

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE DISOLUCIÓN DEL COBRE, EL ORO Y LA
PLATA CONTENIDOS EN TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES
DESECHADOS EMPLEANDO SOLUCIONES ÁCIDAS Y TIOSULFATO DE
AMONIO**

OSCAR ANDRÉS RONDÓN ESTUPIÑAN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2017

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE DISOLUCIÓN DEL COBRE, EL ORO Y LA
PLATA CONTENIDOS EN TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES
DESECHADOS EMPLEANDO SOLUCIONES ÁCIDAS Y TIOSULFATO DE
AMONIO**

OSCAR ANDRÉS RONDÓN ESTUPIÑAN

**Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

Director:

**JULIO ELÍAS PEDRAZA ROSAS
Mg. en Ingeniería Civil de Minas**

Codirectores:

**JULIO ANDRÉS PEDRAZA AVELLA
Dr. en Química**

**DIEGO OSWALDO PEREZ ACEVEDO
Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2017

De manera muy especial dedico este trabajo:

A mis padres Fanny Estupiñan y Samuel Rondón por su apoyo incondicional en esta etapa, su esfuerzo, paciencia y por creer en mí.

A mi familia en general quienes me motivaron en este largo camino.

A mis amigos, compañeros de carrera y profesores por brindarme su compañía y apoyo para que todo esto fuera posible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería Química por los conocimientos adquiridos para formarme como profesional.

A los profesores Julio Elías Pedraza y Julio Andres Pedraza por brindarme su confianza, su tiempo, dedicación y por permitirme desarrollar esta tesis en el grupo de investigación GIMBA.

Al codirector Diego Pérez, por su orientación en cada paso, gracias por sus aportes, su tiempo y motivación para el desarrollo de esta tesis.

A Yury López por brindarme su tiempo e instrucción cada vez que lo necesité durante el curso del proyecto

Al grupo de investigación en Materiales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) por la disposición de un espacio en el cual trabajar. A los laboratorios de rayos X y de microscopía de la UIS Guatiguará y a sus respectivos directores por su valiosa Colaboración.

Un agradecimiento especial a Carlos Márquez, por el acompañamiento durante todo el desarrollo de este proyecto, su constante colaboración y el respaldo brindado para concluir esta tesis.

Gracias a todos aquellos que de alguna u otra manera influyeron en el desarrollo de mi trabajo de grado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1. LAS TARJETAS ELECTRONICAS DE CELULARES	17
1.2. DISOLUCIÓN DEL COBRE MEDIANTE SOLUCIONES DE ÁCIDO SULFÚRICO Y PERÓXIDO DE HIDRÓGENO	18
1.3. DISOLUCIÓN DE ORO Y PLATA MEDIANTE SOLUCIONES DE TIOSULFATO DE AMONIO, COBRE (II) Y AMONÍACO	20
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	24
2.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE EXPERIMENTACIÓN.....	24
2.1.1. Muestras de experimentación.	24
2.1.2. Preparación de las muestras.	25
2.1.3. Determinación de la composición elemental y ley calculada.	25
2.1.4. Análisis morfológico de las muestras.	26
2.2. DISOLUCIÓN ÁCIDA DEL COBRE DE LAS TARJETAS ELECTRONICAS ..	27
2.2.1. Ensayos preliminares de la disolución.	27
2.2.2. Estudio del efecto del tamaño de partícula.	27
2.2.3. Estudio del efecto de la concentración del ácido.	28
2.2.4. Estudio del efecto de la relación sólido-líquido.	28
2.2.5. Estudio del efecto del tiempo de disolución.	28
2.2.6. Estudio del efecto de la doble disolución de cobre.	28
2.3. DISOLUCIÓN CON TIOSULFATO DEL ORO Y DE LA PLATA DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS.....	29
2.3.1. Estudio del efecto de la concentración del tiosulfato de amonio.....	29
2.3.2. Estudio del efecto de la concentración del ion cúprico.	29
2.3.3. Estudio del efecto del tiempo de disolución.	29

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE EXPERIMENTACIÓN.....	30
3.1.1. Distribución granulométrica.....	30
3.1.2. Composición química elemental.	30
3.1.3. Análisis morfológico de las muestras.....	31
3.2. DISOLUCIÓN ÁCIDA DEL COBRE DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS	32
3.2.1. Ensayos preliminares de la disolución.	32
3.2.2. Estudio del efecto del tamaño de partícula.	33
3.2.3. Estudio del efecto de la concentración del ácido, la relación solido-líquido y el tiempo de disolución.....	34
3.2.4. Condiciones de disolución adecuadas.	35
3.2.5. Estudio del efecto de la doble disolución de cobre.	36
3.3. DISOLUCIÓN CON TIOSULFATO DE AMONIO DEL ORO Y DE LA PLATA DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS.....	36
3.3.1. Estudio del efecto de la concentración del tiosulfato y del ion cúprico.....	36
3.3.2. Efecto de aplicar una previa doble disolución de cobre.	38
3.3.3. Condiciones de disolución adecuada.....	38
4. CONCLUSIONES	40
5. RECOMENDACIONES	42
CITAS BIBLIOGRAFÍA	43
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	47
ANEXOS.....	52

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama Eh-pH del sistema Cu-S-H ₂ O a 25 °C usando Cu(Cobre) como el elemento principal. Las molaridades de Cu (+2) y HS- son 10 mMol/kg H ₂ O.	20
Figura 2. Diagrama Eh-pH del sistema: (a) Cu-NH ₃ -S ₂ O ₃ (-2) y (b) Au-NH ₃ -S ₂ O ₃ (-2) a 25 °C (0.0005 M Au; 0.1 M S ₂ O ₃ (-2); 0.1 M NH ₃ /NH ₄ ; 0.0005 M Cu).	21
Figura 3. Diagrama de flujo para la metodología experimental propuesta.	24
Figura 4. Distribución granulométrica de las muestras de tarjetas molidas.	30
Figura 5. Distribución de metales en las fracciones granulométricas para (a) oro, plata y (b) cobre en las muestras molidas.	31
Figura 6. Resumen de los resultados obtenidos del análisis por SEM-EDS.	32
Figura 7. Disolución de cobre en dos etapas ácidas.	33
Figura 8. Disolución de plata(a) y oro(b) en 2 etapas ácidas y tiosulfato de amonio.	34
Figura 9. Disolución de cobre en relación lixivante 1/10 g/ml (a) y 1/15 g/ml (b).	35
Figura 10. Disolución de cobre en relación lixivante 1/20 (g/ml).	36

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Niveles de estudio en las pruebas de disolución con tiosulfato de amonio.	29
Tabla 2. Análisis químico de la muestra por FRX y AA.....	31
Tabla 3. Disolución de oro y plata a diferentes concentraciones de tiosulfato de amonio y cobre (II), a 2 y 4 horas de reacción.....	37
Tabla 4. Disolución de oro y plata a diferentes concentraciones de tiosulfato de amonio y cobre (II) con 4 horas de reacción.....	38
Tabla 5. Disolución de oro y plata con tiosulfato de amonio y cobre (II) posterior a una doble disolución ácida de cobre.....	38

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Reactivos utilizados en el proceso.	52
Anexo B. Principales equipos utilizados	53
Anexo C. Protocolo experimental de las disoluciones.	54
Anexo D. Material clasificado en fracciones.	55
Anexo E. Micrografías SEM y espectros EDS de la muestra.....	56
Anexo F. Resultados de fluorescencia de rayos X.....	58
Anexo G. Desviación estándar de diferentes ensayos.....	59
Anexo H. Ley calculada.	60

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL PROCESO DE DISOLUCIÓN DEL COBRE, EL ORO Y LA PLATA CONTENIDOS EN TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES DESECHADOS EMPLEANDO SOLUCIONES ÁCIDAS Y TIOSULFATO DE AMONIO*

AUTOR: OSCAR ANDRÉS RONDÓN ESTUPIÑAN**

PALABRAS CLAVES: METALES PRECIOSOS, TIOSULFATO DE AMONIO, TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES, DISOLUCIÓN.

DESCRIPCIÓN:

Se llevó a cabo a nivel de laboratorio la disolución de metales preciosos como el oro y la plata junto con el cobre contenidos en tarjetas electrónicas de celulares desechados. La metodología experimental inició con el pretratamiento de las tarjetas electrónicas mediante el desarme, molienda y clasificación por tamices de las mismas. Luego se caracterizó el material por medio de las técnicas analíticas de microscopía electrónica de barrido (MEB), fluorescencia de rayos X (FRX) y absorción atómica con agua regia. En una siguiente etapa se estudió el efecto de variables como el tamaño de partícula, la concentración de la solución ácida, la relación sólido-líquido, el tiempo de reacción y la doble disolución de cobre y plata. Por último, se evaluó el efecto de la concentración de tiosulfato de amonio, el cobre (II) y el tiempo de reacción para la disolución de oro y plata remanente.

Las mejores condiciones para disolver el cobre y gran parte de la plata se lograron al trabajar con una granulometría de material D80=Malla 100, una concentración de ácido sulfúrico de 2.5 molar con una relación sólido-líquido 1/20 (g/ml) y un tiempo de reacción de 3 horas, alcanzando porcentajes de disolución de 99.85% para el cobre y 55.96% para la plata. Igualmente, las mejores condiciones para disolver el oro y la plata remanente se consiguieron al realizar una etapa previa de doble disolución de cobre, seguida de una reacción en medio básico con concentración de 0.3 molar de tiosulfato de amonio, 20 mili molar de cobre (II) y 4 horas de reacción, alcanzando porcentajes de disolución de 91.22% para el oro y 75.19% para la plata restante.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Julio Elías Pedraza Rosas. Codirectores: Julio Andres Pedraza Avella, Diego Oswaldo Pérez Acevedo

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE DISSOLUTION PROCESS OF COPPER, GOLD AND SILVER CONTAINED IN ELECTRONIC CARDS OF DISPOSED CELL PHONES USING ACID SOLUTIONS AND AMMONIUM THIOSULFATE *

AUTHOR: OSCAR ANDRÉS RONDÓN ESTUPIÑAN **

KEYWORDS: PRECIOUS METALS, AMMONIUM THIOSULFATE, ELECTRONIC CARDS OF CELL PHONES, DISSOLUTIÓN.

DESCRIPTION:

The dissolution of precious metals such as gold and silver along with copper contained in electronic cards of disposed cell phones was carried out at laboratory level. The experimental methodology began with the pre-treatment of the electronic cards by the disassembly, grinding and sieving of the sample. Then the material was characterized by analytical techniques of scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence (FRX) and atomic absorption with aqua regia. In a next step the effect of variables such as particle size, acid solution concentration, solid-liquid ratio, reaction time and double copper and silver solution were studied. Finally, the effect of the concentration of ammonium thiosulfate, copper (II) and the reaction time for dissolution of remaining gold and silver were evaluated.

The best conditions for dissolving copper and much of the silver were achieved by working with a grain size of D80 = Mesh 100, a concentration of sulfuric acid of 2.5 molar with a solid-liquid ratio of 1/20 (g / ml) and A reaction time of 3 hours, reaching a dissolution percent of 99.85% for copper and 55.96% for silver. Likewise, the best conditions for dissolving the gold and the remaining silver were obtained by performing a previous double copper dissolution step, followed by a basic reaction with a concentration of 0.3 molar ammonium thiosulfate, 20 milli molar copper (II) And 4 hours of reaction, reaching dissolution values of 91.22% for gold and 75.19% for the remaining silver.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Julio Elías Pedraza Rosas. Co-directors: Julio Andres Pedraza Avella, Diego Oswaldo Pérez Acevedo

INTRODUCCIÓN

Los teléfonos celulares contienen una amplia gama de componentes metálicos, plásticos y otras sustancias potencialmente peligrosas que generan un impacto negativo tanto al ambiente como al ser humano. El alto valor económico que representa el post-consumo de estos equipos los hace uno de los flujos de residuos más atractivos para las tecnologías de reciclaje y aprovechamiento de la basura electrónica en la actualidad [1]. Las innovaciones permanentes en el mundo de la tecnología aceleran el remplazo continuo de los aparatos electrónicos lo cual ha ocasionado que la vida útil potencial de un teléfono móvil sea menor a 3 años, provocando un aumento significativo de los residuos de estos equipos, panorama que a su vez atrae la atención del público debido a los daños ambientales y la abundancia de metales de alto valor presentes en estos desechos [2][3].

