

Caracterización y estudio de la composición de oro presente en la chatarra electrónica

Abner H. Rojas^{a,*}, Eleazar Salinas^b, Eduardo Cerecedo^b, Juan Hernández^b, Ventura Rodríguez^b, María I. Reyes^b

^a Alumno del Doctorado en Ciencia de los Materiales, Área Académica de Ciencia de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, UAEH.

^b Profesora investigadora del Área Académica de Ciencia de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, UAEH.

Resumen

El enorme auge en la producción y consumo de aparatos eléctricos y electrónicos debidos a nuevas y mejores tecnologías, genera equipos con una menor vida útil consolidándolo como el flujo de residuos de mayor crecimiento a nivel mundial lo cual tiene como consecuencias problemáticas de carácter ambiental y de salud humana. Sin embargo, estos desechos contienen una gran cantidad de metales nobles, fundamentado en que cada placa de circuito impreso (presenta de 0.1 a 0.5 gramos de oro, frente a una extracción de 1 a 5 gramos de oro por tonelada de mineral. Teniendo en cuenta estos datos, la recuperación metálica de la chatarra electrónica por diversos procesos ha sido considerada como una fuente secundaria comercialmente viable de extracción de metales. Previamente a una recuperación de metales, es importante conocer las cantidades representativas de metales específicos contenidos en los desechos electrónicos. Es por ello que en este trabajo de investigación se llevó a cabo una amplia caracterización cualitativa, cuantitativa y semicuantitativa de materiales de desechos de equipos de cómputo de diferentes épocas, identificando componentes ricos en oro; utilizando técnicas como Difracción de Rayos X, Microscopia Electrónica de Barrido en conjunto con Microanálisis por Dispersión de Energías y Espectroscopía de Plasma de Acoplamiento Inducido. Como resultado se obtuvieron concentraciones máximas de oro del 99.4 % en peso en pines soportados en el procesador.

Palabras Clave: Caracterización, Chatarra electrónica, Reciclaje, Oro.

1. Introducción

Los circuitos impresos (CI's) son la parte integral de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE's), cuyo acelerado progreso, inducido por la necesidad de nuevos aparatos, más veloces, eficientes y económicos produce la reducción de su vida útil, pasando a convertirse en un simple desecho que incrementa la mala confinación de la "chatarra electrónica" (Reyes *et al.*, 2013).

Tan sólo en México, en 2006, se desecharon cerca de 2,375,000 computadoras, siendo esto solo una parte representativa de los desechos electrónicos. Estos aparatos constan de componentes tóxicos tales como el plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), níquel (Ni), cromo (Cr), berilio (Be) bario (Ba), etc.; que en contacto con la humedad suelen reaccionar generando impactos ambientales altos y enfermedades en las sociedades circundadas, por otra parte, la basura electrónica contiene también muchos metales valiosos tales como oro (Au), plata (Ag), platino (Pt), paladio (Pd), cobre (Cu), etc, los cuales mediante una clasificación adecuada pueden ser sustraídos de una manera sustentable y económicamente atractiva. (Montiel *et al.*, 2013, Jianzhi *et al.*, 2016), por lo anterior el reciclaje resulta de suma importancia, principalmente en los productos post-consumidos y el reciclaje industrial, generando un campo de investigación enfocado en la búsqueda de nuevos y mejores métodos de reciclaje, siendo la recuperación de metales uno de los procesos más rentables que genera un mercado transfronterizo formal como informal (Montiel *et al.*, 2015, Rojas *et al.*, 2014). Esto representa un

valor económico y ecológico considerable en cuanto a la escala de producción de estos desperdicios, que al día de hoy ha logrado consolidar una industria de recuperación de materiales de importancia industrial, priorizando el reciclado de oro depositado sobre el sustrato de un metal no noble de níquel, zinc y/o cobre insertado sobre una base polimérica (*placas*), esto presente en una mezcla heterogénea que contiene generalmente polímeros, cerámicos de sílice y alúmina, metales base y nobles (Montiel *et al.*, 2012, Jianzhi *et al.*, 2016).

