

Recuperación de oro desde un medio amoniaco-tiosulfato con resina de intercambio iónico Amberlite IRA-410*

P. Navarro**, C. Vargas**, V. Reveco** y J. Orellana**

Resumen

Se estudió, a nivel de laboratorio, la adsorción y desorción de oro utilizando la resina de intercambio iónico Amberlite IRA-410 en medio tiosulfato-amoniaco. Los ensayos se realizaron en un reactor agitado, manteniendo constante la temperatura en 25 °C y con una razón volumen de disolución/masa de resina de 833,3 ml/g durante 3 h. Las variables evaluadas fueron las siguientes: pH de 9 a 11, concentración de tiosulfato de 0 a 0,5 M, concentración de amoniaco de 0 a 0,5 M y selectividad frente al ión cúprico. De los resultados obtenidos es posible destacar que la adsorción de oro fue rápida, la presencia de tiosulfato desfavoreció fuertemente la adsorción y la presencia de amoniaco, en cambio, no la afectó mayormente. El cobre, que en cierta medida es un competidor del oro, actuó como catalizador de la reacción de oxidación del tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$) a tetratiónato ($S_4O_6^{2-}$) y tritiónato ($S_3O_6^{2-}$), los cuales pueden provocar una desorción parcial del oro durante la etapa de carga. Además, se estudió el comportamiento de los eluyentes ClO_4^- , SO_3^{2-} y ClO^- en la desorción de oro y cobre. Estos ensayos también se realizaron en un reactor agitado, a temperatura constante de 25 °C, con una razón volumen de disolución/masa de resina de 200 ml/g y en un tiempo de 3 h. Los resultados demuestran que el cobre es eluido más rápidamente que el oro en todos los casos.

Palabras clave

Adsorción. Desorción. Oro. Resina. Tiosulfato. Amoniaco.

Recovery of gold from ammonia-thiosulfate media with amberlite IRA-410 ionic exchange resin

Abstract

The adsorption and elution of gold in thiosulfate-ammonia media were studied at laboratory level using the Amberlite IRA-410 ionic exchange resin. Tests were carried out in a stirred reactor, maintaining constant temperature (25 °C), with a volume of solution/mass of resin ratio of 833,3 ml/g and during 3 h. The variables tested were the following: pH (9-11), thiosulfate concentration (0-0,5 M), ammonia concentration (0-0,5 M) and selectivity in the presence of cupric ion. The obtained results indicate that gold adsorption was quick; the presence of thiosulfate decreased strongly the adsorption; and the presence of ammonia did not affect the adsorption mostly. The copper was in a certain measure a competitor of the gold, but its biggest negative effect was that acted as catalyst of the oxidizing reaction of thiosulfate ($S_2O_3^{2-}$) to tetrathionate ($S_4O_6^{2-}$) and trithionate ($S_3O_6^{2-}$), which can cause a partial elution of gold during the load stage. Also, the behavior of ClO_4^- , SO_3^{2-} and ClO^- as eluents was studied in both gold and copper elution. These tests were also carried out in a stirred reactor, to constant temperature (25 °C), with a volume of aqueous solution/mass of resin ratio of 200 ml/g and for 3 h. Results demonstrated that the copper was eluted more quickly that the gold in all the cases.

Keywords

Adsorption. Elution. Gold. Resin. Thiosulfate. Amonia.

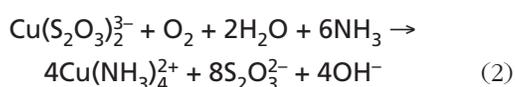
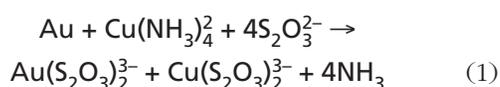
* Trabajo recibido el día 26 de enero de 2006 y aceptado en su forma final el 21 de abril de 2006.

** Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile, Avda. L.B. O'Higgins 3363, Casilla 10233, Santiago, Chile. E-mail: pnavarro@lauca.usach.cl

1. INTRODUCCION

La lixiviación de oro desde concentrados y/o minerales usando disoluciones de tiosulfato y amoniaco ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, como una alternativa al proceso de cianuración^[1-16]. El uso del cianuro presenta ciertas ventajas tales como: facilidad de operación, bajo costo de reactivos y facilidad para recuperar el oro desde la disolución rica obtenida. Del mismo modo presenta algunos problemas, tales como: toxicidad, baja selectividad y bajas velocidades de disolución.

La disolución de oro en disoluciones de tiosulfato puede ser catalizada por cobre y amoniaco, siendo un posible mecanismo el siguiente:



Actualmente, la lixiviación con tiosulfato pareciera ser la alternativa más promisoría para reemplazar al proceso convencional de cianuración, debido a sus características de baja toxicidad y mayores velocidades de reacción. Sin embargo, uno de los problemas asociados al uso del tiosulfato es la recuperación del oro desde las disoluciones obtenidas, ya sea por falta de conocimiento al respecto o por la dificultad del proceso mismo. La recuperación de un elemento desde disoluciones de lixiviación puede ser realizada a través de las siguientes operaciones: carbón activado^[17-22], cementación^[23-28], intercambio iónico^[29-32] y extracción por solventes^[33-34].

Se ha encontrado que el complejo oro-tiosulfato no es adsorbido eficientemente en carbón activado, con lo cual la tecnología del carbón en pulpa no es aplicable a este sistema. La cementación con cinc o cobre ocurre con elevados consumos de cinc o con pasivación por formación de sulfuro cuproso en la superficie cementante de cobre. La técnica de extracción con disolventes ha sido poco estudiada y su aplicación requiere de disoluciones clarificadas exentas de sólidos.

Con respecto a la utilización de resinas de intercambio iónico en la recuperación de oro desde disoluciones acuosas con tiosulfato y amoniaco, existen pocos estudios presentes en literatura^[29-32]. En ellos, se han utilizado principalmente resinas de intercambio iónico de base débil y la etapa de desorción solo se ha estudiado superficialmente.

Los principales resultados de estos estudios se pueden resumir en las siguientes conclusiones:

- La especie estable que se adsorbe en las resinas de intercambio iónico es el complejo $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$.
- Ciertos aniones presentes en la disolución acuosa, como sulfito, tritionato y tetracionato fueron fuertemente adsorbidos y provocaron la disminución en la adsorción del complejo oro-tiosulfato.
- El proceso de adsorción es selectivo para el oro sobre otros metales (Zn, Cu y Ag), siendo el Pb la única especie significativamente competitiva.
- El tiocianato y tetracionato son buenos agentes elusores, pero presentan problemas de precipitación de azufre en la regeneración convencional de la resina, repitiéndose esto en el uso de iones politionatos.

El objetivo de este trabajo fue estudiar a nivel laboratorio mediante experiencias discontinuas, la adsorción de oro en la resina de base fuerte Amberlite IRA-410 en medio amoniaco-tiosulfato, como asimismo la desorción del complejo de oro a través de diferentes disoluciones eluyentes que contengan agentes de elución no probados anteriormente para este sistema.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

2.1.1. Resina de intercambio iónico

La resina de intercambio iónico utilizada fue Amberlite IRA-410, de carácter fuertemente básico, con tamaño de partículas comprendidos entre -20 +50 malla Tyler, de forma esférica y de color amarillo.

2.1.2. Disolución de oro y disolución eluyente

Para la preparación de la disolución de oro y de las disoluciones eluyentes se utilizó agua bidestilada y desionizada, y reactivos químicos de grado analítico, tales como: tiosulfatoaurato de sodio $[\text{Na}_3(\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2) \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$, tiosulfato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3]$, hidróxido de amonio $[\text{NH}_4\text{OH}]$, hidróxido de sodio $[\text{NaOH}]$, sulfato de cobre pentahidratado $[\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$, perclorato de sodio $[\text{NaClO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$, sulfito de sodio $[\text{Na}_2\text{SO}_3]$ y cloruro de sodio $[\text{NaCl}]$.

