

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<https://dx.doi.org/10.14482/inde.43.01.214.956>

# Caracterización química y estructural avanzada de desperdicios de memorias RAM: un enfoque hacia la reciclabilidad y seguridad ambiental

*Advanced chemical and structural  
characterization of RAM memory waste:  
an approach towards recyclability  
and environmental safety*

L U I S G A B R I E L G Ó M E Z A C O S T A \*  
G I O V A N Y O R O Z C O H E R N Á N D E Z \* \*  
D A N I E L F E R N A N D O Q U I N T E R O B E R N A L \* \* \*

\* Estudiante, Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Informática. Candidato a doctor en el programa de Ciencias de la Ingeniería Mención en Informática.

Orcid-ID: <https://orcid.org/0000-0003-1667-5793>. [luis.gomez.ac@usach.cl](mailto:luis.gomez.ac@usach.cl)

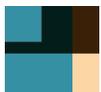
\*\* Profesor e investigador, Universidad ECCI. Dirección de Posgrados. Grupo de investigación GIDMyM. Ph.D. en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales.

Orcid-ID: <https://orcid.org/0000-0002-9132-7310>. [gorozcoh@ecci.edu.co](mailto:gorozcoh@ecci.edu.co)

\*\*\* Estudiante. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Candidato a doctor en el programa de Ciencias de la Ingeniería Mención en Automática.

Orcid-ID: <https://orcid.org/0000-0002-0745-6452>. [daniel.quintero@usach.cl](mailto:daniel.quintero@usach.cl)

**Correspondencia:** Daniel Quintero. Estación Central, Santiago, Chile.  
[daniel.quintero@usach.cl](mailto:daniel.quintero@usach.cl)



## Resumen

Este estudio aborda la caracterización química y estructural de polvos derivados de la molienda de desechos de memorias RAM, enfocándose en la identificación de su composición química (elementos metálicos y no metálicos). Mediante el uso de técnicas avanzadas como espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) y difracción de rayos X se detectó una variedad de elementos y compuestos tanto metálicos (Cu, Si, Sn) como no metálicos (fibra de vidrio) esenciales en la manufactura de placas de circuitos electrónicos. Además, se evaluaron las concentraciones de elementos ambientalmente peligrosos (Pb, As, Cd) y bifenilos policlorados, y se encontró que en su mayoría están dentro de los niveles autorizados por las regulaciones internacionales, lo que sugiere que estos desechos son relativamente seguros desde una perspectiva ecológica. No obstante, se observaron niveles de plomo superiores a los límites establecidos, lo que indica la necesidad de un manejo cuidadoso. Este trabajo contribuye al conocimiento sobre la composición de los desechos electrónicos y subraya la importancia de desarrollar procesos de reciclaje efectivos y seguros para mitigar los posibles riesgos ambientales.

**Palabras clave:** caracterización química, desechos electrónicos, reciclabilidad y seguridad ambiental.

## Abstract

This study addresses the chemical and structural characterization of powders derived from the grinding of RAM memory waste, focusing on the identification of their chemical composition (metallic and non-metallic elements). Using advanced techniques such as X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction, a variety of metallic (Cu, Si, Sn) and non-metallic (fiberglass) elements and compounds essential in the manufacture of electronic circuit boards were detected. Furthermore, the concentrations of environmentally hazardous elements (Pb, As, Cd) and polychlorinated biphenyls were evaluated, finding that, for the most part, they are within the levels permitted by international regulations, suggesting that these wastes are relatively safe from an ecological perspective. However, levels of lead exceeding the established limits were observed, indicating the need for careful management. This work contributes to the knowledge about the composition of electronic waste and underscores the importance of developing effective and safe recycling processes to mitigate potential environmental risks.

**Keywords:** chemical characterization, electronic waste, recyclability and environmental safety.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el vertiginoso avance de la tecnología electrónica y computacional ha conducido a un incremento exponencial en la producción de desechos sólidos eléctricos y electrónicos (WEEE, por sus siglas en inglés). Este fenómeno global, evidenciado incluso en países en desarrollo, ha resultado en la acumulación de cantidades significativas de productos electrónicos obsoletos, contribuyendo a una fracción creciente, aunque aún pequeña, del total de desechos sólidos mundiales liberados al medio ambiente sin el tratamiento o disposición adecuados [1], [2]. La magnitud de este problema se ilustra por las estimaciones de las Naciones Unidas, que indican que la producción anual de WEEE (2016) oscila entre 20 y 50 millones de toneladas, y se encuentra en una trayectoria de crecimiento exponencial [3]. Estos desechos, constituidos por una compleja amalgama de vidrio, plásticos, tarjetas de circuitos impresos y una variedad de metales, presentan desafíos únicos tanto para la recuperación de recursos valiosos como para la mitigación de riesgos ambientales [4].

Las tarjetas de circuitos impresos, ubicuos en la mayoría de los dispositivos electrónicos contemporáneos, son especialmente notorios por su contenido metálico, que incluyen metales económicamente valiosos como el oro, el cobre y la plata. Sin embargo, estos desechos también albergan materiales peligrosos, como los bifenilos policlorados (PCB, por sus siglas en inglés) y metales pesados, que los convierten simultáneamente, en primera instancia, en fuentes de recursos económicos atractivos y, en segunda instancia, en peligrosos contaminantes ambientales.

En el primer caso, el tratamiento adecuado de los desechos electrónicos es crucial para una economía circular sostenible, ya que estos desechos representan una valiosa fuente de recursos. En 2016, el valor de los materiales en estos desechos se estimó en 55 mil millones de euros, superando el PIB de muchos países. Los desechos electrónicos contienen metales preciosos y materiales críticos, cuya recuperación no solo reduce los impactos ambientales negativos, sino que también crea oportunidades de empleo [5]. Es así como, en el ámbito formal, compañías líderes han desarrollado procesos refinados de recuperación para extraer metales preciosos de las tarjetas de circuitos impresos, subrayando el valor inherente de estos desechos electrónicos. A medida que los avances tecnológicos continúan evolucionando, la composición de dichas tarjetas se torna cada vez más elaborada y variada, lo que afecta la viabilidad y la eficacia de las prácticas de reciclaje [6].

En el segundo caso, en países en desarrollo, donde la acumulación de WEEE es particularmente alta, la prevalencia de técnicas de reciclaje informales, como la incineración a cielo abierto y los baños en ácidos, plantea graves amenazas para el bienestar

humano y el ecosistema [7]; particularmente, los PCB son productos químicos industriales que han recibido una amplia atención debido a su implicación en la contaminación de ríos y lagos, así como en la muerte o envenenamiento de peces, junto con diversos escándalos relacionados con la salud humana; a pesar de la prohibición global de los PCB debido a su probada toxicidad ambiental y riesgos para la salud, su presencia en los componentes y desperdicios electrónicos es una realidad, lo cual destaca la importancia de tener una disposición final y adecuada de los mismos. Ejemplos de lo señalado son los incidentes que incluyen el caso de aceite de arroz contaminado en Japón y Taiwán; el primero en 1968 y el segundo en 1979 [8].

