

## Priorización multicriterio de un residuo de aparato eléctrico y electrónico

Multi-criteria prioritization for waste electrical and electronic equipment

José de Jesús Casas\*

Katherine Cerón\*\*

Carlos Julio Vidal\*\*\*

Claudia Cecilia Peña\*\*\*\*

Juan Carlos Osorio\*\*\*\*\*

*Universidad del Valle (Colombia)*

\* Ingeniero industrial, Universidad del Valle. [Jose.casas@correounivalle.edu.co](mailto:Jose.casas@correounivalle.edu.co)

\*\* Ingeniera industrial, Universidad del Valle. [Katherine.ceron@correounivalle.edu.co](mailto:Katherine.ceron@correounivalle.edu.co)

\*\*\* Ph.D. Profesor titular Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad del Valle. [Carlos.vidal@correounivalle.edu.co](mailto:Carlos.vidal@correounivalle.edu.co)

\*\*\*\* Candidata a doctor, Universidad del Valle. [Claudia.pena@correounivalle.edu.co](mailto:Claudia.pena@correounivalle.edu.co)

\*\*\*\*\* MSc. Profesor titular Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad del Valle. [Juan.osorio@correounivalle.edu.co](mailto:Juan.osorio@correounivalle.edu.co)

**Correspondencia:** Juan Osorio. Calle 13 #100-00 edf 357, Valle del Cauca, Cali. 3212167 ext 132 3398462

## Resumen

Se presenta una aplicación de la metodología AHP para la selección de un residuo de aparato eléctrico y electrónico que se va a considerar en el diseño de una red de logística inversa para la gestión integral de los residuos sólidos generados por dichos aparatos. Este trabajo es el primer paso en el diseño de la red logística y se ha abordado desde la perspectiva multicriterio debido a la importancia que revisten dichos residuos tanto desde el punto de vista de su impacto ambiental como económico. Este trabajo incluye una caracterización amplia y detallada de los aparatos eléctricos y electrónicos de mayor presencia en los hogares colombianos. La metodología presentada puede ser replicada fácilmente para cualquier otro tipo de aparato o residuo sólido en el proceso de configuración de la cadena de suministro inversa. Para el caso particular presentado fueron seleccionados los televisores de rayos catódicos y monitores de cristal líquido.

**Keywords:** gestión integral de residuos sólidos, logística inversa, métodos multicriterio, proceso analítico jerárquico AHP, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

## Abstract

This paper presents an application of the AHP methodology to select a waste electrical and electronic equipment (WEEE) to be considered in the design of a reverse logistics chain for the integrated management of the solid waste that those appliances generate. This work is the first step for the design of the logistics chain and has been addressed through the multicriteria viewpoint due to the importance of the WEEE environmental and economic impacts. The paper includes a broad and detailed characterization of the electrical and electronic equipment with the greatest presence in Colombian homes. The exposed methodology can be easily replicated for any other type of equipment or solid waste in the configuration process of the reverse supply chain. For the specific case presented here, cathodic ray and LCD TVs have been selected.

**Palabras clave:** analytic hierarchy process, integrated solid waste management ISWM, multicriteria methods, reverse logistics, waste electrical and electronic equipment WEEE.

Fecha de recepción: 22 de Abril de 2014  
Fecha de aceptación: 16 de Junio de 2015

## INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DE LA LITERATURA

La aceleración de los cambios tecnológicos, la obsolescencia programada y los hábitos de consumo de la sociedad con que los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) se vuelven obsoletos más rápidamente ha llevado a un incremento significativo de los residuos de AEE (RAEE).

Según Greenpeace, en el mundo se generan entre 20 y 50 millones de toneladas de RAEE anualmente y de los residuos sólidos urbanos, la fracción de los RAEE es la que crece más rápidamente; por ejemplo, en Europa este incremento es del 3 al 5 % anual [1].

Actualmente en Colombia los RAEE son reciclados informalmente, incinerados de forma incontrolada y arrojados con los residuos domésticos, y de esta forma llegan a los rellenos sanitarios [1].

