracción de plata por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20% y con 1 g/L de cianuro de sodio.

### 4.3.2 Cianuro libre

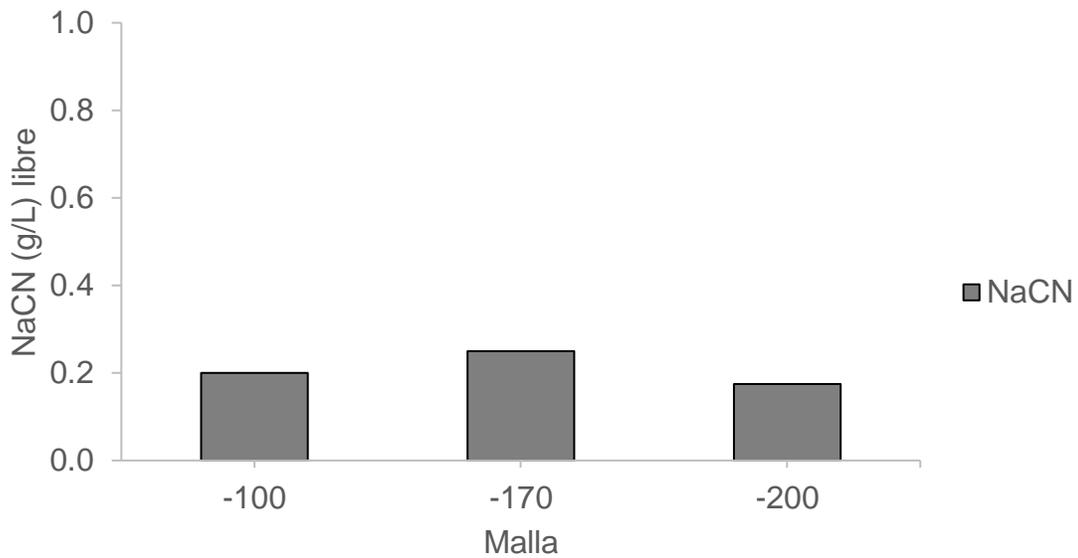
En la Tabla 16, se puede observar que a medida que se reduce el porcentaje de sólidos, aumenta el cianuro de sodio libre. A un porcentaje de sólidos del 50%, el cianuro de sodio libre es cercano o menor a 0.1 g/L en todas las mallas; a un porcentaje de sólidos del 33.33%, el cianuro de sodio libre se mantiene cercano al 0.2 g/L en todas las mallas; a un porcentaje de sólidos del 25 o 20%, el cianuro de sodio libre disminuye a medida que se reduce el tamaño de partícula.

**Tabla 16.** Cianuro de sodio libre por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, con distintos porcentajes de sólidos y utilizando 1 g/L de cianuro de sodio.