La gestión deficiente y la disposición ilegal de residuos electrónicos pueden desencadenar consecuencias ambientales graves. Esta contaminación puede afectar diversos entornos, desde el suelo hasta el aire y el agua, poniendo en riesgo tanto la vida silvestre como las comunidades locales. Por ejemplo, en China se han identificado actividades específicas de reciclaje y disposición inadecuada de residuos electrónicos, lo que expone a las comunidades a metales pesados como el plomo y otras sustancias tóxicas, aumentando considerablemente los riesgos para la salud. Es crucial abordar estos desafíos con prácticas de gestión de residuos más seguras y regulaciones más estrictas para mantener a salvo tanto el ecosistema como la salud pública [9].

Por otra parte, la regulación de sustancias químicas peligrosas se ha fortalecido a nivel internacional mediante los convenios de Estocolmo, Róterdam y Basilea. Estos buscan vigilar y limitar el tráfico internacional de desechos peligrosos y productos químicos tóxicos. Aunque se han implementado medidas para regular los WEEE, la transferencia de estos desechos desde países desarrollados hacia economías emergentes sigue siendo significativa. Además, países como China e India, que son grandes generadores de WEEE, experimentan un rápido crecimiento en el mercado de equipos electrónicos, lo que plantea desafíos adicionales en términos de gestión y control de estos desechos [5].

De manera puntual, el Anexo I del Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación establece para los desperdicios que requieren control, las corrientes de desechos, sustancias y artículos contaminados por los PCB. Entre tanto, el Anexo VIII en la lista A del mismo convenio sostiene que los desechos caracterizados como peligrosos incluyen, entre otros, a los montajes eléctricos y electrónicos de desecho y sus residuos, así como PCB en un grado tal que excedan las características del anexo III, en particular los elementos ecotóxicos o materiales y desechos que, al ser liberados en el medio ambiente, podrían ocasionar efectos adversos tanto a corto como a largo plazo, debido a su capacidad no solo para bioacumularse, sino también por su alta toxicidad para los sistemas biológicos. En conclusión, el documento subraya la necesidad de tener un

control, así como una adecuada gestión de todos aquellos compuestos o desperdicios electrónicos para prevenir riesgos ambientales y para cumplir con las regulaciones internacionales de manejo de desechos peligrosos [10].

En virtud de lo expuesto, en países en desarrollo, los alcances de los peligros asociados con la disposición final inadecuada de los desperdicios electrónicos en general no se conocen con total plenitud aún; razón por la cual este artículo expone las razones por las cuales es necesario realizar pruebas de laboratorio con el fin de obtener de manera asertiva apreciaciones cuantitativas de la matriz de componentes y sustancias que conforman los mismos. Esta caracterización permitirá elaborar hojas de ruta que servirán no solo a nivel nacional, para el caso puntual colombiano, sino también internacional, con contextos y características similares con relación a países en desarrollo, con el fin de tener una adecuada gestión de los WEEE, ya que una mala e inadecuada disposición final de los mismos impacta de manera negativa todo ecosistema con el cual interactúan.

Este estudio tuvo como propósito caracterizar química y estructuralmente los polvos resultantes de la molienda de desechos de memorias RAM, con el objetivo de determinar la presencia y las cantidades de materiales metálicos y no metálicos. Al identificar los componentes de estos desechos electrónicos, buscamos no solo comprender mejor su composición y potencial de reciclabilidad, sino también evaluar su seguridad ambiental.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio se recolectaron desechos eléctricos de memorias RAM de equipos de cómputo obsoletos obtenidos en la ciudad de Manizales (Colombia). Estos desechos se procesaron mediante molienda mecánica usando un molino de aspas **Retsch, modelo SR 200**, a una velocidad de 3420 rpm, durante 30 minutos, y se obtuvo aproximadamente 1 kg de polvo fino con un tamaño promedio de partícula de aproximadamente 80  $\mu\text{m}$ .

Las muestras de polvo se analizaron mediante Microscopía Electrónica de Barrido, utilizando un microscopio **FEI QUANTA 250** de alta resolución, operando en condiciones de alto vacío (menor a  $6 \times 10^{-4} \text{Pa}$ ) y alcanzando una resolución de 3.0 nm a 30 kV. Este microscopio, equipado con un sistema de análisis químico por medio de espectroscopia de rayos X de energía dispersiva modelo GENESIS APEX2i, permitió la caracterización superficial química de las muestras. Adicionalmente, se emplearon análisis de difracción de rayos X (XRD) en un difractómetro Philips Panalytical Xpert Pro, con configuración bragg-brentano ( $\theta - 2\theta$ ) y radiación  $\text{CuK}\alpha$  de 1.540998 Å, reco-

lectando difractogramas en un rango de  $2\theta$  de 20 a 80 grados, con un paso de  $\Delta 2\theta$  de  $0,02^\circ$  y un tiempo de adquisición de 50 segundos por paso.

La extracción de metales como Cd (cadmio), Pb (plomo) y As (arsénico) se realizó mediante la técnica de lixiviación, siguiendo el método de extracción para *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) según EPA 1311. La cuantificación de estos metales se efectuó por espectroscopía de absorción atómica, utilizando un espectrómetro **Agilent Technologies 240 FS AA** con un generador de hidruros modelo VGA 77. Las variables empleadas en la cuantificación se resumen en la tabla 1.

