

Elementos Críticos en Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, y su afectación a la salud y al medio ambiente. Un breve análisis.

Adriana K. Leura V.*, Juan M. Alfaro B.

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas, Subdirección de Licenciado en Química Industrial. Ciudad Universitaria, Pedro de Alba s/n San Nicolás de los Garza, Nuevo León C.P. 66451.

*aleurav@uanl.edu.mx

Recibido 17 diciembre 2021, Aceptado 24 enero 2022

Resumen

Los denominados elementos o minerales críticos, son constituyentes fundamentales de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos, los cuales en los últimos años han presentado un incremento en la demanda, principalmente aquellos empleados en las telecomunicaciones y servicios de tecnología digital, y que gracias a sus cortos tiempos de vida útil, se convierten rápidamente en residuos de manejo especial. Sin embargo, debido a una falta de cultura social y políticas estrictas para su manejo, son depositados en rellenos sanitarios a cielo abierto, donde actividades de *pepena* y las condiciones del sitio, pueden favorecer la liberación de los elementos críticos al ambiente. En este breve análisis se indican cuáles son las principales afectaciones asociadas a los elementos críticos presentes en los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos a fin de evidenciar el impacto a la salud humana y ambiental, en aras de generar una mayor conciencia en el manejo de este tipo de residuos.

Abstract

The critical elements or minerals are fundamental constituents of Electrical and Electronic Equipment, which in recent years have shown an increase in demand, mainly those used in telecommunications and digital technology services, and due to their short times shelf life, it will quickly set up into special handling waste. However, due to a lack of social culture and strict policies for their management, they are deposited in open-air sanitary landfills, where *pepena* activities and site conditions can favor the release of critical elements into the environment. This brief analysis indicates which are the main conditions associated with the critical elements present in waste electrical and electronic equipment in order to demonstrate the impact on human and environmental health, in order to generate greater awareness in the management of this type of waste.

Palabras clave: *elementos críticos, aparatos eléctricos, residuos de aparatos eléctricos*

Key words: *critical mineral, electrical equipment, e-waste*

1. INTRODUCCIÓN

Se denomina elemento o mineral crítico a aquel que, en caso de presentar escasez en su suministro, el impacto en la economía resulta mayor que el de cualquier otro elemento o mineral [1,2,3]. La disponibilidad de algunos minerales se mide considerando algunas cuestiones que pueden ser: 1) aspectos geológicos en cuanto a si existe o no el recurso natural; 2) técnicos, si es posible extraerlos o no; 3) ambientales, si es posible producirlo de un modo ambiental o socialmente aceptable; 4) políticos, el cómo influyen los gobiernos en la disponibilidad de un recurso por medio de sus políticas y acciones; y 5) económicos; si es posible producir a un coste que el consumidor acepte [1].

Estados Unidos de América, la Unión Europea, Reino Unido, Japón, Corea del Sur, Canadá, Australia, la República Popular de China y Vietnam debido a su potencial de producción/adquisición han identificado una serie de elementos y/o minerales críticos que oscilan entre 19 y 32, como son: Antimonio, Barita, Berilio, Bismuto, Borato, Cobalto, Carbón de coque, Caucho natural, Fluorita, Fosforita, Galio, Germanio, Grafito,

Hafnio, Helio, Indio, Magnesio, Niobio, Escandio, Silicio metálico, Tantalio, Wolframio, Vanadio, Metales del grupo del Platino, Tierras Raras Pesadas, Tierras Raras Ligeras, Bauxita, Litio, Titanio, Estroncio,

Arsénico, Cesio, Cromo, Manganeso, Potasa, Renio, Rubidio, Telurio, Estaño, Uranio y Zirconio [2,3,4,5,6]. Dentro de las aplicaciones de los elementos y minerales críticos se pueden mencionar la industria Aeroespacial, Defensa, Energía, Transporte, Infraestructura, Medicina, Química, Metalurgia, Telecomunicaciones y electrónicos, entre otras [2].

En el caso particular de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE), estos se encuentran íntimamente relacionados con el desarrollo de la sociedad y de la economía, y en los últimos años se ha observado un crecimiento progresivo como un efecto directo de la urbanización, la industrialización y el poder adquisitivo de la población. Los AEE se agrupan en seis categorías generales dependiendo de su función, componentes y dimensiones tal como se describe en la Tabla 1 [7].



Tabla 1. Categorías generales de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.