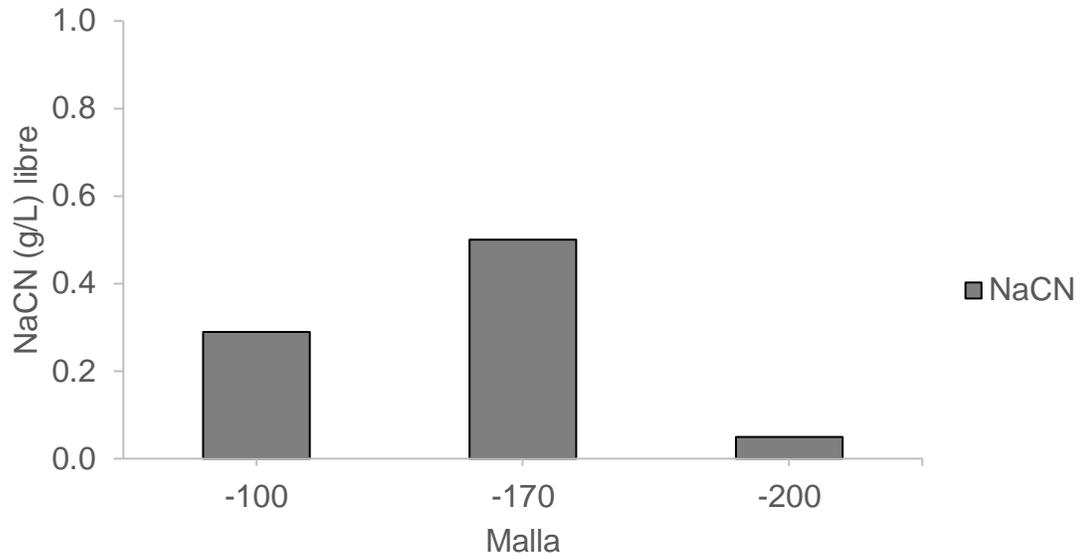
Prueba	%Sólidos	Malla	pH 48;h	NaCN (g/L) 48;h
7	50	-100	10.8	0.05
8	50	-170	10.2	0.05
9	50	-200	10.8	0.125
11	33.33	-100	10.6	0.2
10	33.33	-170	10.3	0.25
12	33.33	-200	10.6	0.175
1	25	-100	10.4	0.29
2	25	-170	10.8	0.5
3	25	-200	10.2	0.05
4	20	-100	10.6	0.55
5	20	-170	10.7	0.45
6	20	-200	10.6	0.25



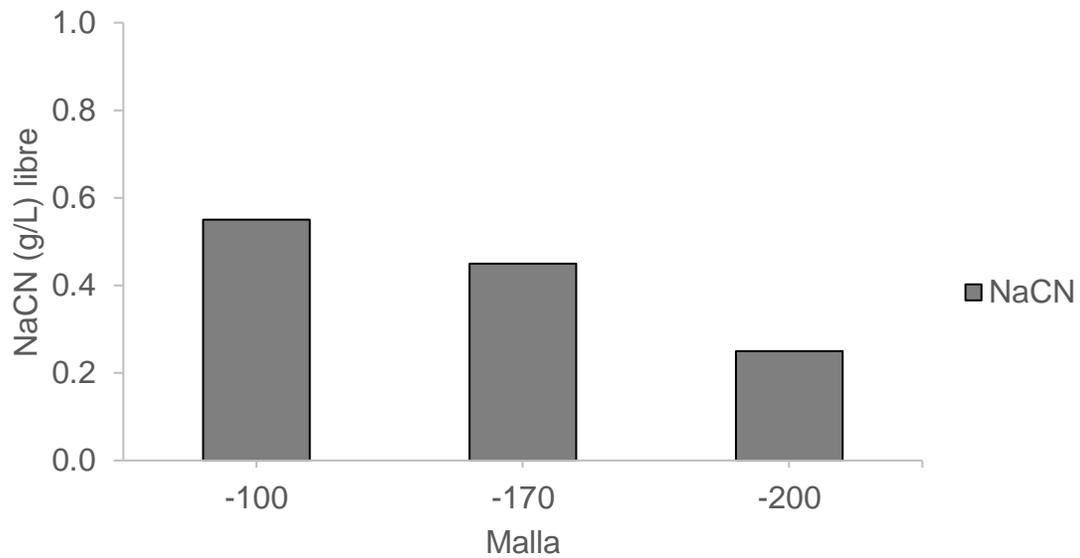
**Figura 36.** Cianuro de sodio libre por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 50% y con 1 g/L de cianuro de sodio.



**Figura 37.** Cianuro de sodio libre por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 33.33% y con 1 g/L de cianuro de sodio.



**Figura 38.** Cianuro de sodio libre por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 25% y con 1 g/L de cianuro de sodio.



