

enerLAC

Revista de
Energía de
Latinoamérica
y el Caribe

**Colectores solares de placa
plana en Uruguay**

**Eficiencia en la producción
de energía eléctrica,
Bolivia.**

**Análisis de dos tipos de
protecciones solares en
Uruguay.**

**Instalación solar de un
proceso productivo,
Argentina.**

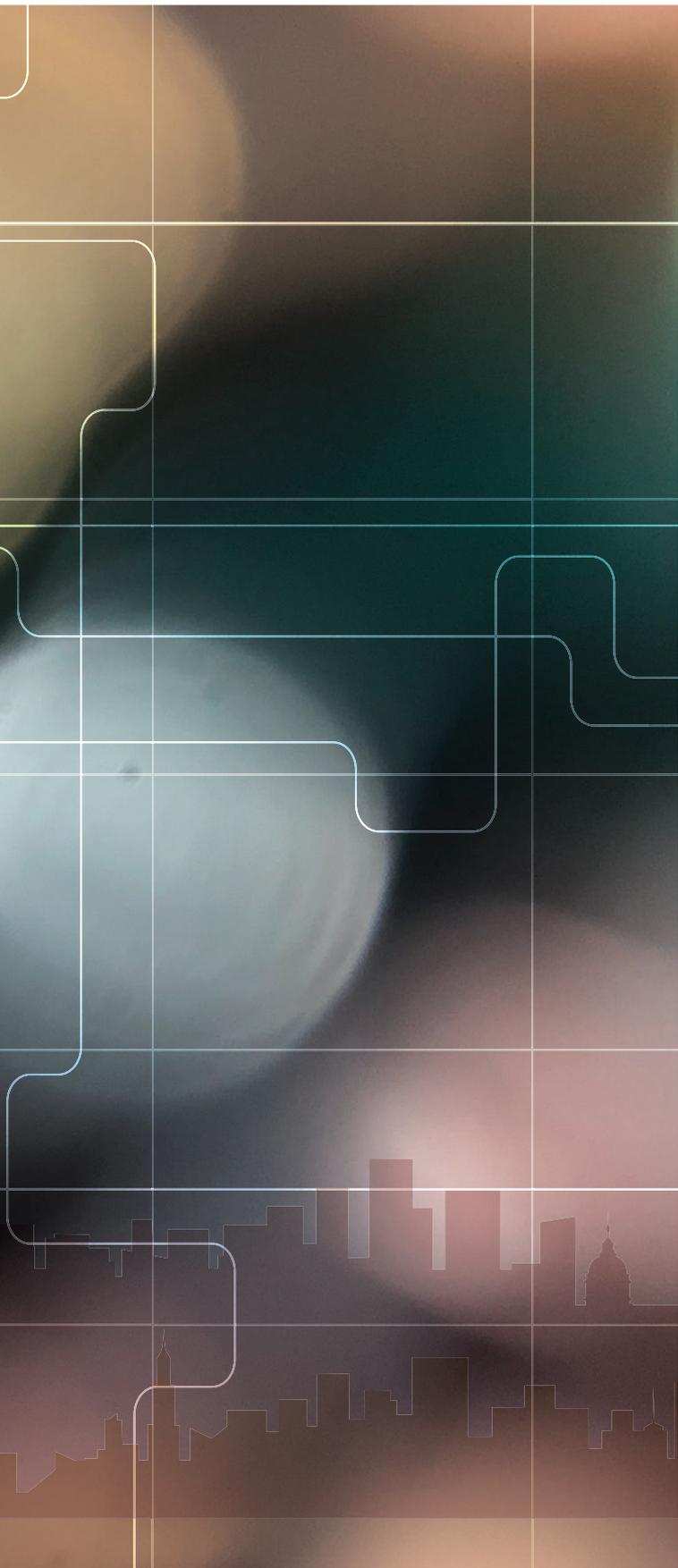
**Permeabilidad al aire
de edificios en Uruguay.**

**Catalizadores para
producción de gas natural.**

**Residuos eléctricos
y electrónicos.**

**Cadena productiva de la
energía y emisión de GEI,
Argentina.**

**Hacia la justicia energética
en México.**



COMITÉ EDITORIAL

Alfonso Blanco. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Ecuador.*

Pablo Garcés. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Ecuador.*

Marcelo Vega. *Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM). Uruguay.*

COMITÉ AD-HONOREM

Andrés Romero C.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Leonardo Beltrán.
Institute of the Americas. México.

Manlio Coviello.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Mauricio Medinaceli.
Investigador independiente. Bolivia.

Ubiratan Francisco Castellano.
Investigador independiente. Brasil.

COORDINADORES DE LA EDICIÓN

DIRECTOR GENERAL
Alfonso Blanco

DIRECTORES EJECUTIVOS
Pablo Garcés
Marcelo Vega

COORDINADORA DE PRODUCCIÓN
Blanca Guanocunga. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).*

COLABORADORES

Raquel Atiaja. *Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).*

Ana María Arroyo. *Diseño y diagramación.*

REVISORES

Aldo Delgado Acevedo.

Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Perú.

Alvar Carranza.

Universidad de la República (UdelaR).

Centro Universitario Regional del Este, CURE, Sede Maldonado.

Departamento de Ecología y Gestión Ambiental. Uruguay.

Augusto Manuel Durán.

Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Perú.

Claudia Alejandra Pilar.

Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Argentina.

Daniela Flores Ramírez.

Investigadora independiente. México.

Guillermo Garrido.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Argentina.

Gustavo Figueredo.

Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) Argentina.

Henry Milton Espada Romero.

Universidad Pública de El Alto. Bolivia.

José Ricardo Sánchez Martínez.

Investigador independiente. México.

Luis Felipe Gómez Fernández.

Ministerio de Energía y Minas. Perú.

Manuel Enrique Chacón Morales.

Empresa Propietaria de la Red S. A. Costa Rica.

Marco Antonio Flores Barahona.

Universidad Nacional Autónoma de Honduras.

Instituto de Investigación en Energía. Honduras.

Marco Daniel Silva Ramos.

Escuela Politécnica Nacional (EPN). Ecuador.

Maxime Le Bail.

Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente. México.

Pedro Andrés Galione Klot. *Universidad de la República*

(UdelaR). Facultad de Ingeniería. Instituto de Ingeniería

Mecánica y Producción Industrial. Uruguay.

Rafael Bernardi.

Universidad de la República (UdelaR). Uruguay.

Rodrigo Alonso Suárez. *Universidad de la República (UdelaR).*

Facultad de Ingeniería. Uruguay.

Rolando Madriz-Vargas. *Universidad Nacional. Laboratorio*

Energía Solar. Departamento de Física. Costa Rica.

© Copyright Organización Latinoamericana de Energía
(OLADE) 2020. Todos los derechos reservados.

ISSN: 2602-8042 (Impresa)

ISSN: 2631-2522 (Electrónica)

Dirección: Av. Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y

Fernández Salvador.

Quito - Ecuador

Página web Revista ENERLAC: <http://enerlac.olade.org>

Página web OLADE: www.olade.org

Mail ENERLAC: enerlac@olade.org

Teléfonos: (+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995

Diseño de la portada y contraportada Ana María Arroyo.

NOTA DE RESPONSABILIDAD DE CONTENIDO

Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad de los autores y no comprometen a las organizaciones mencionadas.



RESIDUOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE): IMPACTO SOCIAL, AMBIENTAL, GESTIÓN Y METODOLOGÍAS SOBRE SU MANEJO

*WASTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC DEVICES (WEEE):
SOCIAL, ENVIRONMENTAL IMPACT, MANAGEMENT AND
METHODOLOGIES ON ITS HANDLING*

Dulce Kristal Becerra Paniagua ¹, Araceli Hernández Granados ², Evelyn Betsabe Díaz Cruz ³,
Karla Graciela Cedano Villavicencio ⁴, Horacio Martínez Valencia ⁵

Recibido: 18/03/2020 y Aceptado: 14/08/2020
ENERLAC. Volumen IV. Número 2. Diciembre, 2020 (108 - 131)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)

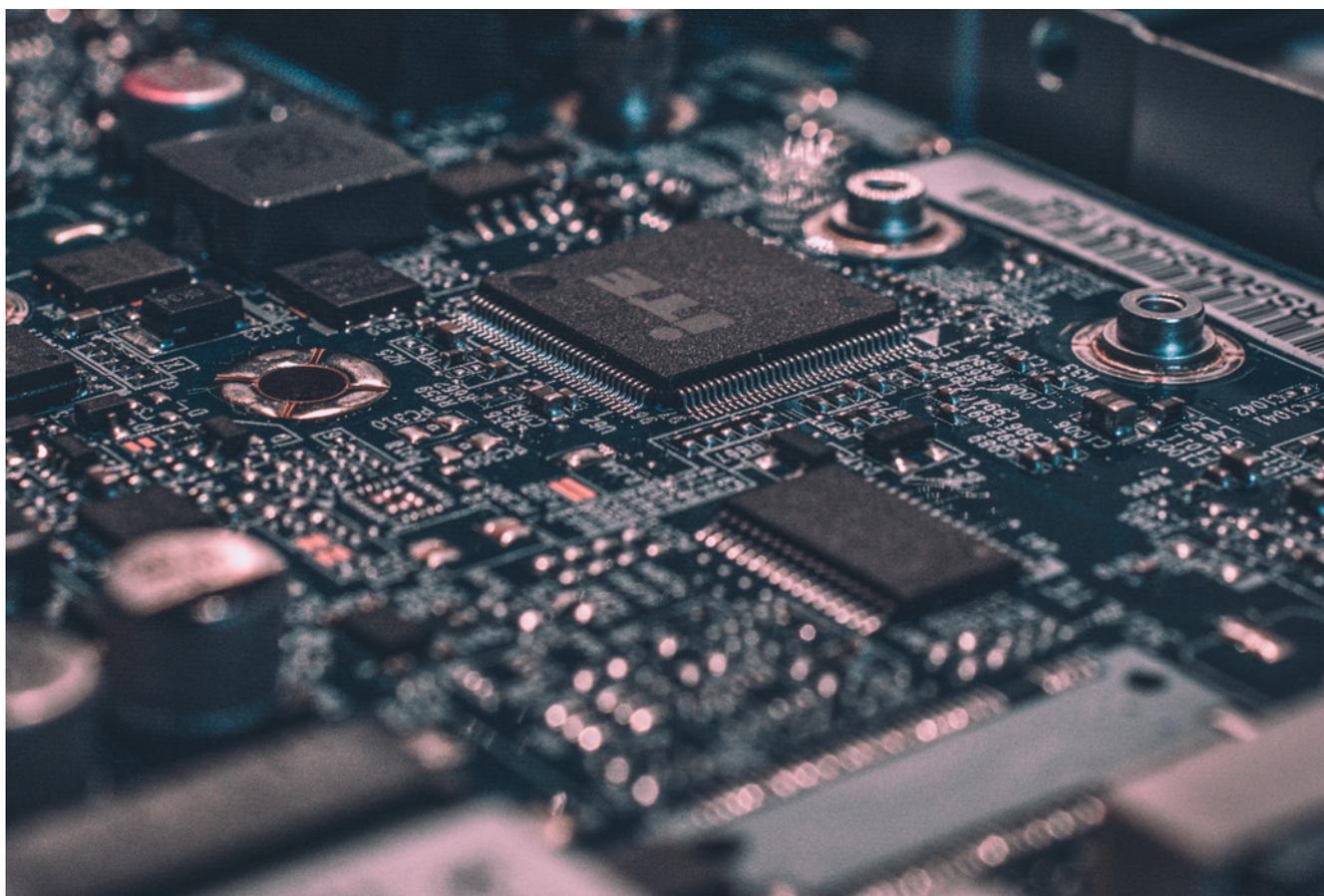


Foto de Alexander Debiève de Unsplash.