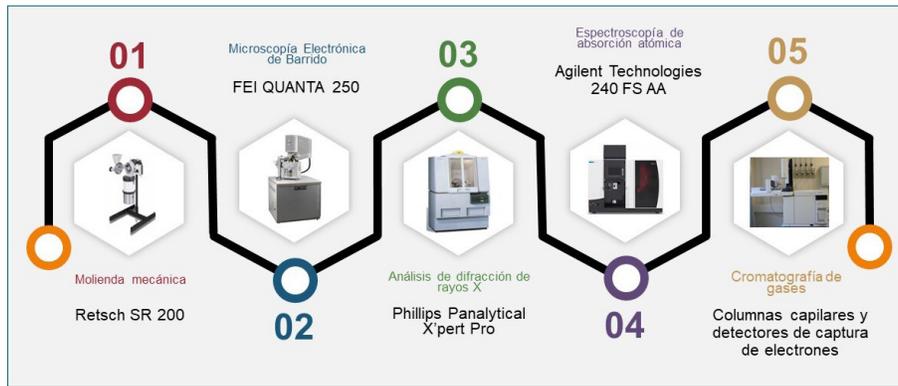
**TABLA 1.** RELACIÓN DE VARIABLES PARA LA CUANTIFICACIÓN DE METALES EN LOS POLVOS DE MEMORIAS RAM

Metal	Longitud de onda (NM)	Rango de trabajo	Método de cuantificación
Cadmio	228.8	0.3 - 1.5 ppm	SM 3111 B
Plomo	217.0	1 - 5 ppm	SM 3111 B
Arsénico	193.7	1 - 10 ppb	SM 3114 C

**Fuente:** elaboración propia.

Además, se llevaron a cabo análisis de los PCB mediante cromatografía de gases, acorde con la norma ASTM D6160-98(2003), para evaluar el contenido de PCB y compararlo con las normativas ambientales actuales. El límite de PCB aceptado internacionalmente, según el convenio de Basilea, es comúnmente de 50 ppm, aunque varía según las legislaciones nacionales. Se utilizaron Aroclors como estándares de referencia, los cuales son mezclas de PCB establecidos por la empresa norteamericana Monsanto. La cromatografía de gases se realizó utilizando **columnas capilares y detectores de captura de electrones (ECD)**, con un tiempo de análisis de 40 minutos y un volumen de inyección de  $1\mu\text{l}$  para cada muestra.

La figura 1 ofrece un esquema claro de los métodos y equipos clave utilizados en este estudio, trazando el flujo desde la preparación de la muestra hasta las técnicas de análisis aplicadas, facilitando la visualización del proceso metodológico integral.

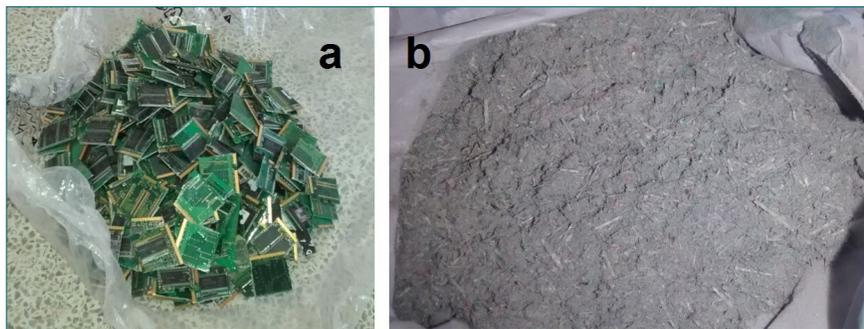


Fuente: elaboración propia.

**FIGURA 1.** DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL PROCESO DE ANÁLISIS DE DESECHOS DE MEMORIAS RAM

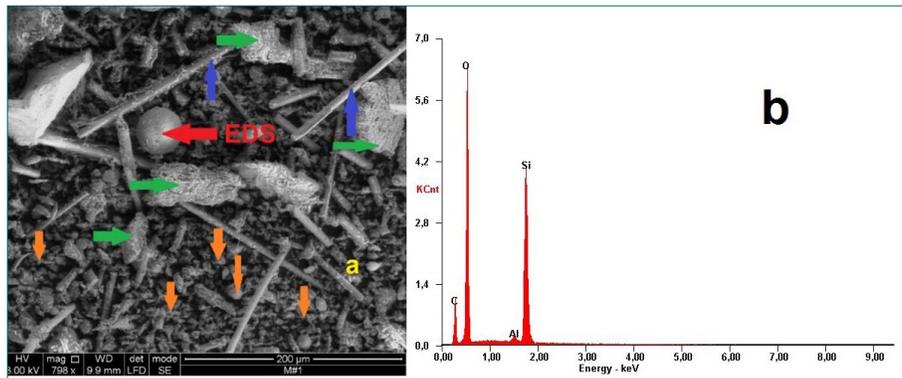
## RESULTADOS

Después de triturar mecánicamente las memorias RAM desechadas, se observaron diferencias visuales significativas en el material final. Este incluía fragmentos metálicos, partículas de plástico y residuos de soldadura, como se muestra en la figura 2. Esta figura compara los desechos de memorias RAM antes (figura 2-a) y después (figura 2-b) del proceso de molienda, evidenciando la transformación a una forma de polvo fino. Mediante SEM se examinaron diversas áreas de este polvo. En la figura 3-a se identifican claramente fibras (indicadas con flechas azules), partículas pequeñas (flechas naranjas), grandes (flechas verdes) y una única esférica (flecha roja) con un diámetro aproximado de  $30 \mu\text{m}$ . La composición elemental de esta última fue determinada por EDS, con resultados expuestos en la figura 3-b.



Fuente: elaboración propia.

**FIGURA 2.** (A) DESECHOS ELECTRÓNICOS DE RAM ANTES DE LA MOLIENDA Y (B) POLVO RESULTANTE DE LA MOLIENDA MECÁNICA DE LOS DESECHOS ELECTRÓNICOS



Fuente: elaboración propia.

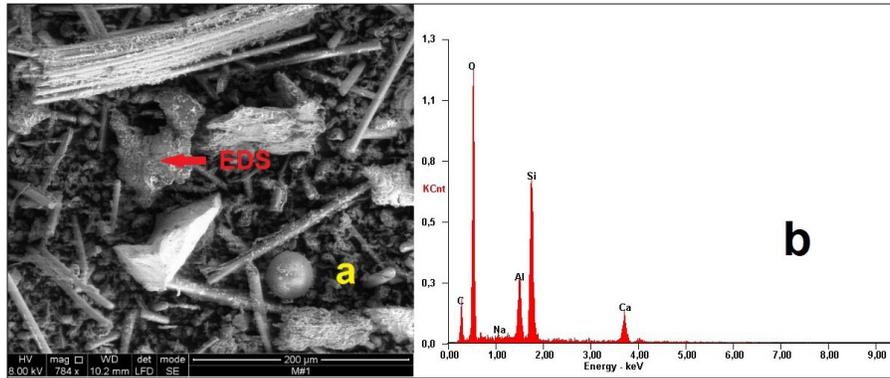
**FIGURA 3.** (A) MICROGRAFÍA SEM DE UNA MUESTRA DE POLVO DE DESECHOS ELECTRÓNICOS DE RAM. (B) ESPECTRO EDS SOBRE LA ESFERA (FLECHA ROJA) QUE SE VE EN LA FIGURA 3-A

La tabla 2 detalla los porcentajes de elementos hallados en la partícula esférica mostrada en la figura 3-a mediante análisis EDS. Predominan el Si (silicio) y O (oxígeno), con menores cantidades de C (carbono) y Al (aluminio). Asimismo, la figura 4-a exhibe un análisis SEM de otra sección del polvo, revelando una variedad de estructuras micrométricas. La figura 4-b muestra el espectro EDS de una partícula de mayor tamaño (señalada con una flecha roja), identificando elementos tales como C, O, Na (sodio), Al, Si y Ca (calcio), con cuantificaciones presentadas en la tabla 3.

