



POTENCIAL EN MÉXICO DE LA RECUPERACIÓN DE METALES A PARTIR DEL RECICLAJE DE TABLEROS ELECTRÓNICOS RESIDUALES

Jaime Gómez-Duran ^a, Zeferino Gamiño-Arroyo ^{a,*}, Fernando Israel Gómez-Castro ^a, Lorena Eugenia Sánchez-Cadena ^b, Tzayam Pérez-Segura ^a

^a Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Col. Noria Alta, Guanajuato, Gto., C.P. 36050, México. e-mail *gaminoz@ugto.mx

^b Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Guanajuato, Calle Juárez 77, Col. Centro, Guanajuato, Gto. C.P. 36000 México.

Resumen

El aumento en el uso de aparatos electrónicos ha traído consigo una demanda cada vez mayor de materia prima para su fabricación; entre estos materiales se encuentran metales como cobre, plata, cobalto, litio y oro. Una de las propuestas que hacen parte de las nuevas políticas gubernamentales enfocadas a alcanzar una economía circular es el reciclaje, para lo cual se requiere un tratamiento adecuado de los residuos. En el presente trabajo se realizó una revisión sobre la minería urbana enfocada en la valorización de los residuos electrónicos de alto valor, tales como computadores personales de mesa y portátiles, teléfonos inteligentes y tabletas electrónicas. Asimismo, se analiza el impacto en la salud humana de algunos compuestos tóxicos presentes en estos residuos, así como el panorama del potencial de desarrollo de los procesos asociados al aprovechamiento y valorización de estos residuos.

Palabras claves: minería urbana, valorización de residuos, residuos electrónicos, reciclaje.



POTENTIAL IN MEXICO FOR THE RECOVERY OF METALS BY RECYCLING OF PRINTED CIRCUIT BOARD (PCB) SCRAP

Abstract

The increase on the use of electronic devices has brought a rising demand for raw materials for their manufacture; among these materials, metals as copper, silver, cobalt, lithium and gold can be mentioned. One of the proposals that are part of the new government policies, focused on achieving a circular economy, is recycling, which requires the adequate treatment of waste. In the present work, a review on urban mining is carried out, focused on the recovery of high-value electronic waste such as personal desktop computers and laptops, smartphones and electronic tablets. Moreover, the impact on human health of some toxic compounds present in these is analyzed. Finally, the potential of the development of associated waste recovery processes is estimated.

Keywords: urban mining, electronic waste, waste recovery, recycling.



1. Introducción

Con el desarrollo de nuevas tecnologías de comunicación y herramientas de trabajo, ha provocado un aumento en la demanda de equipos electrónicos como computadores, teléfonos, aparatos y electrodomésticos inteligentes, estimándose entre 3% y 5% por año (Charles y col., 2017). La presencia de metales pesados (Pb, Sb, As, Cr), así como el consumo de materia prima de metales nobles (Ag, Au, Pd, Pt), de metales bases (Cu, Fe, Al), de metales alcalinotérreos (Ca, Mg), de metales para las baterías (Li, Co) entre otros metales usados en los componentes electrónicos, ha sido un foco de atención, pues se pronostican riesgos de abastecimiento debido a la demanda así como, por problemas geopolíticos, que se han desarrollado entorno a las fuentes de estos metales (Council, 2017; Johnson Matthey Precious Metals Management, 2017; The Silver Institute, 2018). A su vez, por el corto tiempo de vida y las mejoras tecnológicas que provocan una rápida obsolescencia, lo cual promueve un crecimiento en la generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) (Tsydenova & Heyken, 2019), los

cuales representan entre un 3.1% y 5.0% en peso de los residuos sólidos urbanos (RSU) (INEGI, 2013). En 2015 se generaron en México 1.1 megatoneladas de RAEE al año, con una proyección de crecimiento del 17% para el 2026 (Baldé, 2017), reciclándose alrededor del 10% y el resto depositado en rellenos sanitarios y bodegas (INCyTU, 2018). Muchos de los metales de interés como plata, oro, paladio, se encuentran en los tableros electrónicos impresos (PCB por sus cifras en inglés) (Kaya, 2019) el cual representa entre un 0.2 y 0.5% de los RAEE, y entre un 75 a 90% del valor de estos (Kaya, 2016a) y en las baterías de ion litio donde se concentran litio y cobalto, lo que hace urgente el desarrollo de tecnologías de recuperación de metales viables y amigables con el ambiente (Lu & Xu, 2016).