**Figura 39.** Cianuro de sodio libre por tamaño de partícula, después de 48 horas de lixiviación, a un porcentaje de sólidos del 20% y con 1 g/L de cianuro de sodio.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- En presencia de únicamente tiosulfato de sodio, se alcanzaron porcentajes de extracción de oro y plata superiores al 90%, solo cuando el porcentaje de sólidos fue del 20% y la concentración del tiosulfato de sodio fue de 30 g/L.
- En presencia de glicina, se alcanzaron porcentajes de extracción de oro y plata cercanos o superiores a 90% cuando el porcentaje de sólidos fue del 20% y la concentración de tiosulfato de sodio fue de 30 g/L, y cuando el porcentaje de sólidos fue del 25% y la concentración de tiosulfato de sodio fue de 20 g/L.
- La adición de glicina reduce el consumo de tiosulfato en algunos casos. Los casos más notables se presentan cuando el mineral ha pasado por la malla 100 o 170 y el porcentaje de sólidos es del 20% y la concentración de tiosulfato de sodio es de 30 g/L, y cuando el porcentaje de sólidos es del 25% y la concentración de tiosulfato de sodio es de 20 g/L.
- En ausencia de glicina, a medida que se reduce el tamaño de partícula, se reduce el consumo de tiosulfato de sodio. En presencia de glicina, el consumo de tiosulfato de sodio, se reduce en algunos casos, pero su efectividad disminuye a medida que decrece el tamaño de partícula (véase figura 26 y 27).
- Se presentaron bajos porcentajes de extracción de oro y plata, así como ningún cambio significativo en los consumos de tiosulfato de sodio, cuando el porcentaje de sólidos es del 50% y la concentración de tiosulfato de sodio es de 3 g/L, y cuando el porcentaje de sólidos es del 33.33% y la concentración de tiosulfato de sodio es de 10 g/L.
- A mayor concentración de reactivo, mayor velocidad de reacción y mayor extracción.
- A menor tamaño de partícula, mayor velocidad de reacción.
- Durante la lixiviación con cianuro de sodio se obtuvieron porcentajes de extracción de oro elevados en casi todos los casos. Los porcentajes de extracción de plata fueron altos

cuando se tiene un porcentaje de sólidos menor a 33.33%. Si el porcentaje de sólidos es del 20%, el porcentaje de extracción de oro y plata es superior a 90%.

## 5.2 Recomendaciones

- Una de las características del tiosulfato de sodio es que puede extraer valores de metales preciosos en minerales refractarios, por lo que se recomienda hacer pruebas de lixiviación en dichos minerales.
- Hacer pruebas de lixiviación con tiosulfato de amonio con el fin de comparar los resultados con tiosulfato de sodio y glicina.
- Como características los tiosulfatos de amonio y sodio son recomendados también para minerales donde haya cobre, ya que este es un cianicida fuerte.

---

## CAPÍTULO 6

### BIBLIOGRAFÍA

1. Adams, M. D. (2016) *Advances in Gold Ore Processing: Developments in Mineral Processing*. Segunda Ed. Amsterdam: Elsevier.
2. Constable, E. C. (1996) *Metals and Ligand Reactivity: An Introduction to the Organic Chemistry of Metal Complexes, New, revised and expanded edition*. Segunda Ed. New York: VCH Publishers.
3. Das, D. (2005) *Biochemistry, Parte 2*. Doceaba Ed. Calcuta, India: Academic Publishers.  
Disponibile en:  
[https://books.google.com.mx/books?id=Gx0fZ\\_DF5BoC&printsec=copyright&hl=es#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=Gx0fZ_DF5BoC&printsec=copyright&hl=es#v=onepage&q&f=false).
4. Đurović, M. D., Bugarčić, Ž. D. y van Eldik, R. (2017) “Stability and reactivity of gold compounds – From fundamental aspects to applications”, *Coordination Chemistry Reviews*, 338, pp. 186–206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.02.015>.
5. Eksteen, J. J. y Oraby, E. A. (2015) “The leaching and adsorption of gold using low concentration amino acids and hydrogen peroxide: Effect of catalytic ions, sulphide minerals and amino acid type”, *Minerals Engineering*, 70, pp. 36–42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.08.020>.
6. F. Bell, C. (1980) *Quelación de Metales: Principios y Aplicaciones*. México: México: El Manual Moderno.
7. Feng, D. y van Deventer, J. S. J. (2011) “The role of amino acids in the thiosulphate leaching of gold”, *Minerals Engineering*, 24(9), pp. 1022–1024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.04.017>.
8. Free, M. L. (2013) *Hydrometallurgy: Fundamentals and Applications*. New Jersey, WA: John Wiley & Sons.
9. Gupta, C. K. (2003) *Chemical Metallurgy Principles and Practice*. Mumbai, India: John