**TABLA 2.** CUANTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ENCONTRADOS EN EL ANÁLISIS EDS SOBRE LA ZONA DESCRITA EN LA FIGURA 3-A (ESFERA)

Elemento	Wt %	At %
C	12.3	19.13
O	42.32	50.11
Al	1.27	0.89
Si	44.28	29.87

Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.

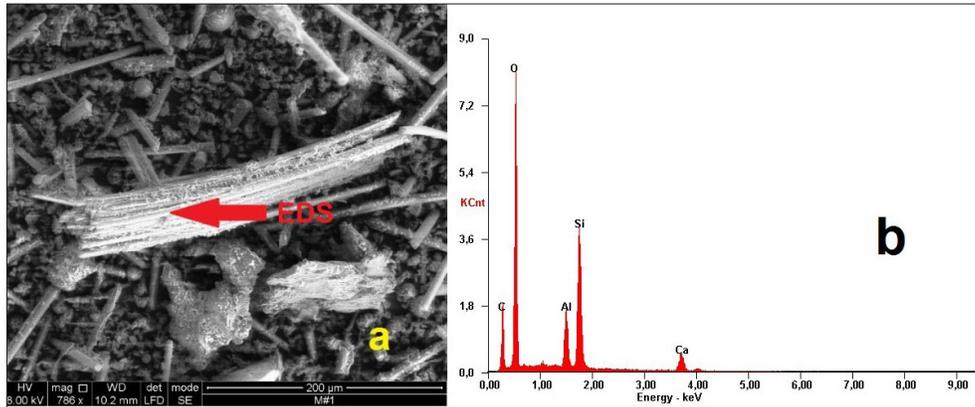
**FIGURA 4.** (A) MICROGRAFÍA SEM DE UNA MUESTRA DE POLVO DE DESECHOS ELECTRÓNICOS DE RAM. (B) ESPECTRO EDS SOBRE LA PARTÍCULA QUE SE SEÑALA EN LA FIGURA 4-A

**TABLA 3.** CUANTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ENCONTRADOS EN EL ANÁLISIS EDS SOBRE LA ZONA DESCRITA EN LA FIGURA 4-A (PARTÍCULA)

Elemento	Wt %	At %
C	6.3	11.34
O	35.91	48.52
Na	0.52	0.49
Al	8.98	7.19
Si	27.87	21.45
Ca	20.42	11.02

Fuente: elaboración propia.

Se llevó a cabo un análisis SEM adicional enfocado en una estructura distinta encontrada en el polvo. La figura 5-a ilustra una micrografía de una zona específica, destacando la presencia de microfibras apiladas, estructuras esféricas y partículas de varios tamaños, similares a las observadas en zonas previamente analizadas (figuras 3 y 4). La tabla 4 presenta la cuantificación de los elementos encontrados en estas fibras.



Fuente: elaboración propia.

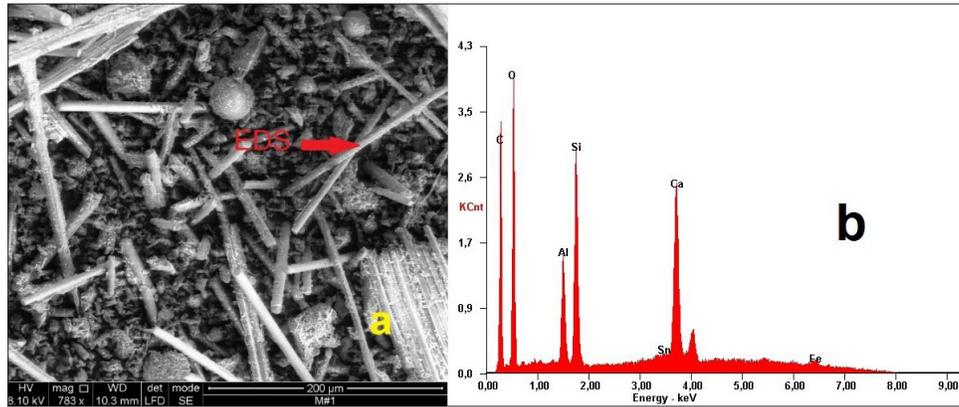
**FIGURA 5.** (A) MICROGRAFÍA SEM DE UNA MUESTRA DE POLVO DE DESECHOS ELECTRÓNICOS DE RAM. (B) ESPECTRO EDS SOBRE LAS FIBRAS APILADAS QUE SE SEÑALA FIGURA 5-A.

**TABLA 4.** ANÁLISIS CUANTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ENCONTRADOS EN EL EDS SOBRE LA ZONA DESCRITA EN LA FIGURA 5-A (FIBRAS APILADAS)

Elemento	Wt %	At %
C	10.89	18.21
O	38.94	48.87
Al	9.25	6.88
Si	25.88	18.5
Ca	15.04	7.54

Fuente: elaboración propia.

La figura 6-a presenta un análisis SEM de otra parte del polvo, destacando una diversidad de partículas, incluidas formas esféricas y variaciones de tamaño. Un análisis EDS aplicado a dos fibras aisladas, mostrado en la figura 6-b, detecta la recurrencia de elementos como C, O, Al, Si y Ca, además de una notable cantidad de Sn (estaño). La composición de estas fibras se detalla en la tabla 5.



**Fuente:** elaboración propia.

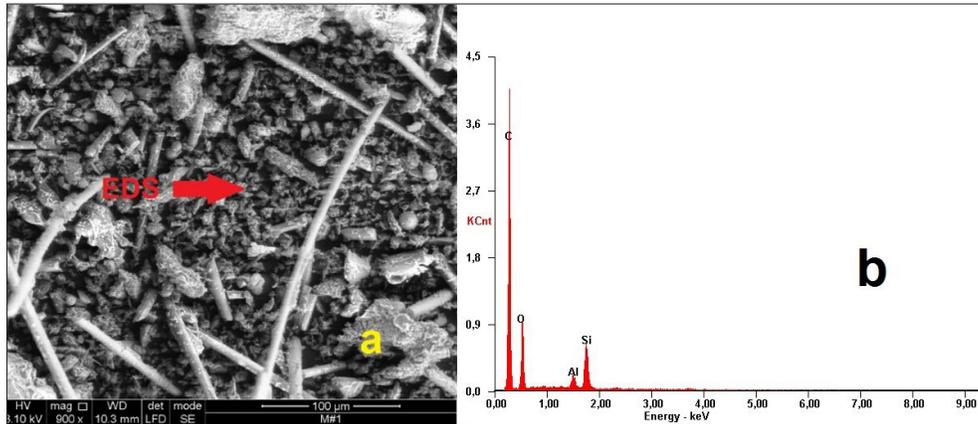
**FIGURA 6.** (A) MICROGRAFÍA SEM DE UNA MUESTRA DE POLVO DE DESECHOS ELECTRÓNICOS DE RAM. (B) ESPECTRO EDS SOBRE DOS FIBRAS AISLADAS QUE SE SEÑALAN EN FIGURA 6-A.

