

Los teléfonos celulares una nueva mina de metales preciosos, factible de valorizar mediante tostación y lixiviación con cianuro

Ernesto de la Torre, Alicia Guevara y Sebastián Espinoza

Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX)

ernesto.delatorre@epn.edu.ec

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue recuperar oro, plata, paladio y rodio de tarjetas de circuitos impresos de teléfonos celulares descartados. Para esto, se utilizaron técnicas de cianuración para extraer oro, plata y paladio, y lixivaciones con hidróxido de potasio, ácido nítrico, ácido sulfúrico y cloruro de sodio para extraer paladio y rodio. Se determinó el contenido de cada metal en la tarjeta, se realizaron ensayos de cianuración con tratamientos preliminares de la muestra de reducción de tamaño, tostación, lixiviación con amoníaco y lixiviación con ácido nítrico.

Se obtuvo una recuperación de 95 % de oro, 82 % de plata y 42 % de paladio, cuando la tarjeta tostada desde temperatura ambiente hasta 850 °C a 0,72 atm, pulverizada hasta d_{80} 136 μm y lixiviada con amoníaco al 16,7 % v/v, fue cianurada con 4 g/L de cianuro, a pH 10,5 por 24 horas. Se realizaron ensayos de cianuración con reciclaje de la solución previamente tratada con carbón activado. El porcentaje de disolución de los metales de interés disminuyó con la recirculación. Se efectuaron ensayos de lixiviación con tratamientos preliminares de la muestra de tostación a 850 °C y 0,72 atm y reducción de tamaño. La lixiviación con ácido nítrico, para la muestra tostada y con diámetro de partícula de 136 μm , con una concentración de HNO_3 de 50 g/L durante 6 horas registró una recuperación de 75 % de paladio. No se registró recuperación alguna de rodio con ninguno de los agentes lixiviantes utilizados.

Palabras claves: Tarjeta de circuito impreso, cianuración, tostación reducción de tamaño, recuperación de oro, plata, paladio y rodio, lixiviación con ácido nítrico

Abstract

The purpose of this research was to recover gold, silver, palladium and rhodium from discarded cell phones printed circuit boards. Cyanide leaching was used to recover gold, silver and palladium. In order to recover palladium and rhodium leaching tests with KOH, HNO_3 , H_2SO_4 and NaCl were carried out. The content of each in the circuit boards metal was determined. Cyanide leaching tests were carried out for circuit boards that received preliminary treatments of roasting, size reduction, leaching with HNO_3 and leaching with ammonia in order to determine those that are effective for a high recovery of gold and silver.

Preliminary treatments of roasting at 0,72 atm from room temperature to 850 °C, size reduction to 136 μm and leaching with ammonia 16,7 % v/v resulted in recovery rates of 95 % of gold, 82 % of silver and 42 % of palladium during cyanide leaching with 4 g/L of NaCN, pH 10,5 and time 24 hours. Moreover, cyanidation test with recycling of the solution after being treated with activated carbon were carried out. Dissolution rate of metals decreased as the solution was recirculated. Acidic and alkaline leaching tests with roasted and milled circuit boards were carried out. 50 g/L nitric acid leaching for 6 hours resulted in 75 % of palladium recovered. No amount of rhodium was recovered with any of the leaching agents used.

Keywords: Printed circuit board, cyanidation, roasting, size reduction, recovery of gold, silver, palladium and rhodium, nitric acid leaching.

1 Introducción

1.1 El problema de los residuos electrónicos

Los residuos electrónicos se han convertido en una de las más importantes limitaciones en el desarrollo de la industria electrónica. De los residuos sólidos urbanos, la fracción de los electrónicos es, sin duda, la que crece con

mayor rapidez. Los mayores causantes de este problema son los teléfonos móviles y los ordenadores, pues son los que se reemplazan más a menudo [11] y [9].

Cada año se venden a nivel mundial más de 1.000 millones de aparatos celulares y dos de cada tres personas tienen acceso a la telefonía móvil. Actualmente hay

4.600 millones de abonados al servicio de la telefonía celular sobre una población de más de 6.800 millones. La constante innovación tecnológica y nuevas funcionalidades en los teléfonos celulares conllevan un permanente recambio de equipos a una velocidad preocupante. El rápido aumento de este tipo de residuo motiva una preocupación, pues no se deben descartar los problemas ambientales que pueden generar en un futuro próximo [8].