- Wiley & Sons. doi: 10.1002/ange.200385071.
10. Lawrance, G. A. (2010) *Introduction to Coordination Chemistry*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons.
  11. Marsden, J. y House, I. (2006) *The Chemistry of Gold Extraction*. Segunda Ed. Littleton, CO.: SME.
  12. Martell, A. E. y Hancock, R. D. (1996) *Metal Complexes in Aqueous Solutions*. Nueva York: Springer Science & Business Media.
  13. Morrison, R. T. y Boyd, R. N. (1998) *Química Orgánica*. Quinta Ed. Edo. de México, México: Addison Wesley Longman de México S.A. de C.V.
  14. Munive, T. G. *et al.* (2011) “Estudio comparativo de la lixiviación de un mineral refractario con cianuro de sodio y tiosulfato de sodio para la recuperación de oro y plata”, *Geomimet*, 291, pp. 12–24.
  15. Nicol, M. J., Fleming, C. A. y Paul, R. L. (1987) “The Chemistry of the Extraction of Gold”, en Stanley, G. G. (ed.) *The South African Institute of Mining and Metallurgy*. Johannesburg, South Africa: South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 831–905.
  16. Oraby, E. A. y Eksteen, J. J. (a) (2015) “The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine–peroxide solutions and their adsorption on carbon”, *Hydrometallurgy*, 152, pp. 199–203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.12.015>.
  17. Oraby, E. A. y Eksteen, J. J. (b) (2015) “Gold leaching in cyanide-starved copper solutions in the presence of glycine”, *Hydrometallurgy*, 156, pp. 81–88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.05.012>.
  18. Richardson, J. F., Harker, J. H. y Backhurst, J. R. (2002) *Chemical Engineering: Particle Technology and Seraration Processes*. 5° Edición. Gran Bretaña: Butterworth Heinemann.
  19. Speight, J. G. (2005) *Lange’s Handbook of Chemistry*. 16° Edició. New York: McGraw-Hill.
  20. Syed, S. (2012) “Recovery of gold from secondary sources—A review”, *Hydrometallurgy*, 115–116, pp. 30–51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>.
  21. Tran, T. (1992) “The Hydrometallurgy of Gold Processing”, *Interdisciplinary Science Reviews*. Taylor & Francis, 17(4), pp. 356–365. doi: 10.1179/isr.1992.17.4.356.
  22. Trujillo, F. J. (2004) *Soluciones Acuosas: Teoría y Aplicaciones. Módulo de apoyo*

*académico en Química*. Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Medellín.

23. Vandebossche, M. *et al.* (2015) "Remediation of Heavy Metals by Biomolecules: A Review", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. Taylor & Francis, 45(15), pp. 1644–1704. doi: 10.1080/10643389.2014.966425.
24. Wade Jr., L. G. (2012) *Química Orgánica*. Séptima Ed. Edo. de México, México: Pearson Educación.