Debido a que los RAEE están compuestos por materiales peligrosos como el plomo, cadmio, mercurio y arsénico, el peligro en los destinos finales mencionados radica en que se liberan sustancias tóxicas que impactan negativamente la salud humana y el medio ambiente [2]. Por otro lado, los RAEE contienen componentes que pueden ser reparados y materiales valiosos, como oro, cobre y plata, que se pueden recuperar para reincorporarlos en los procesos productivos como materias primas [2].

Es por esto que es muy importante considerar mecanismos efectivos para la gestión de estos residuos. Asimismo, a la hora de definir estos tipos de sistemas es relevante considerar cuál ha de ser la clase de aparato con la que se iniciará dicho proceso (máxime cuando se sabe que no todos tienen los mismos tratamientos ni el mismo nivel de materiales peligrosos y valiosos, por lo cual se ha planteado realizar un proceso de priorización de dichos aparatos sustentado en la aplicación del proceso analítico jerárquico (AHP por sus siglas en inglés).

El término “Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)” hace referencia a cualquier aparato que utilice un suministro de energía eléctrica para su funcionamiento y que haya alcanzado el fin de su vida útil. Entre los RAEE se incluye una amplia gama de aparatos, como computadores, equipos electrónicos de consumo, celulares y electrodomésticos, que ya no son utilizados o deseados por sus usuarios. El término RAEE también

comprende todos aquellos componentes, subconjuntos y consumibles que forman parte del producto en el momento en que se desecha [2].

En la literatura se pueden encontrar dos tipos de enfoques para la clasificación de los RAEE: un enfoque los clasifica desde la perspectiva de su comercialización cuando son vendidos inicialmente como aparatos eléctricos y electrónicos y el otro desde la gestión y manejo de los respectivos residuos.

Según la Directiva Europea 2002/96/CE [3], desde una perspectiva de su comercialización, los productos o aparatos que pueden convertirse en RAEE al final de su vida útil se pueden clasificar en 10 categorías (ver tabla 1).

Desde la gestión y manejo de los RAEE, en Colombia recientemente pasó a sanción presidencial el Proyecto de Ley 17 de 2010, por el cual se regula la política pública de Residuos Eléctricos y Electrónicos en Colombia. Esta ley pretende establecer responsabilidades a los importadores, productores, comercializadores y generadores de RAEE en cuanto a la gestión de estos residuos. Asimismo, en ella se especifica que entre las responsabilidades del productor está la de establecer directamente o a través de terceros que actúen en su nombre un sistema de recolección y gestión ambientalmente seguro de los residuos de los productos puestos por él en el mercado; también la responsabilidad de gestionar o manejar los RAEE con las empresas que cuenten con la respectiva licencia, permiso o autorización ambiental [4].

**Tabla 1.** Clasificación de los RAEE según Directiva Europea 2002/96/CE

Categoría	Ejemplos
1. Grandes electrodomésticos	Lavadoras, neveras, lavaplatos, estufas, etc.
2. Pequeños electrodomésticos	Planchas, tostadoras, secadoras de cabello, cafeteras, etc.
3. Equipos de tecnologías de la información y telecomunicaciones	Computadores, impresoras, celulares, teléfonos, etc.
4. Aparatos eléctricos de consumo	Televisores, radios, videocámaras, etc.
5. Equipos de iluminación	Luminarias, lámparas fluorescentes, etc.
6. Herramientas eléctricas y electrónicas	Taladros, sierras, máquinas de coser, etc.
7. Juegos y equipos deportivos	Trenes, carros, consolas de video juegos, etc.
8. Equipos médicos	Aparatos de radioterapia, cardiología, diálisis, etc.
9. Instrumentos de monitoreo y control	Páneles de control, detectores de humo, etc.
10. Máquinas dispensadoras.	Máquinas dispensadoras de bebidas calientes, bebidas frías, latas y productos sólidos, etc.

**Fuente:** Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2003 [3].

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) de Colombia propuso una clasificación de los RAEE basada en su gestión y manejo en cinco categorías (ver tabla 2).

Además de esta ley existe la Ley 430 de 1998, por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental referentes a los desechos peligrosos y otras disposiciones. El Decreto 4741 de 2005 reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.