2.2. Técnica experimental

2.2.1. Etapa de adsorción

Se realizaron pruebas de adsorción en un reactor de 500 ml de capacidad con agitación mecánica, manteniendo constantes los siguientes parámetros experimentales:

- Tiempo de contacto : 3 horas
- Temperatura : 298 K
- Concentración inicial de oro : 8 mg/l
- Volumen disolución acuosa : 400 ml
- Razón disolución/resina : 833,3 ml/g
- Agitación mecánica : 500 rpm

En esta etapa se evaluó el porcentaje de oro adsorbido y la carga de oro en la resina (g de Au/kg de resina) en función del tiempo, para las diferentes condiciones experimentales. Las variables estudiadas y sus rangos de experimentación se presentan en la tabla I.

La metodología experimental seguida en cada experiencia fue la misma, variando solo las condiciones propias de cada caso. Las etapas desarrolladas fueron las siguientes:

- Se agregó al reactor la disolución acuosa, se ajustó la temperatura y el pH.
- Se agregó la resina a la disolución y se agitó el sistema mecánicamente para obtener una condición de mezcla perfecta.
- Se sacaron muestras de la fase acuosa de aproximadamente 3 ml, cada cierto tiempo, para análisis químico.
- En forma continua se midió el pH y la temperatura de la disolución acuosa.
- Una vez alcanzado el tiempo de 3 h, se detenía la agitación, se separaba la resina de la disolución acuosa y se lavaba para su posterior análisis químico.

Los análisis químicos fueron realizados por absorción atómica y la carga de oro en la resina se determinó por balance de oro presente en las disoluciones.

2.2.2. Etapa de desorción

Se cargó, previamente, la resina cada vez que se realizó un ensayo de este tipo y las experiencias de desorción se realizaron en un reactor de 500 ml de capacidad con agitación mecánica, donde se mantuvieron constantes las siguientes condiciones experimentales:

Tabla I. Variables y rangos de experimentación en la etapa de adsorción.

Table I. Variables and experimentation ranges in the adsorption stage.

Variable	Rango de experimentación
pH	9-11
Concentración de tiosulfato de amonio	0-0,5 M
Concentración de amoniaco	0-0,5 M
Concentración de cobre	0 - 500 ppm

- Tiempo de contacto : 3 horas
- Temperatura : 298 K
- Razón disolución/resina : 200 ml/g
- Volumen disolución acuosa : 300 ml
- Agitación mecánica : 500 rpm

En esta etapa se determinó la concentración de oro en la disolución rica y se evaluó el porcentaje de oro desorbido en función del tiempo para las diferentes condiciones experimentales. Las variables estudiadas y sus rangos de experimentación se muestran en tabla II.

En este caso la metodología experimental fue la siguiente:

- Se cargó previamente la resina con oro de acuerdo con las condiciones experimentales estudiadas en la etapa anterior.
- Se agregó al reactor la disolución acuosa eluyente y se ajustó la temperatura y el pH a los valores requeridos.
- Se agregó la resina cargada previamente y se agitó mecánicamente el sistema.
- Se sacaron muestras de acuoso de aproximadamente 3 ml cada cierto tiempo para su análisis químico.
- Se controló en forma continua el pH y la temperatura de la disolución acuosa.
- Una vez alcanzado el tiempo de 3 h, se detuvo la agitación, se filtró la resina de la disolución acuosa y se lavó.
- De la misma forma que en la etapa anterior, los análisis químicos fueron realizados por absorción atómica.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Etapa de adsorción

3.1.1. Efecto del pH

En figura 1 se muestran los resultados obtenidos al estudiar el efecto del pH en la adsorción y carga de

Tabla II. Variables y rangos de experimentación en la etapa de desorción.

Table II. Variables and experimentation ranges in the elution stage.

Variable	Rango de experimentación
pH	9,5-11
Concentración de ClO_4^-	0,2-1,0 M
Concentración de SO_3^{2-}	0,2-1,0 M
Concentración de Cl^-	0,5-4,0 M

oro en la resina. Con 0,1 M de tiosulfato y de acuerdo con las otras condiciones experimentales en estudio, el oro se encuentra en disolución en forma del complejo $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$, el cual fue adsorbido rápidamente en todos los casos (en los primeros 30 min) para llegar al equilibrio alrededor de los 120 min.

El porcentaje de oro adsorbido después de 4 h de contacto fue prácticamente el mismo en todos los casos, lo cual denota un efecto nulo del pH en estas condiciones experimentales. Hubo, no obstante, una mayor velocidad del proceso a pH 9 en relación con valores mayores, lo cual puede ser atribuido a una mayor difusividad del complejo $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ hacia la superficie de la resina. La carga de oro en la resina alcanzó valores muy similares, 6,4 g Au/kg resina a pH 9 y de 6,3 g Au/kg resina a pH 11.

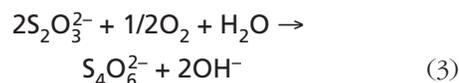
3.1.2. Efecto de la concentración de tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$)

En figura 2 se observa el efecto de la concentración de tiosulfato en la adsorción y carga de oro en la resina al trabajar a pH 9. Es evidente el efecto negativo que produce el contenido de tiosulfato en la disolución acuosa sobre el porcentaje de oro adsorbido, después de 3 h de contacto. Sin presencia de tiosulfato, la adsorción de oro alcanzó un 100% (6,7 g Au/kg resina) y con 0,5 M de tiosulfato la adsorción disminuyó a 79,7% (6 g Au/kg resina).

En términos de carga de oro en la resina, existió solo una diferencia del 10 % en las condiciones evaluadas, lo cual es atribuible a la pequeña cantidad de

oro existente en el sistema en relación a la masa de resina.

Este deterioro en la adsorción de oro producto de la presencia de tiosulfato puede ser atribuido a un efecto de competencia de los distintos complejos presentes por los sitios fáticos de la resina, pero además por la oxidación que sufre el tiosulfato a tetratiónato con el oxígeno disuelto, el cual también puede ser adsorbido por la resina. El tiosulfato es oxidado a tetratiónato de acuerdo con la siguiente reacción:



La selectividad de la resina por el complejo de oro $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$ en relación al tiosulfato y tetratiónato disminuye con la concentración inicial de tiosulfato, ya que con 0,1 M de $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ la disminución en la adsorción de oro, después de 3 horas de contacto, fue de solo el 4%.

Para mayores concentraciones de tiosulfato como por ejemplo 0,5 M, después de 3 h de contacto, la disminución alcanzó al 20%. En cambio, para esta misma concentración de tiosulfato y tiempo de contacto de 15 min, la disminución en la adsorción de oro solo fue del 8%.