La mayoría de los teléfonos celulares contiene una cantidad de materiales plásticos, cerámicos, y metales, que se pueden reciclar. Entre un 65 % y un 80 % de las partes de los teléfonos móviles pueden ser re aprovechadas, de ésta manera se extiende el ciclo de vida de los productos. El reciclaje de estos aparatos ahorra recursos y protege el medio ambiente porque no es necesario extraer metales nuevos [10].

La proporción de metales preciosos presentes en los residuos electrónicos es importante, se estima que en los 230 millones de computadores y los mil millones de teléfonos móviles vendidos en 2006, las cantidades de oro y plata alcanzaron respectivamente a 70 y 235 toneladas, lo que corresponde en cada caso a cerca de 3 % de la producción minera mundial de ambos metales. En cuanto al paladio, estas cifras llegan incluso a las 18 toneladas o 12 %. Uno de los principales obstáculos para recuperar de manera eficiente y eficaz estos recursos es la casi inexistente infraestructura para la recolección y reciclaje, junto con la ausencia de asignación de responsabilidades [2].

En un teléfono celular, la tarjeta de circuitos impresos corresponde a un 40 % del peso total del mismo, sin considerar el peso de la batería, y es en ésta donde están presentes los metales nobles. El cobre corresponde a un 30 % del peso de la tarjeta aproximadamente [3].

1.2 Recuperación de metales por procesos hidrometalúrgicos

La recuperación de metales por procesos hidrometalúrgicos involucra una serie de lixiviaciones ácidas y básicas de las tarjetas de circuito. Los agentes lixiviantes más utilizados son el cianuro y los ácidos minerales como el ácido sulfúrico y nítrico [12].

El cianuro de sodio es utilizado universalmente para recuperar metales nobles debido a su costo relativamente bajo y a su efectividad para disolverlos. Además, a pesar de su toxicidad, puede ser utilizado con un bajo riesgo a la salud y el ambiente. El orden de actividad para los metales nobles con el cianuro es $Au > Ag > Pd > Rh$.

Varias variables que afectan la cianuración, tales como concentración, temperatura, pH y tamaño de partícula han sido estudiadas. Sus efectos en la óptima conversión de oro han sido investigados para obtener mejoras efectivas a escala industrial [12], [4].

La velocidad de disolución de oro aumenta de manera directamente proporcional con la concentración de cianuro pero se vuelve independiente cuando la concentración de cianuro excede el 0,06 % en peso [5].

Un tamaño de partícula pequeño puede aumentar la velocidad de disolución del oro. Esto se debe a que un menor valor de d_{80} permite tener una mayor área superficial para el contacto entre el sólido y el líquido, lo cual incrementa la recuperación. La disolución máxima de oro, plata, platino y paladio en una solución cianurada se da a valores de pH en el rango de 10 a 10,5 [7].

La disolución del cobre es un fenómeno no deseado durante el proceso de cianuración, puesto que consume reactivo y oxígeno disuelto. Como consecuencia de esto, se da una disminución de la disolución de oro y una interferencia en los procesos subsecuentes de recuperación, y se contamina el producto final. Para la remoción de cobre antes de la cianuración se somete al mineral a procesos de lixiviación con ácido nítrico o la lixiviación con amoníaco [7].

La disolución de los metales del grupo del platino está basada en la provisión de un alto potencial de oxidación y de iones complejantes efectivos en solución. Por ejemplo en el caso de la disolución con agua regia, el cloro y nitrosil cloruro (NOCl) formados, proveen un alto potencial de oxidación y la alta concentración de iones cloruro actúa como el agente complejante.

Un sistema de disolución comparable con el agua regia puede ser creado si se utiliza una mezcla de un agente oxidante, una sal de cloro y una solución ácida como el ácido sulfúrico. La adición de una sal de cloro a una solución de H_2SO_4 a una concentración moderada estabilizaría los iones de paladio y rodio que en solución forman los complejos correspondientes y, en consecuencia, mejoraría su disolución [6].

2 Materiales y Métodos

2.1 Materiales

Todos los reactivos utilizados fueron de grado técnico puesto que fueron utilizados para disolver metales preciosos y las impurezas no producen interferencia en el análisis.

Para la caracterización física se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca Tescan con analizador de Rayos X Quantax. Para la determinación del contenido de paladio y rodio en las tarjetas se utilizó un equipo de espectrofotometría de absorción atómica AAnalyst 300 PERKIN ELMER.

Para la tostación de las tarjetas se utilizó una mufla SEPOR. En el proceso de reducción de tamaño se utilizó un molino de martillos marca CONDUX y un pulverizador NAEF.

