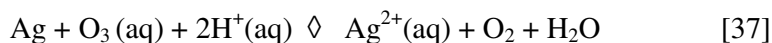


## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES

#### IV.1. LIXIVIACIÓN DE PLATA

1. La lixiviación de la plata con  $O_3$  presenta una estequiometría concordante con la reacción global:

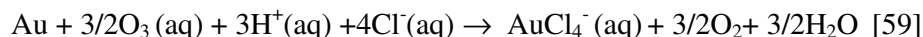


2. La velocidad de extracción de la plata se incrementa con la velocidad de agitación. Para el reactor utilizado, la velocidad de lixiviación es proporcional a la velocidad de agitación elevada al exponente 0.8.
3. La velocidad de lixiviación de la plata en medio  $O_3/O_2/H^+$  es proporcional a la presión parcial de ozono.
4. Por debajo los  $50^\circ C$ , la velocidad de lixiviación es prácticamente independiente de la temperatura, a  $T > 50^\circ C$ , decrece.
5. Las características de lixiviación indican que la cinética de la reacción está controlada por transferencia de masa del ozono en solución. Los coeficientes de transferencia de masa son independientes de la presión parcial de ozono y dependen de la temperatura, con una energía de activación de  $17 \text{ kJ/mol}$ , que confirma este control cinético.
6. Para el reactor utilizado, los coeficientes de transferencia de masa están en el rango de  $\sim 10^{-4} \text{ m/s}$ , característicos de reacciones sólido/líquido en reactores de agitación convencional.

7. La velocidad de lixiviación disminuye ligeramente al aumentar la concentración de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en el intervalo de 0.3 – 1M. Este efecto está relacionado con la disminución de la solubilidad de ozono.
8. Las velocidades de lixiviación disminuyen a  $\text{pH} < 2$ . A  $\text{pH} > 4$  se forma una capa sólida de  $\text{Ag}_2\text{O}_2/\text{Ag}_2\text{O}$  en la superficie de la placa de plata. La capa no es completamente protectora, puesto que la lixiviación tiene lugar a baja aunque constante velocidad. A  $\text{pH} = 6$  la reacción es extremadamente lenta.
9. Las características cinéticas son consistentes con un mecanismo general de corrosión metálica controlado por transporte de reactantes.

#### IV.2. LIXIVIACIÓN DEL ORO

1. La lixiviación del oro con  $\text{O}_3$  presenta una estequiometría de acuerdo con la reacción global:



2. La velocidad de extracción se incrementa con la velocidad de agitación. No obstante, a temperatura ambiente, este efecto es menos significativo que en la lixiviación de la plata. Para el reactor empleado, la velocidad es proporcional a la velocidad de agitación elevada a 0.4.
3. La velocidad de lixiviación del oro en medio  $\text{O}_3/\text{O}_2/\text{H}^+/\text{Cl}^-$  es también proporcional a la presión parcial de ozono.
4. A  $T < 40^\circ\text{C}$ , la velocidad de lixiviación se incrementa ligeramente con la temperatura, por encima de esta temperatura la velocidad de extracción disminuye.