**Tabla 2.** Clasificación de los RAEE desde una perspectiva de su gestión y manejo

Categoría	Ejemplos
1. Aparatos destinados a la refrigeración	Neveras, congeladores, otros refrigerantes
2. Electrodomésticos grandes y medianos	Todos los demás electrodomésticos grandes y medianos (menos equipos de categoría 1)
3. Aparatos de iluminación	Tubos fluorescentes, bombillos
4. Aparatos con monitores y pantallas	Televisores, monitores TRC, monitores LCD
5. Otros aparatos eléctricos y electrónicos	Equipos de informática, oficina, electrónicos de consumo (excepto los mencionados en categorías anteriores)

Fuente: MAVDT, 2010, pp.10 [2].

También por medio de las resoluciones 1297 de 2010, 1511 de 2010 y 1512 de 2010 se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de pilas y/o acumuladores, de bombillas y de computadores y/o periféricos, respectivamente [2].

Aunque en la literatura se encuentran trabajos que relacionan los RAEE con los métodos multicriterio, estos están más orientados a la configuración de la cadena que a la selección de los RAEE mismos [5]-[12].

Con este artículo se busca entonces proponer una metodología multicriterio para realizar la selección del tipo de residuo de aparato eléctrico y electrónico más dañino, pues aunque todos deberían ser considerados, debido a las restricciones de los recursos, los esfuerzos iniciales deberían enfocarse en aquellos considerados más perjudiciales. Dicha metodología será presentada en el siguiente apartado, incluyéndose la caracterización

de los principales RAEE. En el apartado siguiente se presentará la selección del tipo de RAEE y finalmente las conclusiones del trabajo realizado.

## METODOLOGÍA

Se plantea una metodología de dos fases claramente diferenciadas. Una primera fase en la que se caracterizaron los RAEE incluidos en el proceso de priorización; esta incluyó la cantidad de RAEE generados y fue realizada utilizando información secundaria de fuentes oficiales en Colombia. En este caso es fundamental destacar que para la estimación de la cantidad de RAEE generados fueron utilizados dos métodos para estimar la cantidad potencial de RAEE [13]: el método de consumo y uso, el cual toma en cuenta el número promedio de equipos en un hogar típico con accesorios eléctricos y electrónicos, y el método de suministro de mercado, que usa datos referentes a la producción y las ventas de una región geográfica dada. Ambos métodos se basan en ciertas suposiciones sobre el tiempo que dura en un hogar determinados aparatos hasta que llegan finalmente a convertirse en residuos.

**Método de estimación por suministro de mercado.** Con este método se estima el potencial de generación de RAEE a partir de datos históricos de producción y ventas de los diferentes grupos de productos, corregidos por las importaciones y exportaciones [13]. Según lo anterior, los aparatos vendidos en un determinado periodo de tiempo ( $t$ ) se vuelven residuos después de cumplir su vida útil ( $VU$ ); así, la cantidad de RAEE generada en unidades por tipo de aparato en un periodo  $t$  viene dada por la expresión

$$\text{Generación de RAEE } (t) = \text{Ventas } (t - VU) \quad (1)$$

De acuerdo con Blaser [14], cuando hay escasez de información de las ventas, esta se puede determinar por medio del consumo aparente, que se calcula mediante la expresión

$$\text{Ventas AEE } (t) = \text{Importación } (t) + \text{Producción nacional } (t) - \text{exportaciones } (t) \quad (2)$$

**Método de estimación por consumo y uso de los aparatos.** Según Blaser [14], esta metodología toma como base el número de hogares ( $h$ ) que tiene un país, la penetración en los hogares ( $p$ ) por cada aparato (estimada

como el porcentaje de hogares que tiene un determinado AEE), el número promedio de aparatos ( $n$ ) (en los hogares que cuentan con el aparato) y la vida útil ( $vu$ ) de cada aparato.