RESUMEN

A medida que el mercado de la tecnología continúa evolucionando, el flujo de residuos de dispositivos eléctricos y electrónicos (RAEE) generados pueden constituir una amenaza ambiental y social, debido en gran parte al manejo inadecuado, al servicio insuficiente de recolección de estos residuos y a la desinformación existente sobre el tema. En este artículo se presenta una revisión sistemática de la literatura publicada sobre los RAEE, incluyendo información sobre su generación, destino y metodologías ambientalmente amigables que se han propuesto para su gestión-reciclaje, así como sobre impactos ambientales y en la salud derivados de los RAEE y su manejo. Esta revisión tiene el propósito de sensibilizar a la población sobre el peligro de un tratamiento inadecuado de los RAEE, y a su vez considerar la implementación de estrategias de gestión y acciones a tomar, a través de procesos de reciclaje amigables con el medio ambiente. Las primeras menciones de los RAEE en la producción científica datan de 1996, evidenciándose que el tópico ha seguido en constante crecimiento hasta el 2019, cuando se publicaron 735 documentos. Las categorías con mayor número de documentos donde se ha generado mayor conocimiento y aportaciones científicas de alto impacto destacan las enfocadas al medio ambiente o a la sustentabilidad energética, así como las áreas de metalurgia, química, eléctrica y de combustibles fósiles. Además, se presenta el mapeo de los desechos electrónicos en millones de toneladas que se produce mundialmente y se muestran las regiones que envían RAEE a otros países en su mayoría en forma ilegal. Por otra parte, el reciclaje de RAEE es un proceso complicado, pero con un alto potencial para generar una economía circular verde.

Palabras clave: RAEE, ODS, Basura Electrónica, Reciclaje, Electroquímica, Recuperación de Metales.

1 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM).
dkbp@ier.unam.mx
<http://orcid.org/0000-0003-0471-7044>

2 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
Instituto de Ciencias Físicas (ICF-UNAM).
aracelih@icf.unam.mx
<http://orcid.org/0000-0001-9439-5362>

3 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM).
ebdc@ier.unam.mx
<http://orcid.org/0000-0002-3219-129X>

4 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM).
kcedano@ier.unam.mx
<http://orcid.org/0000-0002-8102-7226>

5 Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
Instituto de Ciencias Físicas (ICF-UNAM).
hm@icf.unam.mx
<http://orcid.org/0000-0002-0695-3457>

ABSTRACT

As the technology market continues to evolve, the flow waste from the electrical and electronic devices (WEEE) generated may constitute an environmental and social threat, due in large part to the inadequate management of these wastes, as well the insufficient collection services, and the existing disinformation on this topic. In this article its present a systematic review of the literature published about WEEE, including information on their generation, destination and environmentally friendly methodologies that have been proposed for its management-recycling, as well as on environmental and health impacts derived from WEEE and its handling. This review aims to sensitize the population about the danger of inadequate treatment of WEEE and in turn to consider the implementation of management strategies and actions to be taken for these, through environmentally friendly recycling processes. The first mentions of WEEE in scientific production date from 1996, evidencing that the topic has continued to grow steadily until 2019, when 735 documents were published. The categories with the greatest number of documents where the greatest knowledge and high-impact scientific contributions have been generated include those focused on the environment or energy sustainability, as well as the areas of metallurgy, chemistry, electricity and fossil fuels. In addition, the mapping of electronic waste produced in millions of tons that is produced worldwide is presented and the regions that send WEEE to other countries, mostly illegally, are shown. On the other hand, the recycling of WEEE is a complicated process, but with a high potential to generate a green circular economy.

Keywords: WEEE, ODS, Electronic Waste, Recycling, Electrochemistry, Metal Recovery.

INTRODUCCIÓN

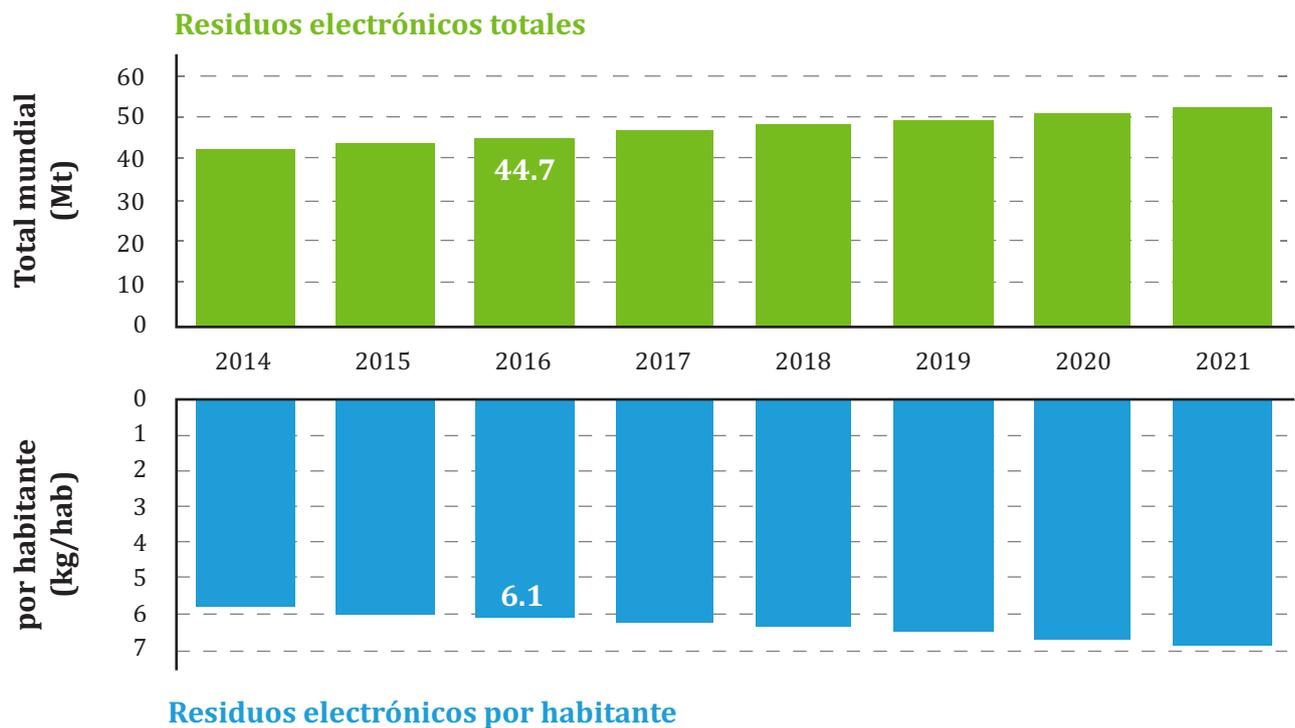
Se definen como RAEE a los residuos o desechos de aparatos eléctricos y electrónicos, o WEEE por sus siglas en inglés (*Waste Electrical and Electronic Equipment*) a cualquier aparato eléctrico o electrónico cuyo periodo de vida útil ha concluido. Los dispositivos eléctricos o electrónicos (DE) son por definición aquellos que contienen circuitos y/o componentes eléctricos o que para su funcionamiento necesitan corriente eléctrica, campos electromagnéticos o baterías (Blaisdell-Vidal, 2019). Los RAEE son generados cuando el usuario decide dejar de utilizar sus DE como resultado de la creciente demanda de nuevos productos, falla física, las constantes actualizaciones o la llamada obsolescencia programada (problemas de compatibilidad) (Ongondo et al., 2011). Por ejemplo, en 1992 la vida útil (EoL, *End of Life*, en inglés) de las computadoras personales (PC, personal computer, en inglés) era en promedio de 4.5 años, esta decreció a 3 años en 1999 y pasó a ser de sólo 2 años en el 2005 (Culver, 2005; Widmer et al., 2005). Entre los RAEE más generados se encuentran teléfonos celulares, computadoras, impresoras, televisores, tabletas, paneles fotovoltaicos, refrigeradores, entre otros más (Cucchiella et al., 2015; Wong et al., 2007). Esto se debe en gran parte al deseo de los consumidores por adquirir los modelos más recientes en materia tecnológica.

Datos recientes informan que anualmente en el mundo se generan de 20 a 50 millones de toneladas aproximadamente de estos residuos (Tuncuk et al., 2012). Tan solo en el 2016 se generaron 44.7 millones de toneladas métricas (Mt) de desechos, que significa 6.1 kilogramos por habitante en el planeta (kg/hab), lo cual equivale al peso de 9 pirámides de Giza o 4,500 torres Eiffel; y se estima que esta cifra pueda incrementar a 52.2 Mt para el 2021 (Baldé et al., 2017); esta estimación se puede observar en la Figura 1.

Este incremento de RAEE no sólo origina la generación de desechos sólidos, si no que otro problema que se produce es el inadecuado manejo de estos, ocasionando problemas como la contaminación del suelo y agua; asimismo si los residuos se incineran, también se contamina el aire ¹, impactando de manera negativa la salud humana y al ambiente (Dimitrakakis et al., 2009; Stenvall et al., 2013). Cuando los contaminantes penetran en el suelo, pueden filtrarse al subsuelo, de manera que alteran la calidad de las aguas subterráneas. Las personas que habitan cerca de los sitios de reciclaje al tomar agua, usarla en la comida o respirar aire contaminado quedan expuestos a compuestos tóxicos como

aluminio, bario, berilio, cadmio, cobalto, plomo, níquel, entre otros más (Cesaro et al., 2018; Yang et al., 2018). Debido a la magnitud de las problemáticas anteriormente mencionadas, en este artículo se presenta una revisión sistemática de la literatura publicada sobre los RAEE. Además, se proporciona información sobre su generación, destino, impacto a la salud y a la calidad del ambiente, con el objetivo de sensibilizar e informar sobre el peligro que existe en el tratamiento inadecuado de los RAEE. Adicionalmente, se muestra la importancia de formular e implementar estrategias de gestión de residuos mediante procesos de reciclaje ambientalmente amigables.

Figura 1. Generación mundial de residuos electrónicos por habitante y total mundial, periodo 2014 a 2016



Nota: Los valores de 2017 a 2021 son estimaciones del estudio de Baldé et al. (2017)

Fuente: Elaboración propia con datos basados del estudio de Baldé et al. (2017)

¹ Los componentes principales fueron plásticos a base de estireno (84% en peso) así como poliolefinas (12% en peso) y principalmente acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), poliestireno (PS), polipropileno (PP).

METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA BÚSQUEDA DE LITERATURA SOBRE RAEE

Para conocer de forma general los esfuerzos hechos por la comunidad científica en torno a los RAEE, se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica sobre la producción científica en este tema. La búsqueda bibliográfica se realizó mediante el buscador *web of science* (WOS) de *Clarivate Analytics*; (WOS, 2020), con la colección de las siguientes revistas indexadas: “*Science Citation Index Expanded*”, “*Social Sciences Citation Index*”, “*Conference Proceedings Citation Index*”, “*Conference Proceedings Citation Index-Social Science & Humanities*”, “*Book Citation Index-Science*” “*Book Citation Index-Social Sciences & Humanities*” y “*Emerging Sources Citation Index*”. Se investigaron el grupo de palabras: TS= “WEEE” OR “e-waste” OR “electr* waste” (*sirve como comodín y para incluir las palabras derivadas como *electric*, *electronic*, etc.) OR “*Waste Electrical and Electronic Equipment*”. Se realizó la búsqueda de estas palabras en el campo de búsqueda “tema” (TS=topic), es decir en título, abstract y palabras clave.