Tan solo con respecto al oro, en 2004, en el ámbito de consumo mundial de este material fue de 3,360 toneladas, de las cuales 2,478 toneladas fueron aportadas por procesos de minería, 829 toneladas fueron reincorporadas por la industria del reciclaje y 53 toneladas por otras fuentes; de las cuales, es importante definir que 1,016 toneladas se aplicaron en joyería y acuñado de monedas y 2,176 se emplearon en la industria electrónica y de telecomunicaciones, el resto en sectores industriales de diferente enfoques. Se puede percatar sin esfuerzo que es mínima aún la cantidad de metales recuperados del total enfocado a la fabricación en el sector electrónico. En el año 2005 la demanda de oro se vio incrementada un 3% en comparación con el año anterior (Juarez *et al.*, 2007, Ramirez *et al.*, 2008) y con la tendencia a incrementa exponencialmente la necesidad de dicho elemento sumado a su escases en la corteza terrestre que requiere nuevos y costosos sistemas de extracción mineral, insentivan la búsqueda de nuevos procesos de recuperación eficientes de fuentes secundarias.

El valor presente en estas placas de circuitos impresos (PCI's) ha estimulado la creación de una gran cantidad de

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: abner_rc@hotmail.es (Abner H. Rojas)

métodos de reciclaje que incluyen las tecnologías físicas y mecánicas de separación, métodos pirometalúrgicos, procesamientos hidrometalúrgicos, electrometalúrgicos entre otros (Yanhua *et al.*, 2012). Donde sumado a factores ambientales, económicos y de eficiencia se optó por métodos hidrometalúrgicos para lograr la separación con agentes químicos de componentes de interés en un medio acuoso.

Con base en esto, y fundamentado en el precio de oro que tiende a la alza, en el presente trabajo se respalda la viabilidad del reciclaje de oro partiendo de la chatarra electrónica como materia prima, realizando una evaluación de cada componente presente, esto consolidando un mercado económico viable, sumado a una reducción del impacto ambiental asociado a la problemática.

1.1. Composición de la Chatarra Electrónica

Se considera un componente de la chatarra electrónica a todo aparato eléctrico y electrónico que incluye en su fabricación la incorporación de PCI's para su óptima vida funcional. La distribución de los componentes de la basura electrónica al final de la vida útil de una computadora, se compone de un 24.80% en peso de vidrio, 23.00% en peso de plásticos, 0.02% en peso de materiales preciosos, 20.47% en peso de hierro, 6.30% en peso de plomo, 14.17% en peso de aluminio, 6.93% en peso de cobre y 4.30% en peso de otros elementos esto referido a una composición general de todo el equipo. Es decir que existe un 25.00% de componentes recuperables, un 67.00% de materiales reciclables (plásticos, metales ferrosos, aluminio, cobre, oro, níquel, estaño, etc.) y un 8.00% de elementos potencialmente tóxicos (plomo, mercurio, berilio, selenio, cadmio, cromo, sustancias halogenadas, clorofluorocarbonos, bifenilos policlorados, policloruros de vinilo, ignífugos como el arsénico y el amianto, entre otros.) (Cordero *et al.*, 2012, Mesinas *et al.*, 2015, Montero *et al.*, 2012).

2. Metodología

2.1 Recolección y clasificación de chatarra electrónica

Se realizó la recolección de circuitos impresos provenientes de diferentes equipos (marcas) y épocas, considerando para este estudio como materia prima a las tarjetas controladoras de disco duro, procesadores, tarjetas de memoria RAM (Random Access Memory) y placas base (motherboard). Se consideró una cantidad representativa de placas de circuitos impresos (PCI's)* obteniendo una muestra homogénea.

De las placas recolectadas se seleccionaron las fracciones metálicas (pines) a las cuales se realizó una minuciosa caracterización física. Para este propósito se separaron los componentes metálicos de la base polimérica de las tarjetas para su posterior análisis.

* Estas tarjetas están conformadas prácticamente por los mismos componentes electrónicos soportados (condensadores, resistencias, transistores, circuitos integrados, etc.), difieren únicamente de la cantidad y calidad de sus materiales, así como

2.2 Microscopia Electrónica de Barrido y Espectroscopia de Energías Dispersivas

Para el análisis morfológico se empleó un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) marca JEOL modelo JSM-6300, con una corriente de sonda de 10^{-2} a 10^{-5} Amperes (A) y una energía de 2 a 30 kiloelectronvolts (keV).