La tarjeta electrónica de un teléfono celular se puede definir como una mezcla de varias sustancias; metales normales como cobre, aluminio, hierro; metales preciosos como oro, plata, paladio y platino, elementos tóxicos como el plomo, mercurio, cromo, níquel, berilio, arsénico, entre otros [4]. De manera que estas placas electrónicas se convierten en una importante fuente de metales preciosos ofreciendo no solo un alto beneficio económico con la recuperación de estos, sino también una disminución del impacto ambiental generada por la presencia de tecnologías encaminadas al tratamiento de los componentes contaminantes en estos desechos. La recuperación de oro, plata y paladio de los residuos de celulares resulta atractiva porque la cantidad de estos metales preciosos contenidos en las tarjetas de celulares desechadas es casi diez veces más alta que en un mineral de alta ley [5][6][7]. En la industria actual, la recuperación de metales preciosos a partir de las tarjetas electrónicas es usualmente realizada por procesos que involucran el uso del cianuro y la pirometalurgia. Sin embargo, estas técnicas tradicionales

causan una serie de problemas al emplear reactivos que generan desechos de difícil degradación, elevada toxicidad para la salud y el medio ambiente, razón por la cual las nuevas investigaciones se han enfocado en el uso de agentes menos contaminantes y de fácil manipulación.

Los procesos hidrometalúrgicos son más atractivos para la recuperación de metales preciosos debido a la baja emisión de gases como dioxinas, furanos y volátiles como Cl₂, Br₂, SO₂, Pb, Hg, Cr, retardantes de llama y demás sustancias contaminantes. Adicionalmente son técnicas más exactas, predecibles, fáciles de controlar y ambientalmente más amigables que los tradicionales [8][9][10].

La disolución de metales preciosos como el oro y la plata empleando agentes lixiviantes no cianurados se ha venido estudiando desde hace más de 20 años [11][12]. La literatura expone al cianuro, el agua regia, el tiosulfato y la tiourea como los agentes lixiviantes más comunes para la disolución del oro y la plata constituyentes de los circuitos electrónicos siendo el cianuro el reactivo más usado y de mayor aplicación debido a su eficacia y fácil operación. Disolver algunos de los metales presentes en las placas electrónicas de celulares es un proceso realizado por ácidos minerales en presencia de sustancias oxidantes. Se propone el ácido sulfúrico acompañado de peróxido de hidrogeno como agentes lixiviantes adecuados para disolver el cobre y otros metales normales contenidos en los circuitos de las tarjetas electrónicas. En complemento, se ha encontrado que las soluciones lixiviantes de ácido sulfúrico en presencia de peróxido de hidrogeno pueden ser recicladas para usarse por lo menos en cinco repeticiones antes de ser desechadas [5]. Adicionalmente, la literatura anuncia el tiosulfato como una buena opción para disolver el oro y la plata, ya que este reactivo es poco tóxico y económicamente viable. Otras ventajas como el bajo impacto ambiental y el fácil manejo operacional son ofrecidas con el uso de este agente debido a que el tiosulfato es menos costoso y menos contaminante que el cianuro [13].

Con base en lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue encontrar las mejores condiciones del proceso en dos etapas para la disolución del cobre, la plata y el oro contenidos en los residuos de placas electrónicas de celulares, utilizando ácido sulfúrico y peróxido de hidrogeno para el cobre, seguido de una segunda disolución con tiosulfato de amonio en medio básico para el oro y la plata. Para ello, inicialmente se caracterizaron por fluorescencia de rayos X, microscopia electrónica de barrido y digestión con agua regia seguida de cuantificación por absorción atómica, cada una de las diferentes fracciones obtenidas de las placas de celulares desechados luego de su trituración y separación por tamaños. Finalmente, se realizaron los experimentos para determinar las mejores concentraciones de algunos reactivos utilizados y las condiciones más apropiadas de la primera y segunda lixiviación, hallando las eficiencias de las disoluciones en cada etapa.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. LAS TARJETAS ELECTRONICAS DE CELULARES

Se estima que un total de 6,8 billones de teléfonos celulares fueron registrados por la población mundial para el 2014, con un tiempo de vida útil promedio de estos equipos entre 9 y 18 meses, por lo que se espera una cantidad alarmante de dispositivos desechados hoy en día [14][15].

Las tarjetas electrónicas de celulares representan entre el 10% y 30% del peso total del equipo, su contenido en cuanto a metales preciosos es alto si se compara con otros aparatos electrónicos [16][17]. Adicionalmente, estas partes de los equipos móviles junto a las baterías son consideradas como peligrosas debido a su contenido de sustancias tóxicas lo que atrae la atención de varios sectores económicos en cuanto a un reciclaje autosostenible [18].

El tratamiento de residuos electrónicos como los celulares puede dificultarse debido a que diferentes metales, retardantes de llama bromados, cerámicas, resinas y otros elementos no metálicos están altamente mezclados entre sí. En consecuencia, una separación mecánica de las diferentes partes de un teléfono móvil, así como una reducción de tamaño de sus respectivas placas electrónicas pueden ser usados como pretratamientos para aumentar la eficiencia en la disolución y recuperación de los metales valiosos [19].

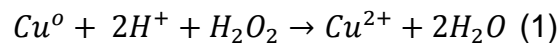
Cada empresa de telefonía móvil en el mundo presenta su propia ingeniería para el desarrollo de celulares, sin embargo, la manufactura de gran parte de los teléfonos en el mercado se sitúa dentro de una metodología de producción semi-estándar. De esta forma, se pueden estimar composiciones promedio de los metales preciosos

presentes en estos, ya que, a pesar de que se pretendía utilizar menos cantidad de metales de alto valor en los dispositivos de última generación, estos han venido incrementando su tamaño respecto a los modelos antiguos, aumentando así el uso de metales preciosos [20].

1.2. DISOLUCIÓN DEL COBRE MEDIANTE SOLUCIONES DE ÁCIDO SULFÚRICO Y PERÓXIDO DE HIDRÓGENO

Existen muchos factores influyentes en la disolución de cobre y otros metales contenidos en las tarjetas electrónicas de celulares, la concentración de reactivos oxidantes (ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno), al igual que la proporción sólido-solución y el tiempo de digestión sobre los residuos electrónicos son algunas variables importantes en este proceso. Comúnmente, los agentes oxidantes empleados en la disolución de metales con ácido sulfúrico son el oxígeno y el peróxido de hidrógeno, si bien el empleo del oxígeno contenido en el aire resulta económico, las condiciones experimentales del peróxido (aunque sea costoso y no reutilizable) son fácilmente controlables encontrándose eficiencias más altas de disolución al compararse con otros agentes oxidantes [2].

El sistema de disolución del cobre empleando ácido sulfúrico y peróxido de hidrogeno, en medio acuoso, ocurre como se muestra a continuación (1):



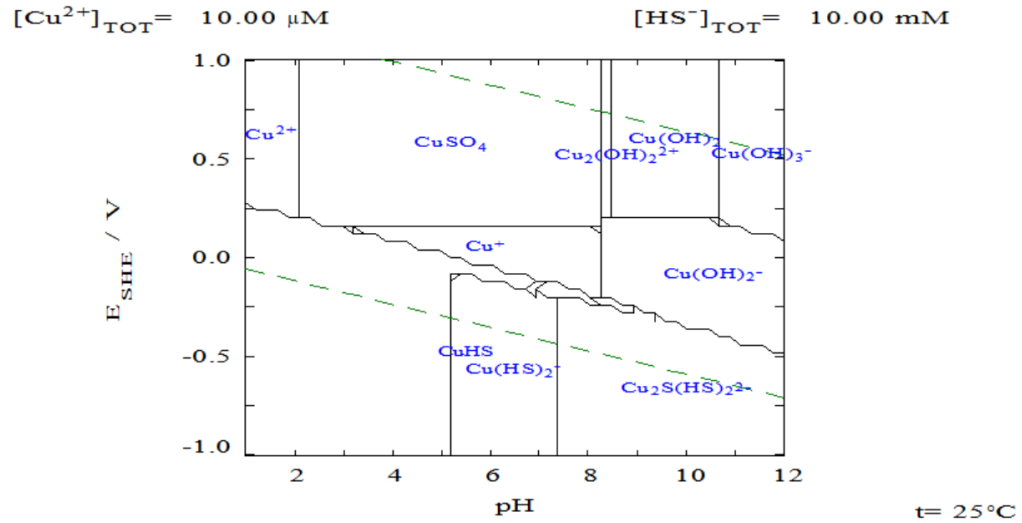
El oxígeno producido por la descomposición del peróxido de hidrógeno reacciona con el cobre metálico oxidándolo a Cu (II) y formando sulfato de cobre (II) ($CuSO_4$) disuelto en medio acuoso.

La reacción de disolución del cobre es exotérmica, se realiza a temperatura ambiente (aproximadamente a 23°C). Así mismo, la descomposición del peróxido de hidrógeno se ve influenciada térmicamente, de esta forma, un incremento en la temperatura de reacción superior a los 50°C disminuiría el oxígeno disuelto en la solución lixivante, lo que se traduce en un impacto no favorable para la disolución de cobre. Además, este proceso no tiene un incremento significativo de disolución cuando el tiempo de reacción se prolonga por más de cuatro horas [21].

Algunos investigadores llevaron a cabo numerosos experimentos para la recuperación de cobre impreso en tarjetas electrónicas de celulares [2]. Los sistemas de lixiviación que usaron empleaban sulfato de amonio debido a su alto poder lixivante sobre el cobre aún bajo la presencia de altas impurezas para este tipo de reacción, como Sn al 4,9%, Fe al 3,4%, Pb al 3,2%, etc. Por otro lado, un bajo tamaño de partícula en la trituración y molienda de las placas electrónicas ocasiona mayor exposición de los átomos metálicos al ataque de los reactivos lixiviantes y genera menor resistencia al fenómeno de transferencia de masa acelerando la reacción, en otras palabras, la disolución de cobre se incrementa con una disminución del tamaño de las partículas de tarjetas electrónicas. El cobre fue extraído eficientemente por procesos de lixiviación mientras el tamaño de partícula de las piezas fue menor a 1 milímetro, consecuentemente reducir las tarjetas a dimensiones menores a 0.5 milímetros incrementaría significativamente el gasto energético en el proceso de trituración.

En el diagrama de Pourbaix presentado en la Figura 1, se observa que el cobre se solubiliza bajo la especie iónica Cu (+2) en un área de estabilidad termodinámica a un rango de pH ácido (menor a 2). Otros metales como la plata y el hierro también se oxidan en presencia de ácido y peróxido. La cantidad de metal disuelto dependerá de su potencial de reducción y de la concentración del lixivante, entre otros factores [22].

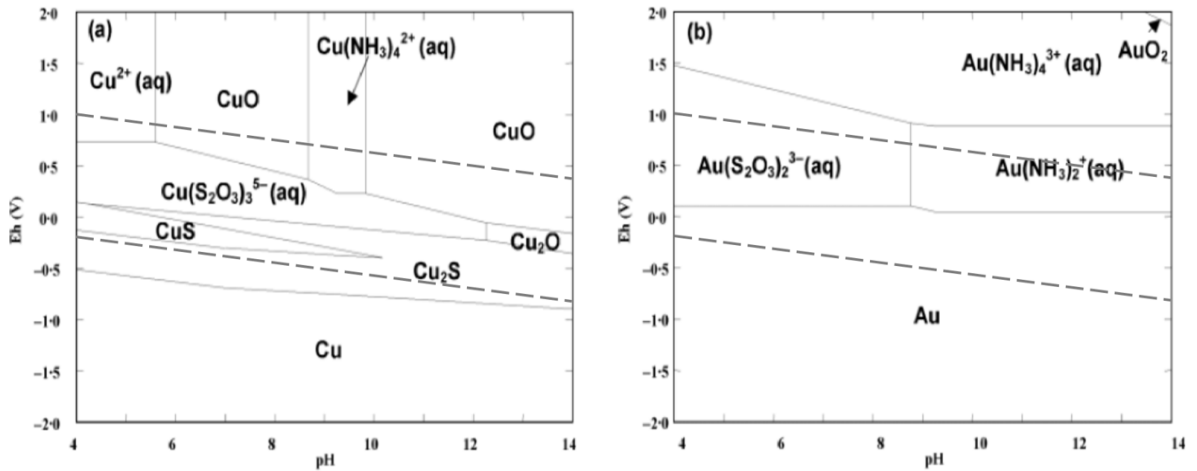
Figura 1. Diagrama Eh-pH del sistema Cu-S-H₂O a 25 °C usando Cu(Cobre) como el elemento principal. Las molaridades de Cu (+2) y HS⁻ son 10 mMol/kg H₂O.