Resultados

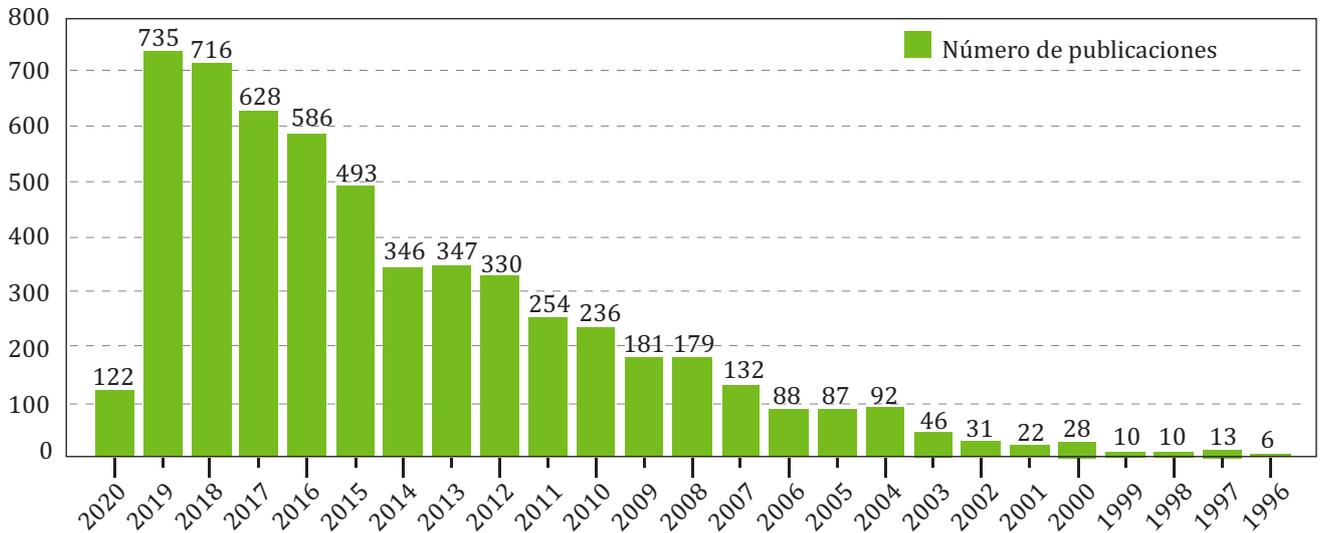
La búsqueda proporcionó 5,778 documentos de la combinación del grupo de palabras utilizadas (datos al 28 de febrero del 2020). De ellos, 2,916 documentos contenían la palabra “e-waste”, 1,847 de “WEEE” y sólo 856 mencionan la frase “*Waste Electrical and Electronic Equipment*” (las cifras no

son acumulativas). En la Figura 2 se observa que la producción científica (número de publicaciones) de documentos relacionados a este tema comenzó en 1996 y ha seguido en constante crecimiento hasta llegar a 735 documentos en el 2019. Dentro del total de documentos encontrados, el 72% corresponde a artículos, el 21% a memorias de trabajo y el porcentaje restante se divide entre conferencias, capítulos de libros, resúmenes, etc. Se puede atribuir que los primeros resultados de documentos que aparecieron en 1996, se debió a que a inicios de ese año se comenzó con la generación de políticas públicas sobre la protección del medio ambiente que prohibía la importación de residuos municipales peligrosos y sólidos en algunos países como la República Popular China (Long et al., 2016).

De acuerdo con la Figura 3, los países con mayor aportación de documentos (producción científica, barras color celeste) son la República Popular de China (China), Estados Unidos de América (EUA) e India. Lo anterior se puede correlacionar a que también son los países con mayor inversión en investigación y desarrollo (I+D) del mundo (Fondo Monetario Internacional, 2019) y con mayor número de pobladores de acuerdo con las estadísticas de Worldometer (población, barras color amarillo) (Worldometer, 2020). Es interesante destacar que también se clasificaron dentro de los 5 países que más RAEE produjeron en el 2014 (producción de RAEE, barras color verde) (Lines et al., 2016).

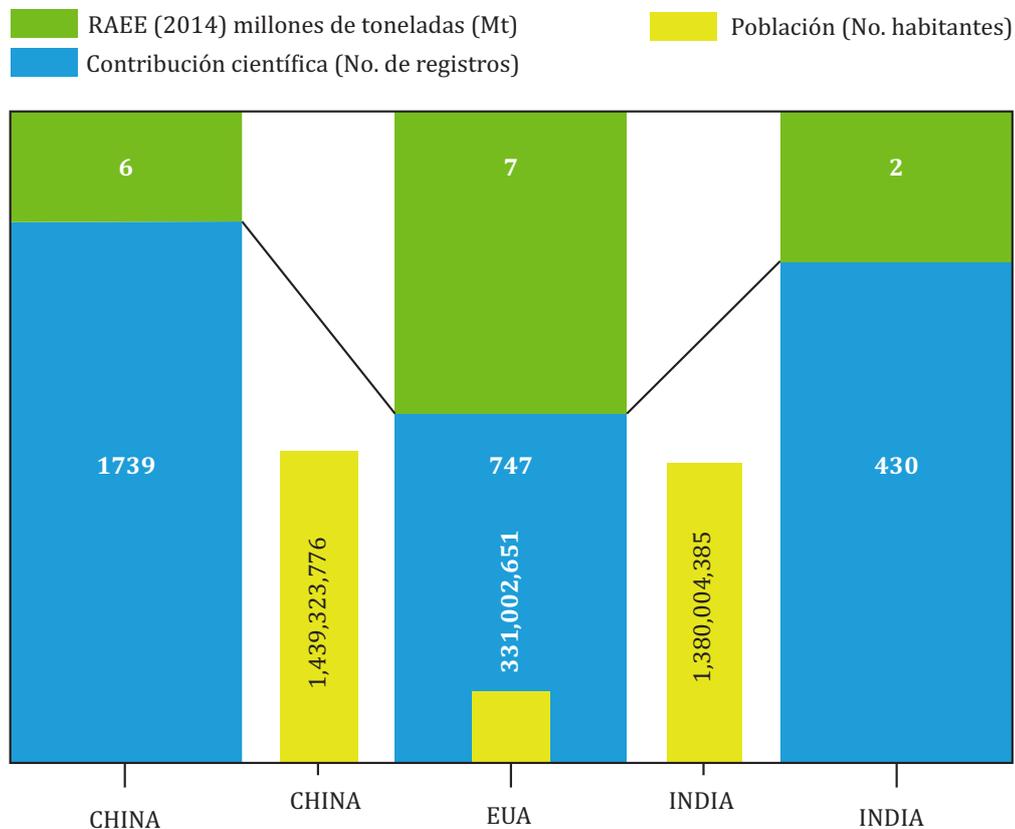


Figura 2. Producción científica por año durante el periodo de 1996-2020, para los criterios de búsqueda establecidos



Fuente: Elaboración propia con información de Web of Science (WOS, 2020)

Figura 3. Número de contribuciones científicas (documentos), RAEE en millones de toneladas y población de China, EUA e India

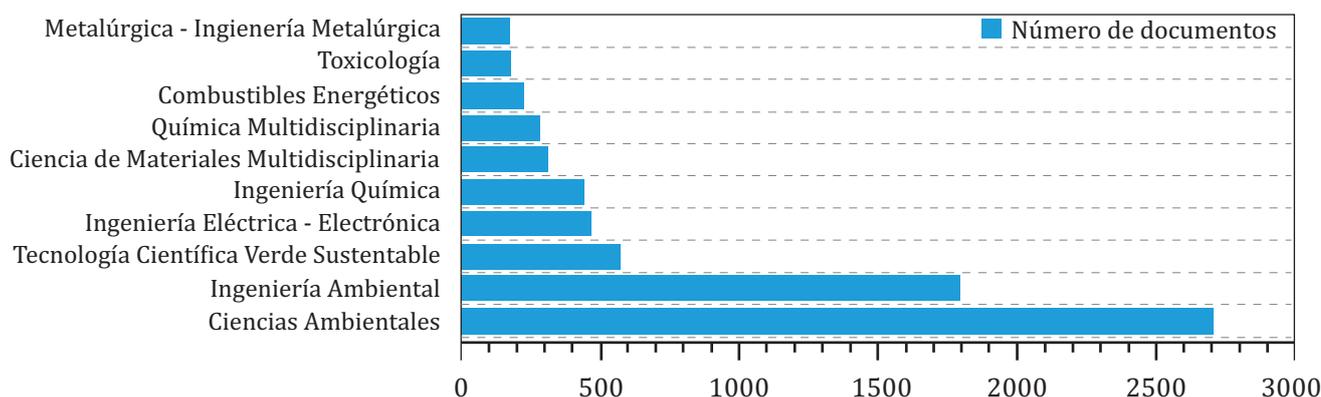


Fuente: Elaboración propia con información de Web of Science (WOS, 2020) y cifras de la población mundial por país (Worldometer, 2020).

En la Figura 4, se muestran las categorías con mayor número de documentos donde se ha generado mayor conocimiento y aportaciones científicas de alto impacto. Dentro de estas,

destacan las enfocadas al medio ambiente o a la sustentabilidad energética, así también las áreas de metalurgia, química, eléctrica y de combustibles fósiles.

Figura 4. Top 10 de categorías donde se encuentran la mayoría de los documentos



Fuente: Elaboración propia con información de Web of Science (WOS, 2020)

ORIGEN DE LOS RAEE Y MATERIALES CONTENIDOS

Entre los diferentes tipos de dispositivos eléctricos y electrónicos que han llamado más la atención por su amplia popularidad de uso y desechos que generan, se encuentran los celulares, computadoras, pantallas y monitores de CRT, LCD y LED, tabletas, placas de circuitos impresos (PCB, *Printed Circuit Board*, en inglés) discos duros de estado sólido y paneles fotovoltaicos (Cucchiella et al., 2015). Por ejemplo, los celulares son dispositivos que poseen diferentes tipos de baterías como níquel-cadmio (NiCd), níquel-metal hidruro y de iones de litio (Li-ion), estas baterías poseen elementos altamente contaminantes. En 2006 se estimó que se desecharon mil millones de celulares (Rahmani et al., 2014). Sin embargo, es difícil calcular con certeza los RAEE derivados de esta industria ya que estos pueden permanecer en casa de los usuarios por años, incluso cuando dejan de funcionar, o dejan de usarse (aunque sean funcionales) o por obsolescencia programada (Cucchiella et al., 2015). Este término se utilizó por primera vez cuando Bernard

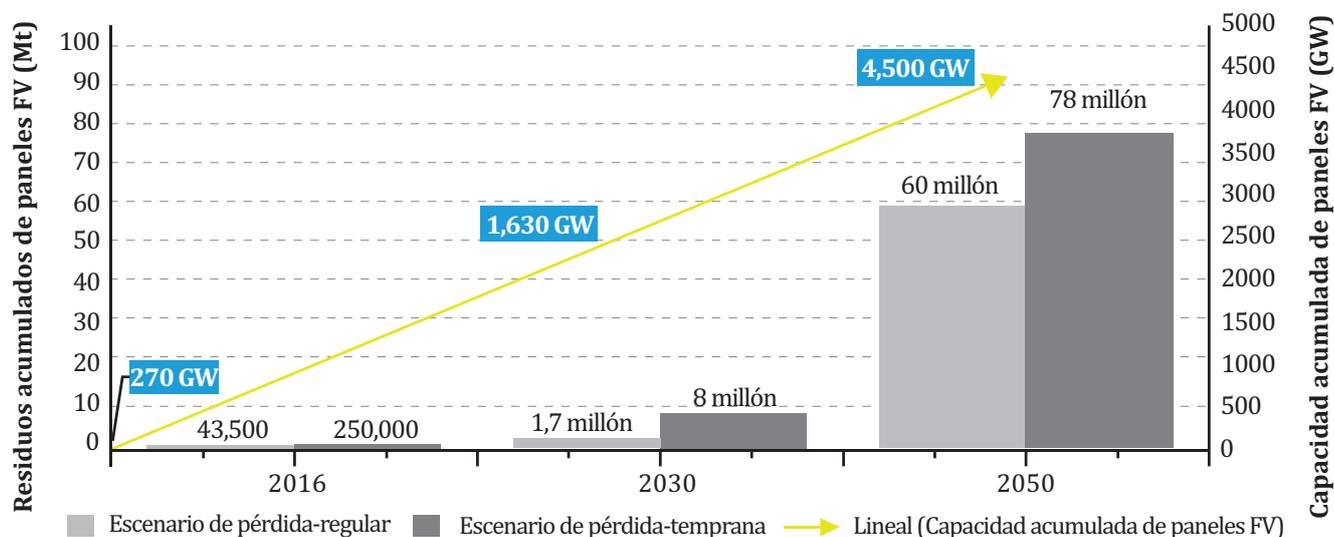
London lo acuñó en uno de sus ensayos en 1932 (London, 1932) y se popularizó en 1954 por Brooks Stevens, el cual lo llevó a la definición de obsolescencia planeada como: "Inculcar en el comprador el deseo de poseer algo un poco más nuevo, un poco mejor, un poco antes de lo necesario". De acuerdo con los datos de GSMA², hasta el día de hoy existen 5.8 mil millones de personas que poseen un dispositivo móvil en el mundo, lo cual significa que al 67.95% de la población mundial posee un dispositivo de este tipo (Turner, 2020). En el 2004, se estimó que se vendieron más de 180 millones de computadoras personales (PC), aproximadamente 100 millones de PC's fueron desechadas y en el mismo año alrededor de 315 millones de PC's quedaron obsoletas. Dejando a su paso una generación de aproximadamente 544,310 toneladas de plomo, 907 toneladas de cadmio y 1,814,369 toneladas de plástico (Babu et al., 2007; Daven & Klein, 2008). Otros materiales contaminantes presentes en su gran mayoría en las computadoras son resinas como ABS (*acrylonitrile butadiene styrene*), HIPS (*high-impact polystyrene*), PPO