Para dicho análisis se utilizaron las siguientes condiciones:

- Voltaje de aceleración $E_0 = 30$ keV.
- Corriente de la condensadora de $9 [1 \times 10^{-9}]$ A
- Modo de imagen SEI (Electrones Secundarios)
- Distancia de trabajo de 15mm.
- Apertura de 3 (600 μ m)

Para realizar el análisis EDS y mapeo, se emplea una energía de 15 keV utilizando un detector acoplado marca OXFORD.

2.3 Difracción de Rayos X

El análisis por difracción de rayos X fue realizado empleando un difractómetro marca Inel, modelo EQUINOX 2000. Los difractogramas se obtuvieron a temperatura ambiente en un intervalo para 2θ de 20 a 100, con fuente de radiación $Co K\alpha 1$ (1.789010 Å). Los pines fueron colocados sin triturar, a un tiempo de adquisición de 25 minutos. La evaluación de los espectros de difracción fue indexada mediante el software MATCH 3 empleando la base de datos COD-Inorg REV184238 2016.07.05 (Power Diffraction Data Base).

2.4 Espectrofotometría de Plasma de Acoplamiento Inducido

El análisis cuantitativo fue realizado empleando un espectrofotómetro marca PERKIN-ELMER, modelo ÓPTIMA 3000 XL, el cual utiliza plasma de argón como fuente de producción de átomos ionizados y alcanza temperaturas de 6000 a 10000 K.

Para el análisis se consideraron 6 muestras patrón, para verificar la linealidad del intervalo de análisis de ppm de Au (0.2-1.4 ppm). El disolvente utilizado en la preparación de los patrones es una disolución de HCl-HNO₃ a una relación 3 a 1 (v/v).

A partir del valor de ppm de Au obtenido, por interpolación en la recta de calibrado y conociendo el volumen total de disolución (100mL) y la cantidad total de muestra (1g) se calcularon las partes por millón (ppm) de Au presente en cada tipo de pin.

3. Resultados

En primera instancia se realizó la recolección aleatoria de placas de circuitos impresos de diferentes marcas, modelos y generaciones (Figura 1).

la composición de materiales que los integran (Chaverra *et al.*, 2011).

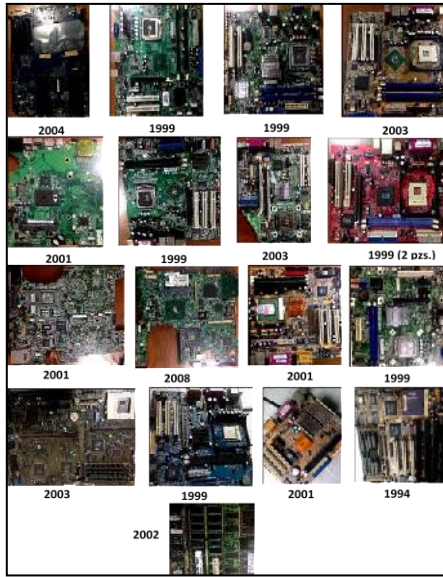


Figura 1. Placas de circuitos impresos empleadas para el estudio.

Se recolectó un total de 22 placas de las cuales, 17 son placas base o motherboard, y 5 son tarjetas de memoria RAM (random access memory) las cuales se muestran en la figura 1, con la época de procedencia de cada una. Los componentes metálicos fueron desmontados manualmente de diferentes áreas distribuidas sobre el polímero que conforma las PCI's (Tabla 1).

TABLA 1. DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPONENTES DESMONTADOS SOBRE LAS PCI'S.

PIEZA	Zona
	Pin del procesador
	Soporte del procesador
	Soporte de memoria de acceso aleatorio (RAM)
	Soporte de puertos auxiliares
	Soporte de tarjetas de interconexión de componentes periféricos (PCI)
	Soporte de tarjetas de audio y video

3.1 Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis por Dispersión de Energías

Los circuitos impresos de computadora fueron debidamente caracterizados, por Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis por Dispersión de Energías (SEM-EDS).

En este sentido las figuras 3 a la 10, muestran micrografías, mapeos y espectros de EDS correspondientes a diversos pines,

el microanálisis se realizó tomando tres zonas como referencias para cada muestra, homogenizando la distribución elemental;

- I. La zona superficial, que se usa para hacer contacto con otros componentes electrónicos.
- II. Parte media, que es el cuerpo del elemento metálico.
- III. Parte inferior, en la base del pin que conecta con la base de la placa.