**TABLA 5.** CUANTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ENCONTRADOS EN EL ANÁLISIS EDS SOBRE LA ZONA DESCRITA EN LA FIGURA 6-A (DOS FIBRAS AISLADAS)

Elemento	Wt %	At %
C	9.83	20.88
O	19.46	31.03
Al	5.62	5.32
Si	12.49	11.35
Sn	4.82	1.04
Ca	47.76	30.39

**Fuente:** los autores.

Finalmente, una micrografía SEM adicional (figura 7-a) examina otra región del polvo de memoria RAM, mostrando estructuras esféricas, fibras y partículas de diferentes tamaños. El análisis EDS sobre partículas pequeñas seleccionadas, ilustrado en la figura 7-b, identifica elementos como C, O, Al y Si, destacando la predominancia del carbono. Los resultados cuantitativos se compilan en la tabla 6.



Fuente: elaboración propia.

**FIGURA 7.** (A) MICROGRAFÍA SEM DE UNA MUESTRA DE POLVO DE DESECHOS ELECTRÓNICOS DE RAM. (B) ESPECTRO EDS SOBRE UNA ZONA CON PARTÍCULAS PEQUEÑAS QUE SE SEÑALAN EN LA FIGURA 7-A

**TABLA 6.** CUANTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ENCONTRADOS EN EL ANÁLISIS EDS SOBRE LA ZONA DESCRITA EN LA FIGURA 7-A (PARTÍCULAS PEQUEÑAS)

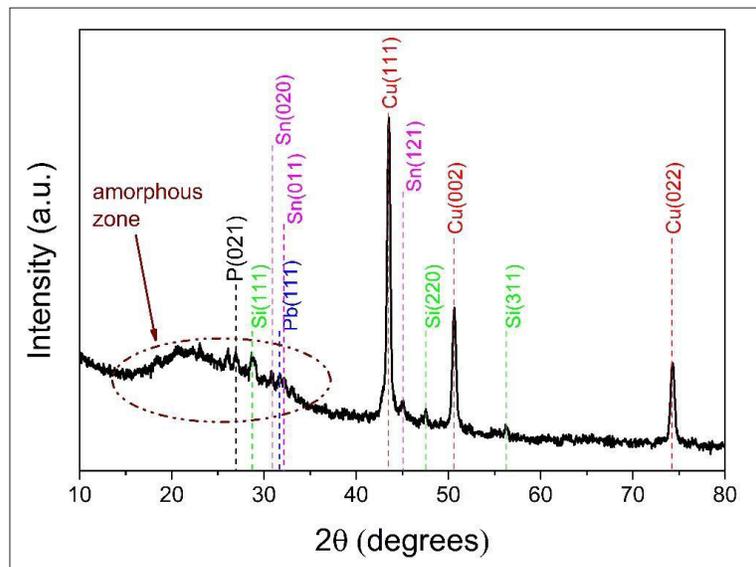
Elemento	Wt %	At %
C	60.27	71.82
O	20.39	18.24
Al	3.81	2.02
Si	15.53	7.92

Fuente: los autores.

Se analizó una muestra de polvo de memoria RAM utilizando difracción de rayos X, y los resultados se presentan en la figura 8. Se identificaron picos de difracción correspondientes a diferentes elementos, siendo los más prominentes los del Cu (cobre), con picos en las posiciones (111), (002) y (022) según el patrón de referencia ICSD 98-008-7417, lo que confirma la presencia de cobre en la muestra. Asimismo, se detectaron picos de Si en las posiciones (111), (220) y (311) conforme al patrón de referencia ICDD 01-080-0018, indicando su uso en los dispositivos por sus propiedades semiconductoras. Un pico de difracción en  $26.9^\circ$  se atribuyó al P (fósforo), identificado como (021) según el patrón de referencia ICDD 01-076-1961. Además, se identificaron picos correspondientes al Sn en las posiciones (020), (011) y (121) de acuerdo con el patrón de referencia ICSD 98-010-8170, un elemento utilizado en soldaduras. Una señal menor asociada al Pb (plomo) se observó alrededor de  $31.6^\circ$ , identificada como

(111), resaltando su habitual uso en soldaduras. Se observó también un pico ancho en la difracción, denominado zona amorfa, que se relaciona con componentes amorfos de las memorias RAM, como bifenilos policlorados y fibra de vidrio.

Para evaluar la presencia de metales peligrosos en los desechos de memorias RAM, específicamente Cd (cadmio), Pb (plomo) y As (arsénico), se aplicó la técnica del Proceso Característico de Lixiviados para Toxicidad (TCLP) según el método de extracción EPA 1311. Este proceso implica la lixiviación de la muestra durante 18 horas, con condiciones de agitación controladas, seguida de filtración. Estos metales fueron cuantificados mediante espectroscopía de absorción atómica. Los parámetros empleados para la cuantificación se detallan en la tabla 1, y los resultados obtenidos se presentan en la tabla 7.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA. 8. DIFRACTOGRAMA DE LA MUESTRA DE POLVO DE MEMORIA RAM

TABLA 7. VALORES ENCONTRADOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE TCLP, EN CONJUNTO CON ABSORCIÓN ATÓMICA, DE LOS ELEMENTOS CONSIDERADOS PELIGROSOS: CADMIO, PLOMO Y ARSÉNICO

Elemento	Valor (mg/L)	Técnica / método
Cadmio	< 0.033	Absorción atómica / EPA 1311, SM 3111 B
Plomo	20.83	Absorción atómica / EPA 1311, SM 3111 B
Arsénico	2.23*10 <sup>-3</sup>	Absorción Atómica-Generador de Hidruros / EPA 1311, SM 3114 C

Fuente: elaboración propia.