² Global System for Mobile Communications

(*polyphenylene oxide*), PPE (*polyphenylene ether*) y PVC (*polyvinyl chloride*) (Babu et al., 2007) que pueden resultar altamente tóxicos. Las pantallas y monitores de CRT, LCD y LED son consideradas una sección altamente generadora de RAEE. La composición de las pantallas o televisores de CRT son de mayor volumen en comparación con las de LCD. Por ejemplo, una TV y un monitor de CRT pesan aproximadamente 25 y 16 kilos respectivamente, en cambio las de LCD tienen un peso menor de aproximadamente 60% (10 y 5 kilos, para TV y CRT respectivamente). Esto se puede observar al hacer la comparación en gramos/unidad de tres de los principales materiales (vidrio, plástico, acero/hierro) contenidos en los monitores y/o pantallas de CRT y LCD. Por ejemplo, vidrio 15,760 vs 590, plástico 8,755 vs 1,780, acero/hierro 2,088 vs 2,530 en gramos/unidad para CRT vs LCD (Cucchiella et al., 2015). Los paneles fotovoltaicos (FV) se presentan como una tecnología alterna viable para la generación de energía limpia, debido a la intensa radiación que incide en la tierra, casi 127 mil TW de energía solar llegan a la tierra anualmente, de los cuales sólo 1.2 % se afirma que son aprovechables, es decir, 1,600 TW (Kabir et al., 2018) o aproximadamente 104 veces más de lo que la humanidad consume actualmente

(Adachi et al., 2013). La industria solar FV se encuentra exclusivamente dominada por la tecnología convencional de semiconductores inorgánicos como el silicio policristalino, monocristalino y las celdas de película delgada. Esta tecnología actualmente representa un porcentaje bajo de generación de RAEE a nivel mundial. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía Renovable (Stephanie Weckend et al., 2016) menos del 1% de los paneles FV que produjeron una potencia energética de 222 GW a finales del 2015 cumplieron su vida útil. Sin embargo, para el 2050 se proyecta una instalación de paneles FV que producirá 4,500 GW y por ende los desechos de paneles solares se incrementará. La vida útil promedio de un panel fotovoltaico es de hasta 30 años. Tomando en cuenta este último dato y la capacidad de desechos de paneles solares acumulados para el 2050, se tendrán alrededor de 60 a 70 millones de toneladas generadas de residuos de paneles FV (Stephanie Weckend et al., 2016); esta estimación se puede observar en la Figura 5, donde el Escenario de pérdida-regular: supone una vida útil de 30 años para los paneles solares, sin desgaste anticipado, mientras que el Escenario de pérdida-temprana: tiene en cuenta una vida útil “temprana”, “mediana edad” y fallas de “desgaste” antes de los 30 años.

Figura 5. Estimación global de residuos de paneles fotovoltaicos, periodo 2016-2050

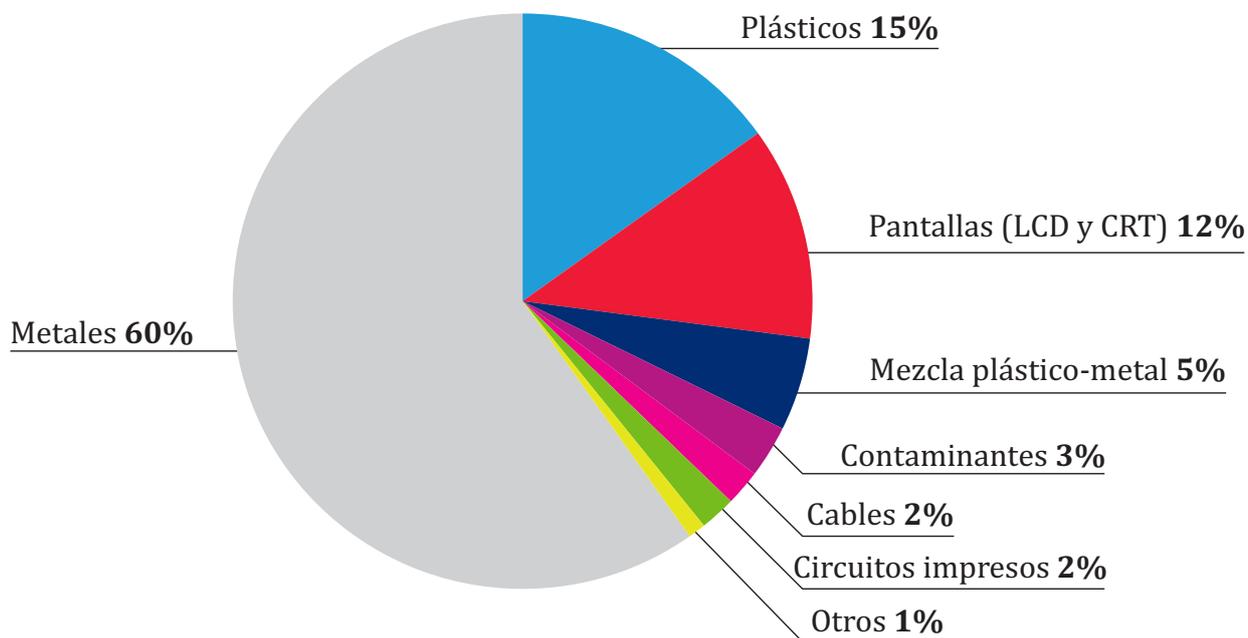


Fuente: Elaboración propia con datos basados del estudio de Stephanie Weckend et al. (2016) Definir pérdida-regular y pérdida temprana

Los RAEE contienen una combinación de materiales para hacer posible el funcionamiento y el diseño que el consumidor espera. Los tipos de RAEE se han clasificado en cinco categorías principalmente (Figura 6), las cuales son: i) metales-férreos, ii) plásticos, iii) metales no férreos, iv) vidrio y v) otros materiales como madera, caucho, cartón. Los metales-férreos como el hierro y el acero son los materiales más comunes de encontrarse en los RAEE y ambos pueden contribuir al 50% del peso total de los desechos; el segundo grupo que más peso aporta es el plástico, constituye aproximadamente el 21%; el tercer grupo incluye a los metales preciosos y representa un 13%; finalmente el porcentaje total lo conforman otros materiales como el vidrio. Además, se han encontrado más de 1,000 sustancias tóxicas en los RAEE (Puckett et al., 2002), entre ellos los retardadores de llamas

bromados (BFR, *brominated flame retardants*, en inglés), que contienen grupos orgánicos como: los bifenilos policlorados (BPCs), éteres bifenílicos polibromados (PBDEs) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), entre otros. Así también algunos elementos tóxicos como: bario (Ba), berilio (Be), cadmio (Cd), cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb), litio (Li), mercurio (Hg), níquel (Ni) y plata (Ag) (Kiddee et al., 2013). Lo cual genera una alta preocupación entre la comunidad científica y por lo que sugiere documentarse con la literatura generada sobre los RAEE, para conocer las propuestas que se han hecho y poder sugerir procesos alternos a los existentes para la gestión de estos residuos con metodologías y tecnologías que consideren principios de producción más limpia y economía circular de los residuos que incluyan procesos ecológicos o que minimicen el daño generado.

Figura 6. Fracciones de materiales típicos en RAEE



Fuente: Elaboración propia con datos adaptados del estudio de Widmer et al. (2005)

CIFRAS INTERESANTES SOBRE LOS RAEE

Parte fundamental para conocer el daño ocasionado por los RAEE, es conocer en cifras el impacto que generan. A continuación, se men-

cionan algunos datos que son preocupantes y que tienen un potencial educativo para concienciar acerca de los desechos generados por el uso de aparatos eléctricos y electrónicos.

Los RAEE representan el 2% de los desechos sólidos en el mundo, pero pueden llegar a ser el 70% de los residuos peligrosos que se encuentran en los rellenos (ONU, 2019) y se estima que para el 2040 los RAEE representen el 14% de las emisiones totales de carbono (Ellen MacArthur Foundation, 2018). Además, sólo el 20% de los RAEE son reciclados y el 80% restante se incinera o termina en los rellenos sanitarios (World Economic Forum, 2019). La importancia del reciclaje de los RAEE tiene grandes beneficios ambientales y de salud, pero también su valor económico es considerable. Los RAEE al ser compuestos por más de 60 metales diferentes, se estima que su valor es de 48 mil millones de euros. Bullion Street, analizó que la industria electrónica consume 320 toneladas de oro y 7,500 toneladas de plata cada año y que la extracción urbana de desechos electrónicos podría generar \$ 21 mil millones cada año (United Nations University, 2012). El valor calculado de los RAEE con un tratamiento de reciclaje adecuado rebasa los 62,500,000,000 de dólares anuales, lo cual supera al producto interno bruto (PIB) de algunos países (UN, 2019). Otro beneficio económico es que al reciclar 10,000 toneladas de desechos pueden crear los siguientes empleos: 1 empleo para incineración, 6 empleos en rellenos sanitarios, 36 empleos en centros de reciclaje y 296 empleos en el reciclaje de computadoras (ILSR, 2002). Aun cuando este es un problema global, actualmente sólo 67 países cuentan con una legislación ambiental para el manejo adecuado de los RAEE (World Economic Forum, 2019).

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental (EPA, *Environmental Protection Agency*, en inglés) en EUA se desechan diariamente 416,000 celulares y 142,000 computadoras, mientras que anualmente se producen 1,000,000,000 de celulares y 300 millones de computadoras (Chandler, 2017). Se ha estimado que al reciclar un millón de celulares (148.4 toneladas) se pueden obtener 34 kilos de oro, 350 kilos de plata, 15 kilos de paladio y más de 16,000 kilos de cobre (Kumar et al., 2017).

El reciclaje de los RAEE ofrece un ahorro de energía, ya que al no producir estos la disminución de gases de efecto de invernadero será de uno de los efectos positivos más importantes. Por ejemplo, al reciclar 10 kg de aluminio se estima que el ahorro de energía es del 90%, se evitan aproximadamente 13kg de bauxita³, 20 kg de dióxido de carbono (CO₂) y 0.11 kg de dióxido de azufre (SO₂) (Kumar et al., 2017). Otra ventaja de los RAEE es que el grado de concentración de metales en los electrónicos es mayor que los extraídos por la actividad minera. Por ejemplo, en promedio varios RAEE pueden contener 1,009 ppm de plata, 127 ppm de oro y 51.6 ppm de paladio, para el caso de la minería los valores son 215.5 ppm de plata, 1.01 ppm de oro y 2.7 ppm de paladio, lo cual es una diferencia significativa (Kumar et al., 2017).