Con base en los resultados obtenidos es posible identificar que la menor concentración de oro se encuentra en la base del pin, siendo contrario al comportamiento de los metales base (Ni y Cu) tienden a concentrarse mayormente en la base del material.

En los pines provenientes de los procesadores se logró identificar una mayor cantidad de oro, donde el microanálisis refleja una composición del 96.7 al 99.47 % del peso con cantidades base de cobre, níquel y silicio (Figura 3).

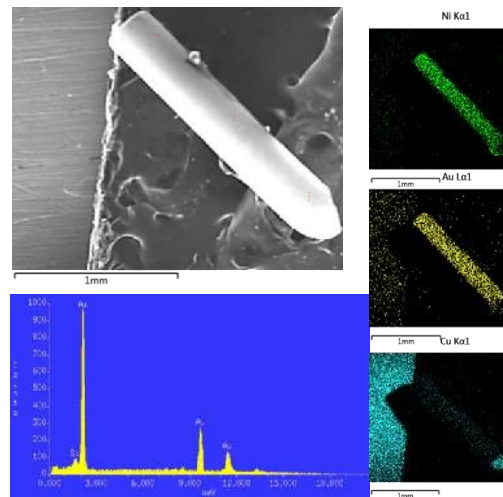


Figura 3. Micrografía, mapeo y espectro EDS de pin de procesador.

En los pines del soporte del procesador provenientes de los procesadores se encontró la mayor cantidad de oro en la zona I, que se ve ubicada como el contacto entre procesador y base, esta concentración se ve disminuida a lo largo del cuerpo de la pieza, el microanálisis refleja una composición del 49.67 % del peso con cantidades base considerables de cobre, níquel, estaño y silicio (Figura 4).

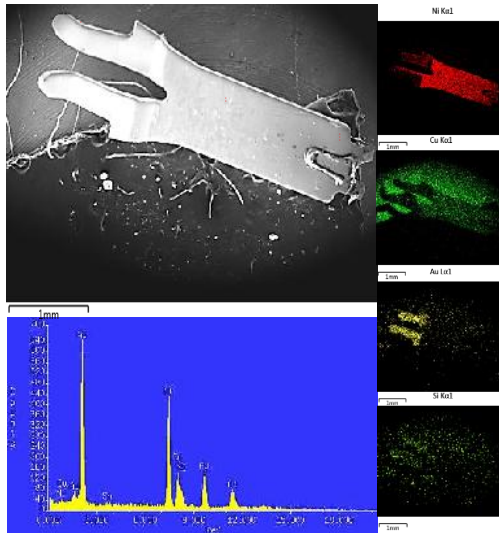


Figura 1. Micrografía, mapeo y espectro EDS de pines de soporte de procesador.

En los pines del soporte de la tarjeta de interconexión de componentes periféricos (PCI) soportados en la placa madre correspondientes a los años 1999, muestran una mínima cantidad de oro, pero con presencia constante a lo largo de la pieza, esta concentración se ve disminuida a lo largo del cuerpo de la pieza, el microanálisis refleja una composición variable englobada de oro del 7.29 a 23.95% del peso con cantidades base considerables de cobre, níquel, estaño y silicio (Figura 5).

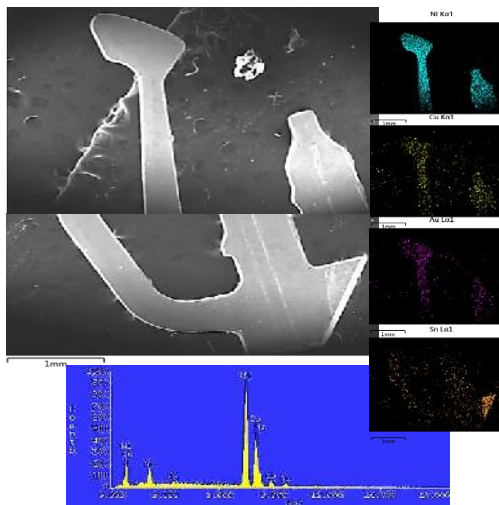


Figura 2. Micrografía, mapeo y espectro EDS de pines de soporte de tarjetas PCI's año 1999.