## ANEXOS

### Pruebas de Lixiviación con Tiosulfato de Sodio

<b>Prueba No.</b>	1		
<b>Malla:</b>	-100	<b>Relación:</b>	1:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	500	<b>Glicina (g/L):</b>	0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au(mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.2	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	11.0	2.8	1.18	1.14	2.8	1.0
8	10.8	2.1	1.26	1.48	3.0	1.3
12	10.5	1.5	1.72	1.82	4.1	1.6
24	10.4	1.0	2.10	2.05	5.0	1.8

**Consumo:** 2.0

<b>Prueba No.</b>	2		
<b>Malla:</b>	-100	<b>Relación:</b>	2:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	1000	<b>Glicina (g/L):</b>	0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.2	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.9	6.5	1.13	1.14	5.4	2.0
8	10.6	5.4	2.42	1.25	11.5	2.2
12	10.4	2.1	3.93	2.91	18.7	5.1
24	10.2	1.1	5.29	3.88	25.2	6.8

**Consumo:** 8.9

<b>Prueba No.</b>	3		
<b>Malla:</b>	-100	<b>Relación:</b>	3:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	1500	<b>Glicina (g/L):</b>	0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.1	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.8	16.0	4.31	15.24	30.8	40.1
8	10.7	7.0	7.22	19.87	51.6	52.3
12	10.5	6.9	9.81	25.92	70.1	68.2
24	10.2	5.1	11.40	30.59	81.4	80.5

**Consumo:** 14.9

<b>Prueba No.</b>	4		
<b>Malla:</b>	-100	<b>Relación:</b>	4:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	2000	<b>Glicina (g/L):</b>	0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.2	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.9	20.1	5.29	17.70	50.4	62.1
8	10.8	16.4	7.37	22.80	70.2	80.0
12	10.6	7.2	8.44	24.40	80.4	85.6
24	10.4	7.0	9.46	26.36	90.1	92.5

**Consumo:** 23.0

<b>Prueba No.</b>	5		
<b>Malla:</b>	-170	<b>Relación:</b>	1:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	500	<b>Glicina (g/L):</b>	0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.1	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	11.0	2.5	1.26	0.91	3.0	0.80
8	10.7	2.0	1.76	2.17	4.2	1.9
12	10.6	1.3	2.48	2.28	5.9	2.0
24	10.5	1.0	2.60	2.39	6.2	2.1

**Consumo:** 2.0

**Prueba No.** 6  
**Malla:** -170      **Relación:** 2:1  
**Muestra (g):** 500      **Cu (mg/L):** 70  
**Agua (ml):** 1000      **Glicina (g/L):** 0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.9	7.1	2.23	1.65	10.6	2.9
8	10.7	5.4	3.93	3.02	18.7	5.3
12	10.4	3.5	5.29	3.88	25.2	6.8
24	10.3	3.1	6.32	6.04	30.1	10.6

**Consumo:** 6.9

**Prueba No.** 7  
**Malla:** -170      **Relación:** 3:1  
**Muestra (g):** 500      **Cu (mg/L):** 70  
**Agua (ml):** 1500      **Glicina (g/L):** 0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.1	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.8	16.1	5.61	13.57	40.1	35.7
8	10.6	12.8	9.41	22.99	67.2	60.5
12	10.4	7.2	10.56	26.83	75.4	70.6
24	10.4	7.0	11.56	30.93	82.6	81.4

**Consumo:** 13.0

**Prueba No.** 8  
**Malla:** -170      **Relación:** 4:1  
**Muestra (g):** 500      **Cu (mg/L):** 70  
**Agua (ml):** 2000      **Glicina (g/L):** 0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.2	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	11.1	21.6	6.35	16.05	60.5	56.3
8	10.7	20.4	8.44	22.29	80.4	78.2
12	10.6	15.2	9.20	23.40	87.6	82.1
24	10.6	14.1	9.62	26.70	91.6	93.7