Categoría	Descripción
1. Aparatos de intercambio de temperatura	Refrigeradores, congeladores, aparatos de aire acondicionado y bombas de calor.
2. Pantallas y monitores	Televisores, monitores, ordenadores portátiles, incluidos los miniportátiles, y tabletas.
3. Lámparas	Lámparas fluorescentes, lámparas de descarga de alta intensidad y lámparas LED.
4. Grandes aparatos	Lavadoras, secadoras, lavavajillas, cocinas eléctricas, impresoras grandes, fotocopiadoras y paneles fotovoltaicos.
5. Pequeños aparatos	Aspiradoras, hornos de microondas, equipos de ventilación, tostadoras, hervidores eléctricos, afeitadoras eléctricas, básculas, calculadoras, aparatos de radio, videocámaras, juguetes eléctricos y electrónicos, pequeñas herramientas eléctricas y electrónicas, pequeños dispositivos médicos y los pequeños instrumentos de supervisión y control.
6. Aparatos de Informática y de telecomunicaciones pequeños.	Teléfonos móviles, dispositivos del sistema mundial de determinación de la posición (GPS), calculadoras de bolsillo, encaminadores, computadoras personales, impresoras y teléfonos.

Una de las mayores problemáticas asociadas a los AEE es su corto tiempo de vida útil de 2 a 5 años para teléfonos celulares y portátiles; 5 a 7 años para televisores, por mencionar algunos, lo que contribuye al aumento cotidiano de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE, E-Waste por sus siglas en inglés). En 2019 se produjeron 53.6 millones de toneladas métricas (Mt) [7,8], siendo México el tercer productor de este tipo de residuos en América, solamente precedido por Estados Unidos y Brasil [9]. De acuerdo con el Foro de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (WEEE Forum, por sus siglas en inglés), como resultado en el incremento de las actividades de Home Office y entretenimiento en los hogares, en respuesta a la pandemia por COVID-19, las necesidades por AEE, especialmente de aquellos enlistados en las categorías de pantallas y monitores, y aparatos de informática y de telecomunicaciones pequeños, se determinó una producción aproximada de 57.4 Mt [10]. A pesar de que los RAEE son considerados residuos de manejo especial de acuerdo a lo enmarcado en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos [11,12], la realidad es que la disposición final de los mismos en la mayoría de las ocasiones se realiza en vertederos municipales a cielo abierto, lo que se

traduce en afectaciones a la salud de la población y del ambiente.

2. EFECTOS A LA SALUD HUMANA Y AMBIENTAL

Una de las principales actividades informales que se realizan en los rellenos sanitarios a cielo abierto es la pepena, es decir, la recuperación de residuos sólidos ya sea para su reciclaje o la obtención de materiales de interés económico, por lo que hombres, mujeres y niños que se dedican a esta actividad se ven seriamente expuestos a los elementos que conforman los RAEE, los cuales pueden llegar a ser potencialmente tóxicos. Aunado a ello, procesos como la lixiviación o el arrastre hídrico o eólico pueden favorecer la dispersión de los elementos entre los diferentes compartimentos ambientales.

Entre los elementos críticos que se emplean en la producción de AEE y que por ende forman parte de los RAEE, se destacan el indio, estaño, tierras raras, iridio, elementos del grupo del platino, tantalio, arsénico, cesio, rubidio, galio, cobalto y litio [13]. A continuación se describen en las Tablas 2 y 3, las afectaciones a la salud humana y ambiental que han sido reportadas en la literatura para cada uno de los elementos críticos presentes en este tipo de residuos.

Tabla 2. Afectación a la salud humana y ambiental de elementos críticos presentes en Aparatos Eléctricos y electrónicos de las categorías dos y seis de la clasificación general de AEE.

Elemento crítico	Afectación Salud Humana	Afectación Salud Ambiental	Ref.
Indio	Daños en el corazón, riñones e hígado y pueden ser teratógenos.	Los efectos ambientales de esta sustancia aún no han sido reportados.	[14]
Estaño	La ingestión de grandes cantidades de compuestos inorgánicos puede producir dolores de estómago, anemia, y alteraciones del hígado y los riñones. Compuestos orgánicos pueden interferir con el funcionamiento del sistema nervioso y el cerebro. En casos graves, puede causar la muerte. El contacto de la piel o los ojos con compuestos inorgánicos u orgánicos de estaño	El estaño inorgánico se adhiere al suelo y a sedimentos en el agua, y algunos se disuelven en agua. Una vez en la atmósfera, el estaño se adhiere a partículas de polvo que pueden ser movilizadas por el viento o removidas del aire por la lluvia. Los compuestos orgánicos de estaño se adhieren al sedimento en el suelo y a partículas en el agua. Los compuestos orgánicos de estaño pueden acumularse en	[15]

	puede producir irritación de la piel y los ojos.	peces, en otros animales y en plantas.	
--	--	--	--

Tabla 2. Cont. Afectación a la salud humana y ambiental de elementos críticos presentes en Aparatos Eléctricos y electrónicos de las categorías dos y seis de la clasificación general de AEE.