En los pines del soporte de las tarjetas PCI's soportados en la placa madre correspondientes a los años 2000, se encontró una concentración de oro localizada, que se ubica en la zona I, que corresponde a el área de contacto con los *fingers* (áreas de contacto) de las memorias de acceso aleatorio (RAM), pero con presencia mínima a lo largo que el cuerpo, cuya concentración tiende a descender con forme avanza a la base del componente, corroborado con el microanálisis a una composición en la zona I de oro de 29.42 % del peso con cantidades base de cobre, níquel y trazas de estaño y silicio (Figura 6).

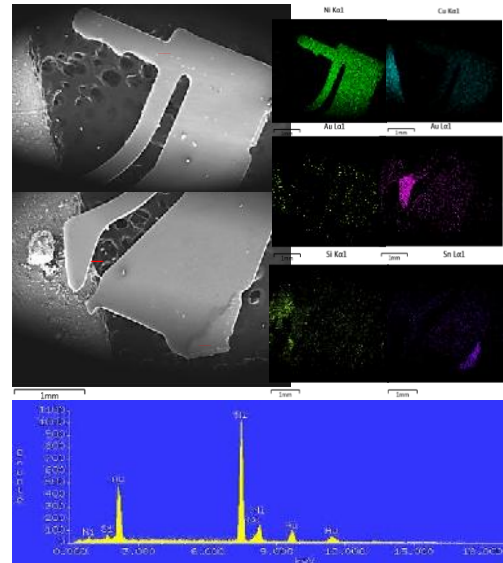


Figura 3. Micrografía, mapeo y espectro EDS de pines de soporte de tarjetas PCI's año 2000.

En los pines de contacto con los componentes de audio y video soportados en la placa madre, la concentración de oro fue mínima y se mantuvo homogénea por todo el área de la pieza, corroborando con el microanálisis una composición oro de 1.4% en peso reportando cantidades de metales base como cobre, níquel, zinc y trazas de estaño (Figura 7).

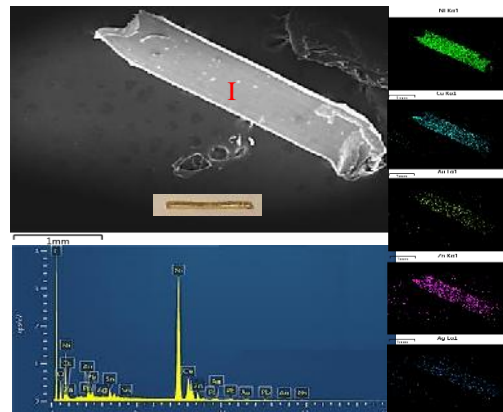


Figura 4. Micrografía, mapeo y espectro EDS de pines de contacto a componentes de audio y video.

En la figura 8 es posible visualizar que la concentración de oro fue insignificante, corroborando así, que la concentración más alta de estos materiales se da en la zona de contacto de la pieza, el microanálisis dio a conocer una composición oro máxima de 1.1% en peso reportando cantidades de metales base como cobre, níquel, zinc y trazas de estaño, cuyos valores se concentran en la base del componente electrónico y disminuyendo la concentración al acercarnos a la zona de contacto.

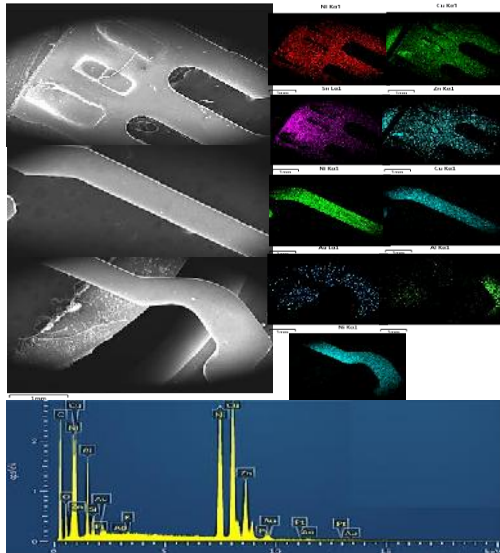


Figura 5. Micrografía, mapeo y espectro EDS de pines de soporte de tarjetas auxiliares de audio y video.

En los *fingers* de tarjetas de memoria de acceso aleatorio (RAM), la concentración de oro fue alta, el análisis se efectuó en dos zonas, esto considerando homogénea la superficie de la placa, donde las concentraciones de Cu, Ni y Au tuvieron el mismo comportamiento creciente hacia la zona de contacto, corroborando con el microanálisis una composición oro máxima de 9.7% en peso reportando cantidades de metales base como cobre y níquel, cuyos valores se concentran distribuidos de igual manera (Figura 9).