2. Impacto ambiental de los RAEE

Metales pesados como: plomo, mercurio, cadmio, arsénico cromo o contaminantes orgánicos persistentes hace que los RAEE tenga un impacto ambiental negativo, ya que, debido a sus propiedades físicas y



químicas, permanecen y se transportan fácilmente por el agua, aire o especies migratorias, causando daños severos a la salud humana y la fauna. La exposición a dichas sustancias tóxicas en los RAEE puede provocar cáncer de piel o pulmones, efectos negativos en el sistema nervioso y muscular, incremento en la presión sanguínea, irritación de ojos, entre otros padecimientos (Cruz-Sotelo y col., 2017; Ogungbuyi, 2012).

El arsénico produce daños en el cerebro, relacionado también con cáncer de pulmón y piel, así como un veneno para la fauna marina. El cadmio provoca daño pulmonar, hipertensión, daño renal y cáncer, bioacumulándose, éste puede ingresar por tierra o agua. El cromo puede provocar úlceras y cáncer, daños en el estómago y riñones por ingesta, así como daño en las vías respiratorias por inhalación con efectos adversos en la fauna. El mercurio puede provocar daño pulmonar, vómito, diarrea, aumento de presión y con prolongada exposición daño severo al cerebro y riñones, así como malformaciones de fetos, bioacumulándose con facilidad en la fauna acuática. El plomo puede producir anorexia, dolor muscular y cefalea,

disminución en el rendimiento del sistema nervioso, así como cáncer por exposición prolongada. El litio, aunque no produce daño, la inadecuada disposición de las baterías basadas en este metal pueden provocar explosiones por su inflamabilidad (Cruz-Sotelo y col., 2017; Ogungbuyi, 2012). A su vez los compuestos orgánicos polibromados que son retardadores de flama bromados (BFR), entre los utilizados con mayor frecuencia se encuentran: polibromobifenilos (PBBs), éteres difenílicos polibromados (PBDEs) y el tetrabromobisfenol A (TBBPA). El análisis del impacto ambiental debe evaluarse teniendo en cuenta que el tiempo y tipo de exposición, dosis, así como las interacciones que pueden tener con el ambiente expuesto. Los retardantes de flama de bajo peso son de mayor peligro, cuando los residuos son quemados o triturados hasta polvo (Moguel, 2007).

Debido a lo anterior, diversas políticas internacionales han sido enfocadas en el desarrollo de estas tecnologías, como la agenda 2030 ((UN), 2019), con el objetivo de promover la generación de nuevas tecnologías que se puedan implementar de manera tal que, los procesos existentes



tengan un menor impacto ambiental con una producción y consumo responsable, a su vez tengan impactos positivos en la disminución de la pobreza y en el clima, establecido en los objetivos 12 y 13 de la agenda (ONU, 2019). Una solución viable para el problema de abastecimiento de los metales es el reciclaje de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) (Hsu y col., 2019; Kaya, 2016a, 2016b; Mancheri y col., 2018), dado al gran volumen de residuos producidos, se convierten en la segunda fuente de estos recursos (así como de otros materiales), dando origen a la minería urbana (*urban mining*) (Kaya, 2016a) en la economía circular. Diversas políticas han sido consideradas en dirección de facilitar esta transición, desde que los productores hagan más fácil el reúso, desmantelamiento y separación de los componentes de los RAEE, hasta la implementación de la “responsabilidad extendida del productor” haciendo más factible la implementación de nuevas tecnologías en este campo (Serpe, 2018).

3. Tipos de reciclaje

El reciclaje de los residuos electrónicos se ha abordado principalmente de forma mecánica, con procesos pirometalúrgicos (Kaya, 2016a), que se basan en altas temperaturas para la fundición de los metales deseados o hidrometalúrgicos, usando solventes de alta agresividad como el agua regia o cianuro para solubilización de metales (Serpe, 2018), con etapas posteriores para recuperación y separación final de los metales (Kaya, 2016a) como la electrodeposición, cementación, precipitación o adsorción (EPA, 2015; Kaya, 2016b), sin embargo los requerimientos energéticos y de seguridad han hecho de este tipo de tecnologías sean planteadas con cuidado y se promueva la búsqueda de nuevas estrategias con bajos requerimientos energéticos, explorando diversas técnicas tales como la absorción de soluciones de cianuro (Snyders y col., 2012), con otros agentes acomplejantes (Gönen, 2003), solventes orgánicos (Xing & Lee, 2019), líquidos iónicos (LI) (Floreau y col., 2010) y biolixivación (Zhou y col., 2020). Como se esquematiza en la Figura 1 en el cual debe haber una etapa de desmantelamiento que permita separar los



residuos de materiales bases (carcasas, elementos electrónicos grandes) de los PCB y otros componentes.