La generación de RAEE anual en unidades por aparato viene dada por la ecuación

$$RAEE(t) = \frac{h(t)*n(t)*p(t)}{vu(t)} \quad (3)$$

La segunda fase corresponde a la utilización de una herramienta multi-criterio, que para este caso se seleccionó el proceso analítico jerárquico (AHP) por su versatilidad, por su capacidad de integrar al mismo tiempo valoraciones de tipo cuantitativo y cualitativo y por la experiencia de los autores respecto a la aplicación y utilidad de la misma.

La aplicación del AHP inicia con la definición de las alternativas, es decir, los RAEE que se caracterizaron, y posteriormente la selección de los criterios con base en los cuales se realizará la priorización; estos se definen en función de la literatura y el juicio de los expertos que participan del proceso de priorización. Utilizando la escala de Saaty, propia del AHP, los expertos realizan las comparaciones por pares y se obtiene el vector de prioridad que define cuál de los RAEE es el considerado más importante según los criterios definidos y las consideraciones de los expertos consultados.

## RESULTADOS

### Caracterización de los RAEE

Para la selección de los RAEE que se decidió caracterizar solo se tuvieron en cuenta los 10 aparatos de uso doméstico que se muestran en la tabla 3, pues son los únicos de los que se dispone de información de penetración en los hogares en Colombia, de acuerdo con los informes de las encuestas de calidad de vida realizadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

La priorización de los RAEE se hace de acuerdo con las toneladas potenciales de generación de residuos de cada tipo de aparato, ya que desde el punto de

vista de la gestión de los RAEE son interesantes aquellos aparatos que generan grandes cantidades de residuos y tienen potencial para afectar la salud humana y el medio ambiente por la presencia de materiales contaminantes.

El potencial de generación de residuos se calcula por medio del método de consumo y uso. De acuerdo con este método, los tipos de residuos que se decidió caracterizar son las neveras, televisores, lavadoras, computadores y celulares, pues son los aparatos con el mayor potencial de generación de residuos de acuerdo con su peso total (ver tabla 3), y además estos cinco aparatos han sido reconocidos en diferentes estudios por su alto potencial de contaminación [2], [14], [15], [16]. Por su parte, los computadores y celulares han sido tratados en diferentes artículos debido a sus altos niveles de crecimiento en la penetración del mercado, acompañados de una acelerada disminución su ciclo de vida [17]-[22].

**Tabla 3.** Priorización de los RAEE

Aparato	Penetración del aparato en hogares <sup>1</sup> (%)	Número de aparatos por hogar <sup>2</sup> (unidades)	Vida útil <sup>3</sup> (años)	Peso promedio <sup>4</sup> (kilogramos/ unidad)	RAEE (unidades)	Peso RAEE <sup>5</sup> (toneladas)
Neveras	77,0 %	1	20	72,09	479867	34594
Televisores	91,3 %	2,1	10	13,73	2389739	32811
Lavadoras	48,9 %	1	14	39,38	435353	17144
Computadores	33,9 %	1,4	5	2,94	1183091	3478
Celulares	90,2 %	3,2	3	0,25	11992110	2998
Reproductor de video	47,0 %	1	7	3,01	836874	2519
Equipo de sonido	50,8 %	1	7	2,7	904536	2442
Horno eléctrico	23,8 %	1	12	5,03	247204	1243
Microondas	20,5 %	1	7	3,01	365020	1099
Aspiradora	7,0 %	1	8	3,5	109061	382

<sup>1</sup> Porcentaje de hogares que tienen al menos un aparato [23]. <sup>2</sup> Promedio de aparatos con los que cuenta un hogar: televisores, celulares y computadores [24]. Para los demás AEE se supone que se tiene un aparato por hogar. <sup>3</sup> Vida útil promedio en años de cada aparato [14], [22], [25]. <sup>4</sup> Peso promedio=Peso neto total de importaciones (kg)/ Número de aparatos importados (unidades) [26]. <sup>5</sup> Peso RAEE=RAEE \*Peso promedio.

**Nota:** En este estudio se considera que el número de hogares en Colombia en 2012 era 12 464 083 [27].

A continuación se describen los cinco RAEE de acuerdo con su composición y peso, y su uso y tenencia.