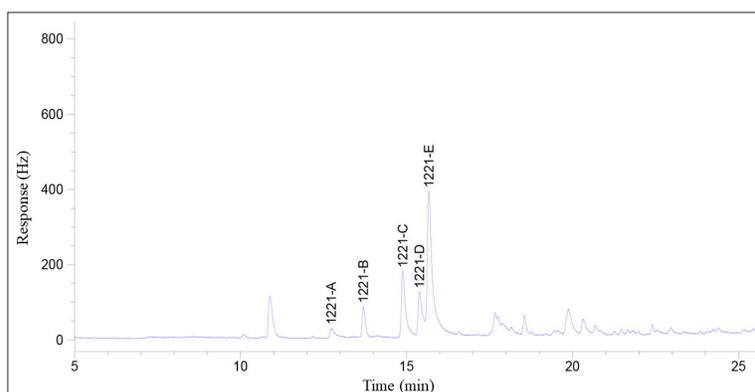
Para cuantificar los niveles de PCB presentes en los desechos, se adoptó el método estándar ASTM D6160, que emplea cromatografía de gases para la detección y cuantificación de PCB en una amplia gama de desechos sólidos y líquidos, incluidos aceites, lodos y soluciones acuosas. Este procedimiento analítico se alinea con la regulación EPA 8082. Los resultados específicos, detallando los valores encontrados para cada Aroclor en unidades de mg/Kg, se resumen en la tabla 8. Se determinó que la concentración total de PCB en la muestra analizada fue de 10.73484 mg/Kg.

**TABLA 8.** VALORES PARA LOS AROCLORS UTILIZADOS EN EL MÉTODO DE DETECCIÓN DE PCB MEDIANTE LA TÉCNICA DE CROMATOGRAFÍA DE GASES Y EL MÉTODO DE ANÁLISIS EPA 8082

Parámetro Aroclor	Valor (mg/Kg) - 2767 ANTEK 36041
Aroclor 1221	1.47609
Aroclor 1232	1.88171
Aroclor 1242	1.60100
Aroclor 1248	1.84771
Aroclor 1254	1.85749
Aroclor 1260	2.07084
PCB totales	10.73484

**Fuente:** elaboración propia.

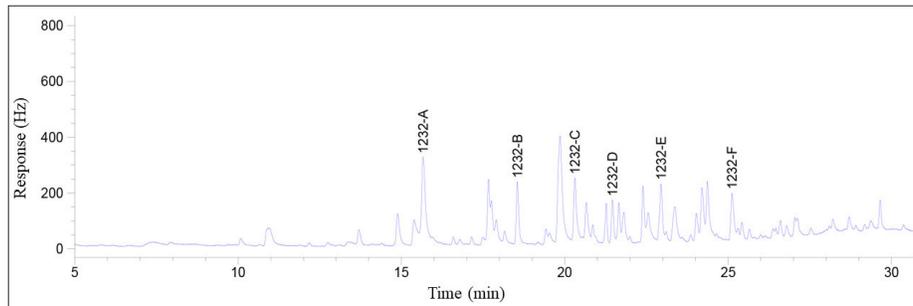
De la figura 9 a la 14, se pueden ver los espectros de la prueba de cromatografía para cada Aroclor analizado.