1.3. DISOLUCIÓN DE ORO Y PLATA MEDIANTE SOLUCIONES DE TIOSULFATO DE AMONIO, COBRE (II) Y AMONÍACO

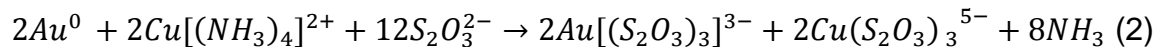
Uno de los principales problemas en la disolución de oro y plata empleando el ion tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$) es su carácter semi-estable. La descomposición química de este anión puede ocurrir fácilmente si no se consigue el pH adecuado (básico) en la solución lixivante. La descomposición oxidativa de tiosulfato da lugar a una serie de compuestos estables y semi-estables como ($S_4O_6^{2-}$) tetrionato, ($S_3O_6^{2-}$) tritionato, (SO_3^{2-}) sulfito y (SO_4) sulfato, siendo este último el compuesto más estable al que puede oxidarse el tiosulfato [12]. El tiosulfato es un ligando que tiende a formar sus complejos más estables con iones metálicos como el oro, paladio, cobre, plata, mercurio, entre otros [23]. Un diagrama de Pourbaix para la disolución del oro y cobre en una solución de tiosulfato amoniacal se muestra en la Figura 2. En esta figura se observa la especiación global de varios compuestos disueltos en un área de estabilidad termodinámica a un rango de pH básico (8.5-11).

Figura 2. Diagrama Eh-pH del sistema: (a) Cu-NH3-S2O3(-2) y (b) Au-NH3-S2O3(-2) a 25 °C (0.0005 M Au; 0.1 M S2O3(-2); 0.1 M NH3/NH4; 0.0005 M Cu).



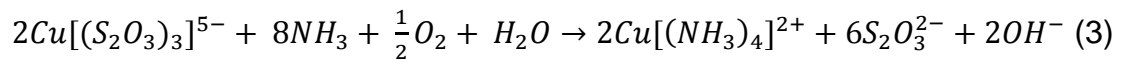
Fuente: D. M. Muir and M. G. Aylmore. Thiosulphate as an alternative to cyanide for gold processing –issues and impediments. Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C) March 2004 Vol. 113

El mecanismo de disolución para la plata con soluciones de tiosulfato amoniacal y sulfato de cobre es similar al del oro. La disolución de la plata requiere potenciales de reducción-oxidación similares a los del oro, y pH básicos entre 9 y 11 [12]. Para lograr la disolución de estos metales preciosos es necesaria la presencia de un agente oxidante y un ligando acomplejante. Un sistema lixivante de tiosulfato de amonio catalizado con cobre utiliza el complejo cuprotetramina, $Cu[(NH_3)_4]^{2+}$, como agente oxidante y tiosulfato, $S_2O_3^{2-}$, como ligando acomplejante como se aprecia en la siguiente reacción (2):

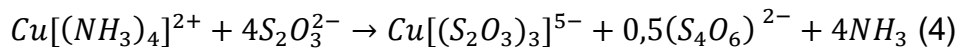


Se puede observar que el electrón liberado de la oxidación del oro metálico para convertirse en oro oxidado (Au^+) es utilizado por el Cu (+2) como complejo $Cu[(NH_3)_4]^{2+}$ para reducirse a Cu (+1) como complejo $Cu[(NH_3)_4]^{1+}$. Posterior a esto, se da un intercambio de ligandos de $Cu[(NH_3)_4]^{1+}$ a $Cu[(S_2O_3)_3]^{5-}$ en el

complejo. En ese momento el $Cu[(S_2O_3)_3]^{5-}$ reacciona con oxígeno y amoníaco para reducirse nuevamente y formar la cuprotetramina como se observa (3):



La adición de cobre (II) a la solución de amoníaco genera la formación del complejo cuprotetramino $Cu[(NH_3)_4]^{2+}$, consecuentemente este complejo oxida al tiosulfato como se puede apreciar [12] (4):



Los aniones tritionato ($S_3O_6^{2-}$) y tetracionato ($S_4O_6^{2-}$) son conocidos por no presentar ninguna actividad lixivante sobre metales [24]. Por otro lado, el tiosulfato puede ser consumido, en reacciones secundarias, por peróxidos, fosfinas, polisulfuros, cromados, bromuros, ioduros y otros [25].

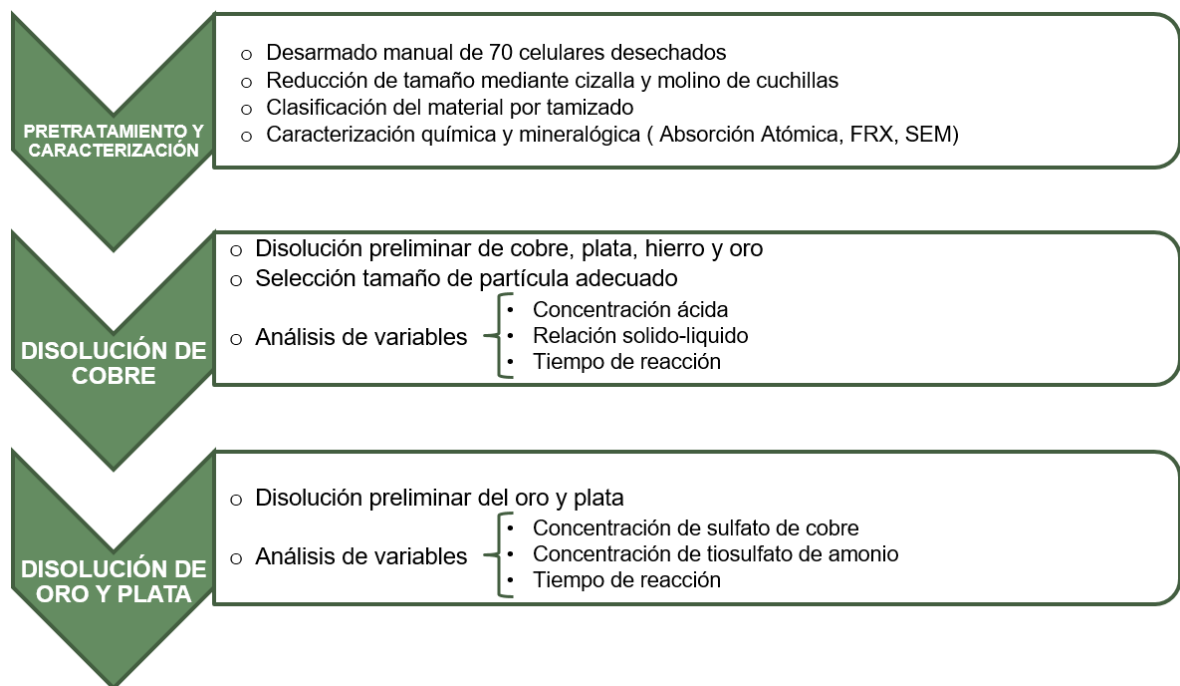
La cantidad de amoníaco en la solución es crucial para una efectiva disolución del oro y de la plata, puesto que el tiosulfato se oxida a tetracionato ($S_4O_6^{2-}$) cuando la solución alcanza valores de pH inferiores a 6. La adición de amoníaco no solo mejora la disolución de metales preciosos a través de la fácil formación de un complejo cupro-tetramínico, también reduce el consumo de tiosulfato. Sin embargo, un aumento desmesurado en la concentración de amoníaco tiende a direccionar la reacción reversiblemente. Una desventaja de la presencia de amoníaco se debe a que este reactivo se volatiliza fácilmente en recipientes de reacción abierta contaminando los alrededores. Sin embargo, el amoníaco no presenta una significativa amenaza ambiental y puede ser recuperado y reciclado si se emplea un sistema eficiente [20]. Igualmente, el contenido de cobre es determinante en la estabilidad del ion lixivante, es un componente fundamental en la eficiencia de la reacción dado que, sin la presencia del sulfato de cobre como agente catalizador,

la disolución del oro y de la plata se vuelve lenta debido a la ausencia de la cuprotetramina $Cu[(NH_3)_4]^{2+}$. En contraposición, altas concentraciones de este catalizador dan lugar a la formación de tritionato ($S_3O_6^{2-}$) [12].

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental del presente trabajo se desarrolló con base en el esquema metodológico mostrado en la Figura 3, en el cual se estructuran tres etapas para alcanzar los objetivos del proyecto junto con algunas actividades específicas.

Figura 3. Diagrama de flujo para la metodología experimental propuesta.



2.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE EXPERIMENTACIÓN

2.1.1. Muestras de experimentación. Para el desarrollo del proyecto se obtuvo un total de 70 celulares desechados, donados por una empresa de reciclaje de aparatos eléctricos y electrónicos en Bucaramanga, SOCIAL RAEE. Se utilizaron

diversas marcas comerciales de dispositivos móviles, modelos de diferentes años, manufactura y zonas de comercialización (Motorola, Samsung, Nokia, BlackBerry, LG, Iphone, etc.) con el fin de estandarizar el proceso para posteriores estudios.

2.1.2. Preparación de las muestras. A cada uno de los celulares se les retiró manualmente las tapas, baterías, teclados, pantallas, cubiertas plásticas y las partes metálicas más grandes que recubrían los microprocesadores, ya que no son aptas para el proceso de reducción de tamaño y pueden afectar los procesos de disolución posteriores.

Dadas las características del molino y las sugerencias de algunos investigadores, inicialmente se sometió el material a una operación de corte manual utilizando una *cizalla de banco para láminas metálicas*, hasta conseguir partículas alrededor de un (1) centímetro de diámetro [26]. Posteriormente, la totalidad del material fue pasado una sola ocasión por la cámara de molienda del *tritador de cuchillas Thomas Wiley model 4* del Laboratorio de Beneficio de Minerales de la Universidad Industrial de Santander, el cual opera a 800 revoluciones por minuto (rpm) y cuenta con un tamiz de perforaciones circulares de un (1) milímetro de diámetro. De esta forma, se logró reducir el tamaño de la muestra debido al corte que ejercían las cuchillas rotatorias y los bordes afilados del molino a las tarjetas electrónicas de los celulares. El material molido se clasificó por tamaño de partícula con base en la Norma Técnica Colombiana NTC 77 [27], utilizando la siguiente serie de *tamices Tyler*: 16m, 60m, 100m, 140m y un fondo de finos para un total de 5 muestras de fracciones granulométricas. Luego de 20 minutos de tamizado en el *Ro-Tap* cada muestra resultante en los tamices se pesó y se separó para los cálculos de distribución granulométrica (Ver Anexo B).

2.1.3. Determinación de la composición elemental y ley calculada. Se realizó una digestión con agua regia a cada una de las 5 muestras obtenidas en el tamizado utilizando una relación 1/16 (g/ml) entre material sólido y la solución digestora, por

triplicado, con un tiempo de reacción de 3 horas para garantizar la disolución total de los metales presentes en las placas electrónicas (Anexo C). Las concentraciones de los metales en estas soluciones fueron determinadas en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia) mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (Espectrofotómetro de Absorción Atómica, Modelo 210 VGP, Buck Scientific). Además, con los datos obtenidos para las diferentes fracciones granulométricas se calculó la ley del material para determinar la composición de oro, plata, hierro y cobre en la muestra total (Anexo H).

Igualmente, se llevó a cabo un análisis por Fluorescencia de Rayos X para determinar la composición elemental del material molido y poder realizar una posterior comparación con los otros métodos de caracterización. Los análisis cuantitativos se realizaron en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia), mediante el método QUANT-EXPRESS en el rango de sodio (Na) a Uranio (U), en un Espectrómetro Secuencial de Fluorescencia de Rayos-X de Longitud de Onda Dispersiva de 4KW marca BRUKER modelo S8 TIGER.

2.1.4. Análisis morfológico de las muestras. Mediante Microscopía Electrónica de Barrido SEM-EDS se pudo observar la morfología de las muestras, los sitios puntuales donde se localizan los distintos metales, su distribución en las placas, así como también identificar la composición superficial de algunos puntos metálicos y no metálicos de interés en las tarjetas electrónicas sin triturar. Las lecturas tuvieron lugar en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga, Colombia), empleando un microscopio electrónico de barrido (FE-SEM) marca QUANTA FEG 650 y JSM 7600f.