- *Neveras*

*Composición y peso.* Los materiales valiosos o aprovechables que se pueden encontrar dentro de una nevera son chatarra ferrosa, aluminio, cobre, cables de cobre, aceite lubricante y diferentes plásticos como poliestireno, PVC, etc.[2]. Entre los materiales peligrosos se encuentra la espuma de poliuretano, la fibra de vidrio, el agente refrigerante (en particular clorofluorocarbono-CFC), el aceite del compresor (con parte de CFC) y los condensadores electrolíticos o bifenilospoliclorados (PCB). Estos materiales son los que incrementan significativamente la degradación de la capa de ozono y contribuyen al efecto invernadero [14]. En la tabla 4 se muestra los materiales que componen una nevera.

**Tabla 4.** Composición de una nevera

Componente	Materiales constituyentes	Proporción del peso del material	Proporción del peso del componente
Carcasa	Metal ferroso	83.8 %	62.90 %
	Plástico	16.2 %	
Compresor	Cobre	25 %	23.10 %
	Hierro	65 %	
	Carbón	2 %	
	Plástico	7.8 %	
	Aceite	0.2 %	
Espuma de poliuretano	CFC 11	21.98 %	6.50 %
Refrigerante	CFC 12	15.53 %	4.60 %
Vidrio			1.60 %
Cableado	Cobre y plástico		0.20 %
Condensador	PCBs	0.28 %	0.05 %
Caucho			1.05 %

Fuente: Ogilvie (2004) [16].

De acuerdo con el peso neto y la cantidad de las importaciones obtenidas de la base de datos LegisComex (2012) [26], se puede apreciar que el peso de las neveras se ha mantenido con el tiempo y es aproximadamente de 70 kg.

*Uso y tenencia.* La nevera es un electrodoméstico de primera necesidad, el cual en Colombia no es desechado sino regalado a parientes u otras personas; por esto su vida útil es mayor que en países de Europa o Estados Unidos (11 años). En Colombia la vida útil de este electrodoméstico oscila entre 15 y 25 años [14]. En 2003, el 66,9 % de los hogares tenía una nevera [28], mientras que en 2011 el 77 % de estos ya tenía nevera [23].

- **Televisores**

*Composición y peso.* Los televisores de tubos de rayos catódicos (TRC) y de cristal líquido (LCD) presentan diferencias en sus componentes.

*Televisores TRC.* Entre los componentes valiosos o aprovechables de los televisores de TRC está la carcasa y el yugo de deflexión y la tarjeta de circuito impreso (TCI), que contienen un alto porcentaje de cobre [23]. Los componentes peligrosos del televisor TRC son baterías/acumuladores, TCI, tubos de rayos catódicos (vidrio de cono y de pantalla, que poseen un alto contenido de plomo), condensadores electrolíticos, plásticos con retardantes de llama (plástico BFR) en el cableado y pantallas LCD o LED [8].

Los materiales de un televisor TRC y su proporción se presentan en la tabla 5.

*Televisores LCD.* Entre los componentes peligrosos que contienen los televisores LCD están las baterías/acumuladores, grandes acumuladores, lámparas fluorescentes con mercurio (luz de fondo), TCI, plásticos con retardantes de llama y grandes pantallas LCD [2].

Los materiales presentes en los televisores LCD y su proporción se describen en la tabla 6.

**Tabla 5.** Composición de un televisor TRC

Componente (subcomponente)	Materiales constituyentes	Proporción del peso del material	Proporción del peso del componente
CRT			60 %
(Máscara de sombra)	Acero	7.34 %	
(Vidrio de pantalla)	Vidrio	53.88 %	
(Vidrio de cono)	Vidrio	27.79 %	
(Cañón de electrones)	Plástico, vidrio, acero y cobre	1.539 %	
(Yugo)	Vidrio, acero y cobre	9.45 %	
			10 %
	Oro	0.04 %	
	Cobre	22.00 %	
	Estaño	1.50 %	
	Plomo	2.60 %	
	Fibra de vidrio	30.00 %	
	Resina epóxica	15.00 %	
	Otros metales	29.00 %	
Cableado	Plástico y cobre		2 %
Carcasa			28 %
	Plástico	79.00 %	
	Acero	21.00 %	

Fuente: Nnorom *et al.* (2011) [29]. Adaptado de Lee *et al.* (2004) [30].