3.1.3. Efecto de la concentración de amoníaco (NH_3)

De acuerdo con figura 3, el amoníaco no tiene un efecto notorio en la adsorción de oro, pues después de 3 h de contacto para diferentes concentraciones de

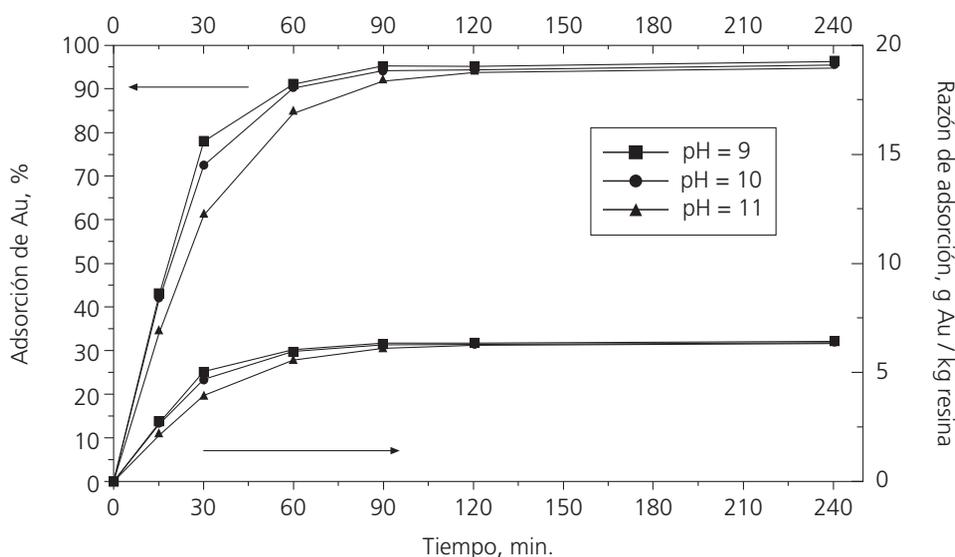


Figura 1. Efecto del pH en la adsorción de oro. Condiciones: 8 ppm Au; 0,1 M $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$.

Figure 1. Effect of pH in the adsorption of gold. Conditions: 8 ppm Au; 0.1 M $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$.

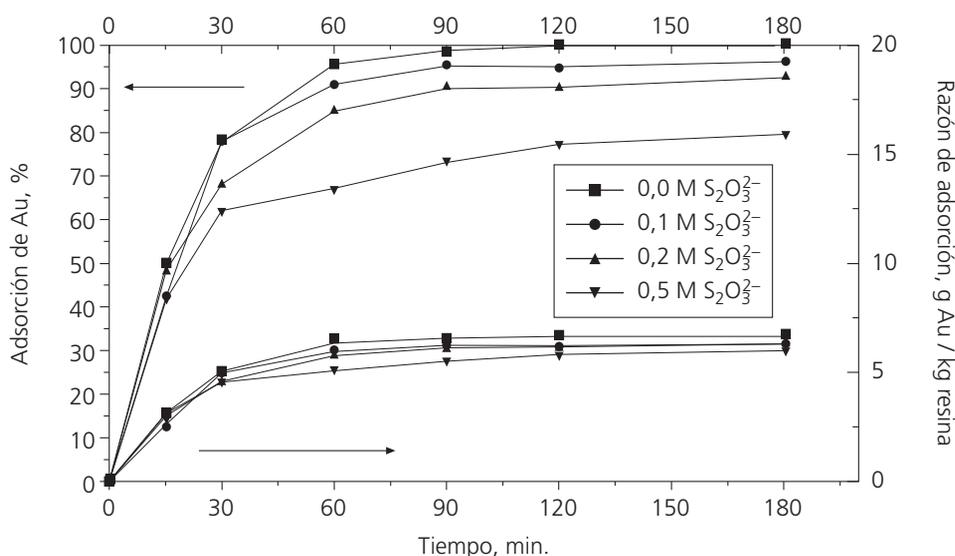


Figura 2. Efecto del tiosulfato en la adsorción de oro. Condiciones: pH = 9; 8 ppm Au.

Figure 2. Effect on thiosulphate in the adsorption of gold. Conditions: pH = 9; 8 ppm Au.

NH₃, el porcentaje de oro adsorbido no varió apreciablemente.

Inicialmente, se nota una mayor adsorción de oro con menores concentraciones de NH₃, lo cual puede deberse a una mayor velocidad de difusión del complejo de oro en dichas condiciones experimentales.

3.1.4. Efecto de la concentración de cobre

En la figura 4 se muestra el efecto de la presencia de cobre en la adsorción de oro a pH 9, cuando se trabajó

con una concentración de 0,1 M de tiosulfato de amonio y 0,1 M de amoníaco. La presencia de cobre produjo un efecto negativo en la adsorción de oro, ya que a medida que aumentó la concentración de aquel disminuyó la cantidad de oro adsorbido, enfatizándose esto para los mayores tiempos de contacto. Además, después de 60 min se produjo una leve desorción del oro desde la resina.

La situación anterior puede ser explicada en los siguientes términos. La presencia del complejo Cu(NH₃)₄²⁺ cataliza la reacción de oxidación del tiosulfato, de acuerdo a la siguiente reacción:

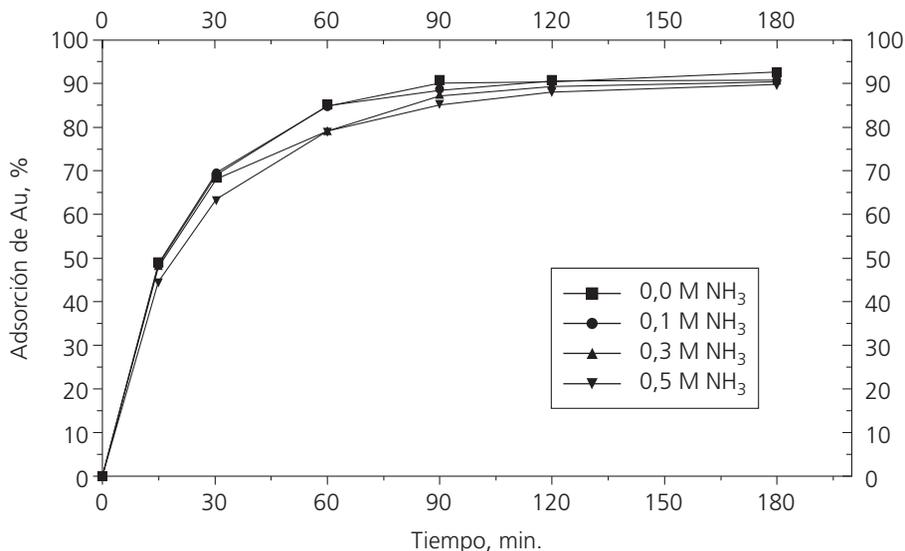


Figura 3. Efecto del amoníaco en la adsorción de oro. Condiciones: 8 ppm Au; 0,2 M (NH₄)₂S₂O₃.

Figure 3. Effect of ammonia in the adsorption of gold. Conditions: 8ppm Au ; 0.2 M (NH₄)₂S₂O₃.

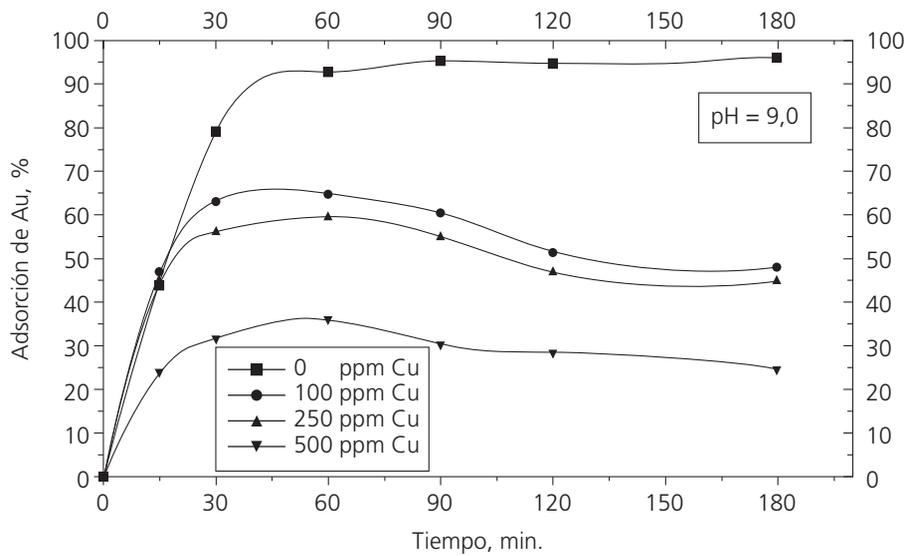
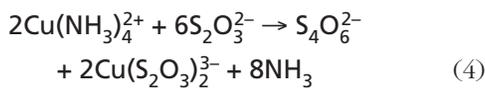


Figura 4. Efecto del cobre sobre la adsorción de oro a pH 9. Condiciones: 8 ppm Au; 0,1M (NH₄)₂S₂O₃; 0,1 M NH₃.