En el proceso de remoción de metales de la solución cianurada se utilizó carbón activado granular Quimicarb malla 8×20 .

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterización física

La caracterización física comprendió la determinación de las regiones de la tarjeta en las que están presentes el oro, y la plata. Para éste propósito se cortó una sección recta de la tarjeta, la cual fue analizada por microscopía electrónica de barrido.

2.2.2 Caracterización química

Para la determinación del contenido de oro y plata se realizó un ensayo al fuego, se utilizó como carga fundente bórax, carbón, PbO, CaCO₃, NaNO₃, sílice y Na₂CO₃. Para cada ensayo se utilizó una tarjeta, la cual fue previamente tostada a 0,72 atm, desde temperatura ambiente hasta 850 °C y pulverizada.

Para la determinación del contenido de metales base, paladio y rodio se realizó una disgregación con agua regia de 0,5 g de la muestra tostada y pulverizada.

2.2.3 Cianuración de tarjetas de circuito impreso

Para determinar las recuperaciones obtenidas de oro y plata metal se analizó el contenido de dichos metales en la solución cianurada por absorción atómica y el contenido en el relave del proceso por ensayo al fuego. En el caso del paladio y rodio se analizó el contenido de cada metal en la solución cianurada y se determinó la relación entre dicha cantidad y el análisis de cabeza de la muestra.

a. Definición de tratamientos preliminares de reducción de tamaño y tostación

Se realizaron ensayos de cianuración con agitación mecánica de 500 rpm de la tarjeta entera, fracturada manualmente en secciones de 4 × 4 cm, 1 × 1 cm, 7 × 7 mm y 5 × 5 mm. El mismo procedimiento se siguió con la muestra tostada. Adicionalmente se realizó un ensayo en la muestra sin tostar reduciéndola de tamaño con el molino de martillos a un d_{80} de 1000 μ m y en la muestra tostada reduciéndola de tamaño con el pulverizador a un d_{80} de 136 μ m. Para cada prueba se utilizó una tarjeta. Las condiciones fueron porcentaje de sólidos 2,5 - 5 % concentración de cianuro 2 g/L, pH 10,5 y tiempo 24 horas.

b. Definición de tratamiento preliminar para remoción de cobre previo al proceso de cianuración

Para estos ensayos se utilizaron dos tipos de muestras: una tarjeta tostada y pulverizada (d_{80} = 136 μ m), y una tarjeta sin tostar y molida (d_{80} = 1000 μ m). Cada muestra fue lixiviada con soluciones de amoníaco 9,1 % v/v y 16,7 % v/v. También se realizaron lixiviaciones con soluciones de ácido nítrico 19,5 % v/v y 33,3 % v/v. Las condiciones para las lixiviaciones fueron porcentaje de sólidos 14 % y tiempo 2 horas. Luego de las lixiviaciones

se filtró el relave, se secó a 110 °C y se cianuró al mismo con las mismas condiciones de la sección a.

c. Definición de los parámetros de operación para el proceso de cianuración

Con los tratamientos preliminares que dieron la mayor recuperación de oro y plata se realizaron ensayos de cianuración en los que se varió la concentración de cianuro de 0,5 a 8 g/L. Las condiciones de operación fueron las mismas que se utilizaron en la sección a.

Una vez definida la concentración de cianuro se realizaron ensayos para definir el pH de trabajo. Se trabajó con valores de pH de 10, 10,5 y 11.

Finalmente se definió el tiempo de proceso, se trabajó a 4, 8, 16, 24 y 48 horas, utilizando como condiciones las definidas anteriormente y un porcentaje de sólidos de 2,5 - 5 %.

d. Ensayos de cianuración con recirculación de la solución cianurada previo tratamiento con carbón activado

Con los parámetros definidos en la sección c., se realizaron ensayos de cianuración con reciclaje de la solución. Antes de volver a utilizarla, la solución fue tratada con carbón activado, se utilizaron 25 gramos de carbón por litro. Se agitó mecánicamente a la solución a 500 rpm durante 24 horas.

Una vez tratada, se determinó el cianuro libre presente en la solución por titulación con AgNO₃. Se añadió el cianuro necesario para alcanzar la concentración definida en la sección c. y se procedió a utilizar la solución en una nueva cianuración.