5. Las características de lixiviación indican que la cinética está básicamente controlada por transferencia del ozono acuoso hasta la superficie del oro. Sin embargo, a  $T > 30^{\circ}\text{C}$  la representación de Arrhenius da una energía de activación de 8 kJ/mol, propia de un control por transporte, mientras que a  $T < 30^{\circ}\text{C}$  la energía de activación resulta de 33 kJ/mol. Este último valor indica un control de la reacción mixto (transporte-químico) para bajas temperaturas.
6. Para el reactor utilizado, los coeficientes de transferencia de masa están también en el rango de  $\sim 10^{-4}$  m/s.
7. Las velocidades de lixiviación son prácticamente independientes de la concentración de ácido en el intervalo 0.05-0.5M. A  $[\text{H}^+] = 1\text{M}$ , la velocidad decrece ligeramente, este efecto está relacionado con la disminución de la solubilidad de ozono.
8. Las velocidades de lixiviación decrecen gradualmente a  $\text{pH} > 2$ . Para  $\text{pH} = 5.7$ , la velocidad de reacción es insignificante. No se detectan productos sólidos (SEM) en la superficie de la lámina de oro, bajo estas condiciones.
9. Las velocidades de lixiviación son poco dependientes de la concentración de cloruro en el rango 0.01M-0.5M, indicando que el  $\text{Cl}^-$  actúa básicamente como agente despasivante. A muy bajas concentraciones de  $\text{Cl}^-$  (0.001M), el efecto despasivante desaparece y el oro no se lixivia de forma apreciable con ozono acuoso.
10. Los estudios de espectrofotometría ultravioleta de soluciones de lixiviación  $\text{O}_3/\text{H}^+/\text{Cl}^-$ , indican que el ozono es la especie predominante en el rango de cloruros de 0.01-0.1M. No se detectó ni cloro molecular ni ácido hipocloroso. La lixiviación del oro en dicho intervalo se produce según la reacción [59].
11. Los estudios de espectrofotometría ultravioleta indican que para  $[\text{Cl}^-] = 0.5\text{M}$  se produce una mezcla de ozono y ácido hipocloroso en las soluciones de lixiviación. Por lo tanto, bajo estas condiciones el ozono es inestable. Consecuentemente, las condiciones óptimas para la lixiviación con ozono en un medio  $\text{H}^+/\text{Cl}^-$ , se sitúan en el intervalo de  $\text{Cl}^-$  de 0.01M-0.1M.

12. Para  $[Cl^-] > 0.01M$ , las características cinéticas son también consistentes con un mecanismo general de corrosión metálica controlado básicamente por transporte de reactantes.

### **IV.3. ESTUDIO COMPARATIVO DE PRODUCTIVIDAD DE LA LIXIVIACIÓN DE LA PLATA, EL PALADIO Y EL ORO CON OZONO ACUOSO**

1. La productividad del metal lixiviado ( $g \text{ metal}/(m^2 \text{ h})$ ) es proporcional a la presión parcial de ozono. Para  $P_{O_3}$  de 0.049 atm, las productividades respectivas para la plata, el paladio y el oro son 14, 13 y 24  $g/(m^2 \text{ h})$ . Estos valores pueden verse incrementados (por extrapolación), si se trabaja con equipos de ozonización a escala industrial, que pueden operar a mayor presión parcial de ozono.
2. El consumo eléctrico por kg de ozono se incrementa ligeramente con la presión parcial de ozono. Los datos experimentales fueron de 15 kWh/kg  $O_3$  a 0.024 atm y 17 kWh/kg  $O_3$  a 0.049 atm. Para ozonizadores a escala industrial se tiene un consumo eléctrico de 18 kWh/kg  $O_3$  a 0.092 atm. La productividad expresada en  $g/(m^2 \text{ h})$ , y entendida como la diferencia entre el valor lixiviado y el consumo eléctrico es máxima cuando se opera a la máxima presión parcial.

### **IV.4. TRATAMIENTO DE PLACAS RADIOGRÁFICAS**

La plata contenida en placas radiográficas, puede recuperarse de forma efectiva mediante lixiviación con ozono, en un medio de sulfúrico diluido a temperatura ambiente. La productividad se incrementa con la densidad de pulpa y la presión parcial de ozono. Los tiempos de residencia se encuentran en el rango de 40-70 minutos para  $P_{O_3} = 0.049-0.026$  atm. El consumo de ozono aproximado es de 1kg  $O_3$ /kg Ag.

## IV.5. TRATAMIENTO DE CHATARRA ELECTRÓNICA

### IV.5.1. Componentes dorados

Los componentes dorados de circuitos impresos pueden ser tratados mediante dos etapas consecutivas (etapas 1 y 3 del proceso METALozon<sup>®</sup>):

#### 1) Lixiviación con $O_2/H_2SO_4$

Durante esta etapa, se extrae el recubrimiento de oro del sustrato polimérico conteniendo cobre/níquel. Después de la separación sólido-líquido, el níquel puede ser recuperado de la solución. Las partículas de oro ( $< 2mm$ ) se separan por cribado del sustrato polimérico conteniendo cobre.