2.2. DISOLUCIÓN ÁCIDA DEL COBRE DE LAS TARJETAS ELECTRONICAS

2.2.1. Ensayos preliminares de la disolución. La primera etapa de este proceso se realizó siguiendo un protocolo descrito en la literatura en donde se establecen dos lixiviaciones para disolver la totalidad del cobre presente en las placas electrónicas [28]. De esta forma, se utilizó una relación 1/10 (g/ml) entre el material sólido y la solución lixivante, una filtración entre las dos lixiviaciones (3 horas c/u), temperatura ambiente e igual velocidad de agitación (51 rpm) en el agitador por rodillos. La solución lixivante utilizada fue ácido sulfúrico 2M con peróxido de hidrogeno al 35%, en relación 4:1 en volumen respectivamente. Adicionalmente, se hizo una tercera disolución utilizando el método descrito por JEONGB, J. y colaboradores en 2010 [29], quien sugiere unas “condiciones óptimas” para lixiviar el oro y la plata presentes en las placas electrónicas. Así, se utilizó una relación 1/15 (g/ml) entre el material sólido y el lixivante, una lixiviación de 2 horas a temperatura ambiente, pH entre 9-11 e igual velocidad de agitación (51 rpm). La solución lixivante utilizada fue 0.12 M de tiosulfato de amonio, 0.2 M de amoniaco al 30% y 20mM de Cobre (+2). El experimento se realizó por triplicado para cada muestra obtenida de la clasificación por tamaños. Por último, la concentración de metales preciosos disueltos en las soluciones fue determinada por Espectroscopia de Absorción Atómica.

2.2.2. Estudio del efecto del tamaño de partícula. De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba con ácido sulfúrico, se buscó determinar el tamaño de partícula que presentara la mejor relación costo/eficiencia en la disolución del cobre a las mismas condiciones. Sin embargo, la decisión de este tamaño de partícula adecuado también se vio influenciada por factores como la disolución de plata, hierro, oro y la dificultad de alcanzar tamaños de partículas muy bajos. Así, una vez definida esta variable se llevó de nuevo gran parte del material al triturador de cuchillas Thomas Wiley model 4 con el objeto de obtener suficiente material para

los estudios posteriores. Las 5 fracciones estudiadas fueron +16#, 16/60#, 60/100#, 100/140# y -140# Ty.

2.2.3. Estudio del efecto de la concentración del ácido. Una vez obtenido el tamaño de partícula a trabajar más adecuado, se decidió variar la concentración del ácido sulfúrico buscando disolver la totalidad del cobre concentrado, manteniendo constante la relación de volumen con respecto al peróxido de hidrogeno. Las concentraciones estudiadas fueron 2M, 2.5M y 3M.

2.2.4. Estudio del efecto de la relación sólido-líquido. De acuerdo con los resultados obtenidos de forma preliminar se estableció que al utilizar una relación inicial 1/10 (g/l) entre sólido y líquido lixivante se podría saturar la solución con los metales disueltos, por lo que esta fue otra variable de interés. Utilizando relaciones 1/15 y 1/20 se repitieron las pruebas de disolución de cobre.

2.2.5. Estudio del efecto del tiempo de disolución. Como es de esperarse a medida que se van disolviendo los metales el licor se va concentrando y por consiguiente se irá disminuyendo la velocidad de disolución, por lo que, simultáneamente con el cambio de solución ácida, se tomaron alícuotas entre 30 y 50 microlitros por 4 horas cada 45 minutos para comprobar la cantidad de cobre disuelto y evaluar el tiempo de reacción adecuado. Los tiempos estudiados fueron 45 minutos, 1 hora y media, 2 horas y 15 minutos, 3 horas y 3 horas con 45 minutos.

2.2.6. Estudio del efecto de la doble disolución de cobre. Se aplicó un escalamiento 1:5 (cinco veces), 1:7.5 (siete veces y media) y 1:15 (quince veces) en las pruebas para lixiviar cobre con las mejores condiciones de ácido sulfúrico, de modo que se pudiera analizar si la doble lixiviación sugerida en la literatura se puede omitir realmente. El sólido restante se filtró y se secó en una estufa de laboratorio y, de esta forma se pudo asegurar que hubiera suficiente muestra para las siguientes pruebas.

2.3. DISOLUCIÓN CON TIOSULFATO DEL ORO Y DE LA PLATA DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS

2.3.1. Estudio del efecto de la concentración del tiosulfato de amonio. De acuerdo con los ensayos preliminares y las referencias bibliográficas, se realizaron pruebas de disolución de oro y plata, tomando los parámetros y rangos de concentración de tiosulfato que se muestran en la Tabla 1. El objeto de esta prueba, al igual que las consecuentes, fue determinar las condiciones de trabajo adecuadas para cada variable. La concentración de metales preciosos disueltos en las soluciones fue determinada por Espectroscopia de Absorción Atómica.

2.3.2. Estudio del efecto de la concentración del ion cúprico. Se realizaron pruebas siguiendo los niveles de estudio presentados en Tabla 1, competentes a la concentración de ion cúprico en las soluciones lixiviantes. Se buscó identificar la relación entre la concentración de este reactivo y los porcentajes de disolución de metales preciosos.

2.3.3. Estudio del efecto del tiempo de disolución. Se realizaron pruebas siguiendo los niveles de estudio presentados en Tabla 1, competentes al tiempo de disolución. Se buscó evaluar si el tiempo de esta reacción tenía o no un efecto significativo en la disolución de metales preciosos.

Tabla 1. Niveles de estudio en las pruebas de disolución con tiosulfato de amonio.

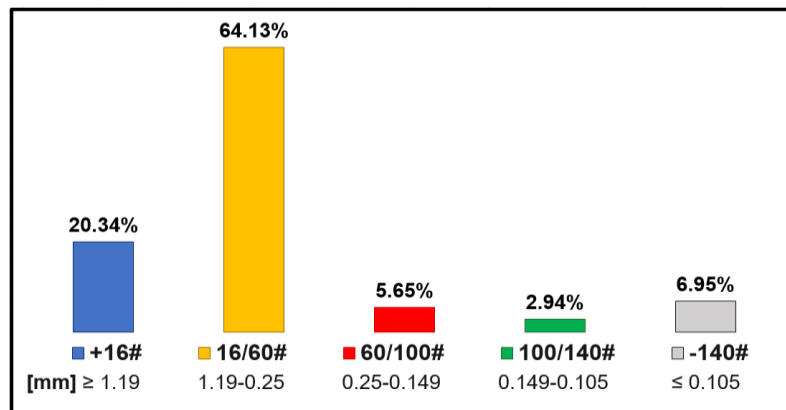
Variable	Rango
Tiosulfato de Amonio	0.1 M - 0.2 M - 0.3 M
Cobre (II)	10 mM - 20 mM - 30 mM
Tiempo	2h - 4h
Parametros	Valor
Relacion sólido-líquido	1/15 (g/ml)
Amoniaco	0.2 M
Velocidad de agitación	51 rpm

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE EXPERIMENTACIÓN

3.1.1. Distribución granulométrica. El material procesado en el molino se clasificó en 5 fracciones granulométricas (Anexo D). En la figura 4 se observa que la mayor parte de la muestra es de granulometría gruesa (+60# Ty) alcanzando cerca de 85% en peso, debido principalmente a la separación de las cuchillas en la cámara de molienda.

Figura 4. Distribución granulométrica de las muestras de tarjetas molidas.



3.1.2. Composición química elemental. En las digestiones con agua regia para cada tamaño de muestra se observa que el oro presenta una distribución similar en todas las fracciones con una leve tendencia a acumularse en tamices pequeños. La plata presenta un comportamiento más evidente alcanzando valores de 0.4% en peso para bajos tamaños (60-100# Ty), Figura 5 (a). Por otro lado, el cobre fue más abundante en los tamices con mayor abertura llegando a concentrarse hasta 43% en peso en tamaños mayores a +60# y 60/100# Ty, Figura 5 (b).

Los resultados obtenidos por Fluorescencia de Rayos X (Anexo F) presentaron diferencias significativas con respecto a los conseguidos por absorción atómica. Las concentraciones de oro y cobre fueron 10% más bajas según FRX, mientras que la plata y el hierro fueron entre dos y tres veces más abundantes de lo hallado por absorción atómica. Probablemente, aunque el tamaño de partícula es pequeño, la muestra tomada no fue suficientemente homogénea para confrontar los resultados con valores similares por ambos métodos, otro factor que pudo afectar los datos es la interferencia de lectura entre tantas sustancias presentes en las muestras de tarjetas, Tabla 2.

Figura 5. Distribución de metales en las fracciones granulométricas para (a) oro, plata y (b) cobre en las muestras molidas.

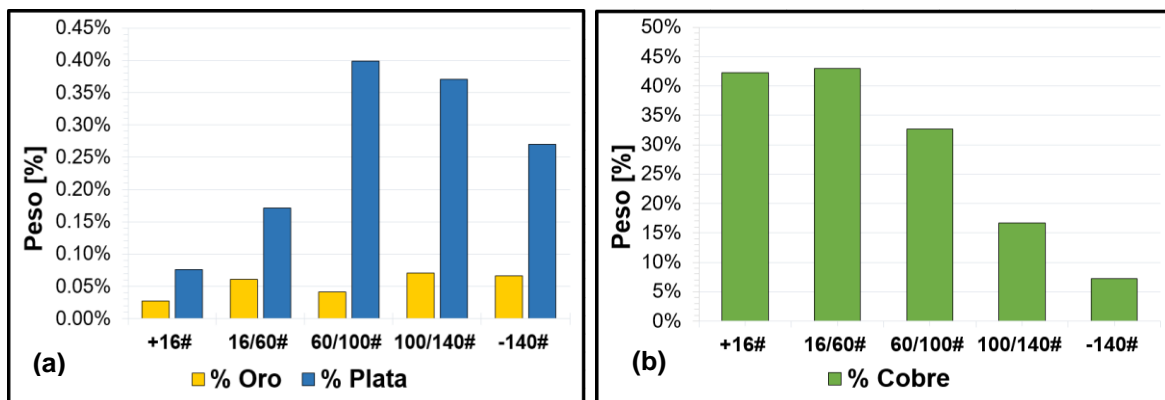


Tabla 2. Análisis químico de la muestra por FRX y AA.

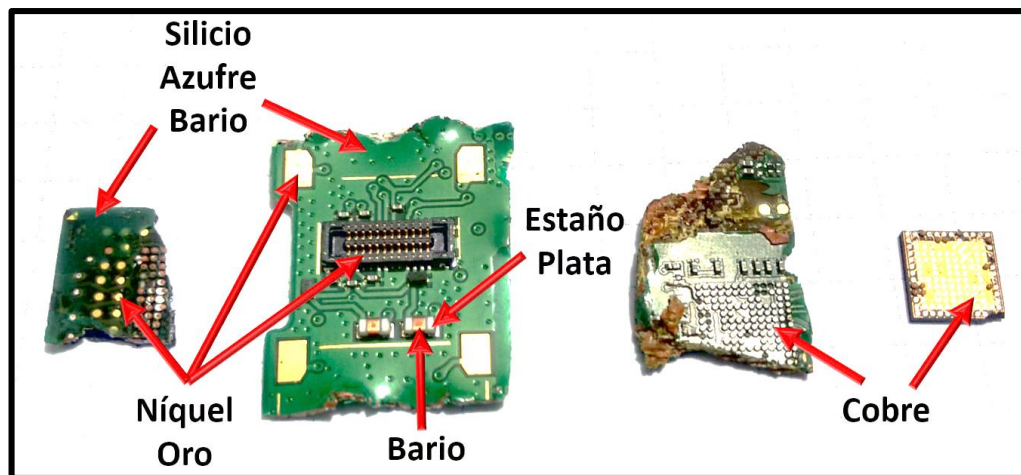
Elemento \ Método	Au [g/ton]	Ag [Kg/ton]	Cu [Kg/ton]	Fe [Kg/ton]	Ni [%]	Ba [%]	Sn [%]	Si [%]	Ca [%]	Al [%]	Ti [%]	Otros [%]
FRX	698.28	2.71	351.73	14.26	12.29	9.91	9.60	9.19	4.75	4.33	3.45	9.70
AA*	625.97	1.77	389.77	5.71	-	-	-	-	-	-	-	-

*Sólo se calcularon las leyes por Absorción Atómica AA a los metales de interés (oro, plata, hierro y cobre).