2.2.4 Lixiviación ácida y básica de tarjetas de circuito impreso

En estos ensayos se utilizaron como agentes lixiviantes hidróxido de potasio, ácido nítrico y ácido sulfúrico. Se determinó la recuperación de paladio y rodio sobre la base del análisis del contenido de cada metal en la solución y se determinó la relación entre dicha cantidad y el análisis de cabeza de la muestra.

a. Definición de tratamientos preliminares

Se utilizaron dos tipos de muestra, una tarjeta tostada y pulverizada (d_{80} = 136 μ m) y una tarjeta sin tostar y molida con molino de martillos (d_{80} = 1000 μ m). Las condiciones de los ensayos fueron, concentración de agente lixiviante: 14 g/L para KOH y 35 g/L para HNO₃ y H₂SO₄, porcentaje de sólidos 2,5-5 %, y tiempo 2 horas.

b. Definición de los parámetros de operación para los procesos de lixiviación

Con los tratamientos preliminares que dieron la mayor recuperación de paladio y rodio se realizaron ensayos de lixiviación ácida y básica en los que se varió la concentración de agente lixiviante de 2

a 40 g/L. Para KOH y de 20 a 50 g/L para los ácidos. Las condiciones de operación fueron las mismas que se utilizaron en la sección a.

Una vez definida la concentración de agente lixiviante se realizaron ensayos para definir el tiempo de lixiviación. Se trabajó con tiempos de proceso de 2,4 y 6 horas.

2.3 Lixiviación con solución de ácido sulfúrico y cloruro de sodio de tarjetas de circuito impreso

Se realizó un ensayo con una tarjeta tostada y pulverizada ($d_{80} = 136 \mu\text{m}$). Se utilizó una solución de H_2SO_4 al 60 % en peso con un contenido de 0,1 mol/L de NaCl. Las condiciones utilizadas fueron porcentaje de sólidos 10 %, y tiempo 6 horas.

3 Análisis

3.1 Caracterización física y química

La imagen presentada en la Figura 1 corresponde a un filamento de soldadura de uno de los chips presentes en una tarjeta de circuito impreso obtenida con un microscopio electrónico a 500 aumentos. En estos filamentos existe un blindaje de metales nobles, el cual evita que se produzca un desgaste de los mismos por la corrosión.

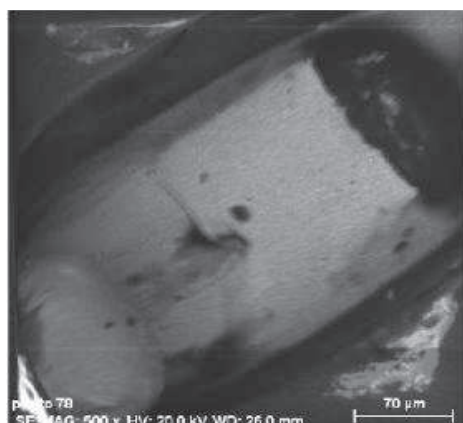


Figura 1. Imagen por microscopía electrónica a 500 aumentos de un filamento de soldadura correspondiente a una capacitor perteneciente a una tarjeta de circuito impreso.

En la Figura 2 se presentan imágenes del análisis químico realizado al filamento. Como se puede observar, existe una aleación de oro (color azul) y plata (color rojo) en la superficie del filamento.

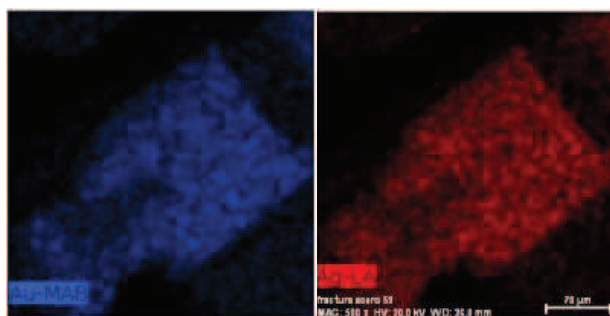


Figura 2. Imagen por microscopía electrónica a 500 aumentos del análisis químico de los filamentos para soldadura de un capacitor perteneciente a una tarjeta de circuitos impresos.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la caracterización química de las tarjetas de circuito impreso.

Metal	Concentración	Promedio
Au	244 – 857 g/t	421 g/t
Ag	520 – 2901 g/t	1355 g/t
Pd	68 – 80 g/t	74 g/t
Rh	44 – 54 g/t	49 g/t
Cu	10 - 43 %	29 %

Tabla 1. Concentración de metales nobles en tarjetas de circuito impreso.

Como se puede observar, los rangos de las concentraciones obtenidas tanto de oro como de plata fueron amplios. Dicha heterogeneidad en el contenido de estos metales se debe a que el mismo varía en función del modelo y la marca del teléfono. En el caso del paladio y el rodio los rangos son menores, por tal razón el contenido promedio puede ser considerado como un valor representativo.