**Fuente:** elaboración propia.

**Nota.** Se encontraron 5 señales de este Aroclor, como se señala en la figura 1221-A a la 1221-E.

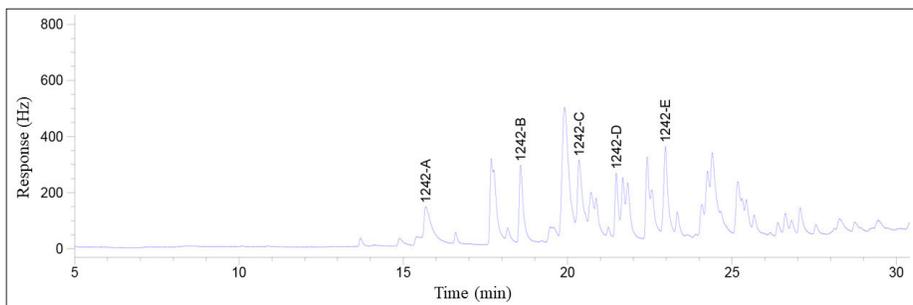
**FIGURA 9.** ESPECTRO DE CROMATOGRAFÍA DE GASES PARA EL AROCLOR 1221



**Fuente:** elaboración propia.

**Nota.** Se encontraron 6 señales de este Aroclor, como se señala en la figura 1232-A a la 1232-F.

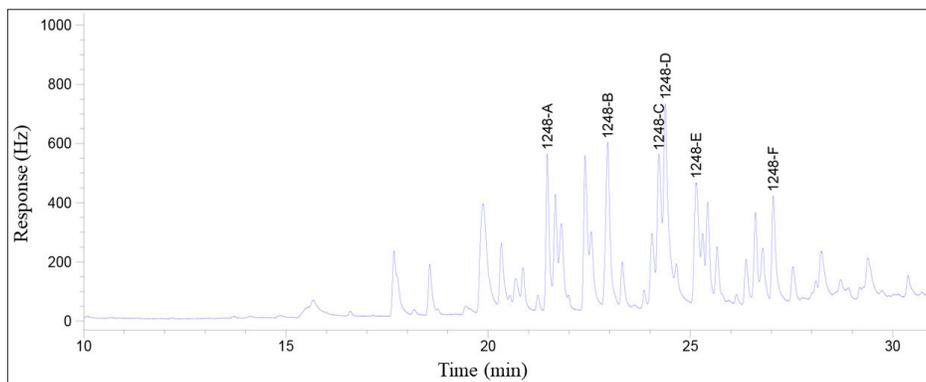
**FIGURA. 10.** ESPECTRO DE CROMATOGRAFÍA DE GASES PARA EL AROCLOR 1232



**Fuente:** elaboración propia.

**Nota.** Se encontraron 5 señales de este Aroclor, como se señala en la figura 1242-A a la 1242-E.

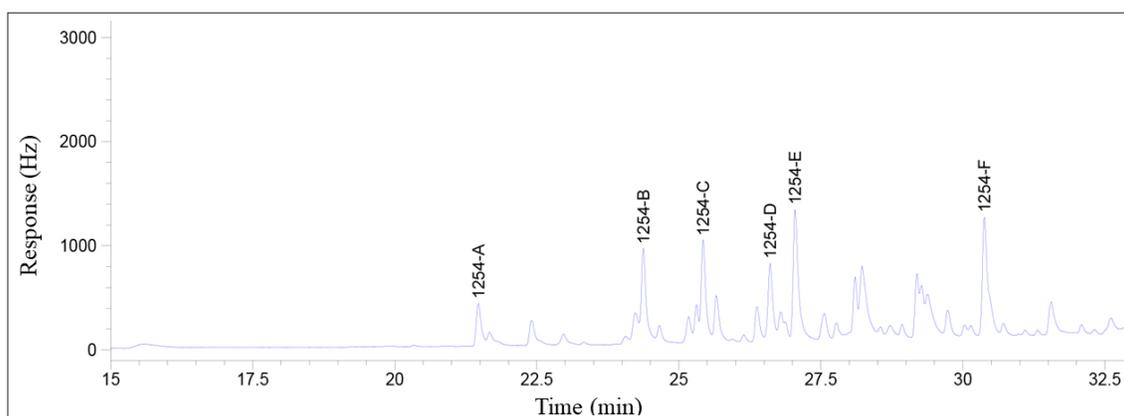
**FIGURA. 11.** ESPECTRO DE CROMATOGRAFÍA DE GASES PARA EL AROCLOR 1242



**Fuente:** elaboración propia.

**Nota.** Se encontraron 6 señales de este Aroclor, como se señala en la figura 1248-A a la 1248-F.

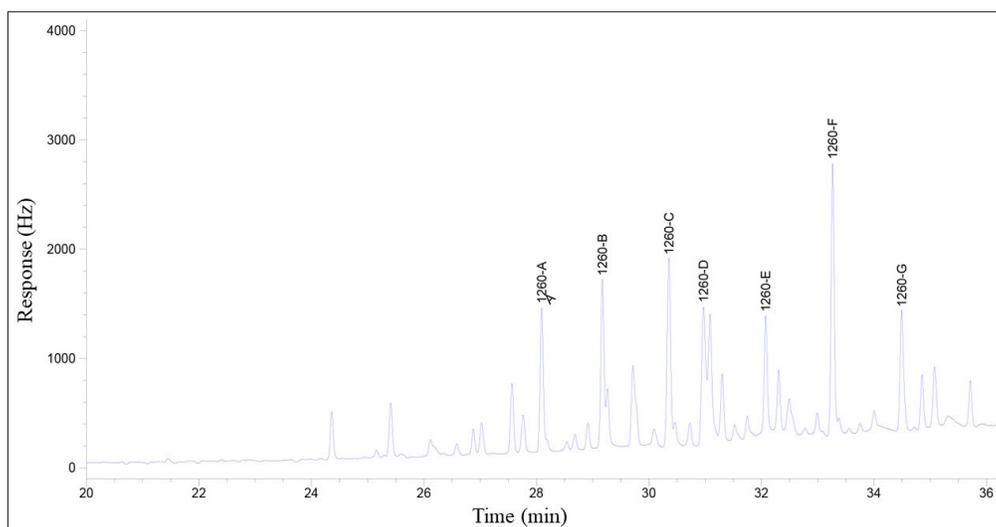
**FIGURA 12.** ESPECTRO DE CROMATOGRAFÍA DE GASES PARA EL AROCLOR 1248



**Fuente:** elaboración propia.

**Nota.** Se encontraron 6 señales de este Aroclor, como se señala en la figura 1254-A a la 1254-F.

**FIGURA 13.** ESPECTRO DE CROMATOGRAFÍA DE GASES PARA EL AROCLOR 1254



**Fuente:** elaboración propia.

**Nota.** Se encontraron 7 señales de este Aroclor, como se señala en la figura 1260-A a la 1260-F.

**FIGURA 14.** ESPECTRO DE CROMATOGRAFÍA DE GASES PARA EL AROCLOR 1260

## DISCUSIÓN

La identificación de diversas formas y tamaños de partículas, como se observa en la figura 3-a, sugiere variaciones en la composición de los desechos y una posible segregación durante el proceso de molienda. El análisis EDS realizado en la partícula esférica (figura 3-b) reveló la presencia de elementos tales como C, O, Al y Si. Este hallazgo proporciona evidencias importantes sobre la procedencia y las propiedades de los

materiales encontrados en los polvos de tarjetas de circuitos impresos, subrayando la necesidad de un análisis más detallado para evaluar su impacto en la reciclabilidad y las implicaciones ambientales de los desechos de memorias RAM.

La composición dominante de Si y O en la partícula esférica, destacada en la figura 3-a, sugiere que es probablemente un compuesto de óxido de silicio. La presencia de C y Al, junto con Na y Ca identificados en una de las partículas más grandes (figura 4-a), refleja la complejidad y diversidad en la composición de estos desechos, elementos típicamente asociados con componentes de memorias RAM.

La composición elemental de las fibras, detallada en la tabla 4, indica que se trata de fibra de vidrio un material ampliamente utilizado en la manufactura de placas de circuitos electrónicos. Este hallazgo enfatiza la importancia de los componentes no metálicos en los desechos electrónicos, lo que representa un reto significativo para los procesos de reciclaje.

La presencia de Sn, como se muestra en la figura 6, es de particular interés debido a su aplicación en aleaciones para soldaduras blandas, a menudo en combinación con el plomo. Esto evidencia que los métodos de fabricación y ensamblaje de memorias RAM dejan rastros característicos en los desechos electrónicos, lo que podría influir en las estrategias de gestión y reciclaje de estos materiales.

La notable presencia de carbono en las áreas analizadas, indicada en la figura 7, apunta a la existencia de compuestos poliméricos, como los bifenilos policlorados. Este es un aspecto crítico por las graves implicaciones ambientales y para la salud humana, debido a la presencia de estos, destacando su resistencia a la degradación y su toxicidad.

La presencia de Cu y Si en las muestras, como se evidencia en la figura 8, refleja su relevancia en la manufactura de equipos electrónicos, especialmente en memorias RAM, por sus respectivas propiedades conductoras y semiconductoras. El hallazgo de P y Sn, también destacado en la figura 8, subraya su uso en el proceso de fabricación, particularmente en soldaduras. La identificación de Pb, a pesar de su conocida toxicidad, destaca la necesidad de transición hacia tecnologías libres de plomo, tendencia ya adoptada por algunas empresas. Además, la zona amorfa identificada en la misma figura sugiere la complejidad de los materiales presentes en los desechos electrónicos, incluyendo compuestos potencialmente peligrosos como los PCB.

Los resultados de la cuantificación de Cd, Pb y As revelan que, de acuerdo con el Decreto 4741 (2005) del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia, los niveles de Cd y As en los polvos de las memorias RAM están por debajo de los límites permitidos (1.0 mg/L para Cd y 5.0 mg/L para As).

Sin embargo, los niveles de Pb exceden el límite permitido de 5.0 mg/L, al hallarse niveles de 20.83 mg/L.