Elemento crítico	Afectación Salud Humana	Afectación Salud Ambiental
Tantalio	La toxicidad sistémica del óxido de tantalio y del tantalio metálico es baja, probablemente por su escasa solubilidad. Sin embargo, constituye un riesgo para la piel, los ojos y el aparato respiratorio.	No se ha reportado efectos en el ambiente por tantalio.
Arsénico	Puede producir náusea y vómitos, disminución del número de glóbulos rojos y blancos, ritmo cardíaco anormal, fragilidad capilar y una sensación de hormigueo en las manos y los pies. La inhalación de niveles altos de arsénico inorgánico puede producir dolor de garganta e irritación de los pulmones e inclusive puede ser fatal. El contacto de la piel con arsénico inorgánico puede producir enrojecimiento e hinchazón.	Muchos compuestos comunes de arsénico pueden disolverse en agua. Los peces y mariscos pueden acumular arsénico; la mayor parte de este arsénico está en una forma orgánica llamada arsenobetaina
Cesio	Animales de laboratorio expuestos a muy altas concentraciones exhibieron aumento o disminución en actividad.	En el aire, el cesio puede movilizarse largas distancias antes de depositarse en el suelo o en el agua. La mayoría de los compuestos de cesio se disuelven en agua. El cesio se adhiere firmemente a la mayoría de los suelos y no se profundiza bajo la superficie del suelo.
Galio	Existe la posibilidad de exposiciones por inhalación de polvo durante la producción de óxidos y sales en polvo y durante la producción y proceso de monocristales de los compuestos semiconductores. Las salpicaduras y derrames de soluciones del metal y sus sales pueden actuar sobre la piel y las mucosas.	No se han reportado afectaciones al ambiente por galio.
Cobalto	La exposición a niveles altos de cobalto puede producir efectos en los pulmones y el corazón. También puede producir dermatitis.	El cobalto en el aire se asociará con partículas que se depositarán en el suelo en unos pocos días. El cobalto liberado al agua o al suelo se adherirá a partículas. Algunos compuestos de cobalto se pueden disolver en el agua.
Litio	Inhalación: Sensación de quemadura, tos, respiración trabajosa, falta de aire, dolor de garganta. Piel: Enrojecimiento, quemaduras cutáneas, dolor, ampollas. Ingestión: Calambres abdominales, dolor abdominal, sensación de quemadura, náuseas, shock o colapso, vómitos, debilidad.	El litio metálico reacciona con el nitrógeno, el oxígeno, y el vapor de agua en el aire. El hidróxido de litio representa un peligro potencialmente significativo porque es extremadamente corrosivo. Se debe prestar especial atención a los organismos acuáticos.
Rubidio	El rubidio reacciona rápidamente con la humedad de la piel para formar hidróxido de rubidio, que provoca quemaduras térmicas en los ojos y piel.	No se han documentado efectos ambientales del rubidio.

Tabla 3. Afectación a la salud humana* de los elementos críticos del grupo del platino presentes en Aparatos Eléctricos y electrónicos de las categorías dos y seis de la clasificación general de AEE.

Elemento crítico	Afectación Salud Humana	Ref.
Platino	Se cree que los efectos tóxicos y potencialmente tóxicos del platino están relacionados con determinadas sales hidrosolubles como el hexacloroplatinato potásico, el tetracloroplatinato potásico, el cloroplatinato sódico y el cloroplatinato amónico. La exposición por inhalación de estas sales provoca manifestaciones alérgicas respiratorias, estornudos, lagrimeo y tos. Posteriormente, aparecen síntomas asmáticos con tos, congestión torácica, jadeos y fatiga	[23]
Iridio	Se sabe muy poco sobre la toxicidad del iridio y sus compuestos. Dado que se utiliza en cantidades reducidas, no ha habido muchas oportunidades de observar efectos adversos en el hombre. Todos los radioisótopos son potencialmente dañinos y deben aplicarse las medidas de seguridad adecuadas para la manipulación de material radiactivo. Los compuestos solubles de iridio, como el tribromuro y el tetrabromuro de iridio y el tricloruro de iridio producen los efectos tóxicos tanto del iridio como del halógeno, pero no existen datos sobre la toxicidad crónica. El tricloruro de iridio se ha descrito como un irritante leve para la piel y produce irritación ocular.	[24]
Osmio	El osmio metálico es inocuo, pero las personas que trabajan en su producción están expuestas a la acción de los vapores de ácidos y de cloro. Los vapores de tetróxido de osmio son tóxicos y sumamente irritantes para los ojos: producen lagrimeo y conjuntivitis incluso en bajas concentraciones. También son irritantes para las vías respiratorias altas y provocan bronquitis, espasmos bronquiales y dificultad respiratoria, que puede durar varias horas. Una exposición más prolongada puede producir lesiones corneales, ceguera, trastornos digestivos y procesos inflamatorios pulmonares y renales. En contacto con la piel, produce una coloración verde o negra de la piel, y dermatitis y ulceraciones.	[24]
Paladio	El cloruro de paladio produce dermatitis y sensibilización cutánea de tipo alérgico en trabajadores expuestos diariamente. Además, debe considerarse como irritante ocular.	[24]
Rutenio	El tetraóxido de rutenio es volátil e irritante para el tracto respiratorio.	[24]

*No se han reportado efectos en el ambiente asociados a los elementos del grupo del platino.