3.1.3. Análisis morfológico de las muestras. En las micrografías obtenidas por SEM-EDS se pudo verificar que los metales preciosos se encuentran tanto

superficialmente como dentro de capas plásticas en las tarjetas electrónicas. La distribución de estos metales se da a lo largo de toda la placa, aunque se presenta mayormente en las conexiones de partes importantes del celular como la cámara, algunos puntos del teclado y los microprocesadores (Anexo E). Un resumen de los resultados se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Resumen de los resultados obtenidos del análisis por SEM-EDS.



3.2. DISOLUCIÓN ÁCIDA DEL COBRE DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS

3.2.1. Ensayos preliminares de la disolución. Se realizó una disolución de cobre en 2 etapas consecutivas con ácido sulfúrico para cada tamaño de muestra. Se pudo observar que en las granulometrías de mayor tamaño la segunda etapa era primordial para disolver una mayor cantidad de cobre. Sin embargo, solo se alcanzó un 85% de disolución para estas fracciones de tamaños mayores (+100# Ty), por otro lado, las partículas más finas (-100# Ty) presentaron una disolución de casi la totalidad del cobre (99.53%) en una sola etapa, por lo que una segunda lixiviación para estos tamaños sería innecesaria, Figura 7.

3.2.2. Estudio del efecto del tamaño de partícula. Para evaluar el tamaño más adecuado de partícula, fue necesario medir el grado de disolución de los metales preciosos en las placas. La plata presentó un comportamiento similar al del cobre, sin embargo, al tratar el material residual con tiosulfato de amonio, a las mejores condiciones citadas en la literatura, se pudo obtener mayores porcentajes de disolución. En resumen, en tamaños menores a malla 100, se pudo disolver casi un 60% de la plata presente en la muestra. El tamaño más grande disolvió mayor cantidad de plata, sin embargo, esto pudo deberse al contacto de los reactivos con las partículas lo suficientemente grandes y concentradas en este metal que lo oxidaron casi por completo. El oro, que solo se disuelve bajo el complejo de tiosulfato de amonio, presentó una tendencia más acentuada presentando sus mejores porcentajes de disolución cercanos a 12%, en los tamaños de partícula más finos (-100# Ty), Figura 8.

Figura 7. Disolución de cobre en dos etapas ácidas.

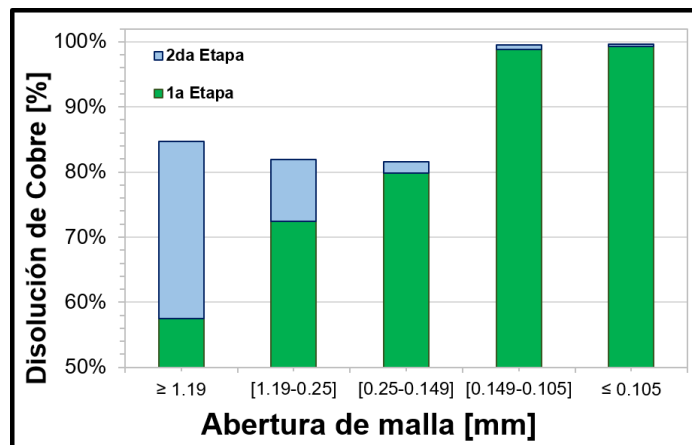
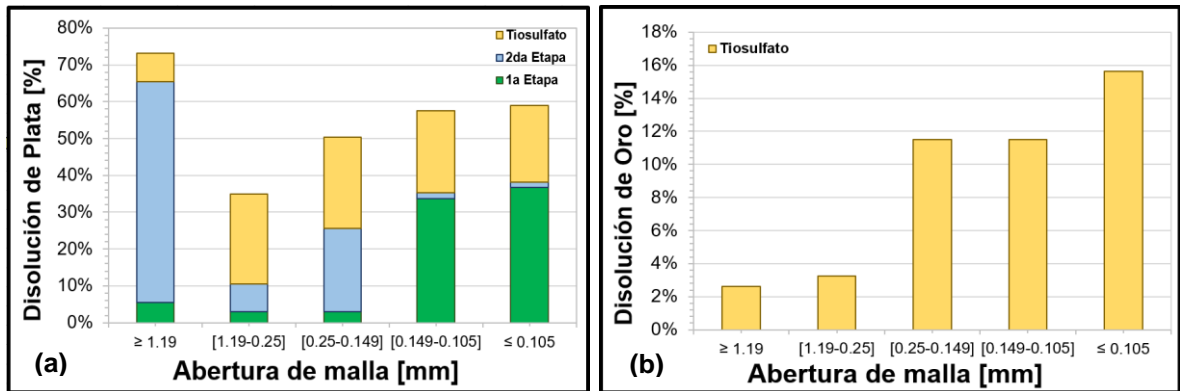


Figura 8. Disolución de plata(a) y oro(b) en 2 etapas ácidas y tiosulfato de amonio.



Luego de estos resultados, se decidió tomar el tamaño de partícula pasante malla 100 (<0.149 milímetros) como el adecuado tanto para disolver el cobre, como la plata y el oro. Así, y con el fin de evitar innecesarias pérdidas energéticas durante la nueva molienda se llevó toda la muestra hasta granulometría D80-100# Ty, es decir, 80% de las partículas pasantes malla 100 y 20% con tamaños mayores.

3.2.3. Estudio del efecto de la concentración del ácido, la relación sólido-líquido y el tiempo de disolución. Después de llevar la muestra a un tamaño único (D80-100# Ty), las concentraciones de cada metal cambiarían por lo que se repitió la prueba con agua regia para obtener de nuevo los puntos de disolución de referencia para cada metal. Los resultados de aplicar las variables de concentración de ácido sulfúrico, relación sólido-lixiviante y tiempo de reacción se muestran en las Figuras 9 y 10. La muestra (D80-100# Ty), al estar más concentrada en metales, respondió de forma deficiente a concentraciones de 1 a 3 molar en ácido sulfúrico para disolver el cobre, obteniendo resultados máximos de 91.05% en relación sólido-lixiviante 1/10 (g/ml). Mediante la relación 1/15 se pudo alcanzar un 99.7% de disolución de cobre utilizando ácido sulfúrico a 3 molar en 3 horas y 45 minutos de reacción, mientras que con la relación 1/20 se alcanzó 99.85% de disolución de cobre a 2.5 molar de ácido y 3 horas de reacción.

3.2.4. Condiciones de disolución adecuadas. Teniendo en cuenta que es realmente necesario disolver cerca del 100% de cobre en una primera etapa para evitar problemas en la disolución de oro y plata con tiosulfato de amonio, se escogió una relación sólido-solución de 1/20 (g/ml) a 2.5 molar en ácido sulfúrico, 20% en volumen de peróxido de hidrogeno al 35% (parámetro) y 3 horas de reacción como las condiciones adecuadas para esta primera etapa, los demás parámetros se mantuvieron constantes. Adicionalmente, aplicar estas condiciones llevaría a disolver un 56% de la plata presente en las muestras, lo que se traduce en mejores disoluciones de oro en la etapa siguiente puesto que se reduciría la cantidad de iones metálicos de plata que podrían asociarse con el tiosulfato en la última reacción. Ahora, la desviación estándar de los resultados anteriores se mantuvo medianamente baja, alrededor de 7%, lo que pudo deberse a falencias en el control de las repeticiones y posiblemente a la poca homogeneidad de la muestra a trabajar (Anexo G). Sin embargo, con base en los resultados obtenidos se concluye que existe una buena reproducibilidad de estos experimentos.

Figura 9. Disolución de cobre en relación lixiviante 1/10 g/ml (a) y 1/15 g/ml (b).

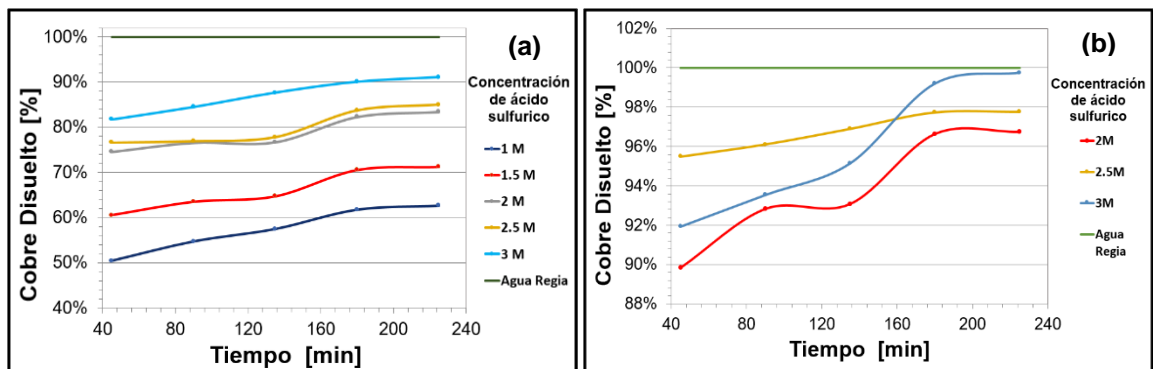
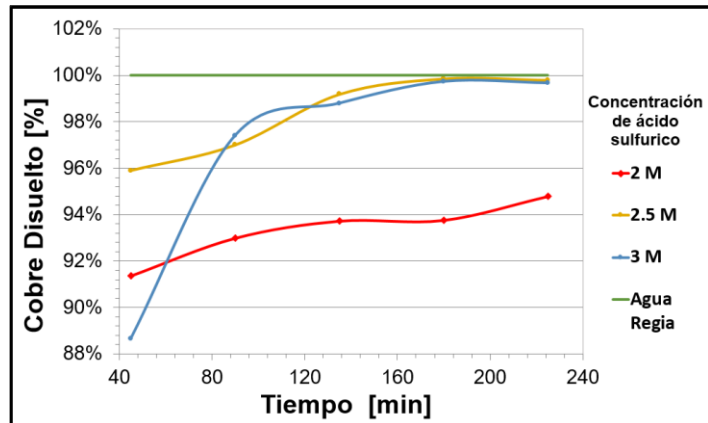


Figura 10. Disolución de cobre en relación lixiviante 1/20 (g/ml).



3.2.5. Estudio del efecto de la doble disolución de cobre. Antes de comenzar la etapa de lixiviación del oro y de la plata con tiosulfato de amonio, se realizó una disolución del cobre a las mejores condiciones encontradas en el apartado anterior. Se escaló el proceso al trabajar con 5, 7.5 y 15 gramos para obtener suficiente muestra en las siguientes pruebas experimentales. Durante las pruebas se notó un incremento significativo de la temperatura de reacción y eficiencias más bajas (5%, 10% y 15% respectivamente) propias del escalamiento de procesos. A una parte del material se le aplicó doble disolución con ácido sulfúrico a las mejores condiciones para determinar si de esta forma se podrían obtener mejores disoluciones de oro en la siguiente etapa.

3.3. DISOLUCIÓN CON TIOSULFATO DE AMONIO DEL ORO Y DE LA PLATA DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS

3.3.1. Estudio del efecto de la concentración del tiosulfato y del ion cúprico.

El diseño experimental en esta parte se trabajó como una combinación de concentraciones de tiosulfato de amonio y cobre (II) con valores alrededor de los mejores encontrados en la literatura. Así, se probó concentraciones de 0.1, 0.2 y 0.3 molar de tiosulfato de amonio y 10, 20 y 30 mili molar de cobre (II). La concentración

de amoníaco se dejó constante a 0.2 molar para que la solución se mantuviera dentro del rango de pH permitido para disolver oro y plata según el diagrama de Pourvaix (8.5 – 11 pH). Se encontró la mejor disolución de oro y plata al trabajar con altas concentraciones de tiosulfato y medias concentraciones de cobre(II), tal como se muestra en la Tabla 3. El tiempo de disolución no mostró un incremento tan significativo para la disolución de oro, sin embargo, para la plata se pudo alcanzar valores cercanos a 75% con 4 horas de reacción. De acuerdo con estos resultados, se descartó por completo las pruebas 1, 2 y 3 en donde los porcentajes fueron despreciables debido a la baja concentración de tiosulfato de amonio. Las pruebas de la 4 a la 9 se repitieron a 4 horas para comprobar la variación de disolución con respecto al tiempo cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.