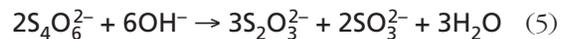
Figure 4. Effect of copper on gold adsorption at pH 9. Conditions: 8 ppm Au; 0.1M (NH₄)₂S₂O₃; 0.1M NH₃.



lo cual provee la disminución de la cantidad de oro adsorbido por co-adsorción de cobre a la forma de Cu(S₂O₃)₂³⁻ y de tetratioato S₄O₆²⁻.

En figura 5 se observa la cantidad de cobre adsorbido en las condiciones experimentales anteriores, produciéndose desorción de cobre después de 30 min, siendo atribuible a la presencia de tetratioato.

Para minimizar el efecto de la presencia de tetratioato, se trabajó a pH 11, ya que bajo estas condiciones de alcalinidad es posible restaurar parcialmente la concentración de tiosulfato de acuerdo con la siguiente reacción:



En la figura 6 se muestra el efecto de trabajar a pH 11 con 0,1 M de amoníaco, 0,1 M de tiosulfato de amo-

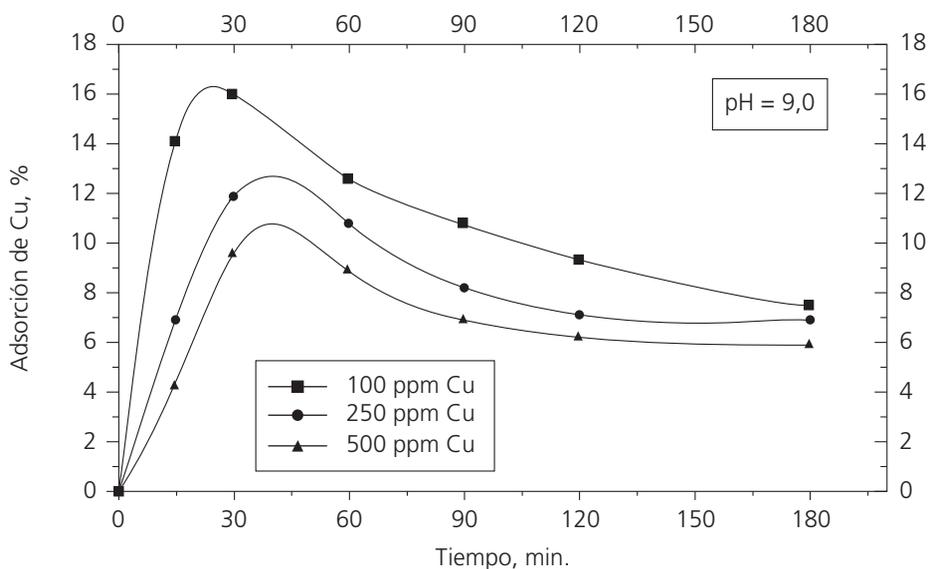


Figura 5. Adsorción de cobre para diferentes concentraciones del metal a pH 9. Condiciones: 8 ppm Au; 0,1 M (NH₄)₂S₂O₃; 0,1 M NH₃.

Figure 5. Adsorption of copper for different metal concentrations at pH 9. Conditions: 8 ppm Au; 0.1 M (NH₄)₂S₂O₃; 0.1 M NH₃.

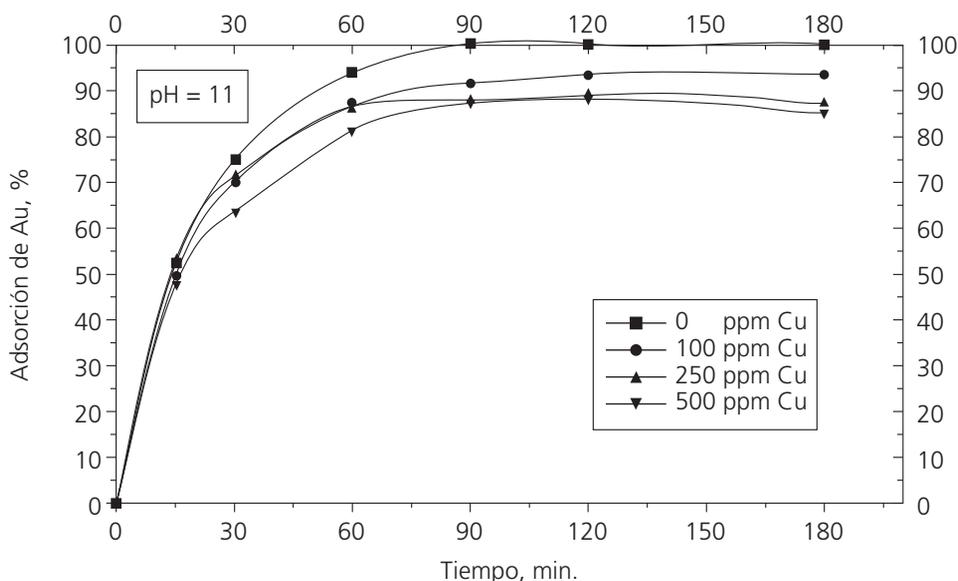


Figura 6. Efecto del cobre sobre la adsorción de oro a pH 11. Condiciones: 8 ppm Au; 0,1 M $(NH_4)_2S_2O_3$; 0,1 M NH_3 .

Figure 6. Effect of copper on gold adsorption at pH 11. Conditions: 8 ppm Au; 0.1 M $(NH_4)_2S_2O_3$; 0.1 M NH_3 .

nio y diferentes concentraciones de cobre. En este caso, solo se produjo una disminución en la adsorción del oro al aumentar el contenido de cobre en la disolución de 100 a 500 ppm, atribuible a la co-adsorción de cobre en forma de $Cu(S_2O_3)_2^{3-}$.

En la figura 7 se muestra la adsorción de cobre al trabajar en condiciones similares a las mostradas en la figura 6. El cobre adsorbido bajo estas condiciones constituye un competidor del oro por los sitios activos de la resina, lo que produjo un descenso en la adsorción de oro mostrada en la figura 6, al aumentar el contenido de cobre disuelto. Esta competencia se manifiesta al trabajar con 100 y 250 ppm de Cu, debido a que después de 3 h de contacto se alcanzó una extracción de 11,2 % y 6,8 %, respectivamente.

3.2. Etapa de desorción

3.2.1. Elución de oro

Para el estudio de elución de oro, la resina fue cargada previamente utilizando las mejores condiciones de carga obtenidas en el estudio de adsorción previo. Una vez cargadas las resinas, se estableció que la carga promedio fue de 8 g Au/kg resina.

3.2.1.1. Elución de oro con disoluciones de perclorato (ClO_4^-)

Se trabajó con una concentración de resina de 5 g/l a pH 11. Los resultados obtenidos de porcentajes de oro eluido se muestran en la figura 8.