En general, el peso promedio de los televisores ha disminuido radicalmente. Según el cálculo del peso promedio de los televisores importados, en 2008 un televisor pesaba 22 kg, y en la actualidad pesa en promedio 13.73 kg.

*Uso y tenencia.* El televisor es uno de los electrodomésticos más comunes en Colombia y ocupa un puesto central en el hogar promedio. La encuesta de calidad de vida 2008 muestra que el 88.5 % de los hogares tiene televisor a color, y según el DANE (2012a) [23], ese porcentaje aumentó a 91.3 %. De acuerdo con las importaciones de televisores en 2012, para este estudio se estima que el 41.5 % de los televisores es tipo CRT y el 58.5 % LCD [26]. Se estima que la vida útil de un televisor oscila entre 5 y 15 años [14].

**Tabla 6.** Composición de un televisor LCD

Componente (subcomponente)	Materiales constituyentes	Proporción del peso del material	Proporción del peso del componente
Carcasas y/o envolturas			81.6 %
(Metales)	Acero	65.6 %	
	Aluminio	0.7 %	
(Plásticos)	Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	21.9 %	
	Polimetilmetacrilato	2.1 %	
	Poliestireno (PS)	5.3 %	
	Otros plásticos	4.4 %	
			6.1 %
TCI 1	Oro	0.04 %	
	Cobre	22.00 %	
	Estaño	1.50 %	
	Plomo	2.60 %	
	Fibra de vidrio	30.00 %	
	Resina epóxica	15.00 %	
	Otros metales	29.00 %	
			3.5 %
Cableado eléctrico	Cobre	25.7 %	
	Plásticos BFR	74.3 %	
Luz de fondo			1.1 %
			7.7 %
Visualizador LCD	Vidrio	87.2 %	
	Plásticos	12.7 %	
	Cristales líquidos	0.1 %	

**Fuente:** Salhofer *et al.* (2011) [31]. Adaptado de Lee *et al.* (2004) [30].

- **Lavadoras**

*Composición y peso.* Una lavadora se compone de grandes partes hechas principalmente de metales y plástico. Según Blaser (2009) [14], los componentes con potencial de contaminación en una lavadora son el condensador del motor, que contiene electrólitos o PCB; la TCI, donde se encuentran

condensadores, plomo y retardantes de llama; y la placa de cubierta, que contiene retardantes de llama [2].

En la tabla 7 se muestra la composición de una lavadora.

Según las importaciones de lavadoras en Colombia, el peso promedio de estas ha disminuido en los últimos años, de unos 43 kg pasó a un poco más de 39 kg.

*Uso y tenencia.* La lavadora no es un electrodoméstico muy común en los hogares, sin embargo, su tenencia en los hogares del país ha aumentado considerablemente. Según la Encuesta de Calidad de Vida [28], en 2003 solo el 24.9 % de los hogares poseía una lavadora y en 2011 el 48.9 % de estos ya tenía una [23]. En cuanto a la vida útil de una lavadora, esta oscila entre 10 y 18 años [14].

- ***Computadores (portátiles y de escritorio)***

*Composición y peso.* Los computadores tienen componentes que pueden contener sustancias peligrosas, como los condensadores, los componentes con mercurio, los switches, las pantallas de LCD, las TCI, plásticos con retardantes de llama (en el cableado) y las baterías de respaldo [2]. Además se encuentran componentes con materiales valiosos que pueden ser aprovechados, como el hierro o el acero que se encuentran en las carcasas; el aluminio de los disparadores de calor; el cobre que se encuentra en los transformadores y bobinas; y los metales preciosos, como oro, plata, platino y paladio, dentro de las TCI [2]. En general, las composiciones se diferencian entre los computadores portátiles y los de escritorio.

Las proporciones de los materiales de los que se compone una CPU, un monitor y un teclado se pueden observar en las tablas 8, 9 y 10. En la tabla 11 se muestran los componentes y materiales de un computador portátil.