**Consumo:** 15.9

**Prueba No.** 9  
**Malla:** -200      **Relación:** 1:1  
**Muestra (g):** 500      **Cu (mg/L):** 70  
**Agua (ml):** 500      **Glicina (g/L):** 0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.7	2.4	1.85	4.45	4.4	3.9
8	10.6	1.9	2.56	5.93	6.1	5.2
12	10.4	1.6	3.19	7.30	7.6	6.4
24	10.2	1.3	4.54	9.69	10.8	8.5

**Consumo:** 1.7

<b>Prueba No.</b>	10		
<b>Malla:</b>	-200	<b>Relación:</b>	2:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	1000	<b>Glicina (g/L):</b>	0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.9	8.2	2.63	4.73	12.5	8.3
8	10.7	7.8	4.24	6.10	20.2	10.7
12	10.6	5.1	5.06	8.78	24.1	15.4
24	10.4	4.2	7.48	11.86	35.6	20.8

**Consumo:** 5.8

<b>Prueba No.</b>	11		
<b>Malla:</b>	-200	<b>Relación:</b>	3:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	1500	<b>Glicina (g/L):</b>	0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.1	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	11.0	17.1	7.01	17.40	50.1	45.8
8	10.9	14.3	9.16	23.07	65.4	60.7
12	10.7	12.8	9.83	25.95	70.2	68.3
24	10.5	10.5	11.83	31.77	84.5	83.6

**Consumo:** 9.5

<b>Prueba No.</b>	12		
<b>Malla:</b>	-200	<b>Relación:</b>	4:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	2000	<b>Glicina (g/L):</b>	0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.9	20.4	6.56	16.64	62.5	58.4
8	10.7	19.6	8.58	22.80	81.7	80.0
12	10.4	17.4	9.33	24.00	88.9	84.2
24	10.3	16.2	9.82	26.96	93.5	94.6

**Consumo:** 13.8

<b>Prueba No.</b>	13		
<b>Malla:</b>	-100	<b>Relación:</b>	1:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	500	<b>Glicina (g/L):</b>	5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.6	1.8	2.14	5.47	5.1	4.8
8	10.3	1.4	3.02	6.95	7.2	6.1
12	10.2	1.2	4.49	11.17	10.7	9.8
24	10.1	1.0	7.69	19.49	18.3	17.1

**Consumo:** 2.0

<b>Prueba No.</b>	14		
<b>Malla:</b>	-100	<b>Relación:</b>	2:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	1000	<b>Glicina (g/L):</b>	5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	10.9	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.7	5.4	1.74	3.82	8.3	6.7
8	10.5	3.5	2.21	5.24	10.5	9.2
12	10.3	3.0	4.24	6.56	20.2	11.5
24	10.0	1.0	5.42	12.20	25.8	21.4

**Consumo:** 9.0

<b>Prueba No.</b>	15		
<b>Malla:</b>	-100	<b>Relación:</b>	3:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	1500	<b>Glicina (g/L):</b>	5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	10.8	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.6	18.1	8.41	22.19	60.1	58.4
8	10.4	17.5	12.40	31.43	88.6	82.7
12	10.3	15.3	12.61	33.17	90.1	87.3
24	10.1	14.5	12.81	36.14	91.5	95.1

**Consumo:** 5.5

<b>Prueba No.</b>	16		
<b>Malla:</b>	-100	<b>Relación:</b>	4:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	2000	<b>Glicina (g/L):</b>	5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.9	26.4	6.71	17.53	63.9	61.5
8	10.7	25.1	9.10	23.77	86.7	83.4
12	10.6	24.3	9.61	26.39	91.5	92.6
24	10.5	23.7	10.05	27.30	95.7	95.8

**Consumo:** 6.3

<b>Prueba No.</b>	17		
<b>Malla:</b>	-170	<b>Relación:</b>	1:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	500	<b>Glicina (g/L):</b>	5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	10.9	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.8	2.6	2.14	4.56	5.1	4.0
8	10.6	2.1	2.44	5.24	5.8	4.6
12	10.6	1.3	2.56	5.81	6.1	5.1
24	10.4	0.9	2.73	6.04	6.5	5.3