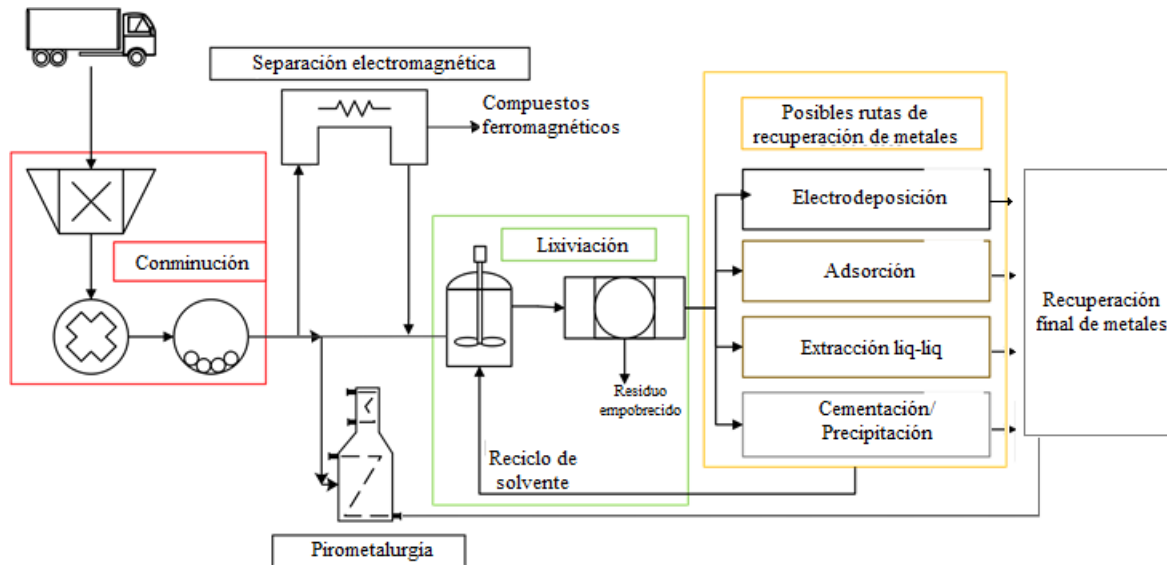


Figura 1. Esquema de la recuperación de valores en metales a partir de residuos electrónicos

4. Panorama de México en generación de RAEE y su tratamiento.

En el caso de México, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) representan un 3.1% en peso de los RSU según el INEGI (2013) siendo para 2016 de aproximadamente 1 MT, con 8.2 kg/habitante (Baldé, 2017) y en 2017 1.1 megatoneladas de RAEE anual, presupuestándose un crecimiento del 17% para el 2026 (Baldé, 2017; González Ulloa y col., 2020). El reciclaje de los RAEE en México abarca alrededor del 10%,

mientras que, 40% permanece almacenado en casas habitación o bodegas y el 50% restante es mandado a rellenos sanitarios (INCyTU, 2018) como se muestra en la Figura 2.

México, desde sus políticas gubernamentales desarrolló y promulgó a nivel nacional la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR; DOF, 2003), con subsecuentes modificaciones como normativa sobre los residuos sólidos y su clasificación, encasillando los residuos



electrónicos dentro de los residuos de manejo especial (RME).