Actualmente, la mayoría de los estudios reportados en la literatura respecto al impacto ambiental asociado a RAEE, se enfocan a los elementos normados y definidos como potencialmente tóxicos (cadmio, mercurio, plomo, cromo hexavalente), es por ello, que en las tablas 2 y 3 se refiere la falta de información respecto a los denominados elementos críticos.

Lo anterior denota la necesidad de realizar estudios enfocados a evaluar la presencia de los diversos elementos críticos que se encuentran presentes en los Aparatos Eléctricos y Electrónicos en diversas matrices ambientales y determinar su repercusión en el ambiente, de tal manera que se contribuya a la generación de políticas estrictas relacionadas con el manejo y disposición de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, así como el desarrollo de programas de capacitación y concientización dirigidos a los diversos sectores de la población, de tal manera que en conjunto, contribuyan a disminuir el impacto asociado a estos elementos.

3. REFERENCIAS

1. Regueiro; Barros. SEM. 2014, 19, 9p.
2. U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/of/2018/1021/ofr20181020.pdf> (accesado el 15 de diciembre de 2021)
3. European Commission 2020. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42849> (accesado el 4 de enero de 2022)
4. European Commission 2020. <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2020-e294f6> (accesado el 10 de diciembre de 2021)
5. Government of Canada 2021. <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/critical-minerals/23414> (accesado el 7 de enero de 2022)
6. Australian Government 2021. <https://www.industry.gov.au/data-and-publications/australias-critical-minerals-strategy/the-opportunity-for-the-critical-minerals-sector> (accesado el 5 de enero de 2022).
7. Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G. Observatorio Mundial de los Residuos Electrónicos – 2020: Cantidades, flujos y potencial de la economía circular. Universidad de las Naciones Unidas (UNU)/Instituto de las Naciones Unidas para Formación Profesional e Investigaciones (UNITAR) – coorganizadores del programa SCYCLE, Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y Asociación

- Internacional de Residuos Sólidos (ISWA), Bonn/Ginebra/Rotterdam, 2020: 120 p.
8. Robinson B.H. *Science of The Total Environment*. 2009, 408:2, 183-191.
 9. Murguía. *Visión de Futuro*. 2022, 26,1, pp. 105-122.
 10. WEEE Forum 2021. https://weee-forum.org/ws_news/international-e-waste-day-2021/. (accesado el 7 de enero de 2022)
 11. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2003. DOF, 52 p.
 12. SEMARNAT 2020, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf> .(accesado el 12 de enero de 2022)
 13. Bakas I., Herczeg M., Veá E.B., Frane A., Youhanan L., Baxter J. *Nordic Council of Ministers*, 2016, 52 p.
 14. Gunnar F. Nordberg, Bruce A. Fowler, in *Risk Assessment for Human Metal Exposures*, 2019, pp. 227-310
 15. Agency for toxic Substances and Disease Registry 2014. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=543&tid=98>. (accesado el 13 de enero de 2022).
 16. National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Tantalum#section=Therapeutic-Uses> (accesado el 13 de enero de 2022).
 17. Agency for toxic Substances and Disease Registry 2016. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=22&tid=3> (accesado el 13 de enero de 2022).
 18. Agency for toxic Substances and Disease Registry 2011. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=578&tid=107> (accesado el 13 de enero de 2022).
 19. Chitambar C.R. *Int J Environ Res Public Health*. 2010, 7,5, pp. 2337-2361
 20. Agency for toxic Substances and Disease Registry 2011. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=373&tid=64> (accesado el 13 de enero de 2022)
 21. Medic B., Stojanovic M., Stimec B.V., Divac N., Vujovic K.S., Stojanovic R., Colovic M., Krstic D., Prostran M. *Curr Med Chem*. 2020. 27, 3, pp. 337-351.
 22. United State Environmental Protection Agency. SRC, Inc. Syracuse, NY. 39 p.
 23. Centers for Disease Control and Prevention 2017. https://www.cdc.gov/biomonitoring/Platinum_BiomonitoringSummary.html (accesado el 13 de enero de 2022).
 24. Lebeau A. John Wiley and Sons, Inc. 2015. Pp. 187-192.