**Consumo:** 2.1

<b>Prueba No.</b>	18		
<b>Malla:</b>	-170	<b>Relación:</b>	2:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	1000	<b>Glicina (g/L):</b>	5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.8	9.2	1.87	3.99	8.9	7.0
8	10.7	8.3	2.42	5.76	11.5	10.1
12	10.5	8.0	5.31	7.13	25.3	12.5
24	10.3	7.4	7.46	14.48	35.5	25.4

**Consumo:** 2.6

<b>Prueba No.</b>	19		
<b>Malla:</b>	-170	<b>Relación:</b>	3:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	1500	<b>Glicina (g/L):</b>	5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	10.9	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.7	17.5	8.75	22.34	62.5	58.8
8	10.5	16.4	11.91	30.93	85.1	81.4
12	10.3	15.3	12.63	34.01	90.2	89.5
24	10.2	14.9	13.03	36.02	93.1	94.8

**Consumo:** 5.1

<b>Prueba No.</b>	20		
<b>Malla:</b>	-170	<b>Relación:</b>	4:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	2000	<b>Glicina (g/L):</b>	5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.9	27.5	6.73	17.33	64.1	60.8
8	10.8	23.4	8.93	23.48	85.0	82.4
12	10.6	22.1	9.53	26.42	90.8	92.7
24	10.4	21.9	10.01	27.27	95.3	95.7

**Consumo:** 8.1

<b>Prueba No.</b>	21		
<b>Malla:</b>	-200	<b>Relación:</b>	1:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	500	<b>Glicina (g/L):</b>	5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.7	2.4	2.18	4.90	5.2	4.3
8	10.5	2.0	2.48	5.47	5.9	4.8
12	10.3	1.1	2.69	6.27	6.4	5.5
24	10.0	0.8	2.94	6.61	7.0	5.8

**Consumo:** 2.2

**Prueba No.** 22  
**Malla:** -200      **Relación:** 2:1  
**Muestra (g):** 500      **Cu (mg/L):** 70  
**Agua (ml):** 1000      **Glicina (g/L):** 5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	10.9	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.4	9.2	3.11	5.87	14.8	10.3
8	10.2	8.4	4.79	11.57	22.8	20.3
12	10.1	7.3	6.59	16.53	31.4	29.0
24	10.0	5.1	9.49	21.43	45.2	37.6

**Consumo:** 4.9

**Prueba No.** 23  
**Malla:** -200      **Relación:** 3:1  
**Muestra (g):** 500      **Cu (mg/L):** 70  
**Agua (ml):** 1500      **Glicina (g/L):** 5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.7	18.9	9.20	22.88	65.7	60.2
8	10.5	17.3	11.63	29.87	83.1	78.6
12	10.3	11.5	12.52	30.59	89.4	80.5
24	10.1	10.7	12.60	33.29	90.0	87.6

**Consumo:** 9.3

<b>Prueba No.</b>	24		
<b>Malla:</b>	-200	<b>Relación:</b>	4:1
<b>Muestra (g):</b>	500	<b>Cu (mg/L):</b>	70
<b>Agua (ml):</b>	2000	<b>Glicina (g/L):</b>	5.0

t(h)	pH	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	10.7	27.5	7.95	19.98	75.7	70.1
8	10.5	21.8	8.43	22.06	80.3	77.4
12	10.3	20.4	9.41	24.28	89.6	85.2
24	10.0	20.1	9.48	25.54	90.3	89.6

**Consumo:** 9.9

## Pruebas de Lixiviación con Tiosulfato de Sodio

**Prueba:** 1  
**Malla:** -100      **Relación:** 3:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 300 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 0.00 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	10.2	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00
6	10.20	0.3	4.0	14.0	28.60	36.79
24	11.0	N/D	7.45	19.9	53.25	52.42
48	10.4	0.29	11.88	25.61	84.92	67.30