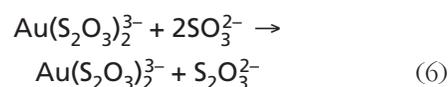
Existe una tendencia a aumentar la elución con mayores concentraciones de perclorato, encontrándose un fuerte efecto a tiempos cortos, al pasar de 0,5 a 1,0 M, siendo esto menor a tiempos prolongados (3 h).

3.2.1.2. Elución de oro con disoluciones de sulfito (SO_3^{2-})

En figura 9 se muestran los resultados de elución de oro al trabajar con diferentes concentraciones de sulfito en la disolución eluyente.

Se observa un efecto notorio al aumentar la concentración de sulfito de 0,2 a 0,5 M, ya que luego de 3 horas de contacto el porcentaje de oro eluido aumenta de 34,8% a 46,6%; siendo menor el porcentaje de aumento al trabajar con 1 M de SO_3^{2-} .

Un aspecto interesante a destacar es que la especie eluida de oro, $Au(S_2O_3)_2^{3-}$, en este ambiente, reaccionaría con el sulfito libre a través de la siguiente reacción:



De acuerdo al diagrama potencial pH del sistema a 25 °C, para un pH en el rango de 10 a 11 y potenciales levemente inferiores a 0 V/ENH, la especie estable es $Au(SO_3)_2^{3-}$ ^[31 y 32], verificándose entonces que el complejo de oro presente en la fase acuosa final es aquel previsto por la ecuación (6).

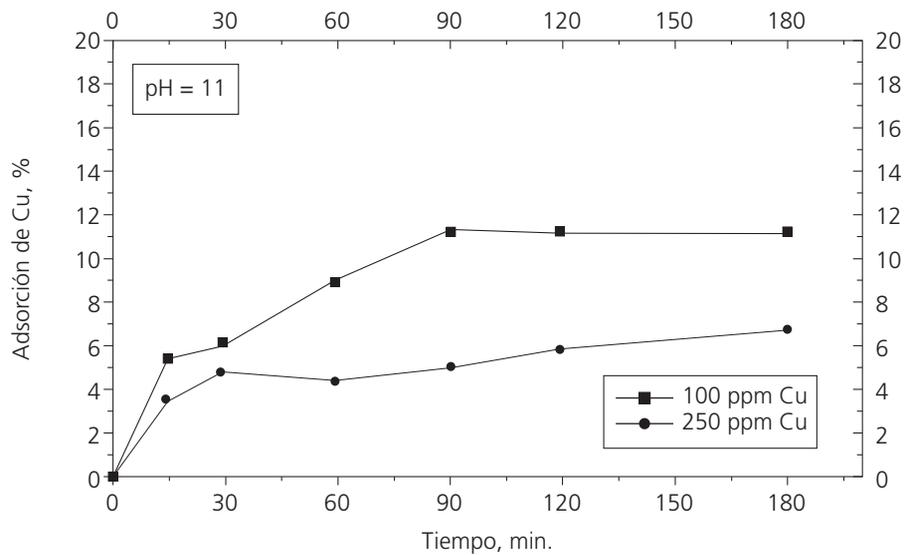


Figura 7. Adsorción de cobre para diferentes concentraciones del metal a pH 11. Condiciones: 8 ppm Au; 0,1 M $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$; 0,1 M NH_3 .

Figure 7. Adsorption of copper for different metal concentrations at pH 11. Conditions: 8 ppm Au; 0.1 M $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$; 0.1 M NH_3 .

3.2.1.3. Elución de oro con disoluciones de cloruro (Cl^-)

En figura 10 se muestran los resultados obtenidos con diferentes concentraciones de cloruro. Estos presentan una tendencia similar, de aumento del porcentaje de oro eluido, al aumentar la concentración de Cl^- , existiendo una importante cantidad de oro desorbido para tiempos cortos, llegándose muy rápidamente al equilibrio.

De manera similar a el ión sulfito, el ión cloruro presenta un acomplejamiento con el oro (AuCl_4^-), en el cual el oro se encuentra en su mayor estado de oxidación (+3). Sin embargo, para los potenciales de trabajo (-0,03 V/ENH), el oro se encuentra en su estado de oxidación (+1), con lo cual se establece el siguiente equilibrio:

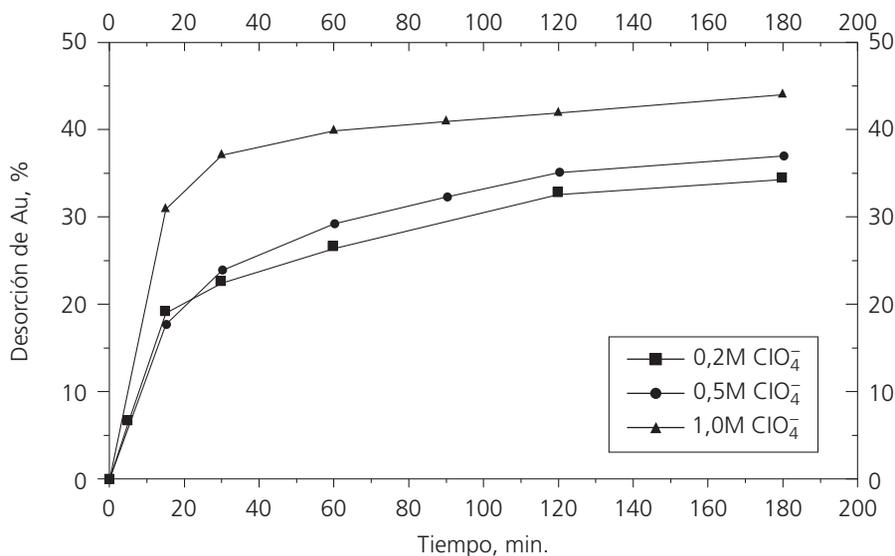
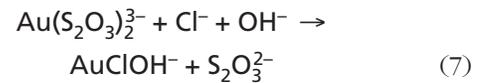


Figura 8. Efecto del perclorato en la desorción de oro. Condiciones: Resina cargada con 8 g Au/kg resina; pH 11.

Figure 8. Effect of perchlorate in the gold elution. Conditions: Resin loaded with 8 g Au/kg resin; pH 11.

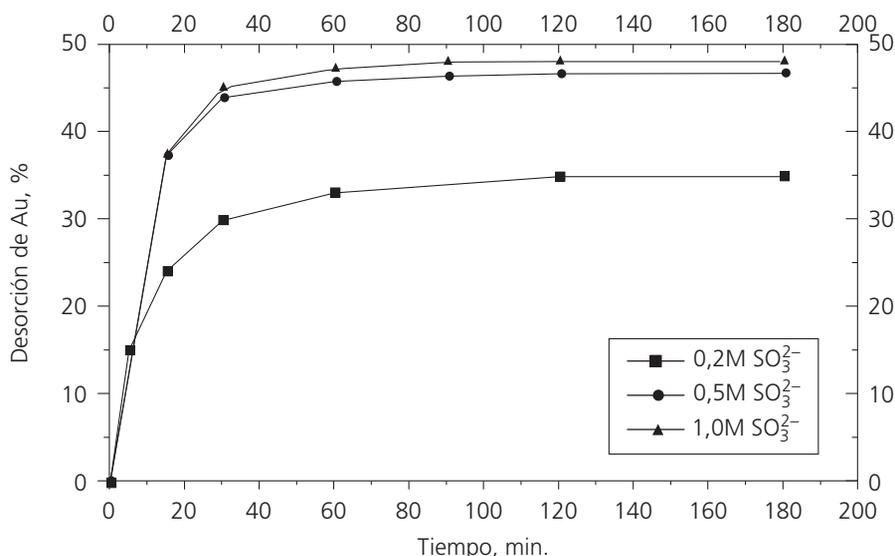


Figura 9. Efecto del sulfito en la desorción de oro. Condiciones: Resina cargada con 8 g Au/kg resina; pH 11.