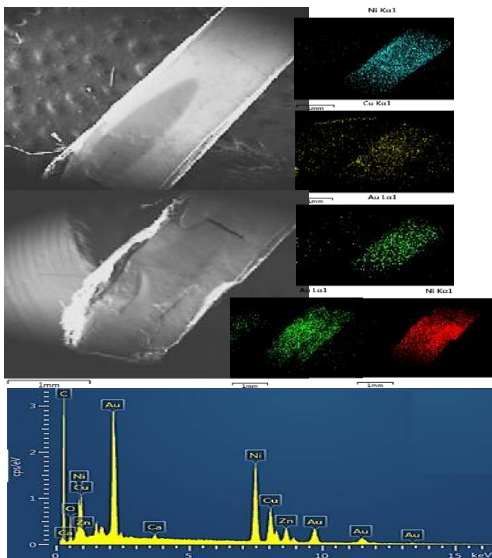


Figura 6. Micrografía, mapeo y espectro EDS de fingers de tarjetas RAM.

En la caracterización efectuada a los pines del soporte de las tarjetas de memoria de acceso aleatorio (RAM), la concentración de oro fue baja, el análisis se efectuó en dos zonas, esto considerando la dificultad de la superficie de la pieza, donde las concentraciones de Cu, Ni, Zn y Au tuvieron el mismo comportamiento creciente hacia la zona de contacto, corroborando con el microanálisis una composición oro máxima de 1.5% en peso reportando cantidades de metales base como cobre y níquel, cuyos valores se concentran distribuidos de igual manera (Figura 10).

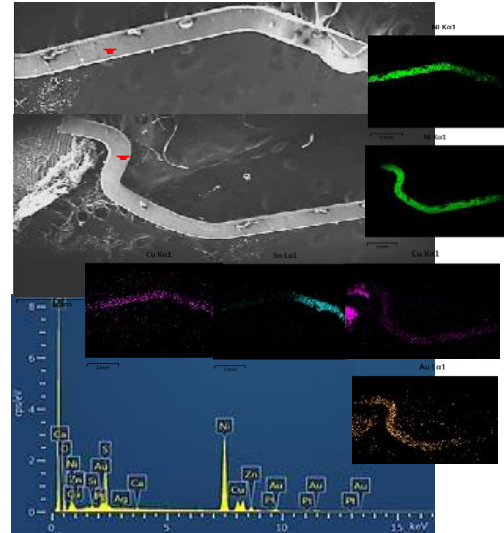


Figura 7. Micrografía, mapeo y espectro EDS de pines de soporte de tarjeta RAM.

De acuerdo a los resultados obtenidos de los análisis por MEB-EDS es posible visualizar la variación en concentración de oro, en cada una de las muestras empleadas considerando la mayor concentración reflejada.

En la figura 11 se presenta la concentración máxima de oro por pieza evaluada, resultado del microanálisis por dispersión de energías de cada uno de los componentes, cabe mencionar que en el análisis se observa la presencia de otros metales de interés, por lo cual es necesario considerar una caracterización adicional cuantitativa.

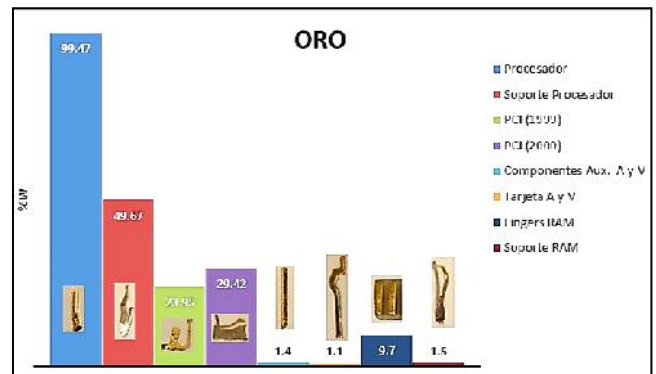


Figura 8. Distribución de la composición de oro en pines de PCI's.

3.2 Difracción de Rayos X

La comparación del patrón de DRX para la muestra de pines procedentes de las placas madre sin pretratamiento, sugiere que los picos en el difractograma, revelan la presencia de oro, cobre y níquel. Corroborando los análisis anteriores, asegurando así la presencia de estos elementos de interés en los pines estudiados.