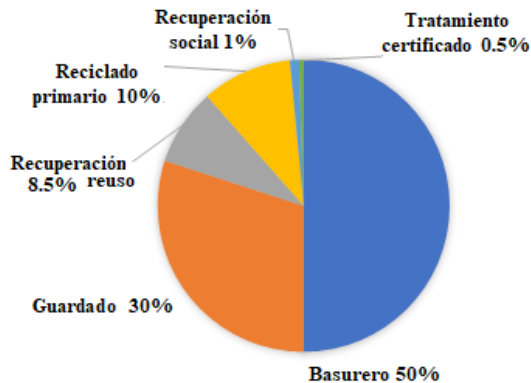


Figura 2. Distribución del tratamiento de residuos electrónicos en México (INCyTU, 2018)

El inventario de residuos electrónicos no es sencillo de obtener, pues se debe revisar los reportes oficiales, reportes de empresas tratadoras (teniendo en cuenta que se contabiliza lo tratado, más no lo total), estimaciones basadas en indicadores económicos, proyecciones, así como cálculos basados en el número de productos y el tiempo de vida útil. En el reporte dado por el Instituto Nacional de Ecología Mexicano (INECC) “*Diagnóstico sobre la generación de basura electrónica en México*” asumieron que los tiempos de vida útil de las computadoras es de cinco años y de los teléfonos móviles tres años; revisaron las cifras de aparatos electrónicos dada por las estadísticas del INEGI, Secretaria de

Hacienda y COFETEL, aproximando una tasa de desecho de 50% (Moguel, 2007). Se hizo un inventario de las importaciones, producto interno y exportaciones, estimándose una baja tasa de contrabando por los actuales tratados. Con dicha información Moguel estimó que: 58300 toneladas de computadores y 1700 toneladas de telefonía móvil residual eran potencialmente desechables, acumulado desde 1996 hasta 2004, y un total de 256000 toneladas que incluyen otros aparatos electrónicos pequeños de telecomunicaciones y tecnología junto a las pantallas en 2005 (INCyTU, 2018), acumulándose en materiales de interés sólo en computadores residuales.

En el *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México* (SEDEMA, 2019) se reportaron 4.8 MT/año de residuos sólidos en actividades cotidianas y 0.22M T/año en centros de alto tránsito y comercio para un total de 5 MT/año, de los cuales 2.9% son RAEE. Según el INEGI 14.2% de los RSU son generados en la Ciudad de México, lo que permite de forma indirecta tener un cálculo aproximado de 41 MT/año a nivel nacional de los cuales 3.1% son RAEE siendo 1.27 MT/año. De los residuos anteriormente mencionados,



se han seleccionado solamente los tableros electrónicos impresos (TCI), puesto que, es donde se concentran los metales de alto valor como oro, paladio, platino y plata (Park & Fray, 2009; Zhang & Forssberg, 1999), siendo los TCI de los teléfonos móviles y computadores personales los de mayor contenido de estos metales, considerándose de alto valor (Goosey & Kellner, 2003; Park & Fray, 2009; Quan y col., 2010; Zhang y col., 2012), así como de metales pesados como plomo o cadmio que pueden causar un daño sino son manejados adecuadamente (Oliveira y col., 2010). En el plan de manejo de residuos de Índigo proambiental SAPI de C (Índigo Proambiental, 2014) se reportaron datos de las importaciones y exportaciones de

aparatos electrónicos, sobre volumen de importación, procedencia y valores netos del comercio de dichos equipos. En el caso de 2008 a 2010 se presentaron 23 millones de unidades de computadoras portátiles, 25 millones de computadores personales y 250 millones de teléfonos móviles. Con dicha información y la información del número de aparatos electrónicos, se puede realizar una estimación del número de tarjetas residuales siguiendo la metodología de Moguel (Moguel, 2007), así como su peso total, siguiendo esta metodología se logró estimar a nivel nacional el número de unidades de equipos electrónicos, así como el peso de tableros residuales presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Masa total de PCB residuales de alto valor (Índigo Proambiental, 2014).

AÑO	ESTIMATIVO DE MILLONES ACUMULADOS DE UNIDADES DE		
	Computadoras portátiles	Computadoras de escritorio	Teléfonos móviles y Tablets
2012	12.6	13.6	115
2013	13.9	15.1	117
2014	15.4	16.7	110
2015	16.9	18.3	150
2016	18.5	20.1	160
2017	20.2	21.9	180
2018	21.9	23.8	200
Masa unitaria PCB(g)*	43	50	15
Masa promedio PCB (Tm)/año	94.303	118.79	3414.36

Elaborada para el presente estudio a partir de (CV, 2014; INEGI, 2018; SEDEMA, 2019), * Con datos de (Leiton, 2021; Moguel, 2007)



5. Contenido de sustancias de interés en los tableros de circuito impreso (TCI)

En materia de la concentración de metales en dichos residuos, esta puede llegar a ser muy variada, debido a la heterogeneidad de las fuentes, dado que cada fabricante tiene su propia patente de ensamblaje, así

como de diseño electrónico, cableado y nuevos diseños cada año, lo que provoca poca uniformidad y estandarización por lo que se presenta en la Tabla 2 se presenta la composición de metales con intervalos de concentraciones reportados en literatura, y procesos alternativos a los procesos pirometalúrgicos para su recuperación.