**Prueba:** 2  
**Malla:** -170      **Relación:** 3:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 300 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 1.00 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.3	1.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	11.0	0.8	5.0	15.2	35.75	40.00
24	10.8	0.65	9.0	23.6	64.61	62.00
48	10.8	0.5	13.32	31.39	95.24	82.48

**Prueba:** 3  
**Malla:** -200      **Relación:** 3:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 300 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 1.50 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.3	1.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	11.0	0.35	7.0	25.5	50.05	67.01
24	10.8	0.35	10.4	30.8	74.62	81.01
48	10.2	0.05	13.34	32.27	95.40	84.82

**Prueba:** 4  
**Malla:** -100      **Relación:** 4:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 400 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 1.50 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.9	1.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	11.7	0.75	4.1	8.7	39.08	30.48
24	11.0	0.75	6.0	15.9	57.20	55.54
48	10.6	0.55	10.01	26.54	95.40	92.99

**Prueba:** 5  
**Malla:** -170      **Relación:** 4:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 400 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 1.30 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.6	1.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	11.1	0.8	4.5	11.8	42.90	41.42
24	11.2	0.75	6.2	17.7	59.10	61.85
48	10.7	0.45	10.12	27.12	96.51	95.04

**Prueba:** 6  
**Malla:** -200      **Relación:** 4:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 400 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 1.30 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.5	1.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	11.1	0.7	5.2	13.7	49.57	48.00
24	10.9	0.55	5.8	18.2	55.29	63.67
48	10.6	0.25	10.01	25.79	95.40	90.36

**Prueba:** 7  
**Malla:** -100      **Relación:** 1:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 100 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 2.50 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	+12.5	1.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	12.0	0.55	24.4	33.0	58.15	28.93
24	11.5	0.075	31.3	57.2	74.61	50.12
48	10.8	0.05	36.63	63.49	87.30	55.62

**Prueba:** 8  
**Malla:** -170      **Relación:** 1:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 100 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 2.50 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.6	1.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	11.4	0.375	23.7	41.2	56.48	36.09
24	10.9	0.05	30.5	51.9	72.63	45.44
48	10.2	0.05	35.97	57.49	85.71	50.36

**Prueba:** 9  
**Malla:** -200      **Relación:** 1:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 100 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 2.50 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.7	1.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	11.2	0.65	19.1	42.9	45.52	37.58
24	11.2	0.3	32.5	65.1	77.47	57.04
48	10.8	0.125	38.63	87.16	92.06	76.35

**Prueba:** 10  
**Malla:** -170      **Relación:** 2:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 200 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 3.00 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.0	1.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	10.9	0.75	9.8	24.0	46.71	42.00
24	10.4	0.5	12.9	35.4	61.49	62.00
48	10.3	0.25	15.09	45.41	71.91	79.56

**Prueba:** 11  
**Malla:** -100      **Relación:** 2:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 200 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 1.00 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.5	1.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	11.1	0.8	16.1	23.6	76.74	41.35
24	10.8	0.475	18.8	36.1	89.83	63.25
48	10.6	0.2	19.48	47.08	92.86	82.48

**Prueba:** 12  
**Malla:** -200      **Relación:** 2:1  
**Muestra:** 100 g      **NaCN:** 1.00 g/L  
**Agua:** 200 ml      **CaOH<sub>2</sub>:** 1.00 g/L

t(h)	pH	NaCN (g/L)	Au (mg/L)	Ag (mg/L)	% Ext Au	% Ext Ag
0	11.2	1.0	0.0	0.0	0.00	0.00
6	10.9	0.65	15.8	24.5	75.31	42.92
24	10.8	0.45	19.3	38.5	91.75	67.50
48	10.6	0.175	19.98	51.58	95.24	90.36