Figure 9. Effect of sulfite in gold elution. Conditions: Resin loaded with 8 g Au/kg resin; pH 11.

El diagrama potencial-pH para el sistema a 25 °C ratifica que la especie estable en las condiciones de trabajo es el ión AuClOH⁻[31 y 32].

3.2.2. Elución de oro y cobre

Elución de oro y cobre con disoluciones 1M de perclorato

La elución de oro y cobre usando como agente de elución 1 M de perclorato se realizó con una concentración de resina de 5 g/l, usando pH 11 y una concen-

tración de amoníaco (NH₃) de 0,1 M con el fin de estabilizar la especie de cobre eluída y una carga de oro y cobre en la resina de 5,4 y 3,2 g/ kg resina, respectivamente.

En figura 11 se observan los porcentajes de oro y cobre eluidos en el tiempo. Se observa una rápida velocidad de elución para ambos elementos a tiempos cortos, desorbiéndose en mayor proporción el cobre a tiempos cortos, hasta alcanzar un estado de equilibrio ambos elementos.

Se definen D_{Au} y D_{Cu} como coeficientes de distribución de oro y cobre, respectivamente, siendo D el

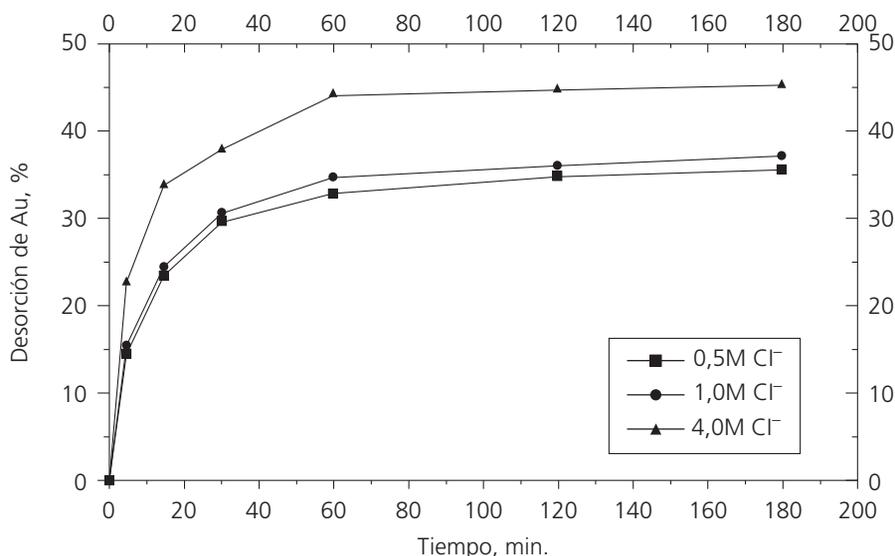


Figura 10. Efecto del cloruro en la desorción de oro. Condiciones: Resina cargada con 8 g Au/kg resina; pH =11.

Figure 10. Effect of chloride in gold elution. Conditions: Resin loaded with 8 g Au/kg resin; pH = 11.

cociente entre las concentraciones de oro o cobre en la disolución y las concentraciones de oro o cobre en la resina, para cualquier tiempo. También se define D_{Au}^{Cu} como el cociente entre los respectivos coeficientes de distribución. En la tabla III, se muestran los valores de D_{Au} , D_{Cu} y D_{Au}^{Cu} para tiempos de 5 y 180 min.

De acuerdo con la tabla anterior, es evidente la mayor facilidad de desorción que presenta el cobre, preferencialmente, a tiempos cortos.

3.2.2.2. Elución de oro y cobre con disoluciones 1M de sulfito

La elución de oro y cobre se realizó usando 1 M de sulfito como eluyente, además de 0,1 M de amoniacco (NH_3) para estabilizar el cobre eluído, trabajando con una concentración de resina de 5 g/l, un pH de 11 y una carga de oro y cobre en la resina de 5,0 y 9,7 g/kg resina respectivamente.

En la figura 12 se muestran los resultados obtenidos y en la tabla IV se muestran los valores de D_{Au} , D_{Cu} y D_{Au}^{Cu} , para los tiempos de 5 y 180 min.

De la misma forma que se establece un equilibrio entre el complejo de oro eluido y el sulfito disuelto, el cobre también presenta un equilibrio entre el complejo que se encontraba en la resina y el ión sulfito. Este equilibrio se puede representar de acuerdo con la siguiente reacción:

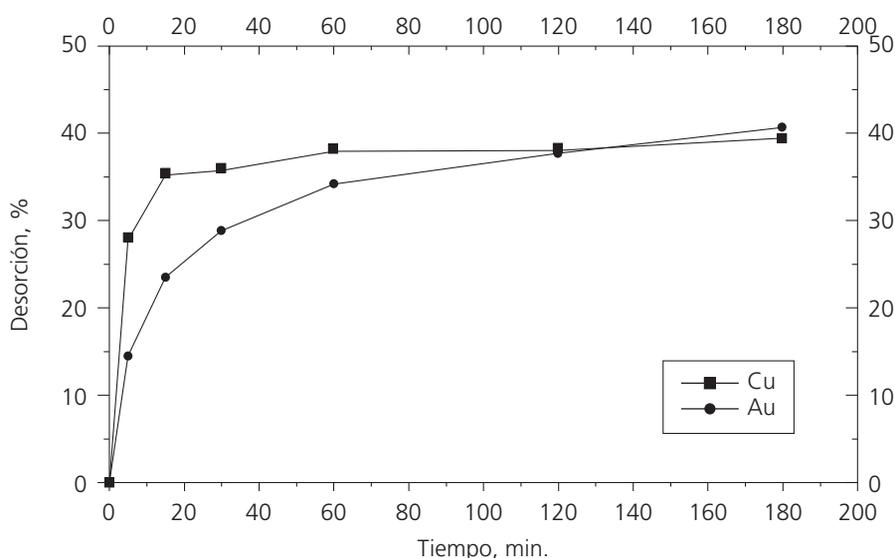
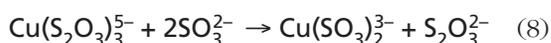


Figura 11. Desorción de oro y cobre en una disolución acuosa con 1M de perclorato. Condiciones: Concentración de resina 5 g/l; concentración de NH_3 0,1 M; Resina cargada con 5,4 g Au/kg resina y 3,2 g Cu/kg resina; pH = 11.

Figure 11. Gold and copper elution in a solution with 1M of perchlorate. Conditions: Resin concentration 5 g/l; ammonia concentration 0.1 M; Resin loaded with 5.4 g Au/kg resin and 3.2 g Cu/kg resin; pH = 11.

Tabla III. Coeficientes de distribución y coeficiente de selectividad en la desorción de oro y cobre para una disolución 1 M de ClO_4^- .

Table III. Distribution coefficients and selectivity coefficient in the gold and copper elution for a solution with 1 M ClO_4^- .

Tiempo	D_{Cu}	D_{Au}	D_{Au}^{Cu}
5	0,38	0,17	0,44
180	0,65	0,68	1,05

El complejo Cu-sulfito en presencia de amoniacco puede dar lugar a:



Debido a la presencia de oxígeno disuelto en la disolución eluyente, el complejo Cu(I)-amoniacco se transforma en $Cu(NH_3)_2^{2+}$, el cual otorga a la disolución la característica de una tonalidad celeste-azul de disoluciones con presencia de $Cu(NH_3)_2^{2+}$.