3.2 Cianuración de tarjetas de circuito impreso

3.2.1 Definición de tratamientos preliminares de tostación y reducción de tamaño

Los resultados de la recuperación de oro y plata en función del tamaño de partícula se presentan en la Figura 3, donde es posible observar que las recuperaciones de oro y plata para las muestras tostada y sin tostar presentan un valor máximo cuando el tamaño de partícula es 5 mm.

Es posible apreciar una disminución en la recuperación de ambos metales cuando el diámetro de partícula de la muestra no tostada fue de 1000 μm. A pesar de que se tiene un menor d_{80} , y por ende una mayor área superficial y una mayor liberación de oro y plata, también existe una mayor liberación de cobre pues queda expuesto al ser fracturado el sustrato de la tarjeta.

Es posible constatar que las recuperaciones de oro y plata obtenidas con la muestra tostada aumentaron, si se las compara con las obtenidas con el mismo tamaño de partícula en ausencia del tratamiento preliminar de tostación. Al eliminar la parte plástica de la tarjeta, se tiene un mayor contacto entre la solución cianurada y la muestra.

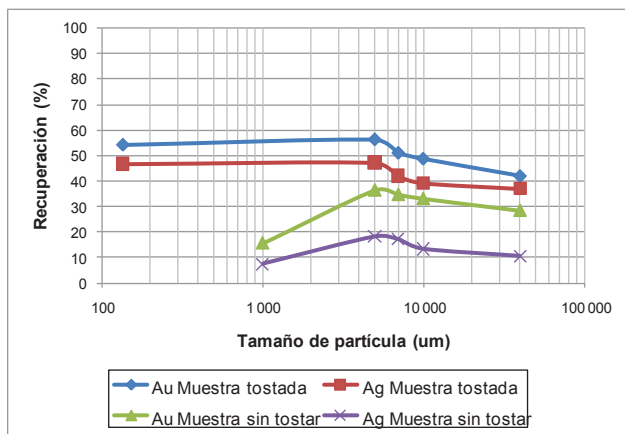


Figura 3. Porcentajes de recuperación de oro y plata obtenidas en el proceso de cianuración en función del tamaño de partícula para muestra tostada y sin tostar.

A diferencia del ensayo con la muestra molida con molino de martillos, la cianuración de la tarjeta que fue tostada y pulverizada permitió alcanzar una recuperación cuyo valor es similar al obtenido con una tarjeta con diámetro de partícula de 5 mm. Esto se debe a que al reducir casi diez veces el tamaño de grano se consigue una mayor área de contacto. El cobre fue totalmente liberado del sustrato. Sin embargo, fue posible tener una mayor, aunque no alta, recuperación tanto de oro como de plata, puesto que las velocidades de disolución de dichos metales en una solución cianurada son mayores a la del cobre. En consecuencia el tamaño de partícula más adecuado para el proceso de cianuración es de 136 μm.

3.2.2 Definición de tratamientos preliminares para remoción de cobre

Los resultados de las recuperaciones de oro y plata obtenidas en la cianuración luego del tratamiento preliminar con soluciones de amoníaco se presentan en la Tabla 2.

Como se puede apreciar, cuando la muestra fue molida, las recuperaciones de los dos metales para las dos soluciones lixiviantes fueron similares, lo que corrobora que el diámetro de partícula que se obtiene con la reducción por el molino de martillos no es el adecuado para obtener una alta recuperación de oro y plata.

Solución	Muestra molida		Muestra tostada y pulverizada	
	Recuperación [%]		Recuperación [%]	
NH ₃ (9,1 %)	Au	Ag	Au	Ag
	39,57	28,57	68,05	52,04
NH ₃ (16,7 %)	42,35	31,90	82,92	68,73

Tabla 2. Resultados de recuperaciones de oro y plata con tratamiento de lixiviación amoniacal.

En el caso de la muestra tostada y pulverizada se observó un incremento en la recuperación de oro de 68,05 % a 82,92 % al aumentar la concentración de amoníaco. El porcentaje de remoción del cobre fue mayor para ambas soluciones en comparación con la muestra molida.

Los resultados de recuperaciones de oro y plata obtenidas con tratamiento preliminar de lixiviación con HNO₃ para los dos tipos de muestra se presentan en la Tabla 3.