DESTINO DE LOS RAEE

El código HS o código arancelario es un grupo de números que se asignan de acuerdo con el sistema de clasificación estandarizado internacionalmente a las importaciones y exportaciones entre países. Oficialmente se le conoce como Sistema Armonizado o en inglés como *Harmonized Commodity Description and Coding System* o *Harmonized System* o simplemente HS. Los códigos HS clasifican aproximadamente 8,000 productos, pero ninguno de estos incluye una categoría para los RAEE. Cuando un cargamento de este tipo ocurre, este solo tiene la opción de usar la clasificación de “electrónicos nuevos”. Alrededor de 67 países cuentan con una legislación referente a los RAEE, lo cual comprende aproximadamente 2/3 del total de países del mundo (World Economic Forum, 2019). No obstante, existen regiones como África, América Latina y parte de Asia que no cuentan ninguna restricción sobre los RAEE. Por lo tanto, se vuelve más complicado hacer una estimación del volumen

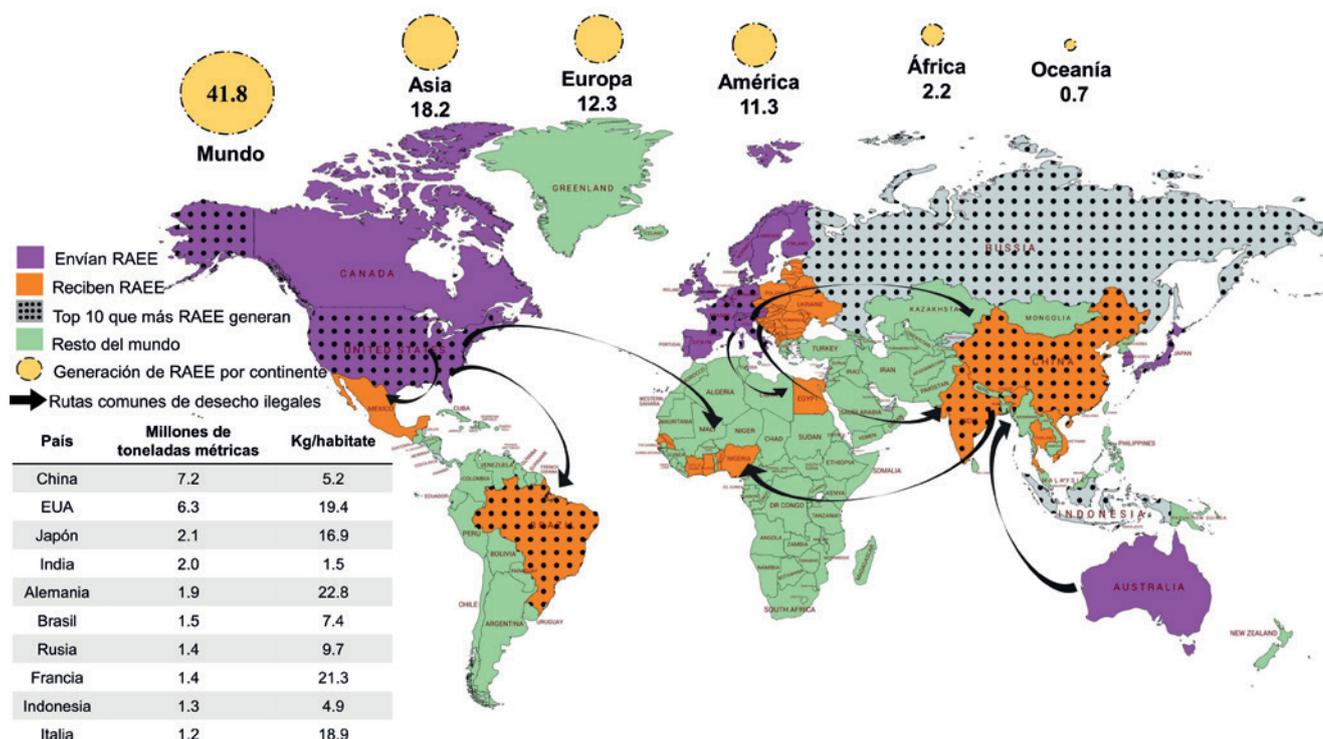
³ Roca compuesta en su mayoría por alúmina y, en menores proporciones óxido de hierro y sílice. Es la fuente principal de donde se extrae el aluminio.

de intercambio o comercio de los RAEE de forma correcta. Por este motivo se han hecho diversas investigaciones al respecto, por ejemplo, en el trabajo de Hopson y Puckett mencionan que se rastrearon 205 DE con un sistema de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning System*, en inglés). Del total de estos, el 74% (152 DE) se envió a un centro de reciclaje, el 25% (51 DE) fueron donaciones y el 1% restante (2 DE) a reventa, se observó que de los 152 DE, el 34% (69 DE) salieron del país en envíos ilegales a países como Hong Kong, China o Taiwán.

En la Figura 7 se presenta el mapeo de los desechos electrónicos, se describe (círculos amarillos) la cantidad en millones de toneladas que se produce mundialmente, así como las aportaciones que generan cada continente. Si se correlaciona el área de los continentes en km² y en función de la cantidad de desechos que generan, es de esperarse que Asia [44,579,000 km²

(P. Prakashan, 2019)] ocupe el primer lugar. Lo que es preocupante es observar que Europa [10,180,000 km² (Cañellas Blanco y Castellano Alcaide, 2019)] siendo 4.3 veces menor del tamaño de Asia, posea el segundo lugar en generación de RAEE. También se muestra en la tabla indexada el top 10 de países (gris con puntos negros) que más RAEE producen en millones de toneladas métricas y la aportación calculada de kg/habitante (Baldé et al., 2017; Prasad, 2020). Asimismo, se muestran (color morado) las regiones que envían RAEE a otros países en su mayoría en forma ilegal (flechas negras). Por ejemplo, América del Norte envía a algunas regiones de América Latina y África; Europa a regiones como China, Corea del Sur, la India, África. Finalmente, se ilustra también la contraparte los países que más reciben RAEE (color naranja) los cuales son países como México, Brasil y algunas regiones en Europa, China, India y Tailandia.

Figura 7. Mapeo de desechos electrónicos



Fuente: Elaboración propia con datos de World Economic Forum (2019); Baldé et al. (2017) y el uso de mapas de MapChart (2020)

IMPACTOS A LA SALUD Y AL AMBIENTE

Existen investigaciones (Babu et al., 2007; Grant et al., 2013; Hopson y Puckett, 2016) que han comprobado la enorme problemática que conlleva el manejo inadecuado de desechos de DE en rellenos sanitarios, debido a que estos se componen de elementos tóxicos como el Cd, Ni, Li, Cr, Cu, Pb, Sn, Hg, que generan problemas ambientales y a la salud del ser humano al no saberlos manipular. Los RAEE impactan de manera directa a las personas que se encuentran trabajando o viviendo cerca de los sitios de reciclaje o separación de éstos. La ingesta de estos contaminantes puede ocurrir por inhalación, absorción dérmica o digestiva de vapores o partículas de compuestos tóxicos producidas cuando se incineran o cuando los contaminantes penetran en el suelo, ya que pueden filtrarse al subsuelo, de manera que pueden llegar a las fuentes de consumo de agua (Kiddee et al., 2013). La población infantil, las mujeres embarazadas y los adultos mayores son los más vulnerables a este tipo de sustancias, ocasionando diversas enfermedades mencionadas en la Tabla 1.

Por ejemplo, una computadora en promedio pesa 29.6 kg, de lo cual el porcentaje en peso es 43.7% metal, 23.3% es plástico, 17.3% componentes electrónicos y 15.7% es vidrio. Para producir una computadora, así como un monitor se necesitan 1.5 toneladas de agua, 22 kilos de componentes y 240 kilos de combustibles fósiles, lo cual

refleja en una pequeña escala todos los recursos energéticos no renovables y renovables que se requieren para la fabricación de estos dispositivos (Rahmani et al., 2014).

Los contaminantes tóxicos encontrados en los RAEE se pueden clasificar en dos grupos: 1) éteres de bifenilos poli bromados (PBDEs) y 2) metales pesados. Los PBDEs son popularmente usados como retardantes de llama. Diversas investigaciones han señalado a lo largo de los años la presencia de PBDEs en sangre, cabello y orina en personas por exposición directa o indirecta (Kiddee et al., 2013; Lechuga Vázquez y Paredes Rizo, 2014). Este hallazgo es considerado un riesgo potencial de salud debido a que los PBDEs están asociados a problemas de desestabilización del sistema hormonal-tiroideo, tumores y toxicidad neurológica, por mencionar algunos (Qu et al., 2007; Rocha-Gutiérrez et al., 2015). Por otra parte, se encuentran los metales pesados, se estima que el 70% de los metales pesados que llegan a los rellenos en EUA provienen de los RAEE (Lines et al., 2016). Estos pueden provocar serias afectaciones, como daños al bazo, riñones, dermatitis, asma y afectaciones neurodegenerativas como el Alzheimer (aluminio) y el Parkinson (plomo) (Grant et al., 2013). En la Tabla 1 se presenta un resumen de los tipos de contaminantes comúnmente encontrados en RAEE, su aplicación en la industria y los impactos que pueden ocasionar en la salud.

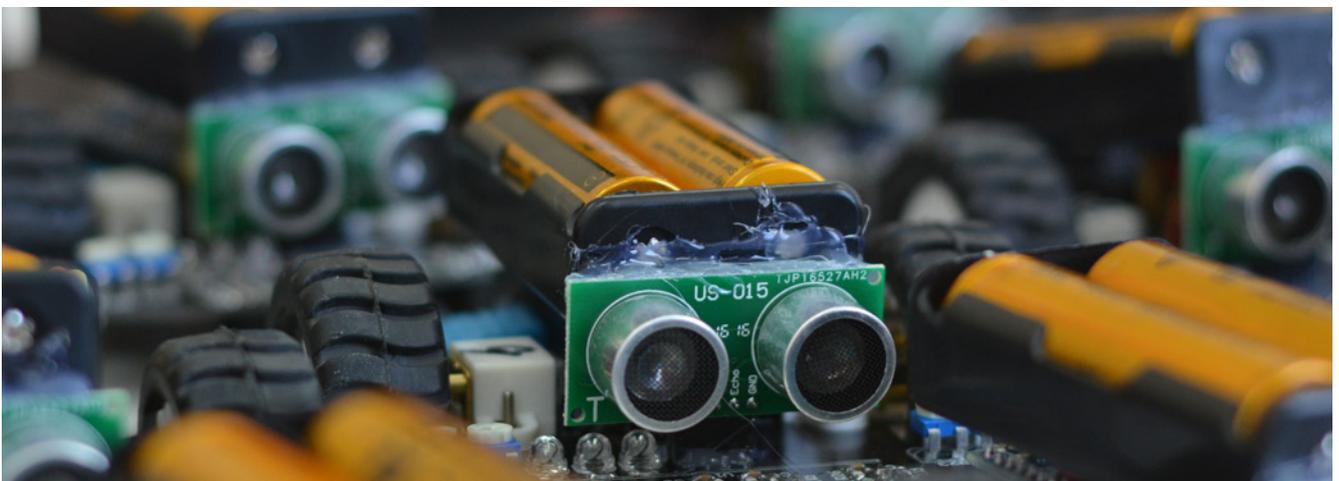


Foto de Frank Wang de Unsplash.

Tabla 1. Sustancias más comunes en los RAEE y sus impactos en la salud

Contaminantes orgánicos	Aplicaciones en RAEE	Impactos en la salud, puede ocasionar:
PBDEs	Plásticos para electrónicos para retardar consumo de un producto por fuego de circuitos, teclados y cables	Al arder produce vapores tóxicos que pueden ocasionar: cáncer, tumores en hígado, desestabilización del sistema hormonal tiroideo.
Elementos	Aplicaciones en RAEE	Impactos en la salud, puede ocasionar:
Cadmio	Resistencias de chip de dispositivos de montaje en superficie (SMD), detectores de infrarrojos, chips semiconductores, interruptores, muelles, conectores, PCB, baterías de NiCd, fotocopiadoras de tóner, tubos de rayos catódicos.	Respirar altos niveles de cadmio produce graves lesiones en los pulmones, irritación en el estómago e induce vómitos, diarrea y daños irreversibles en los riñones.
Litio	Baterías	Están conformadas por plomo, cromo, cobalto, cobre, níquel y talio. Pueden provocar efectos adversos de respiración, pulmonares y neurológicos.
Mercurio	Termómetros, sensores, equipo médico, lámparas, teléfonos celulares, baterías, tubos fluorescentes, algunas baterías e interruptores de luz.	Daños al cerebro e hígado, tos, dolores en el pecho, náusea, vómito, diarrea, aumentos en la presión arterial o en el ritmo cardíaco, erupciones de piel e irritación de los ojos.
Plomo	Monitores, soldaduras en PCB, tubos de rayos catódicos, lámparas, baterías,	Daños al sistema central y periférico nervioso, al sistema sanguíneo, reproductivo y al riñón. Debilidad en los dedos, las muñecas y los tobillos;

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio de Grant (2013); Ramesh (2007); Puckett (2002); Cucchiella (2015)

ACCIONES QUE SE HAN IMPLEMENTADO A NIVEL MUNDIAL

La Organización Mundial de las Naciones Unidas (ONU) en el 2015 presentó la agenda de desarrollo sostenible e identificó 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS), 169 metas para acabar con la pobreza, proteger al planeta y garantizar la prosperidad de todos en los próximos años. Al incrementarse los niveles de RAEE en el mundo estos impactan directamente de manera negativa en el medio ambiente, la salud pública

y los ODS. Se ha identificado que su impacto en los ODS es del 30%, específicamente en los siguientes objetivos: Salud y bienestar (3), agua limpia y saneamiento (6), trabajo decente y crecimiento económico (8), ciudades y comunidades sostenibles (11), producción y consumo responsables (12), vida marina (14).