El hallazgo de una concentración total de PCB de 10.73484 mg/Kg en los desechos de memorias RAM subraya la presencia significativa de estos contaminantes (el nivel de concentración de los bifenilos policlorados de 50 mg/kg o más) [10]. Los PCB son conocidos por su durabilidad y toxicidad, lo que plantea preocupaciones ambientales y de salud pública. Estos hallazgos evidencian la diversidad de materiales presentes en las memorias RAM desechadas y resaltan los desafíos asociados con su reciclaje y manejo ambiental. La variedad de fuentes y procesos de fabricación implicados no solo complica las estrategias de reciclaje, sino que también enfatiza la importancia de desarrollar enfoques de gestión de residuos electrónicos más efectivos y seguros.

Estudios recientes señalan la eficacia en la reutilización de materiales valiosos a partir de los desechos estudiados [11]. Mientras que la recuperación de metales de los desechos de tarjetas RAM es un paso crucial, el objetivo amplio se asocia al desarrollo de soluciones sustentables y con procesos en los que no se generen residuos [12]. Una aplicación potencial puede ser la incorporación de estos desechos en materiales de construcción, por ejemplo, el cemento o los concretos; de igual manera, puede sugerirse estudiar el uso de estos como aditivos en el desarrollo de materiales compuestos, evitando que al final de su vida útil lleguen a vertederos y se contribuya así a una mejor economía circular y se promueva la sostenibilidad ambiental.

## CONCLUSIONES

Este estudio se enfocó en la caracterización química y estructural de polvos resultantes de la molienda mecánica de desechos de memorias RAM. Los análisis realizados, utilizando técnicas avanzadas como la espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) y la difracción de rayos X, han permitido una comprensión profunda de la composición elemental de estos desechos. Se identificó una variedad de elementos y compuestos, tanto metálicos como no metálicos, dentro de los cuales la fibra de vidrio fue notablemente detectada como componente no metálico predominante. Entre los elementos metálicos se destacaron el Cu, Si, Sn, con presencias más débiles de Pb y P, elementos comúnmente asociados a la manufactura de placas de circuitos electrónicos.

La cuantificación de elementos ambientalmente preocupantes, tales como Pb, As y Cd, junto con los PCB, demostró que sus concentraciones permanecen dentro de los niveles determinados por normativas internacionales. Esta observación es crucial, ya que sugiere que, bajo las condiciones de este estudio, los desechos de memorias RAM pueden considerarse seguros desde el punto de vista ambiental. Sin embargo,

se observaron concentraciones de Pb superiores a lo permitido, resaltando la necesidad de estrategias de manejo de desechos que mitiguen potenciales riesgos ambientales.

Estos hallazgos enfatizan la importancia de aplicar técnicas de caracterización detalladas para evaluar la seguridad ambiental de los desechos electrónicos. Aunque los resultados indican que estos desechos son en gran medida seguros, la presencia de elementos como el Pb sobre los límites permitidos subraya la necesidad continua de vigilancia y mejora en los procesos de reciclaje y manejo de estos materiales. La identificación de PCB y la variada composición de los desechos también resaltan la complejidad inherente al reciclaje de componentes electrónicos y la importancia de desarrollar métodos específicos para su tratamiento.

## AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al ingeniero Nelson Eduardo Paz Sánchez por su generoso apoyo financiero, el cual ha sido fundamental para la realización de este trabajo. Su contribución no solo ha permitido llevar a cabo esta investigación, sino también alcanzar los objetivos planteados en este estudio. Su compromiso con el avance científico ha sido una fuente invaluable de inspiración, y estamos profundamente agradecidos por su confianza y respaldo.

## REFERENCIAS

- [1] J. Li, B. Tian, T. Liu, H. Liu, X. Wen y S. Honda, “Status quo of e-waste management in mainland China”, *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 8, n°. 1, pp. 13-20, 2006. doi: 10.1007/s10163-005-0144-3.
- [2] S. B. Wath, A. N. Vaidya, P. S. Dutt y T. Chakrabarti, “A roadmap for development of sustainable E-waste management system in India”, *Science of The Total Environment*, vol. 409, n°. 1, pp. 19-32, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.030>.
- [3] M. Kaya, “Recovery of metals from electronic waste by physical and chemical recycling processes”, *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*, vol. 10, n°. 2, pp. 259-270, 2016.
- [4] T. G. Townsend, “Environmental Issues and Management Strategies for Waste Electronic and Electrical Equipment”, *J Air Waste Manage Assoc*, vol. 61, n°. 6, pp. 587-610, junio 2011. doi: 10.3155/1047-3289.61.6.587.
- [5] Y. Ryan-Fogarty, D. Coughlan y C. Fitzpatrick, “Quantifying WEEE arising in scrap metal collections: Method development and application in Ireland”, *J Ind Ecol*, vol. 25, n°. 4, pp. 1021-1033, ago. 2021. doi: 10.1111/jiec.13101.

- [6] X. Zeng et al., “Current Status and Future Perspective of Waste Printed Circuit Boards Recycling”, *Procedia Environ Sci*, vol. 16, pp. 590-597, 2012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.081>.
- [7] A. Sepúlveda et al., “A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling: Examples from China and India”, *Environ Impact Assess Rev*, vol. 30, n°. 1, pp. 28-41, 2010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.04.001>.
- [8] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). “Protección de la salud humana y el medio ambiente: Guía del Convenio de Róterdam sobre productos químicos y plaguicidas peligroso”, 2004. <https://www.fao.org/3/i0073s/i0073soo.pdf#:~:text=El%20objetivo%20del%20Convenio%20es%20promover%20la%20responsabilidad,proteger%20la%20salud%20humana%20y%20el%20medio%20ambiente>
- [9] W. Li y V. Achal, “Environmental and health impacts due to e-waste disposal in China - A review”, *Science of The Total Environment*, vol. 737, n°. 139745, pp. 1-12, 2020. doi: [org/10.1016/j.scitotenv.2020.139745](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139745).
- [10] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), “Convenio de Basilea. Sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación”. Agosto, 2014. 1400781\_S\_inside\_OCE\_signa.pdf (basel.int)
- [11] R. Guerriero, “New materials and related recovery and/or recycling problems”, *Resources, Conservation and Recycling*, 10, pp. 123-136, 1994. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(94\)90045-0](https://doi.org/10.1016/0921-3449(94)90045-0)
- [12] Z. Sun, H. Cao, Y. Xiao, J. Sietsma, W. Jin, H. Agterhuis y Y. Yang, “Toward Sustainability for Recovery of Critical Metals from Electronic Waste: *The Hydrochemistry Processes*”, en *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 5, n°. 1, pp. 21-40, 2017. American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00841>