Al tratar a la muestra molida con ácido nítrico antes de la cianuración, se obtuvieron recuperaciones alrededor de 10 % mayores al incrementar la concentración de ácido en solución, dicho valor no es significativo si se considera que se trabajó con una solución con un 14 % más de ácido.

Solución	Muestra molida		Muestra tostada y pulverizada	
	Recuperación [%]		Recuperación [%]	
NH ₃ (33,3 %)	Au	Ag	Au	Ag
	27,56	22,68	70,19	64,70
NH ₃ (19,5 %)	17,02	9,03	67,43	62,01

Tabla 3. Resultados de recuperaciones de oro y plata con tratamiento de lixiviación con ácido nítrico.

En el caso de los ensayos realizados con tarjetas tostadas y pulverizadas, la diferencia entre los porcentajes de extracción tanto de oro como de plata fue del 2,7 % aproximadamente para ambos metales.

La obtención de porcentajes menores de remoción con un pre tratamiento de lixiviación ácida se debe a la presencia de residuos del dicho proceso, lo que causa la descomposición del cianuro a HCN. La mayor recuperación de oro y plata luego de la lixiviación amoniacal se debe en parte a la presencia de residuos de amoníaco en la muestra, que reaccionan con el cobre y el cianuro formando un complejo denominado cianuro cupriamonio Cu(NH₃)₄(CN)₂, el cual se disocia en cianuro libre y el complejo Cu(NH₃)₄.

3.2.3 Definición de los parámetros de operación para la cianuración

Los resultados de recuperación de oro y plata obtenidos en los ensayos de definición de la concentración de cianuro de sodio se presentan en la Tabla 4.

Se puede observar que al emplear cantidades bajas de reactivo (de 0,5 a 1,5 g/L), el porcentaje de oro extraído se vio reducido de manera considerable, esto se debe a que la muestra presentaba otros metales como el cobre

Concentración de NaCN [g/L]	Recuperación [%]	
	Au	Ag
0,5	30,20	26,77
1,0	54,73	42,52
1,5	69,91	57,97
2,0	82,92	68,73
3,0	88,44	78,42
4,0	95,11	81,90
8,0	96,02	83,52

Tabla 4. Porcentajes de recuperación de oro y plata al variar la concentración de cianuro de sodio.

Se obtuvieron valores máximos de recuperación de los dos metales (96,02 % de oro y 83,52 % de plata) al utilizar una solución cianurada de 8 g/L. Sin embargo, si se comparan estos porcentajes recuperados con los obtenidos con 4 g/L, es posible ver que el aumento es cercano al 1 %, por lo que no es justificable trabajar con dicha concentración.

Los resultados de recuperación de oro y plata obtenidos en los ensayos de definición del pH de trabajo se presentan en la Tabla 5.

pH	Recuperación [%]	
	Au	Ag
10,0	94,16	79,26
10,5	95,11	81,90
11,0	92,06	75,86

Tabla 5. Porcentajes de recuperación de oro y obtenidos en los ensayos de definición del pH de trabajo.

Como se aprecia en la Tabla 5, al trabajar con un pH de 10,5 se obtuvieron los mayores porcentajes de recuperación.

Los resultados de recuperación de oro y plata obtenidos en los ensayos de definición cianuración para la definición del tiempo de proceso se presentan en la Figura 4.

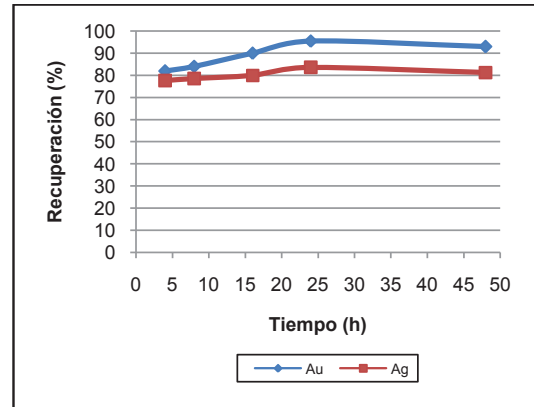


Figura 4. Variación de los porcentajes de recuperación de oro y plata obtenidos al variar el tiempo de cianuración.

Como se puede observar, en la hora 24 se alcanzó la máxima recuperación para ambos metales. Contrariamente, el extender la cianuración hasta las 48 horas produjo una disminución en el porcentaje de oro y plata disueltos. Esto se debe a que el pH alcanza valores cercanos a 12,5. La consecuencia de éste incremento es la precipitación de los dos metales por efecto de la presencia de impurezas como hierro o calcio. La recuperación de paladio alcanzó el 42 %, respecto al rodio no se logró disolución alguna del mismo.