Tabla 2. Rango de composición en metales de interés de los PCB residuales.

% P/P	MIN	MAX	Precio de Mercado	Procesos de recuperación
%Cu	10	40	8706-10755 USD/Tm	Lixiviación ácida/Biolixiviación
% Al	4.81	10	2500-3840 USD/Tm	Separación electrostática/ corrientes Edgy
% Fe	2.51	15	95 – 225 USD/Tm	Separación ferromagnética Lixiviación ácida
% Sn	1.5	3.87	30989-48050 USD/Tm	Lixiviación/Precipitación
%Pb	0.8	2.34	2060 – 2490 USD/Tm	Lixiviación ácida/Precipitación
%Sb	0.15	0.35	13350 USD/Tm	Lixiviación ácida/Precipitación
Ppm				
Ag (ppm)	110	3301	20.8 – 26.5 USD/Oz	Lixiviación con acomplejante. Extracción líquido/líquido Precipitación/electrodepósito
Au (ppm)	80	1000	1729 – 2050 USD/Oz	
Pt (ppm)	4.6	30	920 – 1155 USD/Oz	
Pd (ppm)	50	294	1850 – 3175 USD/Oz	
Nd (ppm)	10	104	90-223 USD/kg	
Ta (ppm)	500	1710	160 – 260 USD/kg	

Elaborada con base en (Chen y col., 2021; Economics, 2022; Jadhao y col., 2016; Korf y col., 2019; Quan y col., 2010).

En el caso de los metales pesados y elementos peligrosos, se presentan en la Tabla 3 los diferentes metales de interés ambiental, destacando los usos tanto en equipos electrónicos como en los tableros de circuito impreso residual (TCIR), así como los métodos de remoción o

recuperación dependiendo de la concentración y su costo, siendo de interés económico: Ni, Ga, Cd Pb. En el caso de los polímeros y los retardantes de flama hace complejo su procesamiento, habiendo pocos avances en el reciclaje de estos polímeros, habiendo un



reprocesamiento mecánico de dichos plásticos (Kaya, 2016a).

Tabla 3. Rango de composición en metales pesados y elementos peligrosos de los PCB residuales.

Metal	Usos	Usos en TCI	composición en TCI	Métodos* de remoción o recuperación
Pb/PbO	Monitores TC Tubos fluorescentes Cableado Baterías solares	Soldadura Cableado	0-8%	Lixiviación Precipitación (Torres & Lapidus, 2017)
Hg/Hg O	Tubos fluorescentes Baterías alcalinas Interruptores Sensores, LCD	Sensores	0-100 ppm	Tratamientos de oxido/reducción Estabilización (Lee y col., 2017; Torres y col., 2018)
Cr	Cromado	Cromado	NA	
Ba	Vidrios, Monitores	Conexión eléctrica	150-500 ppm	Lixiviación Cristalización (Su y col., 2014)
Ni Cd	Baterías recargables Fluorescente	Pins de conexión Resistencias chips Detectores infrarrojos Semiconductores	126	Remoción: Precipitación Absorción en resinas iónicas Recuperación Lixiviación ácida o básica (Coman y col., 2013)
As Ga Sb	LEDs, Diodos	Retardantes de flama Fotoceldas	15.2-429 ppm 0-89 ppm 5000 ppm	Absorción / Intercambio iónico Reducción pirometalúrgica(Karlsson y col., 2018)
Br		Retardantes de flama	No cuantificado	

*La remoción o recuperación de los metales depende principalmente de la concentración de los metales y de su precio en mercado. Elaborada con base en (Kaya, 2019; Korf y col., 2019).

6. Estimación de valores por metal de los tableros de circuito impreso (TCI)

A partir de los datos, se calculó el valor mínimo y máximo de mercado según la ecuación (1)



$$V_{metal} = m_{metal}v_{metal} \quad (1)$$

Donde m_{metal} es la masa de metal en Tm contenida en los TCIR, v_{metal} valor de metal en el mercado por Tm de metal, y V_{metal} es el valor del metal contenido en 1 Tm de TCIR.