#### 2) Lixiviación con $O_3/O_2/HCl$

Las partículas de oro se lixivian completamente, el oro puede recuperarse de la solución por métodos convencionales.

### IV.5.2. Tratamiento global

La chatarra electrónica puede tratarse globalmente según las etapas 1 y 3 del proceso METALozon<sup>®</sup>:

#### 1) Lixiviación con $O_2/H_2SO_4$

Durante esta etapa, se lixivian el Cu, Ni, Sn y Pb y se separan por repulpado, del sustrato polimérico y las partículas de oro. El Cu y Ni pueden recuperarse de la solución y el Sn y Pb forman un fino precipitado ( $SnO_2 + PbSO_4$ ), el cual puede recuperarse por filtración de la pulpa. Las partículas de oro se separan por cribado del sustrato polimérico.

#### 2) Lixiviación con $O_3/O_2/HCl$

Análogo al apartado 2) del IV.5.1. Tratamiento de componentes dorados.

#### IV.6. TRATAMIENTO DE UN CONCENTRADO GRAVIMÉTRICO DE ORO

Los concentrados gravimétrico de oro de mineralogía análoga a la estudiada, pueden ser tratados mediante las tres etapas consecutivas del proceso METALOZON<sup>®</sup>.

1) Lixiviación con  $O_2/H_2SO_4$

En esta etapa el cobre se disuelve completamente.

2) Lixiviación con  $O_3/O_2/H_2SO_4$

La plata se extrae completamente.

3) Lixiviación con  $O_3/O_2/HCl$

El oro nativo se lixivía totalmente.

Durante estos tratamientos, los componentes densos, no metálicos del concentrado permanecen no atacados ( $SnO_2$ ) o ligeramente atacados (hematites).

Las partículas de electrum se lixivian parcialmente al formarse una capa de  $AgCl$ . Estas partículas residuales de electrum pueden tratarse con una solución de  $CaCl_2$ , la cual solubiliza  $AgCl$ . A continuación el electrum puede ser reciclado a la etapa 3) del presente apartado. Si el concentrado contiene altas cantidades de electrum, la etapa 3 debe verificarse en  $O_3/O_2/HCl/ CaCl_2$  (concentrado), para asegurar la lixiviación completa tanto del oro como del electrum.

#### IV.7. TRATAMIENTO DE UN DE UN MINERAL DE GOSSAN

El tratamiento de este mineral requiere de dos etapas consecutivas:

1) Lixiviación con  $O_2/HCl$  diluido

Esta etapa de preoxidación es necesaria para eliminar los agentes reductores contenidos en el mineral, los cuales dificultan la lixiviación directa del oro con ozono acuoso.

## 2) Lixiviación con $O_3/O_2/HCl$ diluido (etapa 3 del proceso METALOZON<sup>®</sup>)

En la lixiviación del oro con ozono se alcanzan extracciones similares -70% en 2 horas- a las obtenidas en los procesos de cianuración convencionales, con la ventaja que los efluentes pueden ser detoxificados con mayor facilidad.

Simultáneamente a la lixiviación del oro, se disuelve el mercurio presente en el mineral, por lo tanto la lixiviación con  $O_3/O_2$  puede ser efectiva para la eliminación de metales tóxicos en suelos, sedimentos y otros residuos sólidos, mineros o industriales.

## IV.8. TRATAMIENTO DE LODOS ANÓDICOS

El proceso METALOZON<sup>®</sup> puede también ser un método efectivo para el tratamiento de lodos anódicos de electrorrefinado del cobre.

### 1) Lixiviación con $O_2/H_2SO_4$

El arsénico y el cobre se recuperan mayoritariamente en esta primera etapa. En esta lixiviación se disuelve la mayor parte del lodo anódico original.

### 2) Lixiviación con $O_3/O_2/H_2SO_4$

En esta segunda etapa se produce una lixiviación selectiva del selenio y la plata. Asimismo, se completa la extracción de telurio.

### 3) Lixiviación con $O_3/O_2/HCl$

En esta etapa tiene lugar la lixiviación selectiva del oro. El sólido residual contiene principalmente sulfato de plomo, sílice, óxidos de antimonio y trazas de cloruro de plata.