3.2.4 Cianuración con recirculación de la solución cianurada

Los resultados obtenidos de las recuperaciones de oro y plata al recircular la solución cianurada luego del tratamiento con carbón activado se presentan en la Tabla 6. Como los resultados lo demuestran, no se consiguió mantener la eficiencia inicial de disolución de la solución. Una de las razones puede ser la presencia de metales base o de cobre en la solución que no fueron removidos en el proceso de tratamiento con carbón activado. Otra posible razón puede ser la descomposición del cianuro.

Cianuración No	Recuperación [%]	
	Au	Ag
1	95,11	81,59
2	87,47	71,60
3	81,47	69,18
4	77,44	65,01
5	73,33	60,28

Tabla 6. Porcentajes de recuperación de oro y plata al recircular la solución tratada con carbón.

3.3 Lixiviación ácida y básica de tarjetas de circuito impreso

3.3.1 Definición de tratamientos preliminares de tostación y reducción de tamaño

Los resultados de la definición del tratamiento preliminar para las lixiviaciones ácidas y básica se presentan en la Tabla 7. Es posible constatar que en los ensayos con la muestra tostada y pulverizada se obtuvo una mayor recuperación de paladio, la disolución del rodio no fue posible en ninguno de los casos.

Muestra	KOH		HNO ₃		H ₂ SO ₄	
	Pd [%]	Rh [%]	Pd [%]	Rh [%]	Pd [%]	Rh [%]
Molida	1,50	0,00	5,07	0,00	4,44	0,00
Tostada y pulverizada	1,77	0,00	12,19	0,00	12,88	0,00

Tabla 7. Resultados de definición de pre-tratamiento para lixiviaciones ácidas y básicas.

3.3.2 Definición de los parámetros de operación para la lixiviación

Los resultados de la definición de la concentración de agente lixivante se presentan en la Tabla 8.

Como se aprecia, ambos ácidos presentan valores muy similares de recuperación de paladio. El aumento de la concentración de ácido no tiene una influencia importante en el proceso. En el caso del KOH, se obtuvo una recuperación de 8 % de paladio y 0 % de rodio con una concentración de 40 g/L.

Concentración [g/L]	HNO ₃		H ₂ SO ₄	
	Pd [%]	Rh [%]	Pd [%]	Rh [%]
20	9,16	0,00	10,21	0,00
35	12,19	0,00	12,88	0,00
50	14,79	0,00	13,36	0,00

Tabla 8. Resultados de definición de concentración de agente lixivante para lixiviaciones ácidas.

Los resultados de la definición del tiempo de lixiviación se presentan en la Tabla 9. Se puede observar que el aumento en el tiempo de proceso es favorable para la lixiviación con ácido nítrico y no para el ácido sulfúrico. En el caso del KOH el aumento en el tiempo no tuvo un efecto significativo en el incremento de la recuperación de paladio, se obtuvo un porcentaje de extracción de 8,59 en la hora 6. Por lo que no se consideró a este tipo de lixiviación como una técnica eficiente para recuperar metales del grupo del platino.

Tiempo [h]	HNO ₃		H ₂ SO ₄	
	Pd [%]	Rh [%]	Pd [%]	Rh [%]
2	14,79	0,00	13,36	0,00
4	46,28	0,00	14,91	0,00
6	75,43	0,00	16,11	0,00

Tabla 9. Resultados de definición de tiempo de proceso para lixiviaciones ácidas.

3.4 Lixiviación de tarjetas de circuito impreso con solución de ácido sulfúrico y cloruro de sodio

En éste ensayo los porcentajes de recuperación más altos obtenidos fueron 43,53 % de paladio y 0 % de rodio en la hora 6.

La adición del cloruro de sodio a la solución de H₂SO₄ estabilizó los iones de paladio, y en consecuencia, mejoró su disolución. En el caso del rodio no se obtuvieron resultados positivos, es posible que el haber trabajado a temperatura ambiente y no a valores altos de dicho parámetro haya impedido que se formen complejos de este metal con los iones cloro.