Además de los ODS, existen otros esfuerzos internacionales sobre el manejo de los RAEE para proteger la salud humana y del medio ambiente, como el convenio de Basilea en el cual

su meta fue la reducción de generación de desechos peligrosos y su movimiento transfronterizo; convenio de Estocolmo su objetivo consistió en la regulación de contaminantes orgánicos persistentes (COP) así como también promover prácticas y tecnologías para el remplazo de estos; convenio de Rotterdam este ayudó para establecer procedimientos sobre la importación y exportación de sustancias químicas peligrosas y plaguicidas; la Comisión para la Co-operación Ambiental de América del Norte que consiste en la cooperación entre Estados Unidos, Canadá y México para la

conservación, protección y mejoramiento del medio ambiente; el convenio de Minamata con el objetivo de proteger la salud humana y del medio ambiente contra los efectos dañinos del mercurio, por mencionar algunos (Instituto Nacional de Ecología INECC, 2006). Todos estos están encaminados a tratar de regular el derrame ilegal, adoptar modelos de economía circular, brindar un tratamiento apropiado, promover la reutilización y el reciclaje de los RAEE. En la Tabla 2 se presenta más información de los ODS y las metas en el manejo de los RAEE propuestos por la ONU.

Tabla 2. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y metas con relación a los RAEE

Objetivo	Metas propuestas por la ONU
3. Salud y bienestar	3.9: “Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos...”
6. Agua limpia y saneamiento	6.1: “De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos” “6.3: De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos... aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización ...”
8. Trabajo decente y crecimiento económico	8.3: “Promover políticas orientadas al desarrollo que apoyen las actividades productivas, la creación de puestos de trabajo decentes...” 8.8: “Proteger los derechos laborales y promover un entorno de trabajo seguro y sin riesgos para todos los trabajadores...personas con empleos precarios”
11. Ciudades y comunidades sostenibles	11.6: “De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo”
12. Producción y consumo responsables	12.4: “De aquí a 2020, lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida ... y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente” 12.5: “De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización”
14. Vida marina	14. 1: “De aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes”. 14.2: “De aquí a 2020, gestionar y proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros para evitar efectos adversos importantes...”

Fuente: Elaboración propia utilizando datos basados en el estudio de Baldé (2017)

ESTRATEGIAS PARA COMBATIR LA GENERACIÓN DE RAEE

Como se mencionó anteriormente, la importancia del manejo correcto de los RAEE es una pieza fundamental para evitar los daños a la salud pública y al ambiente (Dalrymple et al., 2007). Este gran problema del manejo de RAEE puede tener diversas razones, una de ellas es que los países desarrollados poseen un costo de jornada laboral alta y varias regulaciones para disposición final de estos residuos, por lo cual se exportan a países subdesarrollados. Estos a su vez, poseen herramientas y tecnologías más rudimentarias para la extracción/reciclaje de los RAEE (Perkins et al., 2014) y es de esperarse que estos sean recibidos en casi cualquier vertedero por su alto valor comercial (Tuncuk et al., 2012). Por otra parte, se estima que el 40% de la composición de los RAEE son metales de interés comercial, tales como cobre, plomo, estaño, mercurio, plata, oro, platino y paladio. Estos últimos, los metales preciosos, atraen gran interés por su alto valor comercial. (Hagelüken y Corti, 2010). Aunque su extracción está limitada debido a la compleja composición de metales en los desechos electrónicos, más del 80% del valor total de recuperación comprende metales preciosos (Ag, Au y Pt) y más del 95% del total de metales son básicos (Cu, Sn, Hg, Pb) (Díaz et al., 2017). Aunado a esto, los RAEE pueden contener

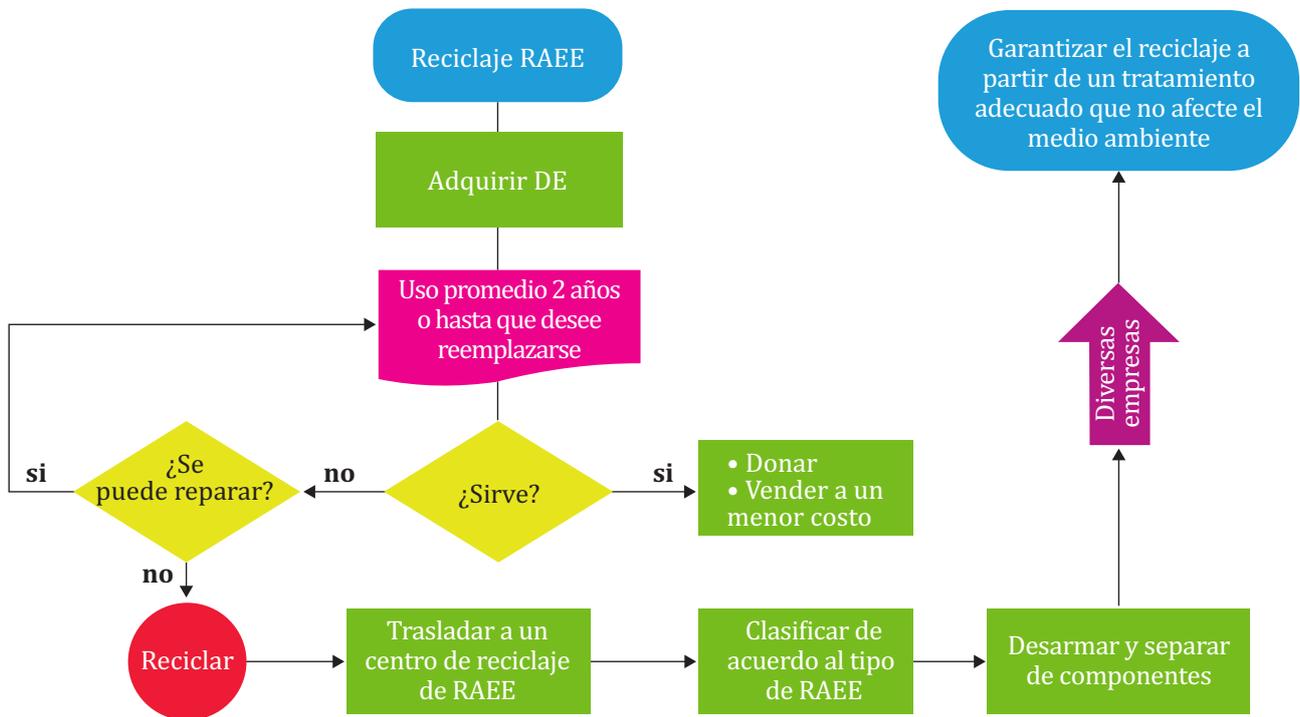
de 25 a 250 veces más oro comparado con la cantidad encontrada en los minerales de los que se extraen estos metales en la actividad minera (Tuncuk et al., 2012). Además, el costo de extraer estos metales a partir de minerales es 13 veces más alto en yacimientos naturales que en RAEE (Zeng et al., 2018). Aun cuando esta actividad tiene un alto impacto económico, los metales en RAEE son reciclados y extraídos mediante herramientas de uso común como desarmadores, martillos y cinceles. Algunos otros ejemplos de extracción son las placas de circuitos impresos que son calentadas y los componentes son removidos; el oro y otros metales se extraen con baños de ácido; los plásticos son triturados y se funden, y en el caso del cobre, este se obtiene quemando el plástico que tiene como cubierta. Todo lo anterior mencionado con escasa o nula protección personal, lo cual conlleva a una actividad de alto riesgo para la integridad y salud del reciclador (Perkins et al., 2014). Es por ello, que en los últimos tiempos la comunidad científica ha enfocado su atención en el desarrollo de estrategias que incluyan métodos, procesos, protocolos y técnicas que no sólo permitan recuperar estos metales de los desechos electrónicos, principalmente los metales preciosos, sino, que consideren un buen uso de los desechos de DE, un manejo adecuado de estos y un reciclaje óptimo de RAEE con un enfoque de economía circular y amigables con el ambiente.



Se estima que el 40% de la composición de los RAEE son metales de interés comercial, tales como cobre, plomo, estaño, mercurio, plata, oro, platino y paladio, sobre todo estos últimos, los metales preciosos.

En la Figura 8, se presenta un diagrama de flujo como propuesta individual para estimular el seguimiento que los usuarios pueden realizar cuando desean deshacerse de sus dispositivos eléctricos y electrónicos. Esto con la finalidad de que los DE no estén almacenados en los hogares o negocios, así como también para evitar que terminen en rellenos sanitarios sin la gestión adecuada y de esta manera evitar contaminación ambiental y daños a la salud.

Figura 8. Diagrama de flujo de los RAEE



Fuente: Elaboración propia con base a los estudios de Cordova-Pizarro et al. (2019); Estrada-Ayub & Kahhat (2014)

Métodos teóricos

Dentro de los métodos teóricos existen investigaciones sobre la evaluación de métodos para la cuantificación de RAEE, los cuales generalmente se clasifican en cuatro categorías: 1) análisis relacionados con la eliminación, 2) análisis de series de tiempo (proyecciones), 3) modelos de factores (utilizando factores determinantes para la correlación) y 4) análisis de entrada-salida (Wang et al., 2013). Algunas otras investigaciones se han enfocado en buscar soluciones para evaluar la localización geográfica de plantas recicladoras. Esto por ejemplo se hizo con el método discreto de decisión de criterios múltiples llamado “método de organización de clasificación de preferencias para evaluaciones de enriquecimiento, PROMETHEE”, (*Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations*, en inglés) (Queiruga et al., 2008). También algunos países han incluido poco a poco nuevas y mejores políticas sobre la gestión y el mejor manejo de los RAEE; un claro ejemplo es Corea del Sur que introdujo en el 2003 el

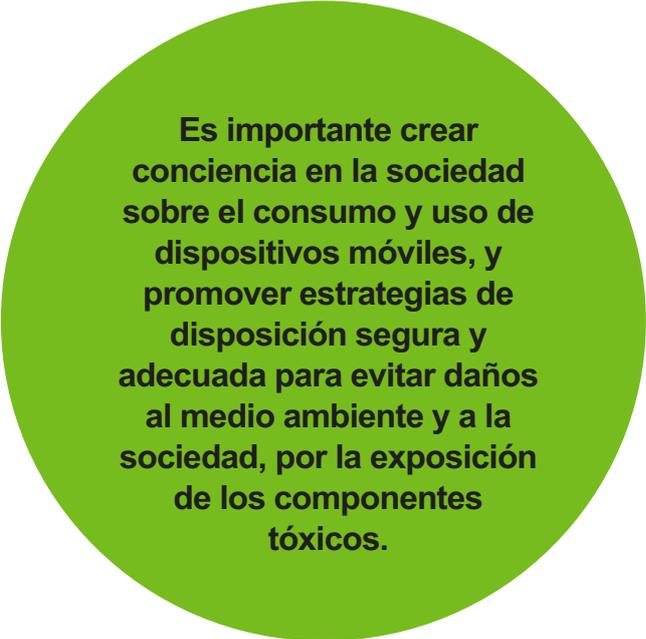
sistema de Responsabilidad Extendida del Productor (EPR, *Extended Producer Responsibility*, en inglés), el cual se define como un instrumento que obliga a los fabricantes e importadores de ciertos productos de consumo masivo, a organizar, desarrollar y financiar la gestión integral de los residuos derivados de sus productos una vez que el consumidor final los desecha. Para mejorar esta política EPR, Kim M. propuso la aplicación del método Delphi y el modelado del proceso de jerarquía analítica AHP (*Analytical Hierarchy Process*, en inglés) a la herramienta de gestión de RAEE en el proceso de formulación de políticas, con la finalidad de determinar la prioridad de los RAEE que se incluirán en el sistema de EPR (Kim et al., 2013). Otro análisis para ayudar en la toma de decisiones en el proceso del fin de la vida útil (EoL) de los RAEE, basadas en la reutilización, recuperación y reciclaje es el que propuso Rubin R.S (Rubin et al., 2014), donde se compararon dos procesos de tratamiento de placas de circuitos impresos (PCB) mediante la metodología de evaluación del ciclo de vida (LCA, *Life Cycle Assessment*, en inglés).