Y con la masa anual promedio generada $m_{TCIR-año}$ y el valor promedio de metal contenido en los TCIR \bar{V}_{metal} , se calcula

el valor potencial total por año de dichos metales, en este caso presentados en la Tabla 4 para los equipos electrónicos computadores, teléfonos inteligentes y tabletas electrónicas estimados y presentados en la Tabla 1.

$$V_{anual} = m_{TCIR-año}\bar{V}_{metal} \quad (2)$$

Tabla 4. Valor de mercado mínimo y máximo de los metales por TCIR y valor total por TCIR generado por año de equipos electrónicos como computadores, teléfonos inteligentes y tabletas electrónicas

Especie	Valor mínimo USD/Tm de TCIR	Valor máximo USD/Tm de TCIR	Valor Promedio Total 10 ⁶ USD
Cu	870.82	4303.42	9.385
Al	120.25	384.00	0.915
Fe	2.38	33.75	0.066
Sn	464.95	1859.95	4.217
Pb	16.48	58.27	0.136
Sb	20.03	46.73	0.121
Nd	0.90	23.19	0.044
Ag	80.71	2421.94	4.539
Au	4879.10	72311.70	140.003
Pt	149.28	1222.24	2.488
Pd	3262.85	32926.52	65.638
Ta	80.00	444.60	0.951
Total	9947.75	116036.30	228.501

En el caso de metales como Ni, As, Cr, Ga no son incluidos en la evaluación económica, así como el material polimérico que contiene los retardantes de flama en base a bromo, pero que, deben tenerse en cuenta en un proceso de remoción para evitar su liberación no controlada a los lugares de disposición final.

Conclusiones

El incremento de los residuos electrónicos representa una fuente prometedora para México de metales bases como cobre, aluminio, de metales nobles (oro, plata, paladio y platino) y tierras raras (tantalio, neodimio), y evitar posibles riesgos para la salud humana y el medio ambiente (plomo,



antimonio, mercurio) si no son tratados correctamente El cual puede llegar a representar 228 millones de dólares en bruto teniendo en cuenta la generación de tarjetas electrónicas residuales generadas por año. Es necesario desarrollar esquemas de manejo de RAEE, debido a que estos contienen valores de metales, pero contienen una carga de metales pesados y compuestos orgánicos que, al momento de ser tratados indebidamente como su quema, pueden generar emisiones de gases tóxicos lo que provocaría aumento de enfermedades en la población aledaña a las plantas tratadoras. De igual manera se deben auspiciar políticas de promoción de clasificación y reciclaje especialmente de RAEE, debido a que esta reduciría en gran medida el derrame descontrolado de compuestos tóxicos, así como la indebida exposición en hogares y lugares de trabajos a dichos residuos, además reduce el consumo de materiales vírgenes en la fabricación de los equipos electrónicos. Es importante mencionar que se debe realizar un estudio logístico con los grandes generadores de RAEE y lugares de recolección para hacer más eficiente el proceso, así como aumentar su rentabilidad.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la DCNE de la Universidad de Guanajuato, así como al CONACYT por su apoyo y permitir el desarrollo del presente trabajo.

Referencias bibliográficas

- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *The Global E-waste Monitor 2017 Quantities, Flows, and Resources*. (2019). Recuperado el 15 de enero de 2022, de https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste_Monitor_2017__electronic_single_pages_.pdf
- Charles, R. G., Douglas, P., Hallin, I. L., Matthews, I., & Liversage, G. (2017). An investigation of trends in precious metal and copper content of RAM modules in WEEE: Implications for long term recycling potential. *Waste Management*, 60, 505-520.
- Chen, Y., Liang, S., Xiao, K., Hu, J., Hou, H., Liu, B., Yang, J. (2021). A cost-effective strategy for metal recovery from waste printed circuit boards via crushing pretreatment combined with pyrolysis: Effects of particle size and pyrolysis temperature. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124505.
- Coman, V., Robotin, B., & Ilea, P. (2013). Nickel recovery/removal from industrial wastes: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 229-238.
- Council, T. W. G. (2017). *Gold Demand Trends 2016*. Recuperado el 22 de enero de 2020, de <https://www.gold.org/goldhub/research/g>



old-demand-trends/gold-demand-trends-full-year-2016/technology

Cruz-Sotelo, S. E., Ojeda-Benítez, S., Jáuregui Sesma, J., Velázquez-Victorica, K. I., Santillán-Soto, N., García-Cueto, O. R., Alcántara, C. (2017). E-Waste Supply Chain in Mexico: Challenges and Opportunities for Sustainable Management. *Sustainability*, 9(4), 503.