4 Conclusiones

- Se obtuvieron valores promedio del contenido de oro y plata en las tarjetas de circuitos impresos de 420 y 1355 g/t respectivamente. El contenido de oro presentó valores en el rango de 244 a 857 g/t y el de plata entre 520 a 2901 g/t. Los contenidos de promedio paladio y rodio fueron de 74, y 49 g/t, respectivamente.
- El tratamiento preliminar de tostación oxidante a 0,72 atm desde temperatura ambiental hasta 850 °C permitió remover el plástico presente en la tarjeta y liberar a los metales preciosos. Se determinó que el diámetro de partícula con el que se obtiene una mayor recuperación tanto de oro como de plata durante el proceso de cianuración fue de 136 m.
- De los dos tratamientos utilizados para remover el cobre, la lixiviación con amoníaco al 16 v/v durante dos horas presentó mejores resultados. Esto se debió a la formación de un complejo de cobre, amoníaco y cianuro, el cual se descompuso y dejó libre al ion (CN)⁻, lo que aumentó la disolución de los metales de interés.
- Los valores de los parámetros de cianuración que permitieron obtener los mayores porcentajes de extracción de oro y plata fueron una concentración de

cianuro de 4 g/L, pH entre 10 y 10,5, y tiempo de proceso de 24 horas. Con dichas condiciones se alcanzaron recuperaciones de 96 % de oro y 82 % de plata. El porcentaje de paladio disuelto fue de 42 % y no se logró disolver cantidad alguna de rodio.

- La cianuración con recirculación de la solución previamente tratada con carbón activado mostró una disminución progresiva de las tasa de disolución de oro y plata. El tratamiento de adsorción no consiguió mantener la eficiencia inicial de disolución de la solución.
- De las técnicas utilizadas para la extracción de paladio y rodio, la lixiviación con ácido nítrico en una concentración de 50 g/L permitió obtener la tasa más alta de recuperación. Se alcanzó una disolución del 75 % del paladio total en un tiempo de 6 horas. Con ninguno de los tipos de lixiviación se consiguió disolver al rodio, se demostró que condiciones normales de presión y temperatura no favorecen su extracción.

Agradecimientos Los autores del presente artículo dejan constancia de su agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional por el apoyo financiero brindado a este trabajo de investigación, a través del Proyecto interno PIS 09-04 y al personal del Departamento de Metalurgia Extractiva por su colaboración profesional.

Referencias

- [1] Brodkey, R. *Transport Phenomena: A Unified Approach*. Editorial Mc. Graw Hill, Nueva York, Estados Unidos, 1988, pp. 383, 385.
- [2] Boeni, H., Silva, U. y Ott, D. *Reciclaje de residuos electrónicos en América latina: panorama general, desafíos y potencial*, 2009. http://www.residuoselectronicos.net/archivos/documentos/Reciclaje_de_residuos_electronicosen_AmericaLatina_Boeni-Silva-Ott-FINAL.pdf. (Junio, 2010)
- [3] CEMPRE. *Residuos Electrónicos*, 2010. http://www.cempre.org.uy/index.php?option=com_content&view=article&id=87&Itemid=105http://www.cempre.org.uy/index.php?option=com_content&view=article&id=87&Itemid=105 (Junio, 2010).
- [4] De Andrade Lima, L. y Hodouin, D. *A Lumped Kinetic Model for Gold Ore Cyanidation*, 2005. *Hydrometallurgy*, 6, (79), 121.
- [5] Ellis, S. y Senanayake, G. *The Effects of Dissolved Oxygen and Cyanide Dosage on Gold Extraction from a Pyrrhotite-Rich Ore*, 2005. *Hydrometallurgy*, 4, (72), 39.
- [6] Mahmoud, H. *Leaching Platinum-Group Metals in a Sulfuric Acid/Chloride Solution*, 2003. *Journal of Materials*, 4, (55), 37.
- [7] Marsden, J. y House, I. *The Chemistry of Gold Extraction*, 1992. Editorial: Ellis Horwood., New York, Estados Unidos, pp. 160-170.
- [8] Residuos Electrónicos. *Basura electrónica, el lado tóxico de la telefonía móvil*. <http://www.residuoselectronicos.net> (Junio, 2010).
- [9] Sheng, P., Etsell, T. *Recovery of gold from computer circuit board scrap using aqua regia*, 2007. *Waste Management Research*, 9, (25), 380.
- [10] Silva U. *Gestión de Residuos Electrónicos en América Latina*, 2009. http://www.residuoselectronicos.net/archivos/documentos/Gestion_de_Residuos_RELAC.pdf (Julio, 2010).
- [11] Xiang, D., Mou, P., Wang, J., Guanghong, D. y Zhang, H. *Printed Circuit Boards recycling process and its environmental impact assessment*, 2007. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12, (34), 1030.
- [12] Zhang, L. y Cui, J. *Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review*, 2008. *Journal of Hazardous Materials*, 2, (158).