3.2.2.3. Elución de oro y cobre con disoluciones 4M de cloruro de sodio

En este caso, las experiencias se realizaron empleando 4 M de cloruro como agente de elusión, 0,1 M de amoniacco para estabilizar el cobre eluído, una concentración de resina de 5 g/l, un pH de 11 y una car-

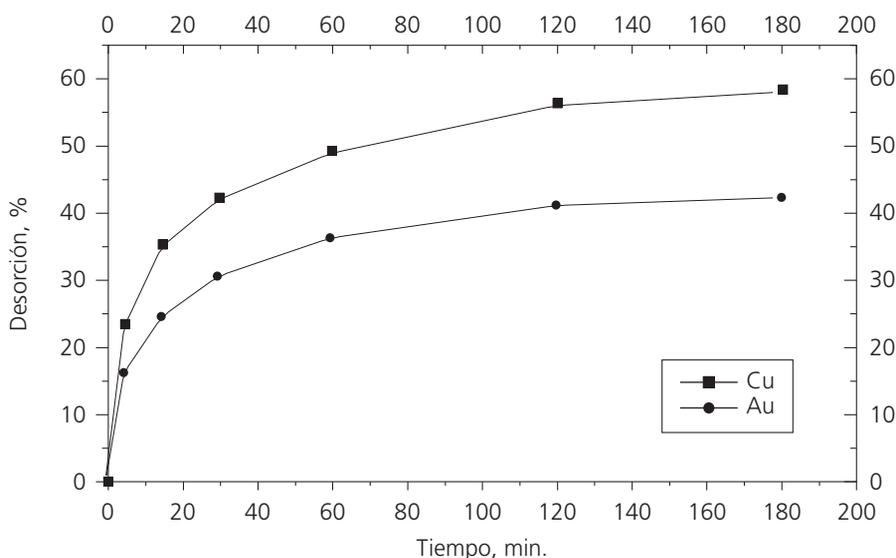


Figura 12. Desorción de oro y cobre en una disolución acuosa conteniendo 1M de sulfite. Condiciones: Concentración de resina 5 g/l; concentración de NH₃ 0,1 M; Resina cargada con 5,0 g Au/kg resina y 9,7 g Cu/kg resina; pH = 11.

Figure 12. Gold and copper elution in a solution with 1 M of sulfite. Conditions: Resin concentration 5 g/l; ammonia concentration 0.1 M; Resin loaded with 5.0 g Au/kg resin and 9.7 g Cu/kg resin; pH = 11.

ga de oro y cobre de 2,5 y 5,5 g/ kg resina, respectivamente.

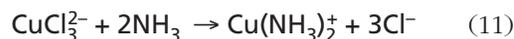
En la figura 13 se muestran los porcentajes eluidos de oro en función del tiempo. En este caso, la velocidad inicial de elución fue la misma para ambos elementos, alcanzándose un mayor porcentaje de elución para el cobre después de 3 h de contacto.

Los coeficientes de distribución y de selectividad mostrados en la tabla V confirman la baja selectividad de desorción del ión cloruro durante todo el tiempo de proceso.

Entre el ión de cobre eluido y el agente de elución se establece el siguiente equilibrio en la disolución rica obtenida:



Y en presencia de amoniacos es posible tener la siguiente reacción:



En la figura 14 se presenta la especiación realizada para las condiciones de potencial, pH y concentración de iones de trabajo. A valores de pH inferiores a 9 la especie más abundante es CuCl₃²⁻, sobre este valor de pH la cantidad de este complejo disminuye drásticamente, siendo más abundante el complejo.

4. CONCLUSIONES

- El comportamiento de la resina Amberlite IRA-410 para la adsorción de oro en medio tiosulfato-amoniaco resultó ser muy prometedor, lo cual sugiere que esta tecnología tiene posibilidades reales para futuras aplicaciones industriales.
- En ausencia de cobre en la disolución, el contenido de amoniacos y el pH no tienen efecto apremiante.

Tabla IV. Coeficientes de distribución y coeficiente de selectividad en la desorción de oro y cobre para una disolución 1 M de SO₃²⁻.

Table IV. Distribution coefficients and selectivity coefficient in the gold and copper elution for a solution with 1 M SO₃²⁻.

Tiempo	D _{Cu}	D _{Au}	D _{Au} ^{Au} _{Cu}
5	0,30	0,19	0,64
180	1,39	0,74	1,53

Tabla V. Coeficientes de distribución y coeficiente de selectividad en la desorción de oro y cobre para una disolución 4 M de Cl⁻.

Table V. Distribution coefficients and selectivity coefficient in the gold and copper elution for a solution with 4 M Cl⁻.

Tiempo	D _{Cu}	D _{Au}	D _{Au} ^{Au} _{Cu}
5	0,59	0,52	0,88
180	1,72	1,30	0,76

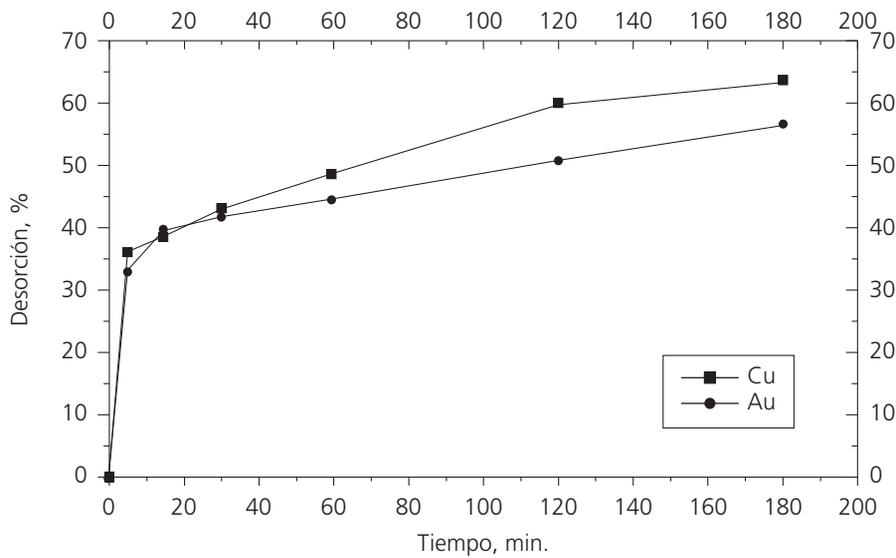


Figura 13. Desorción de oro y cobre en una disolución acuosa conteniendo 4 M de cloruro de sodio. Condiciones: Concentración de resina 5 g/l; concentración de NH_3 0,1 M; Resina cargada con 2,5 g Au/kg resina y 5,5 g Cu/kg resina; pH =11.

Figure 13. Gold and copper elution in a solution with 4 M of sodium chloride. Conditions: Resin concentration 5 g/l; ammonia concentration 0,1 M; Resin loaded with 2.5 g Au/kg resin and 5.5 g Cu/kg resin; pH =11.

ciable en la adsorción de oro, en los rangos estudiados.

- La presencia de cobre y tiosulfato provoca una disminución en la cantidad de oro adsorbido por la resina, especialmente en torno a pH 9. En estas condiciones se produce co-adsorción de cobre y el tiosulfato se oxida a politionatos; esto se minimiza a pH 11.
- Para la resina cargada solo con oro se alcanzaron desorciones de oro en el rango de 40-50 % con

los eluyentes estudiados, la cual puede alcanzar valores cercanos al 100 % al diseñar un proceso industrial; el poder de desorción fue el siguiente: $\text{SO}_3^{2-} > \text{Cl}^- > \text{ClO}_4^-$.