Los resultados de la fase encontrada se revelan en el espectro de difracción siguiente (Figura 12).

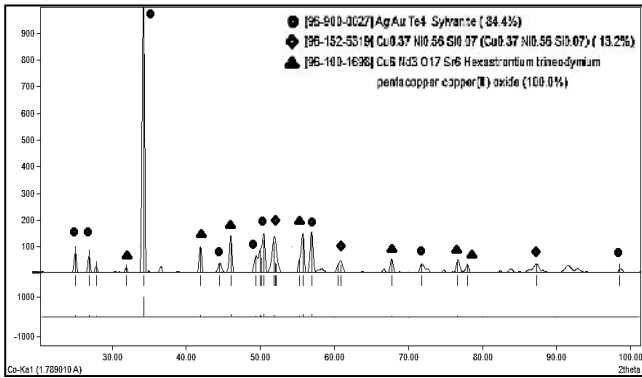


Figura 9. Difractograma de rayos X, en muestra de componentes de la chatarra electrónica.

La información de dicho espectro de difracción se presenta desglosada en la tabla 2, donde se enuncian las fases encontradas para cada pico del espectro, así como el tamaño de cristal para cada fase presente.

Tabla 2. Fases presentes en el análisis de DRX.

PICO	FASE	SISTEMA CRISTALINO	TAMAÑO DE CRISTAL (nm)
●	Silvanita (AgAuTe4)	Monoclínico	5
◆	(Cu _{0.37} Ni _{0.56} Si _{0.07})	Cubica	8
▲	(Cu ₆ Nd ₃ O ₁₇ Sr ₆)	Ortorróbico	4

Utilizando el patrón de difracción anterior (figura 12) se realizó el cálculo del tamaño de grano como se mostró en la tabla 1, que justifica la naturaleza policristalina de las capas de Au y Ag depositadas en un sustrato base.

La presencia del oro en la fase silvanita, presente en los pines de las placas de circuitos impresos de equipos de cómputo, forman una solución sólida de telururo de oro, tiene una suma importancia económica, estos se encuentran asociados al oro nativo o sulfuros con un porcentaje de oro de aproximadamente 25%, buscando mejorar sus propiedades como ductilidad y maleabilidad así como la resistencia al maquinado, en los procesos de la industria electrónica, pero dificultando la recuperación de estos metales con una alta pureza.

Los cálculos para el tamaño de grano fueron realizados empleando la ecuación de Debye-Scherrer, la cual establece que el tamaño de grano es inversamente proporcional al ancho medio del pico máximo de difracción y al coseno del ángulo del pico máximo.








3.3 Espectrofotometría de Plasma de Acoplamiento Inducido

Por medio de esta técnica es posible determinar y cuantificar los elementos presentes en una muestra en un intervalo dinámico lineal de 8 órdenes de magnitud (mg/l). Se basa en el

acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas).

Los resultados mostrados en la tabla 3 presentan las concentraciones en partes por millón (ppm) por cada tipo de pin, correspondientes a los metales de interés en este estudio.

Tabla 3. Concentraciones de Au, Ni y Cu por tipo de pin por ICP.

Muestra	Elemento	Concentración [ppm]
 Pin Procesador	Cu	358.11
	Au	107.25
	Ni	191.16
 Pin Soporte Procesador	Cu	926.29
	Au	6.54
	Ni	36.63
 Pin Soporte Acelerador Graf.	Cu	988.78
	Au	3.80
	Ni	11.30
 Pin soporte PCI	Cu	734.57
	Au	4.50
	Ni	6.00
 Pin de Soporte de Unidades Externas	Cu	752.58
	Au	2.13
	Ni	3.69
 Pin Soporte RAM	Cu	135.95
	Au	50.05
	Ni	8.13
 Conector de Borde	Cu	928
	Au	3.22
	Ni	7.55

Donde podemos señalar que los componentes ricos en oro se encuentran principalmente en el procesador y los soportes de las tarjetas RAM, con valores de oro máximos de 107.25 ppm y 50 ppm respectivamente.

4. Conclusión

Por medio de las técnicas de caracterización efectuadas por MEB-EDS de los circuitos impresos, se determinó el máximo porcentaje de oro en las piezas provenientes del procesador con un 99.43% de Au presente, siendo el principal agente de interés comercial.