En la Tabla 4, se observa una repetición de los ensayos más prometedores a cuatro horas de reacción. La desviación estándar en los experimentos se mantuvo por debajo de 18% aproximadamente, esto se podía esperar pues en el escalamiento para disolver el cobre disminuyó la eficiencia considerablemente. Así, pequeñas trazas de cobre sin disolver pudieron interferir en la reacción con tiosulfato afectando la variabilidad de las pruebas. Sin embargo, se puede verificar que el mejor resultado se obtuvo en el ensayo 8, obteniendo disoluciones de 66.55% de oro y 79.51% de plata. Aunque la variación de los datos es alta para la prueba 8 con oro, sigue siendo un resultado mucho mayor en relación con las demás pruebas.

Tabla 3. Disolución de oro y plata a diferentes concentraciones de tiosulfato de amonio y cobre (II), a 2 y 4 horas de reacción.

Prueba	Tiosulfato de Amonio	Cobre (II)	2 horas de reacción		4 horas de reacción	
			Disolución Oro	Disolución Plata	Disolución Oro	Disolución Plata
1	0.1 M	10 mM	1.58%	9.73%	1.60%	3.43%
2	0.1 M	20 mM	0.73%	2.27%	5.26%	3.67%
3	0.1 M	30 mM	8.54%	34.75%	5.68%	8.45%
4	0.2 M	10 mM	10.08%	55.19%	44.77%	71.48%
5	0.2 M	20 mM	23.59%	62.02%	33.91%	63.75%
6	0.2 M	30 mM	24.82%	61.88%	35.58%	50.93%
7	0.3 M	10 mM	11.58%	37.28%	23.98%	30.52%
8	0.3 M	20 mM	45.81%	59.33%	50.99%	75.19%
9	0.3 M	30 mM	40.95%	63.22%	30.35%	33.81%

Tabla 4. Disolución de oro y plata a diferentes concentraciones de tiosulfato de amonio y cobre (II) con 4 horas de reacción.

Prueba	Tiosulfato de Amonio	Cobre (II)	Disolución Oro	Desviación estándar Oro	Disolución Plata	Desviación estándar Plata
4	0.2 M	10 mM	22.59%	15.68%	60.97%	7.43%
5	0.2 M	20 mM	29.63%	3.03%	54.02%	6.88%
6	0.2 M	30 mM	25.72%	6.97%	55.43%	3.18%
7	0.3 M	10 mM	13.17%	7.64%	46.99%	11.65%
8	0.3 M	20 mM	66.55%	11.00%	79.51%	3.06%
9	0.3 M	30 mM	38.65%	5.87%	59.78%	18.37%

3.3.2. Efecto de aplicar una previa doble disolución de cobre. Los experimentos de los resultados anteriores se realizaron luego de aplicarle a la muestra una sola disolución con ácido sulfúrico a las mejores condiciones encontradas. Finalmente, se evaluó el efecto de realizar una prueba con tiosulfato de amonio a una muestra que fue tratada previamente con dos disoluciones sucesivas de ácido sulfúrico. En la Tabla 5, se evidencia una clara mejora en la disolución tanto de oro como de plata cuando la muestra se trata con una doble disolución de cobre previo al proceso de reacción con tiosulfato de amonio. El mejor de los resultados obtenidos muestra una disolución de 91.22% para el oro y 75.19% para la plata en 4 horas de reacción.

Tabla 5. Disolución de oro y plata con tiosulfato de amonio y cobre (II) posterior a una doble disolución ácida de cobre.

Prueba	Tiosulfato de Amonio	Cobre (II)	2 horas de reacción		4 horas de reacción	
			Disolución Oro	Disolución Plata	Disolución Oro	Disolución Plata
1	0.3 M	20 mM	71.53%	71.75%	91.22%	75.19%
2	0.4 M	20 mM	28.24%	57.37%	54.66%	71.42%

3.3.3. Condiciones de disolución adecuada. Sin duda alguna, las mejores condiciones encontradas para disolver el oro y la plata se dan al aplicar una solución de 0.3 molar de tiosulfato de amonio, 20 mili molar de cobre (II) y 0.2 molar de amoníaco al 30%, con una previa doble (2 veces) disolución ácida del cobre. Así, se alcanzarán porcentajes de disolución para oro cercanos al 90% y de 75% para la plata. Sin embargo, se tendrá que evaluar la relación costo-eficiencia al escoger

este resultado como el mejor, puesto que si sólo se aplica una disolución previa de cobre también es posible alcanzar porcentajes cercanos a 67% para el oro y 80% para la plata, tal como lo muestra la Tabla 4. Realizar una doble reacción ácida supondría, además, la disolución total de cobre, hierro y una gran parte de plata presente en el material, esto a su vez, promueve altos porcentajes de disolución de oro pues el ion tiosulfato se vuelve más selectivo hacia el oro ya que la concentración de plata disminuye. Por otro lado, realizar una sola etapa previa de reacción ácida, implica la pérdida de eficiencia al escalar el proceso, es decir, que en la muestra tratada quedarán pequeñas cantidades de cobre sin disolver que pueden afectar la reacción amoniacal consecuente. Cuantificar estas trazas de cobre restante implicaría un proceso engorroso pues se comprobó que las muestras de celulares no son totalmente homogéneas, por lo que esta cantidad podría variar de una muestra a otra. Adicionalmente, con una sola reacción ácida se alcanzarían porcentajes más bajos de disolución de plata, por lo que se tendría que aumentar la cantidad de tiosulfato en la reacción amoniacal para obtener buenas disoluciones de oro y plata.

4. CONCLUSIONES

Las tarjetas electrónicas de celulares son uno de los flujos de residuos con mayor tasa de crecimiento en los últimos años, su composición rica tanto en elementos peligrosos y tóxicos (Br, Pb, Cr, etc.) como en metales de alto valor económico (Au, Ag, Ti, etc.) hace que la gestión de estos residuos pueda ser autosostenible. De esta forma, se propuso la disolución de cobre, plata y oro a partir de dichos residuos, utilizando soluciones ácidas para el cobre y una solución básica con tiosulfato de amonio para el oro y la plata.

Mediante las pruebas de caracterización con SEM-EDS se encontró la necesidad de liberar los metales preciosos por medio de una molienda, en donde las fracciones gruesas estaban más concentradas en cobre mientras que las finas eran más ricas en plata y oro. Igualmente, se comprobó que las muestras no presentaban una buena homogeneidad y por lo tanto algunos datos de pruebas posteriores pudieron presentar desviaciones leves entre sus repeticiones.

En la etapa de disolución de cobre, plata y oro con ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio se estableció que la granulometría de partícula adecuada para la liberación efectiva de estos metales fue la D80-100# Ty. En la cual, se alcanzó a disolver un 99.53% del cobre con ácido, 57.58% de plata con ácido y tiosulfato, y 11.51% de oro solo con tiosulfato, utilizando una doble lixiviación ácida con ácido sulfúrico 2M y peróxido de hidrogeno al 35%, en relación 4:1 en volumen, seguida de una tercera etapa de lixiviación mediante 0.12 M de tiosulfato de amonio, 0.2 M de amoníaco al 30% y 20mM de Cobre (+2).

Luego de concentrar el material a un solo tamaño de partícula se encontró que las condiciones adecuadas de disolución para el cobre y la plata correspondían a una

reacción en una sola etapa con concentración de ácido sulfúrico de 2.5 molar, una relación sólido-líquido lixivante de 1/20 (g/ml) y una concentración en peróxido de hidrogeno de 20% en volumen al 35%, alcanzando porcentajes de disolución de 99.85% para el cobre y 55.96% para la plata después de 3 horas de reacción.

Adicionalmente, el proceso de disolución de oro y plata con tiosulfato de amonio resultó siendo factible sólo si inicialmente se trata el material con dos etapas previas de disolución del cobre a las mejores condiciones de ácido sulfúrico (relación sólido-solución de 1/20 (g/ml) a 2.5M en ácido sulfúrico, 20% en volumen de peróxido de hidrogeno al 35% y 3 horas de reacción), alcanzando disoluciones de 91.22% para el oro y 75.19% para la plata restante. De otra forma, si se aplica únicamente una etapa previa de reacción ácida, el porcentaje de disolución de oro se verá reducido casi en un 30% mientras el de la plata no se verá muy afectado.

Resulta evidente entonces, que de esta técnica para la disolución de metales en las tarjetas electrónicas de celulares se desprenden varias líneas de investigación adicionales con el objeto de optimizar el proceso de lixiviación, en conjunto con estudios económicos y ambientales que puedan contribuir a la solución del problema de la disposición final de este tipo de residuos electrónicos.

5. RECOMENDACIONES

Después de finalizar este trabajo se definieron algunos aspectos en los que se puede profundizar o hacer énfasis para posteriores estudios, entre los cuales se destacan los siguientes:

Establecer una metodología con la que se puedan desarrollar modelos de predicción para ciertas variables claves de operación como el tiempo de reacción, la concentración tanto de ácido como de peróxido, la velocidad de agitación, la temperatura, entre otros.

Hacer seguimiento a la concentración de oxígeno presente en la solución lixiviante para medir el grado de disociación del peróxido de hidrógeno. Igualmente, se puede comparar el uso de este reactivo con la aplicación de un sistema de aireación continua que promueva la constante oxidación de los metales de interés.

A la hora de digerir la muestra con agua regia se recomienda eliminar por completo el hierro presente en la misma, ya sea por disolución ácida, separación por solventes u otra técnica, con el objeto de evitar posibles interferencias en las lecturas del oro por absorción atómica.

CITAS BIBLIOGRAFÍA

- [1] HONORIO, O. *Metodología para recuperación metales preciosos: oro, plata y grupo del platino, presentes en desechos electrónicos*. En: Tesis de grado Universidad Nacional de Colombia. 2011.
- [2] YANG, T., Xu, Z., WEN, J., YANG, L. *Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by Acidithiobacillus ferrooxidans*. En: Hydrometallurgy 2009. (1–2), 29–32.
- [3] ZHANG, J. LAN, X. SONG, Y. WANG, B. XING, X. *Study on the extraction of gold with acidic thiourea*. En: Precious Metals. 2009. Vol. 30, p. 75–82.
- [4] OSIBANJO, Oladele. NNOROM, Innocent. *Material flows of mobile phones and accessories in Nigeria: environmental implications and sound end-of-life management options*. En: Environmental Impact Assessment Review. 2008. Vol. 28, p. 198-213.
- [5] SYED, S. *Recovery of gold from secondary sources-a review*. En: Hydrometallurgy. 2012. p. 115-116, 30-51.
- [6] LI, J. XU, X. LIU, W. *Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones*. En: Waste Management. 2012. Vol. 32, 1209-1212.
- [7] YU, N. TIE, Z. WANG, F. *The methods for recycling of waste printed circuit boards*. En: China Resource Comprehensive Utilization. 2010. Vol. 29, p. 21-24.

- [8] ZHANG, Y. LIU, S. XIE, S. ZENG, X. LI, J. *Current status on leaching precious metals from waste printed circuit boards*. In: The 7th International Conference on Waste Management and Technology, Procedia Environmental Sciences. 2012. Vol. 16, p. 560-568.
- [9] NI, K. LU, Y. WANG, T. KANNAN, K. GOSENS, J. XU, L. LI, Q. WANG, L. LIU, S. *A review of human exposure to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in China*. En: International Journal of Hygiene and Environmental Health. 2013. Vol. 216, p. 607–623.
- [10] TUE, N. TAKAHASHI, S. SUBRAMANIAN, A. SAKAI, S. TANABE, S. *Environmental contamination and human exposure to dioxin-related compounds in e-waste recycling sites of developing countries*. En: Environmental Science Process & Impacts. 2013. Vol. 15, p. 1326-1331.
- [11] MOLLEMAN, E. DREISINGER, D. *The treatment of copper-gold ores by ammonium thiosulfate leaching*. En: Hydrometallurgy. 2002. Vol, 66. p. 1-3.
- [12] MUIR, D. AYLMOORE, M. *Thiosulfate as an alternative lixiviant to cyanide for gold ores*. En: Advances in Gold Ore Processing. 2005. Cap 3, p. 541-556.
- [13] LANGHANS, J. LEI, K. CARNAHAN, T. *Copper-catalyzed thiosulphate leaching of low-grade gold ores*. En: Hydrometallurgy. 1992. Vol. 29, p. 191–203.
- [14] MOBIFORGE. *Mobile user behaviour staticstis 2015*. [En línea](Recuperado en: 13 de Diciembre del 2017). Disponible en: <http://www.mobithinking.com>.
- [15] YADAV, S. YADAV, S. KUMAR, P. *Metal toxicity assessment of mobile phone parts using Milli Q wate*. En: Waste Management. 2014. Vol. 34, p. 1274-1278.