EPA, (2015). *Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures*. Recuperado el 28 de agosto de 2022, de https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/methodolgy_document_for_selected_municipal_solid_waste_products.pdf

Florea, A., Petica, A., Anicăi, L., & Vişan, T. (2010). Preliminary studies of silver coatings formation from choline chloride based ionic liquids [Bulletin]. *UPB Scientific Bulletin Series B*, 72(2), 115-126.

Gönen, N. (2003). Leaching of finely disseminated gold ore with cyanide and thiourea solutions. *Hydrometallurgy*, 69(1), 169-176.

Goosey, M., & Kellner, R. (2003). Recycling technologies for the treatment of end of life printed circuit boards (PCBs). *Circuit World*, 29(3), 33-37.

Hsu, E., Barmak, K., West, A. C., & Park, A.-H. A. (2019). Advancements in the treatment and processing of electronic waste with sustainability: a review of metal extraction and recovery technologies. *Green Chemistry*, 21(5), 919-936.

INCyTU. (2018). *Residuos Electrónicos*. Ciudad de México. Recuperado el 27 de abril de 2021, de <https://www.foroconsultivo.org.mx/INCy>

[TU/documentos/Completa/INCYTU_18-008.pdf](https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/18-008.pdf)

Índigo Proambiental (2014). *Plan de manejo de residuos de aparatos electrónicos y eléctricos RAEE*. Recuperado el 28 de agosto de 2022, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/190023/Plan_de_Manejo_de_Residuos_de_Aparatos_electronicos_y_electricos_RAEE.pdf

INEGI (2013). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales, (CNGMD) Módulo 6: Residuos Sólidos Urbanos*. Recuperado el 28 de agosto de 2022, de <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2013/>

INEGI. (2018). *Basura*. Recuperado el 15 de Agosto de 2021, de <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/ambiente/basura.aspx?tema=T>

Jadhao, P., Chauhan, G., Pant, K. K., & Nigam, K. D. P. (2016). Greener approach for the extraction of copper metal from electronic waste. *Waste Management*, 57, 102-112.

Karlsson, T., Forsgren, C., & Steenari, B.-M. (2018). Recovery of Antimony: A Laboratory Study on the Thermal Decomposition and Carbothermal Reduction of Sb(III), Bi(III), Zn(II) Oxides, and Antimony Compounds from Metal Oxide Varistors. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(2), 194-204.

Kaya, M. (2016a). Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management*, 57, 64-90.

Kaya, M. (2016b). Recovery of Metals from Electronic Waste by Physical and Chemical Recycling Processes. *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*, 110, 259 - 270.