Métodos experimentales

Actualmente los métodos experimentales más utilizados para separar los metales nobles y preciosos de desechos electrónicos son aquellos que implican la calcinación (pirometalurgia) y la lixiviación con ácidos concentrados (hidrometalurgia) (Leirnes y Lundstrom, 1983). Dentro de estos trabajos se encuentran el de Petter P. (Petter et al., 2014), en el cual se reportó la utilización de lo que comúnmente se llama agua regia (mezcla de ácido nítrico concentrado y ácido clorhídrico concentrado) para la extracción de metales en placas de circuitos impresos. Con esta metodología se obtuvieron 880 g de oro y 376 kg de cobre por tonelada de residuos de PCB. Otros trabajos reportados han combinado la hidrometalurgia con procesos térmicos y de pirólisis para hacer más efectiva la extracción de los metales (Chen et al., 2013; Swain et al., 2015). En el trabajo reportado de Havlik T. (Havlik et al., 2010), se discute que al aumentar la temperatura de pirólisis se mejoró la extracción de cobre y estaño. Aun cuando los reportes científicos son en su mayoría enfocados a la recuperación de metales, también hay trabajos que se enfocan en la recuperación de polímeros. Por ejemplo, el trabajo de Achilias D.S. (Achilias et al., 2009), se centra en el reciclaje de tres tipos de polímeros: policarbonato (PC), poli (acrilonitrilo-butadieno-estireno) (PABS) y poliestireno (PS) con técnicas como la disolución/re-precipitación y pirólisis.

Sin embargo, todos los métodos mencionados presentan grandes desventajas, en el caso de la pirometalurgia esta produce grandes cantidades de gases tóxicos como el óxido de nitrógeno y requiere de equipos especiales para manejar altas temperaturas. Similares efectos pasan con la hidrometalurgia ya que esta implica un consumo excesivo de ácidos concentrados (Leirnes y Lundstrom, 1983). En un proceso hidrometalúrgico convencional esta situación da como resultado el consumo excesivo de ácidos que no son reutilizados, se incrementan los costos y los desechos generados durante el proceso (Kaya, 2016).

Diversos son los esfuerzos que se han hecho para proponer métodos con menores impactos, tal es el caso de Yue C. (Yue et al., 2017), que propuso un método químico de bajo costo e impacto ambiental, basado en el uso combinado de N-bromosuccinimida (NBS) y piridina (Py), lo cual llevó a obtener una alta selectividad de lixiviación del Au sobre otros metales, mostrando un gran potencial para la aplicación práctica industrial hacia la obtención sostenible del oro a partir de minerales y desechos electrónicos. Otros métodos propuestos llamados ecológicos o verdes que han logrado importantes resultados por la alta tasa de recuperación de RAEE y el bajo impacto ambiental son los trabajos de Estrada-Ruiz R.H y de Jadhao P., en los cuales propusieron: 1) un proceso de flotación inversa para la separación eficiente y limpia de las fracciones metálicas y no metálicas sin generar contaminación al usar solo agua y aire durante la operación (Estrada-Ruiz et al., 2016); y 2) la utilización del proceso de quelación ecológica, con este proceso se logró una recuperación del 83.8% del cobre metálico, mientras que solo el 27% de este mismo metal se pudo recuperar usando el método de lixiviación ácida (Jadhao et al., 2016).



Es importante crear conciencia en la sociedad sobre el consumo y uso de dispositivos móviles, y promover estrategias de disposición segura y adecuada para evitar daños al medio ambiente y a la sociedad, por la exposición de los componentes tóxicos.

Enfoque electroquímico

Como se planteó anteriormente, se han realizado varios enfoques novedosos sobre la recuperación de metales para proporcionar una respuesta real a los actuales requisitos sobre legislación ambiental, entre ellos se incluyen métodos bioquímicos y electroquímicos. Estos últimos han demostrado ser más ecológicos debido a que su principal reactivo es el electrón, un “reactivo limpio” (Fogarasi et al., 2013). Bajo ese contexto, un método fácil y efectivo para la recuperación de metales contenidos en RAEE basados en los trabajos de Chu Y. e Imre-Lucaci F., (Chu et al., 2015; Imre-Lucaci et al., 2009) muestran la recuperación de cobre, mediante un proceso de electrólisis que consiste en el galvanizado de piezas metálicas con metales provenientes de RAEE. La electrólisis, es un proceso donde la energía eléctrica se transforma en energía química. El proceso se lleva a cabo en un electrolito, el cual es una solución acuosa que contiene iones libres, capaces de producir la corriente eléctrica mediante la transferencia de los iones entre dos electrodos, estos electrodos a su vez están conectados a una corriente directa (Alvarado-Flores y Ávalos-Rodríguez, 2013) en una celda electroquímica. Si se aplica un potencial y una corriente eléctrica, los iones positivos -cationes- se desplazan al cátodo mientras que los iones negativos -aniones- se dirigen al ánodo. En diversos trabajos de investigación (Diaz et al., 2017; Diaz y Lister, 2018; Lister et al., 2014) se han propuesto procesos electroquímicos para la regeneración de los oxidantes requeridos en la extracción de metales mediante un análisis RMS (Response Surface Methodology, en inglés). La ventaja de este proceso es que los tiempos de proceso pueden reducirse significativamente porque la extracción y recuperación de metales se realizan simultáneamente. Los procesos electroquímicos pueden resultar una solución atractiva para resolver problemas comúnmente presentados en procesos hidrometalúrgicos e integrarse como etapas previas en dichos procesos, ya que permite la reutilización de ácidos en la

solución de lixiviación de metales, reduciendo significativamente los impactos ambientales y los costos operativos asociados con la generación de residuos y el consumo de productos químicos. Un claro ejemplo es la electrónica de un celular, su reciclaje puede generar 1 kg de plata y 235 g de oro por tonelada de estos, mientras que la actividad minera solo promedia 100 g de plata en cada tonelada de mineral extraído y de 2 a 5 g de oro por tonelada de mineral, lo cual lleva a necesitar de 17 veces menos de energía para la recuperación de RAEE en comparación con materiales vírgenes (Smedley, 2020).

CONCLUSIONES

Como sociedad, se está viviendo en una era donde el consumo y adquisición de bienes hace que sea más cómoda la vida cotidiana. Dentro de estos bienes se encuentran los dispositivos eléctricos y electrónicos, como la televisión, computadoras, tabletas, paneles fotovoltaicos y celulares, entre los principales. Sin embargo, estos tienen un tiempo de uso relativamente corto, provocado por diferentes causas, tales como daños, obsolescencia o simplemente porque se adquiere un modelo más reciente o con nuevas funcionalidades. Debido a esto, los dispositivos “viejos” pasan a convertirse en desechos electrónicos, cuya cantidad en los últimos años se ha incrementado muy rápidamente, provocando un problema de contaminación ambiental y paralelamente se vuelve un problema de desigualdad social. Por lo que se destaca la importancia de crear conciencia en la sociedad sobre el consumo y uso de estos, y promover estrategias de disposición segura y adecuada para evitar daños al medio ambiente y a la sociedad, por la exposición de los componentes tóxicos mencionados en ellos.

Como parte de las acciones a tomar, diversos países del mundo han identificado y evaluado las tendencias globales referentes a la cantidad y composición de los RAEE, y han comenzado a implementar normativas para regular y prevenir los RAEE, aunque aún queda mucho camino por recorrer. Por otra parte, la comunidad científica

ha sumado esfuerzos para desarrollar novedosos procesos electroquímicos de reciclaje de RAEE, que son menos contaminantes, más amigables al ambiente y relativamente menos costosos. Para lograr una reducción significativa y un reciclaje adecuado de los RAEE es importante brindar información a los usuarios sobre qué hacer con sus desechos eléctricos y electrónicos, a dónde deben llevarlos y por qué es importante hacerlo de manera sustentable.

Finalmente, la importancia del desarrollo sustentable reside en que se debe velar por el mejoramiento de la calidad de vida en toda actividad humana. Tomar conciencia y acciones sobre los RAEE que pueden ayudar a disminuir las emisiones de gases tóxicos, generar un descenso de los residuos destinados a incineración y contribuir a que se reduzcan los residuos de basura electrónica que terminan en vertederos, evitando así problemas socio ambientales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Energías Renovables (IER) e Instituto de Ciencias Físicas (ICF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el espacio de trabajo brindado, a la Dra. Hailin Zhao Hu por su invaluable apoyo en los laboratorios de Celdas Híbridas 204-205 del IER-UNAM. A Barcelona Activa-innoBAdora por el curso de capacitación de emprendimiento de Dulce Kristal Becerra Paniagua y Araceli Hernández Granados en Barcelona, España. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de doctorado de Dulce Kristal Becerra Paniagua. Y a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, por la beca postdoctoral otorgada a Araceli Hernández Granados.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores confirmamos que no hay conflictos de intereses y que no existe un apoyo financiero significativo para este trabajo que pueda haber influido en su resultado.





REFERENCIAS

Achilias, D. S., Antonakou, E. V., Koutsokosta, E. and Lappas, A. A. (2009). Chemical recycling of polymers from Waste Electric and Electronic Equipment. *Journal of Applied Polymer Science*, 114(1), 212–221. <https://doi.org/10.1002/app.30533>

Adachi, M., Tanino, R., Adachi, J., Mori, Y., Tsuchiya, K., Isoda, S. and Uchida, F. (2013). Verification of necessity of one-dimensional titania nanoscale materials for dye-sensitized solar cells. *Journal of Power Sources*, 226, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.024>

Alvarado-Flores, J. and Ávalos-Rodríguez, L. (2013). Materiales para ánodos, cátodos y electrolitos utilizados en celdas de combustible de óxido sólido (SOFC). *Revista Mexicana de Física*, 59(1), 66–87. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v59n1/v59n1a1.pdf>

Babu, B. R., Parande, A. K. and Basha, C. A. (2007). Electrical and electronic waste: A global environmental problem. *Waste Management and Research*, 25(4), 307–318. <https://doi.org/10.1177/0734242X07076941>

Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R. and Stegmann, P. (2017). *The Global E-waste Monitor 2017: Quantities, Flows, and Resources*. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. [https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM2017/Global-E-waste Monitor 2017 .pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM2017/Global-E-waste%20Monitor%202017.pdf)

Blaisdell-Vidal, S. F. (2019). *Alternativas para el manejo de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) principalmente computadoras* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/E28C8JAK5F49U9EMXSRDFE7493HRI727P4URBI586CD8DAAM7A-02264?func=find-b&REQUEST=SERGIO+FERNANDO+BLAISDELL+VIDAL&find_code=WRD&ADJACENT=N&local_base=TES01&x=72&y=12&filter_code_2=WYR&filter_request_2=&filter_code_3=WYR&filter_request_3=