Los pines de los circuitos impresos de computadoras se consideran una estructura multielemental, se identificaron las fases monoclínicas, cubica y ortorróbica en forma de teluros de oro y plata, aleaciones de cobre-níquel y cobre-estroncio. Por medio de ICP se logró cuantificar la concentración de oro de cada pieza corroborando la máxima concentración en los pines del procesador siendo esta de 107.2 ppm. Para estudios futuros se considera evaluar técnicas de recuperación de estos metales por electrodeposito e hidrometalúrgicos.

English Summary

Characterization and study of the gold composition present in electronic scrap.

Abstract

The growing production and consumption of electrical and electronic equipment due to new and better technologies, generates equipment with a shorter lifespan, consolidating it as the fastest growing waste stream worldwide and generating environmental and human health problems. Despite its potential negative impact, these wastes contain a large quantity of noble metals, based on the fact that each PCI presents 0.1 to 0.5 grams of gold, compared to an extraction of 1 to 5 grams of gold per ton of ore considering the printed circuit boards that make them up, as a commercially viable secondary source of these resources. Due to this, it is necessary to address research regarding the characterization of these materials, identifying gold-rich components; an exhaustive qualitative, quantitative and semiquantitative characterization was carried out by X-ray diffraction, scanning electron microscopy in conjunction with Energy Dispersion Microanalysis and Induced Coupling Plasma Spectroscopy finding maximum gold concentrations of 99.4% by weight in pins supported in the processor.

Keywords:

Characterization, Electronic scrap, Recycling, Gold.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecemos a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por permitir el desarrollo de este trabajo de investigación y al laboratorio de Metalurgia del área académica de ciencias de la tierra y materiales por brindar los recursos necesarios para este análisis.

Referencias

- Chaverra, D. E., 2011, Metodología para la recuperación de cobre de tarjetas de circuitos impresos de computadoras, Tesis doctoral.
- Cordero, M. C., 2012, Recuperación de Basura Electrónica para apoyo en necesidades educativas especiales, Magister de Ingeniería de Materiales y Procesos.
- Jianzhi S. L., 2016, Printed Circuit Board Recycling: A State of the Art Survey, *IEEE transactions on electronics packaging manufacturing*, 27, 33-42.
- Juárez G., 2007, Cinética de precipitación de plata y oro en los sistemas Ag-CN-S2O4-O2 y Au-S2O3-S2O4-O2, Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales.
- Mesinas, M. A., 2015, Caracterización de placas de circuitos impresos de computadoras por difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB) en conjunción con microanálisis por dispersión de energías (EDS), *Tópicos de investigación en ciencias de la tierra y materiales*, 2-7.
- Montero, R., 2012, Recovery of Gold, Silver, Copper and Niobium from Printed Circuit Boards Using Leaching Column Technique, *Journal of Earth Science and Engineering* 2, 590-595.
- Montiel, J. F., 2012, Caracterización de circuitos impresos vía SEM-EDS y su lixiviación en el sistema O₂-H₂SO₄. Efecto de la temperatura, *Boletín de la Sociedad Química de México*. Vol. 6, 1, 21-23.
- Montiel, J. F., 2013, Recuperación de Au, Cu, Ni Y Zn contenidos en desechos electrónicos. Lixiviación dinámica ácida en el sistema H₂SO₄-O₂. Efecto de la concentración de H₃O⁺, 48° Congreso Mexicano de Química, 7-1, 13-15.
- Montiel, J. F., 2015, Lixiviación dinámica ácida de desechos electrónicos en el sistema H₂SO₄-O₂. Estudio termodinámico de la lixiviación de metales (Cu, Ni y Zn) procedentes de desechos de circuitos impresos por métodos electroquímicos, *Adv. Mater. Res.*
- Ramírez, J. M., 2008, Recuperación de oro a partir de la chatarra electrónica, Tesis de Licenciatura.
- Reyes, P.C., 2013, Recuperación de Cu, Ni y Au contenidos en los desechos electrónicos, vía lixiviación en el sistema H₂SO₄-O₂, Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales., 220-224.
- Rojas, L., 2014, Los Residuos Electrónicos en México y el Mundo, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 27-29.
- Yanhua, Z., 2012, Current status on leaching precious metals from waste printed circuit boards, *Procedia Environmental Sciences* 16, 560–568.