- [16] OGUNNIYI, I. VERMAAK, M. *Improving printed circuit board physical processing – an overview*. En: Proceedings of European Metallurgical Conference. 2007.
- [17] KASPER, A. BERSELLI, G. FREITAS, B. TENORIO, J. BERNARDES, A. VEIT, H. *Printed wiring boards for mobile phones: characterization and recycling of copper*. En: Waste Management. 2011. Vol. 31, p. 2536-2545.
- [18] LINCOLN, J. OGUNSEITAN, O. SHAPIRO, A. SAPHORES, J. *Leaching assessments of hazardous materials in cellular telephones*. En: Environmental Science & Technology. 2007 Vol. 41, p. 2572-2578.
- [19] GUAN, J. LI, Y. LU, M. *Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis*. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2008. Vol. 83, p. 185-189.
- [20] GENIK-SAS-BEREZOWSKY, R. SEFTON, V. GORMELY, L. *Recovery of precious metals from metal sulfides*. En: 1978. Vol, 12. p. 3.
- [21] WU, B. CHAN, Y. MIDDENDORF, A. GU, X. ZHONG, H. *Assessment of toxicity potential of metallic elements in discarded electronics: a case study of mobile phones in China*. En: Journal of Environmental Sciences. 2008. Vol. 20, p. 1403-1408.
- [22] ROINE, A. ANTTILA, K. Eh-pH Diagrams (Pourbaix-Diagrams). HSC Chemistry 6.0. [En Linea]. Outotec. Agosto 10, 2006. (Recuperado en 18 de Julio 2017). Disponible en: https://www.chemits.com/de/assets/templates/chemits/download/hsc/HSC_EH_pH_Diagrams.pdf

- [23] WILLIAMSON, M. RIMSTIDT, J. *The rate of decomposition of the ferric-thiosulfate complex in acidic aqueous solutions*. En: *Geochim et Cosmochim Acta*. 1993. Vol, 57. p. 3555-3561.
- [24] AYLMOORE, M. MUIR, D. *Thiosulfate leaching of gold—a review*. En: *Minerals Engineering*. 2001. Vol. 14, p. 135-174.
- [25] XU, Yong. SCHOONEN, Martin. *The stability of thiosulfate in the presence of pyrite in low-temperature aqueous solutions*. En: *Geochim et Cosmochim Acta*. 1995. Vol. 59, p. 4605–4622.
- [26] LEE, Ching-Hwa, TANG, Li-Wen, POPURI, Srinivasa. *A study on the recycling of scrap integrated circuits by leaching*. En: *Waste Management & Research*. 2011. Vol. 29, p. 677-685.
- [27] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 77 – Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. 2008.
- [28] BEHNAMFARD, Ali. MEHDI, Mohammad. VEGLIO, Francesco. *Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation*. En: *Waste Management*. 2013. Vol. 33, p. 2354-2363.
- [29] JEONGB, Jinki. TRUNG, Huynh. JHAC, Manis. HUNG, Vinh. LEEB, Jae-Chun *Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phones*. En: *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 178, p. 1115-1119.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABBRUZZESE, C. FORNARI, P. MASSIDDA, R. VEGLIO, F. UBALDINI, S. *Thiosulphate leaching for gold hydrometallurgy*. En: Hydrometallurgy. 1995. Vol. 39, p. 265–276.

AYLMORE, M. MUIR, D. *Thiosulfate leaching of gold—a review*. En: *Minerals Engineering*. 2001. Vol. 14, p. 135-174.

BEHNAMFARD, Ali. MEHDI, Mohammad. VEGLIO, Francesco. *Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation*. En: Waste Management. 2013. Vol. 33, p. 2354-2363.

FLEMING, C. *The potential role of anion exchange resins in the gold industry*. En: EPD Congress 1998. The Minerals, Metals and Materials Society. 1998. p. 95-117.

GENIK-SAS-BEREZOWSKY, R. SEFTON, V. GORMELY, L. *Recovery of precious metals from metal sulfides*. En: 1978. Vol. 12. p. 3.

GUAN, J. LI, Y. LU, M. *Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis*. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2008. Vol. 83, p. 185-189.

HONORIO, O. *Metodología para recuperación metales preciosos: oro, plata y grupo del platino, presentes en desechos electrónicos*. En: Tesis de grado Universidad Nacional de Colombia. 2011.

JEONGB, Jinki. TRUNG, Huynh. JHAC, Manis. HUNG, Vinh. LEEB, Jae-Chun. *Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phones*. En: Journal of Hazardous Materials. 2010. Vol. 178, p. 1115-1119.

KASPER, A. BERSELLI, G. FREITAS, B. TENORIO, J. BERNARDES, A. VEIT, H. *Printed wiring boards for mobile phones: characterization and recycling of copper*. En: Waste Management. 2011. Vol. 31, p. 2536-2545.

LANGHANS, J. LEI, K. CARNAHAN, T. *Copper-catalyzed thiosulphate leaching of low-grade gold ores*. En: Hydrometallurgy. 1992. Vol. 29, p. 191–203.

LEE, Ching-Hwa, TANG, Li-Wen, POPURI, Srinivasa. *A study on the recycling of scrap integrated circuits by leaching*. En: Waste Management & Research. 2011. Vol. 29, p. 677-685.

LI, J. XU, X. LIU, W. *Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones*. En: Waste Management. 2012. Vol. 32, 1209-1212.

LINCOLN, J. OGUNSEITAN, O. SHAPIRO, A. SAPHORES, J. *Leaching assessments of hazardous materials in cellular telephones*. En: Environmental Science & Technology. 2007 Vol. 41, p. 2572-2578.

MOLLEMAN, E. DREISINGER, D. *The treatment of copper-gold ores by ammonium thiosulfate leaching*. En: Hydrometallurgy. 2002. Vol, 66. p. 1-3.

MOBIFORGE. *Mobile user behaviour staticstis 2015*. [En línea](Recuperado en: 13 de Diciembre del 2017). Disponible en: <http://www.mobithinking.com>.

MUIR, D. AYLMORE, M. *Thiosulfate as an alternative lixiviant to cyanide for gold ores*. En: Advances in Gold Ore Processing. 2005. Cap 3, p. 541-556.

NI, K. LU, Y. WANG, T. KANNAN, K. GOSENS, J. XU, L. LI, Q. WANG, L. LIU, S. *A review of human exposure to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in China*. En: International Journal of Hygiene and Environmental Health. 2013. Vol. 216, p. 607–623.

NICOL, M. ZANGH, S. *An electrochemical study of the dissolution of gold in thiosulfate solutions; Alkaline solutions*. En: Journal of Applied Electrochemistry. 2002. Vol. 33, p. 767-775.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 77 – Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. 2008.

OGUNNIYI, I. VERMAAK, M. *Improving printed circuit board physical processing – an overview*. En: Proceedings of European Metallurgical Conference. 2007.

OSIBANJO, Oladele. NNOROM, Innocent. *Material flows of mobile phones and accessories in Nigeria: environmental implications and sound end-of-life management options*. En: Environmental Impact Assessment Review. 2008. Vol. 28, p. 198-213.

PEREZ, A. GALAVIZ, H. *Method for recovery of precious metals from difficult ores with copper–ammonium thiosulfate*. En: US Patent 4654078. 1987. p. 9.

SYED, S. *Recovery of gold from secondary sources-a review*. En: Hydrometallurgy. 2012. p. 115-116, 30-51.

ROINE, A. ANTTILA, K. Eh-pH Diagrams (Pourbaix-Diagrams). HSC Chemistry 6.0. [En Línea]. Outotec. Agosto 10, 2006. (Recuperado en 18 de Julio 2017). Disponible en: https://www.chemits.com/de/assets/templates/chemits/download/hsc/HSC_EH_pH_Diagrams.pdf

TUE, N. TAKAHASHI, S. SUBRAMANIAN, A. SAKAI, S. TANABE, S.. *Environmental contamination and human exposure to dioxin-related compounds in e-waste recycling sites of developing countries*. En: Environmental Science Process & Impacts. 2013. Vol. 15, p. 1326-1331.

VANN, K. MUSSON, S. TOWNSEND, T. *Factors affecting TCLP lead leachability from computer CPUs*. En: Waste Management. 2006. Vol. 26, p. 293-298.

WILLIAMSON, M. RIMSTIDT, J. *The rate of decomposition of the ferric-thiosulfate complex in acidic aqueous solutions*. En: Geochim et Cosmochim Acta. 1993. Vol, 57. p. 3555-3561.

WU, B. CHAN, Y. MIDDENDORF, A. GU, X. ZHONG, H. *Assessment of toxicity potential of metallic elements in discarded electronics: a case study of mobile phones in China*. En: Journal of Environmental Sciences. 2008. Vol. 20, p. 1403-1408.

XU, Yong. SCHOONEN, Martin. *The stability of thiosulfate in the presence of pyrite in low-temperature aqueous solutions*. En: Geochim et Cosmochim Acta. 1995. Vol. 59, p. 4605–4622.

YADAV, S. YADAV, S. KUMAR, P. *Metal toxicity assessment of mobile phone parts using Milli Q wate*. En: Waste Management. 2014. Vol. 34, p. 1274-1278.

YANG, T., Xu, Z., WEN, J., YANG, L. *Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by Acidithiobacillus ferrooxidans*. Hydrometallurgy 2009. (1–2), 29–32.

YU, N. TIE, Z. WANG, F. *The methods for recycling of waste printed circuit boards*. En: China Resource Comprehensive Utilization. Vol. 29, p. 21-24.

ZHANG, J. LAN, X. SONG, Y. WANG, B. XING, X. *Study on the extraction of gold with acidic thiourea*. En: *Precious Metals*. 2009. Vol. 30, p. 75–82.

ZHANG, Y. LIU, S. XIE, S. ZENG, X. LI, J. *Current status on leaching precious metals from waste printed circuit boards*. In: *The 7th International Conference on Waste Management and Technology*, *Procedia Environmental Sciences*. 2012. Vol. 16, p. 560-568.

ANEXOS

Anexo A. Reactivos utilizados en el proceso.

Reactivo	Formula química	Especificación
Ácido clorhídrico	HCl	Merck/ 37%
Ácido nítrico	HNO ₃	Merck/ 65%
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	Merck/ 95-98%
Amoníaco	NH ₄	Merck/ 30%
Peróxido de hidrógeno	H ₂ O ₂	Tecnoquímicas/ 50%
Sulfato de cobre	CuSO ₄ *5H ₂ O	Merck/ 99%
Tiosulfato de amonio	NH ₄ (S ₂ O ₃)	Merck/ 98%

Anexo B. Principales equipos utilizados

	<p>Cizalla de banco para laminas metálicas</p> <p>Aplicación: Corte de las placas electrónicas.</p> <p>Tomado de: https://www.traverstool.com.mx/maq_18/61-251-041.html</p>
	<p>Molino de cuchillas</p> <p>Aplicación: Trituración de las tarjetas</p> <p>Tomado de: Autor</p>
	<p>Ro-Tap para análisis granulométrico</p> <p>Aplicación: Tamizado de tarjetas trituradas.</p> <p>Tomado de: http://lavallab.com/es/products/tamizadores-zarandas-tamices/tamizadoras-ro-tap/</p>
	<p>Agitador mecánico de rodillos</p> <p>Aplicación: Agitación constante de botellas con soluciones lixiviantes.</p> <p>Tomado de: Autor</p>

Anexo C. Protocolo experimental de las disoluciones.

C1. Agua Regia.

- a. Pesar 1 gramo de la muestra a tratar dentro de una botella plástica.
- b. Agregar 3 partes en volumen de ácido clorhídrico y posteriormente una parte de ácido nítrico. Mantener la botella en el agitador de rodillos.
- c. Filtrar la solución lixiviante en balones aforados, realizando tres lavados de los sólidos remanentes en la botella.

C1. Ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno.