- Cañellas Blanco, A. M. y Castellano Alcaide, J. M. (2019). *Ámbito Lingüístico y Social. Geografía Humana*. Editex, S.A. ISBN: 978-84-9161-998-7
- Cesaro, A., Belgiorno, V., Vaccari, M., Jandric, A., Chung, T. D., Dias, M. I., Hursthouse, A. and Salhofer, S. (2018). A device-specific prioritization strategy based on the potential for harm to human health in informal WEEE recycling. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(1), 683–692. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0390-7>
- Chandler, D. (2017). *Strategic Corporate Social Responsibility: Sustainable Value Creation*. https://books.google.com.mx/books?id=q4CzDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Chen, M., Wang, J., Chen, H., Ogunseitan, O. A., Zhang, M., Zang, H. and Hu, J. (2013). Electronic waste disassembly with industrial waste heat. *Environmental Science and Technology*, 47(21), 12409–12416. <https://doi.org/10.1021/es402102t>
- Chu, Y., Chen, M., Chen, S., Wang, B., Fu, K. and Chen, H. (2015). Micro-copper powders recovered from waste printed circuit boards by electrolysis. *Hydrometallurgy*, 156, 152–157. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.06.006>
- Cordova-Pizarro, D., Aguilar-Barajas, I., Romero, D. and Rodriguez, C. (2019). Circular economy in the electronic products sector: material flow analysis and economic impact of cellphone e-waste in Mexico. *Sustainability*, 11(5), 1361. <https://doi.org/10.3390/su11051361>
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Lenny Koh, S. C. and Rosa, P. (2015). Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.010>
- Culver, J. (2015). *The life cycle of the CPU*. <http://www.pushack.com/life-cycle-of-cpu.html>
- Dalrymple, I., Wright, N., Kellner, R., Bains, N., Geraghty, K., Goosey, M. and Lightfoot, L. (2007). An integrated approach to electronic waste (WEEE) recycling. *Circuit World*, 33(2), 52–58. <https://doi.org/10.1108/03056120710750256>
- Daven, J. I. and Klein, R. N. (2008). *Progress in waste management research*. Nova Science, Publishers, Inc, pp. 93–102.
- Dimitrakakis, E., Janz, A., Bilitewski, B. and Gidarakos, E. (2009). Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2–3), 913–919. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.054>
- Ellen MacArthur Foundation. (2018). The circular economy opportunity for urban & industrial innovation in China. *Circular Economy Perspectives Series*, 1–166. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/The-circular-economy-opportunity-for-urban-industrial-innovation-in-China_19-9-18_1.pdf
- Estrada-Ayub, J. A. and Kahhat, R. (2014). Decision factors for e-waste in Northern Mexico: To waste or trade. *Resources, Conservation and Recycling*, 86, 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.02.012>
- Estrada-Ruiz, R. H., Flores-Campos, R., Gámez-Altamirano, H. A. and Velarde-Sánchez, E. J. (2016). Separation of the metallic and non-metallic fraction from printed circuit boards employing green technology. *Journal of Hazardous Materials*, 311, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.061>
- Fogarasi, S., Imre-Lucaci, F., Ilea, P. and Imre-Lucaci, Á. (2013). The environmental assessment of two new copper recovery processes from Waste Printed Circuit Boards. *Journal of Cleaner Production*, 54, 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.044>
- Fondo Monetario Internacional. (2019). *Perspectivas de la economía mundial. Desaceleración mundial de la actividad manufacturera, crecientes barreras comerciales*. ISSN 1564-5215 (online)
- Grant, K., Goldizen, F. C., Sly, P. D., Brune, M. N., Neira, M., van den Berg, M. and Norman, R. E. (2013). Health consequences of exposure to e-waste: A systematic review. *The Lancet Global Health*, 1(6), e350–e361. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(13\)70101-3](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(13)70101-3)

- Hagelüken, C. and Corti, C. W. (2010). Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through “design for recycling.” *Gold Bulletin*, 43(3), 209–220. <https://doi.org/10.1007/BF03214988>
- Havlik, T., Orac, D., Petranikova, M., Miskufova, A., Kukurugya, F. and Takacova, Z. (2010). Leaching of copper and tin from used printed circuit boards after thermal treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1–3), 866–873. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.107>
- Hopson, E. and Puckett, J. (2016). *Scam Recycling: e-Dumping on Asia by US Recyclers, Basel Action Network, USA*. <https://wiki.ban.org/images/1/12/ScamRecyclingReport-web.pdf>
- ILSR. (2002, February). *Recycling Means Business - Institute for Local Self-Reliance*. <https://ilsr.org/recycling-means-business/>
- Imre-Lucaci, F., Dorneanu, S. A. and Ilea, P. (2009). Electrochemical metals recovery from electronic wastes. Part. I. copper recovery from synthetic solutions. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Chemia, SPEC. ISSUE 1*, 105–111. https://www.researchgate.net/profile/Sorin_Dorneanu/publication/294494630_Electrochemical_metals_recovery_from_electronic_wastes_Part_I_copper_recovery_from_synthetic_solutions/links/56d5cd5208aee1aa5f730b22/Electrochemical-metals-recovery-from-electronic-wastes-Part-I-copper-recovery-from-synthetic-solutions.pdf
- Instituto Nacional de Ecología INECC. (2006). *Diagnóstico sobre la Generación de Residuos Electrónicos en México*. SEMARNAT. http://www2.inecc.gob.mx/descargas/sqre/res_electronicos_borrador_final.pdf
- Jadhao, P., Chauhan, G., Pant, K. K. and Nigam, K. D. P. (2016). Greener approach for the extraction of copper metal from electronic waste. *Waste Management*, 57, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.023>
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A. and Kim, K. H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894–900. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>
- Kaya, M. (2016). Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. In *Waste Management*, 57, 64–90. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.004>
- Kiddee, P., Naidu, R. and Wong, M. H. (2013). Electronic waste management approaches: An overview. *Waste Management*, 33(5), 1237–1250. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.006>
- Kim, M., Jang, Y. C. and Lee, S. (2013). Application of Delphi-AHP methods to select the priorities of WEEE for recycling in a waste management decision-making tool. *Journal of Environmental Management*, 128, 941–948. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.049>
- Kumar, A., Holuszko, M. and Espinosa, D. C. R. (2017). E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.018>
- Lechuga Vázquez, P. y Paredes Rizo, M. . L. (2014). Efectos biológicos derivados de la exposición a PBDES en trabajadores del reciclaje de e-waste: revisión sistemática. *Medicina y Seguridad Del Trabajo*, 60(237), 685–713. <https://doi.org/10.4321/s0465-546x2014000400008>
- Leirnes, J. S. and Lundstrom, M. S. (1983). *Method for working-up metal-containing waste products*. <https://www.google.com/patents/US4415360>
- Lines, K., Garside, B., Sinha, S. and Fedorenko, I. (2016). *Clean and inclusive? Recycling e-waste in China and India Issue paper Sustainable markets* (Issue March). <https://pubs.iied.org/pdfs/16611IIED.pdf>
- London, B. (1932). Ending the depression through planned obsolescence. *Self-Published*, 1–8. <https://faculty.bemidjistate.edu/mlawrence/London.pdf>
- Long, E., Kokke, S., Lundie, D., Shaw, N., Ijomah, W. and Kao, C. chuan. (2016). Technical solutions to improve global sustainable management of waste electrical and electronic equipment (WEEE) in the EU and China. *Journal of Remanufacturing*, 6(1), 1–27. <https://doi.org/10.1186/s13243-015-0023-6>

- MapChart. (2020). *World Map - Detailed - MapChart*. <https://mapchart.net/detworld.html>
- Ongondo, F. O., Williams, I. D. and Cherrett, T. J. (2011). How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste Management*, 31(4), 714–730. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.023>
- ONU. (2019). *Los desechos electrónicos, una oportunidad de oro para el trabajo decente*. <https://news.un.org/es/story/2019/04/1455621>
- Perkins, D. N., Brune Drisse, M. N., Nxele, T. and Sly, P. D. (2014). E-waste: A global hazard. *Annals of Global Health*, 80(4), 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.10.001>
- Petter, P. M. H., Veit, H. M. and Bernardes, A. M. (2014). Evaluation of gold and silver leaching from printed circuit board of cellphones. *Waste Management*, 34(2), 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.032>
- Prakashan, P. (2019). *General Knowledge 2019* (Prabhat Prakashan (ed.)). ISBN : 9789352665976
- Prasad, M. N. V. (2020). *Handbook of Electronic Waste Management International Best Practices and Case Studies*. Butterworth-Heinemann. eBook ISBN: 9780128170311
- Puckett, J., Byster, L., Westervelt, S., Gutierrez, R., Davis, S., Puckett, J. and Smith, T. (2002). *Exporting Harm The High-Tech Trashing of Asia*. Svt C. <http://svtc.org/wp-content/uploads/technotrash.pdf>
- Qu, W., Bi, X., Sheng, G., Lu, S., Fu, J., Yuan, J. and Li, L. (2007). Exposure to polybrominated diphenyl ethers among workers at an electronic waste dismantling region in Guangdong, China. *Environment International*, 33(8), 1029–1034. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.05.009>
- Queiruga, D., Walther, G., González-Benito, J. and Spengler, T. (2008). Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain. *Waste Management*, 28(1), 181–190. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.11.001>
- Rahmani, M., Nabizadeh, R., Yaghmaeian, K., Mahvi, A. H. and Yunesian, M. (2014). Estimation of waste from computers and mobile phones in Iran. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.009>
- Rocha-Gutiérrez, B. A., Peralta-Pérez, M. D. R. y Zavala-Díaz de la Serna, F. J. (2015). Revisión global de los contaminantes emergentes PBDE y el caso particular de México. In *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(3), 311–320. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992015000300010
- Rubin, R. S., Castro, M. A. S. De, Brandão, D., Schalch, V. and Ometto, A. R. (2014). Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. *Journal of Cleaner Production*, 64, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.051>
- Smedley, T. (2020). *How to mine precious metals in your home*. BBC Future. <https://www.bbc.com/future/article/20200407-urban-mining-how-your-home-may-be-a-gold-mine>
- Stenvall, E., Tostar, S., Boldizar, A., Foreman, M. R. S. J. and Möller, K. (2013). An analysis of the composition and metal contamination of plastics from waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Waste Management*, 33(4), 915–922. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.12.022>
- Stephanie Weckend, Andreas Wade and Garvin Heath. (2016). *End of Life Management Solar PV Panels*. https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_ieapvps_end-of-life_solar_pv_panels_2016.pdf
- Swain, B., Mishra, C., Kang, L., Park, K. S., Lee, C. G. and Hong, H. S. (2015). Recycling process for recovery of gallium from GaN an e-waste of LED industry through ball milling, annealing and leaching. *Environmental Research*, 138 (2015), 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.02.027>

- Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E. Y. and Deveci, H. (2012). Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, 25(1), 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.019>
- Turner, A. (2020). *How many people have smartphones in 2020?* Bank My Cell. <https://www.bankmycell.com/blog/how-many-phones-are-in-the-world>
- UN. (2019). *UN report: Time to seize opportunity, tackle challenge of e-waste | UNEP - UN Environment Programme*. <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/press-release/un-report-time-seize-opportunity-tackle-challenge-e-waste>
- United Nations University. (2012). *E-waste: Annual Gold, Silver “Deposits” in New High-Tech Goods Worth \$21 Billion+; Less Than 15% Recovered* - United Nations University. <https://unu.edu/media-relations/releases/step-news-release-6-july-2012-e-waste-precious-metals-recovery.html>
- Wang, F., Huisman, J., Stevels, A. and Baldé, C. P. (2013). Enhancing e-waste estimates: Improving data quality by multivariate Input-Output Analysis. *Waste Management*, 33(11), 2397–2407. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.005>
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M. and Böni, H. (2005). Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, 25(5 SPEC. ISS.), 436–458. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.04.001>
- Wong, M. H., Wu, S. C., Deng, W. J., Yu, X. Z., Luo, Q., Leung, A. O. W., Wong, C. S. C., Luksemburg, W. J. and Wong, A. S. (2007). Export of toxic chemicals - A review of the case of uncontrolled electronic-waste recycling. *Environmental Pollution*, 149(2), 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.044>
- World Economic Forum. (2019). *A New Circular Vision for Electronics Time for a Global Reboot*. January, 24. http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf
- Worldometer. (2020). *Population by Country (2020) - Worldometer*. <https://www.worldometers.info/world-population/population-by-country/>
- WOS. (2020). Web of Science [v.5.33] - *Colección principal de Web of Science Búsqueda básica*. www.webofknowledge.com
- Yang, H., Ma, M., Thompson, J. R. and Flower, R. J. (2018). Waste management, informal recycling, environmental pollution and public health. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 72(3), 237–243. <https://doi.org/10.1136/jech-2016-208597>
- Yue, C., Sun, H., Liu, W.-J., Guan, B., Deng, X., Zhang, X. and Yang, P. (2017). Environmentally benign, rapid, and selective extraction of gold from ores and waste electronic materials. *Angewandte Chemie*, 129(32), 9459–9463. <https://doi.org/10.1002/ange.201703412>

ISSN 2602-8042 [Impresa]

ISSN 2631-2522 [Electrónica]

enerLAC

Revista de
Energía de
Latinoamérica
y el Caribe

 **olade** | ORGANIZACIÓN
LATINOAMERICANA
DE ENERGÍA



Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO

Av. Mariscal Antonio José de Sucre
N58-63 y Fernández Salvador
Quito - Ecuador

Tel. (+593 2) 2598-122 / 2598-280
/ 2597-995

enerlac@olade.org