Kaya, M. (2019). Electronic Waste and Printed Circuit Board Recycling



- Technologies. Cham: Springer International Publishing.
- Korf, N., Løvik, A. N., Figi, R., Schreiner, C., Kuntz, C., Mähltz, P. M., Rösslein, M., Wäger, P., & Rotter, V. S. (2019). Multi-element chemical analysis of printed circuit boards – challenges and pitfalls. *Waste Management*, 92, 124-136.
- Johnson Matthey Precious Metals Management (2017). *PGM Market Report MAY 2017: Summary of Platinum Supply & Demand in 2016*. Recuperado el 28 de agosto de 2022 de <https://dokumen.tips/documents/pgm-market-report-may-2017-johnson-market-reportspgm-market-report-may-2017.html?page=1>
- Lee, W. R., Eom, Y., & Lee, T. G. (2017). Mercury recovery from mercury-containing wastes using a vacuum thermal desorption system. *Waste Management*, 60, 546-551
- Leiton. (2021). *Calculation of printed circuits weight for standard boards, multilayer and aluminum PCBS*. Recuperado el 14 de septiembre de 2021 de <https://www.leiton.de/leiton-tools-weight-calculation.html>.
- Lu, Y., & Xu, Z. (2016). Precious metals recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 28-39.
- Mancheri, N. A., Sprecher, B., Deetman, S., Young, S. B., Bleischwitz, R., Dong, L., Klejin, R., & Tukker, A. (2018). Resilience in the tantalum supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 56-69.
- Moguel, G. J. R. (2007). *Diagnóstico sobre la generación de residuos electrónicos en México*. Ciudad de Mexico
- Ogunbuyi, O., Nnorom, I. C., Osibanjo, O., & Schluep, M. (2012). *e-Waste Country Assessment Nigeria*. Recuperado el 28 de agosto de 2022, de http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/eWaste/EwasteAfrica_Nigeria-Assessment.pdf.
- Oliveira, P., Cabral, M., Nogueira, C., & Margarido, F. (2010). Printed Circuit Boards Recycling: Characterization of Granulometric Fractions from Shredding Process. *Materials Science Forum*, 1434-1439.
- ONU. (2019). *La Agenda para el Desarrollo Sostenible Agenda 2030 "La Década de Acción"*. Recuperado el 15 de marzo de 2022, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- Park, Y. J., & Fray, D. J. (2009). Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, 164(2), 1152-1158.
- Quan, C., Li, A., Gao, N., & dan, Z. (2010). Characterization of products recycling from PCB waste pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89, 102-106.
- SEDEMA. (2019). *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México*. Recuperado el 28 de agosto de 2022, de https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/InventarioDeResiduosSolidosDeLaCiudadDeMexico_2019.pdf
- Serpe, A. (2018). Green chemistry for precious metals recovery from WEE. En F. Vegliò e I. Birloaga (Eds.), *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling* (pp. 271-332). Duxford: Woodhead Publishing.
- Snyders, C.A., Mpinga, C. N., Bradshaw, S. M., Akdogan, G., & Eksteen, J. J. (2012). The adsorption and elution of platinum group metals (Pt, Pd, and Au) from cyanide leach solutions using activated carbon. *The Southern African*



Institute of Mining and Metallurgy. Recuperado el 28 de agosto de 2022 de <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/02/The-adsorption-and-elution-of-platinum-group-metals-Pt-Pd-and-Au-from-cyanide-leach-solutions-using-activated-carbon.pdf>

Su, C.-C., Reano, R. L., Dalida, M. L. P., & Lu, M.-C. (2014). Barium recovery by crystallization in a fluidized-bed reactor: Effects of pH, Ba/P molar ratio and seed. *Chemosphere*, 105, 100-105.

González Ulloa, Y., García, F., & Manske, J. (2020). *Consumo sustentable y reciclaje de residuos electrónicos: México y Alemania*. Ciudad de Mexico: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

The Silver Institute. (2018). *World Silver Survey 2017*. Recuperado el 26 de marzo de 2022, de <https://www.silverinstitute.org/WSS2017.pdf>

Torres, R., & Lapidus, G. T. (2017). Closed circuit recovery of copper, lead and iron from electronic waste with citrate solutions. *Waste Management*, 60, 561-568.

Torres, R., Segura-Bailón, B., & Lapidus, G. T. (2018). Effect of temperature on copper, iron and lead leaching from e-waste using citrate solutions. *Waste Management*, 71, 420-425.

Trading Economics (2022). *Metals Commodities*. Recuperado el 22 de junio de 2022, de www.tradingeconomics.com

Tsydenova, N., & Heyken, M. (2019). Formal and Informal E-waste Collection in Mexico City. En A. Pehlken, M. Kalverkamp, & R. Wittstock (Eds.). *Cascade Use in Technologies 2018* (pp. 30-37) Berlin: Springer.

Xing, W., & Lee, M. S. (2019). A Process for the Separation of Noble Metals from

HCl Liquor Containing Gold(III), Palladium(II), Platinum(IV), Rhodium(III), and Iridium(IV) by Solvent Extraction. *Processes*, 7, 243.

Zhang, S., & Forssberg, E. (1999). Intelligent Liberation and classification of electronic scrap. *Powder Technology*, 105(1), 295-301.

Zhang, Y., Liu, S., Xie, H., Zeng, X., & Li, J. (2012). Current Status on Leaching Precious Metals from Waste Printed Circuit Boards. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 560-568.

Zhou, G., Zhang, H., Yang, W., Wu, Z.,

Liu, W., & Yang, C. (2020). Bioleaching assisted foam fractionation for recovery of gold from the printed circuit boards of discarded cellphone. *Waste Management*, 101, 200-209.