- Cuando oro y cobre estuvieron presentes en la resina, el comportamiento a la desorción del sulfito fue similar al del perclorato; el Cl^- presentó el comportamiento mas bajo pese a utilizar una concentración muy elevada.

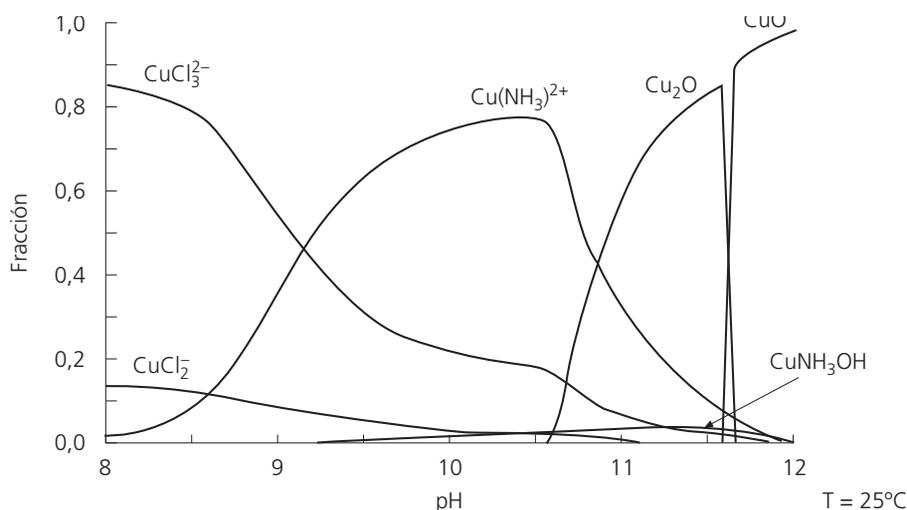


Figura 14. Diagrama de especiación para el sistema $\text{Cu-Cl-NH}_3\text{-S}_2\text{O}_3^{-2}$. Condiciones: $[\text{Cu}]$: 50 ppm, $[\text{S}_2\text{O}_3^{-2}]$: 4×10^{-3} M, $[\text{NH}_3]$: 0,1 M, $[\text{Cl}^-]$: 4 M, E_{ENH}/V : -0,03 V.

Figure 14. Espication diagram for the $\text{Cu-Cl-NH}_3\text{-S}_2\text{O}_3^{-2}$ system. Conditions: $[\text{Cu}]$: 50 ppm, $[\text{S}_2\text{O}_3^{-2}]$: 4×10^{-3} M, $[\text{NH}_3]$: 0.1 M, $[\text{Cl}^-]$: 4 M, E_{ENH}/V : -0.03 V.

— Se logró una buena desorción del cobre desde la resina, produciéndose una mayor desorción de cobre en relación al oro, a tiempos cortos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos por el patrocinio recibido de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica a través del proyecto FONDECYT 1040180.

REFERENCIAS

- [1] D. ZIPPERIAN, S. RAGHAVAN Y J. P. WILSON, *Hydrometallurgy* 19 (1988) 361-375.
- [2] C. ABBRUZZESE, P. FORNYARI, R. MASSIDDA, F. VEGLIO Y S. UBALDINI, *Hydrometallurgy* 39 (1995) 265-276.
- [3] W. T. YEN ET. AL., *Proc. EPD Congress, 1999-Extraction and Processing Division*, B. Mishra (Ed.) San Diego, USA, 1999, pp. 441-455.
- [4] K.N. HAN Y M.C. FUERSTENAU, *Int. J. Miner. Process.* 58 (2000) 369-381.
- [5] P. BREUER Y M. JEFFREY, *Miner. Eng.* 13 (2000) 1.071-1.081.
- [6] M. G. AYLMOORE Y D. M. MUIR, *Miner. Eng.* 14 (2001) 135-174.
- [7] A. VILLARROEL, Trabajo de Titulación, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile (Chile), 2001.
- [8] P. NAVARRO, C. VARGAS, A. VILLARROEL Y F. J. ALGUACIL, *Hydrometallurgy* 65 (2002) 37-42.
- [9] P. BREUER Y M. JEFFREY, *Miner. Eng.* 16 (2003) 21-30.
- [10] D. M. MUIR Y M. G. AYLMOORE, *Miner. Proces. Extractive Metal. C-113* (2004) C2-C12.
- [11] G. SENANAYAKE, *Hidrometallurgy* 75 (2004) 55-75.
- [12] G. SENANAYAKE, *Miner. Eng.* 17 (2004) 785-801.
- [13] G. SENANAYAKE, *Hydrometallurgy* 76 (2005) 233-238.
- [14] J. FICERIOVÁ, P. BALÁZ Y C. LEÓN, *Hydrometallurgy* 77 (2005) 35-39.
- [15] I. CHANDRA Y M. JEFFREY, *Hydrometallurgy* 77 (2005) 191-201.
- [16] G. SENANAYAKE, *Hydrometallurgy* 77 (2005) 287-293.
- [17] N. P. GALLAGHER Y J. L. HENDRIX, *Hydrometallurgy* 25 (1990) 305-316.
- [18] Q. XU, M. MENG Y K. HAN, *Min. Metall. Process.* 13 (1996) 141-146.
- [19] A. VILLARROEL, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile (Chile), 2003.
- [20] P. NAVARRO, C. VARGAS Y F. J. ALGUACIL, *Proc. III Cong. Int. de Minería, Metalurgia y Materiales-VIII Encuentro Minero de Tarapacá*, J. P. Ibáñez, J. Ipinza y X. Veloso (Eds.) Iquique, Chile, 2004, pp. 1-10.
- [21] P. NAVARRO, C. VARGAS, M. ALONSO Y F. J. ALGUACIL, *Proc. 9th International Conference on Environmental Science and Technology (9th CEST)*, T. D. Lekkas (Ed.) Rhodes Island, Greece, 2005, pp. A1084-A1089.
- [22] C. VARGAS, F. PAVEZ Y P. NAVARRO, *Proc. Congreso Binacional SAM/CONAMET- METMAT 2005*, R. Boeri (Ed.), Mar del Plata, Argentina, 2005, pp. 1-6.
- [23] E. GUERRA Y D. DREISINGER, *Hydrometallurgy* 51 (1999) 155-172.
- [24] R. ALVAREZ, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile (Chile), 2002.
- [25] J. B. HISKEY Y J. LEE, *Hydrometallurgy* 69 (2003) 45-56.
- [26] P. NAVARRO, R. ALVAREZ, C. VARGAS Y F. J. ALGUACIL, *Miner. Eng.* 17 (2004) 825-831.
- [27] C. VARGAS, G. CIFUENTES, P. NAVARRO Y P. ORREGO, *Rev. Metal. Madrid* 40 (2004) 101-108.
- [28] P. NAVARRO, C. VARGAS, R. ALVAREZ Y F. J. ALGUACIL, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 12-20.
- [29] H. ZHANG Y D. DREISINGER, *Hydrometallurgy* 66 (2002) 67-76.
- [30] H. ZHANG Y D. DREISINGER, *Hydrometallurgy* 72 (2004) 225-234.
- [31] V. REVECO, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile (Chile), 2005.
- [32] J. ORELLANA, Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile (Chile), 2005.
- [33] J. ZHAO, Z. WU Y J. CHEN, *Hydrometallurgy* 46 (1997) 363-372.
- [34] J. ZHAO, Z. WU Y J. CHEN, *Hydrometallurgy* 48 (1998) 133-144.