1. Pesar 1 gramo de la muestra a tratar dentro de una botella plástica.
2. Agregar agua, peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico, en ese orden, de acuerdo con el ensayo a realizar.
3. Mantener la botella en el agitador de rodillos el tiempo de reacción.
4. Tomar alícuotas entre 30 – 50 microlitros según sea necesario.
5. Filtrar la solución lixiviante en balones aforados, realizando tres lavados de los sólidos remanentes en la botella.

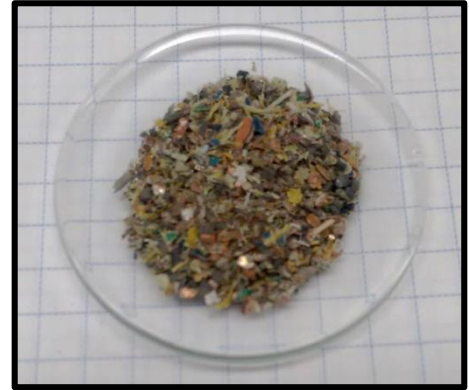
C2. Tiosulfato de amonio, cobre(II) y amoníaco.

1. Pesar 1 gramo de la muestra a tratar dentro de una botella plástica.
2. Agregar agua, cobre(II) y amoníaco en un recipiente de vidrio, según las concentraciones a trabajar. Agitar la solución por 10 segundos.
3. Agregar tiosulfato de amonio a la solución anterior según la cantidad que corresponda y agregar la solución preparada a la botella de reacción.
4. Mantener la botella en el agitador de rodillos el tiempo de reacción.
5. Filtrar la solución lixiviante en balones aforados, realizando tres lavados de los sólidos remanentes en la botella.

Anexo D. Material clasificado en fracciones.



+16# Ty (≥ 1.19 mm)



16/60# Ty (1.19 mm - 0.250 mm)



60/100# Ty (0.250 mm - 0.149 mm)



100/140# Ty (0.149 mm - 0.105 mm)

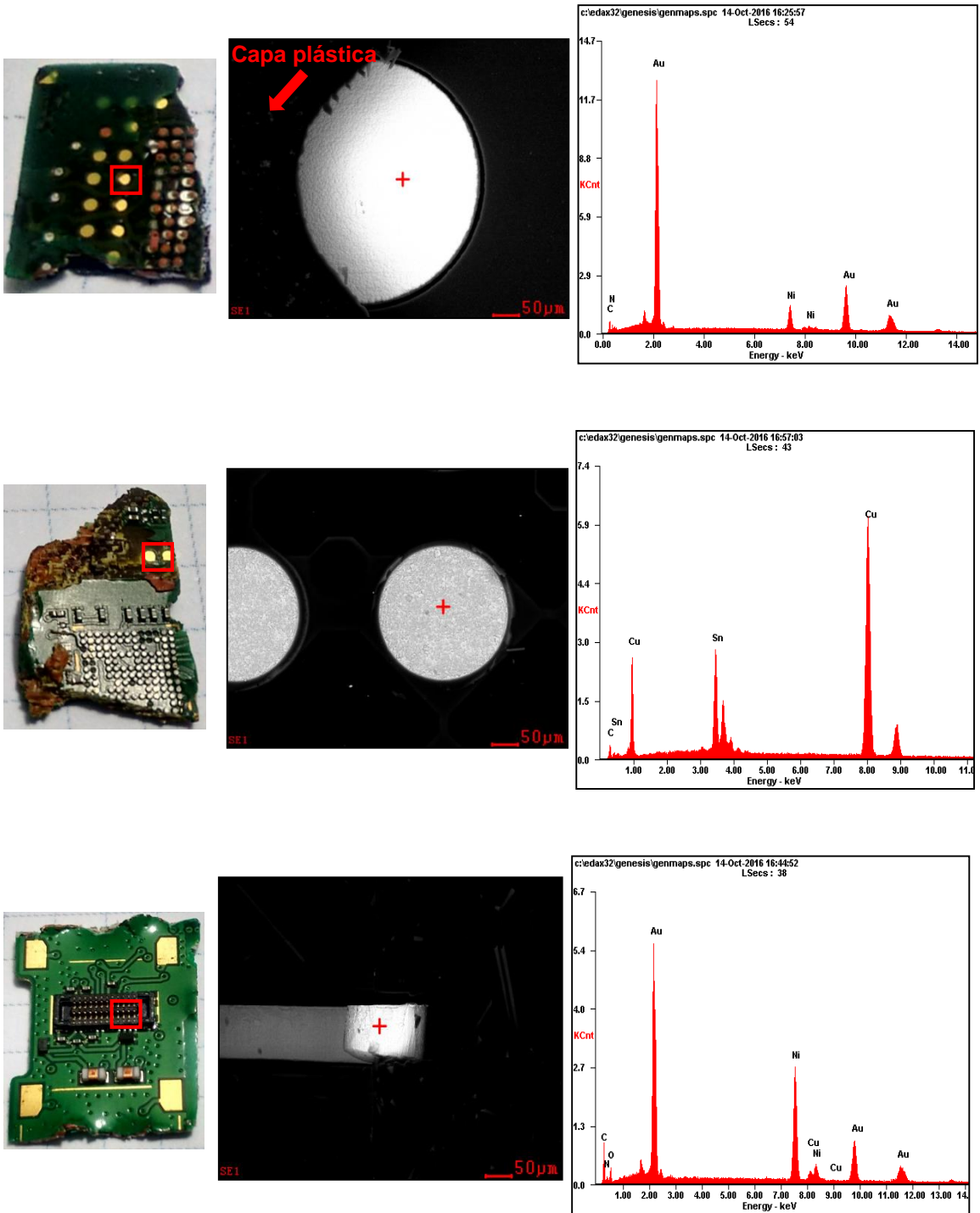


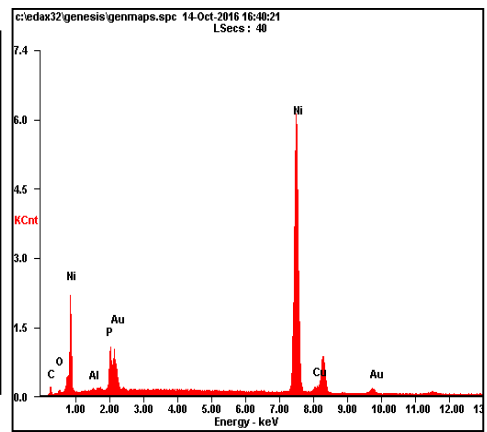
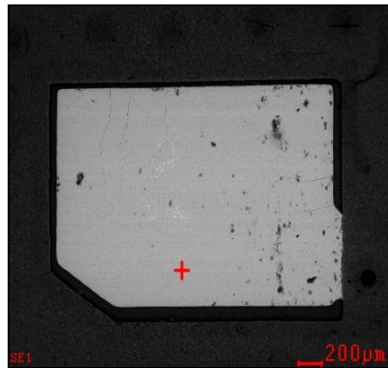
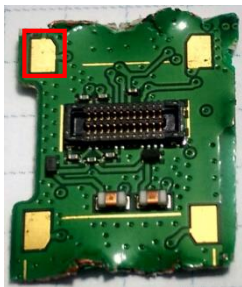
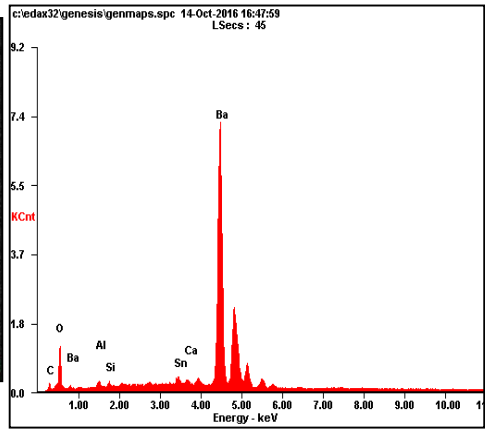
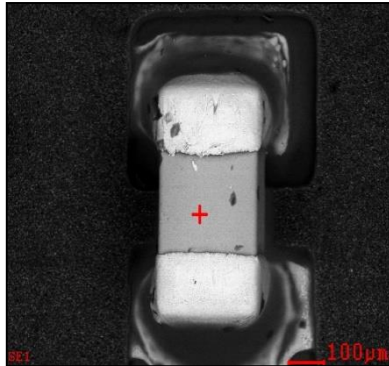
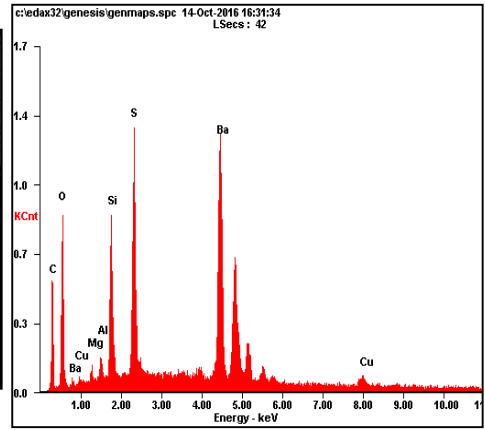
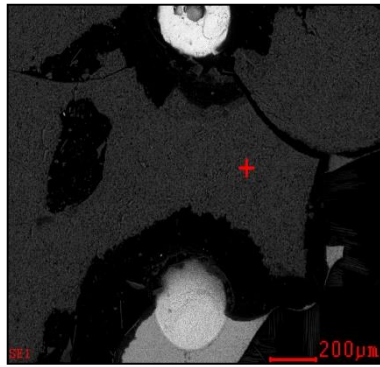
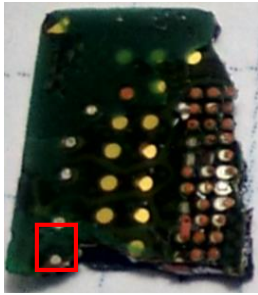
-140# Ty (≤ 0.105)



D80-100# Ty

Anexo E. Micrografías SEM y espectros EDS de la muestra.





Anexo F. Resultados de fluorescencia de rayos X.

Elemento	Concentración Total [%]
Au	0.070
Ag	0.271
Cu	35.173
Fe	1.426
Ni	12.290
Ba	9.910
Sn	9.600
Si	9.190
Ca	4.750
Al	4.330
Ti	3.450
Br	3.400
Zn	1.150
Zr	1.120
Pb	0.940
Cr	0.810
Otros	2.120

Anexo G. Desviación estándar de diferentes ensayos.

Prueba	Dato	Repetición 1	Repetición 2	Promedio	Desviación Estándar
Ácido 2.5 molar, relación 1/10 (g/ml)	1	71.28%	58.34%	64.81%	9.15%
	2	59.80%	59.75%	59.77%	0.04%
	3	52.60%	61.31%	56.96%	6.16%
	4	55.11%	66.72%	60.92%	8.21%
	5	65.65%	72.24%	68.94%	4.66%
Ácido 2.5 molar, relación 1/15 (g/ml)	1	95.49%	89.76%	92.62%	4.06%
	2	96.11%	90.96%	93.54%	3.64%
	3	96.90%	93.96%	95.43%	2.08%
	4	97.73%	95.11%	96.42%	1.86%
	5	97.76%	96.01%	96.88%	1.24%
Ácido 2.5 molar, relación 1/20 (g/ml)	1	89.76%	102.03%	95.89%	8.68%
	2	90.96%	103.02%	96.99%	8.53%
	3	93.96%	104.40%	99.18%	7.39%
	4	95.11%	104.60%	99.85%	6.71%
	5	96.01%	103.58%	99.79%	5.36%

Anexo H. Ley calculada.

# Malla Tyler	Cantidad Retenida [g]	Oro Lixiviado [mg/g]	Oro total [mg]	Ley calculada para Oro [g/Ton]
+16#	144.1	0.340	48.994	$=(443.44*1000)/708.4$
16/60#	454.3	0.721	327.550	625.97
60/100#	40.0	0.422	16.880	
100/140#	20.8	0.737	15.330	
-140#	49.2	0.705	34.686	
Total	708.4		443.44	

# Malla Tyler	Cantidad Retenida [g]	Plata Lixiviada [mg/g]	Plata total [mg]	Ley calculada para Plata [Kg/Ton]
+16#	144.1	0.760	109.451	$=(1257.391)/708.4$
16/60#	454.3	1.714	778.526	1.775
60/100#	40.0	3.989	159.571	
100/140#	20.8	3.703	77.018	
-140#	49.2	2.700	132.825	
Total	708.4		1257.391	