De acuerdo con el peso neto y la cantidad de las importaciones [26], se puede apreciar que el peso de los computadores ha disminuido en el tiempo, de 4 kg pasó a un poco menos de 2 kg.

**Tabla 7.** Composición de una lavadora

Componente (subcomponente)	Materiales constituyentes	Proporción del peso del material	Proporción del peso del componente
Tubería	Polipropileno (PP)		8.9 %
	Plastificante Ftalato	15.64 %	
Cubierta	ABS		6.1 %
Equilibrio	Polipropileno (PP)		5.8 %
Otras partes de plástico	ABS		14.0 %
Armazón	Acero		29.4 %
Otros partes	Acero		4.1 %
			11.9 %
Motor	Cobre	25 %	
	Hierro	65 %	
	Carbono	2 %	
	Plástico	8 %	
Embrague			8.88 %
Condensador			0.51 %
	PCB		
Transformador			1.52 %
Pequeñas partes eléctricas			2.54 %
Manguera			2.54 %
Cableado eléctrico	Cobre y plástico		2.54 %
	Plastificante Ftalato	7.82 %	
TCI			1.27 %

Fuente: Park *et al.* (2006) [33] y Ogilvie (2004) [16].

*Uso y tenencia.* De acuerdo con la encuesta realizada en 2008 por el Centro de Investigación de Mercados (CMI), las entidades públicas y privadas usan un computador durante cuatro años y luego lo almacenan por tres años más. Los usuarios particulares tienen el mismo comportamiento, pero lo almacenan por cinco años en promedio.

Según la Encuesta de Calidad de Vida, en 2003 el 11,2 % de los hogares tenía computador, mientras que en 2011 el 33,9 % de estos ya tenía computador.

**Tabla 8.** Composición de una CPU

Componente (subcomponente)	Materiales constituyentes	Proporción del peso del material	Proporción del peso del componente
Carcasa	Plástico y hierro		42.51 %
(Cara frontal)	Plástico	5.21 %	
(Delantera)	Hierro	6.08 %	
(Trasera)	Hierro	10.59 %	
(Superior)	Hierro	35.07 %	
(Inferior)	Hierro	43.06 %	
TCI 1			6.02 %
	Metales	45 %	
	Cerámica	27 %	
	Polímeros	28 %	
Disco duro	Plástico y hierro		36.24 %
Fuente de poder	Hierro y cobre		13.34 %
Amplificador	Hierro y plástico		1.48 %
Cableado	Plástico y cobre		0.11 %
Tornillos	Hierro		0.30 %

Fuente: Lee *et al.* (2004) [30]. Adaptado de Yamane *et al.* (2011) [12].

- **Teléfonos celulares**

*Composición y peso.* Entre los componentes que pueden contener sustancias peligrosas en un celular están: la pantalla LED o LCD, que contiene cristales líquidos y posiblemente una lámpara fluorescente con mercurio; la batería, que puede contener níquel, mercurio, cadmio o litio; las tarjetas de circuito impreso y algunas partes de plástico, que contienen retardantes de llama. Por otro lado, entre los materiales valiosos que se pueden recuperar de un celular se encuentran algunos metales preciosos como oro, paladio y plata; también se pueden recuperar y reciclar materiales como aluminio, acero, plomo y plásticos.

Los materiales y los metales preciosos mencionados anteriormente se encuentran en las tarjetas de circuito impreso de estos dispositivos. Además, en las carcasas de los celulares se puede encontrar materiales como plástico, cromo, titanio, aluminio, acero y metales ferrosos [20].

En la tabla 12 se muestran los diferentes tipos de materiales que usualmente conforman un celular [21].

De acuerdo con la cantidad y el peso total de los celulares importados, se puede estimar que su peso promedio ha disminuido desde 2007 a 2012 en un 22 %; en este último año alcanzó un peso promedio de 250 gramos.

**Tabla 9.** Composición de un teclado de computador

Componente (subcomponente)	Materiales constituyentes	Proporción del peso del material	Proporción del peso del componente
Carcasa	Plástico		37.91 %
Superior	Plástico	34 %	
Inferior	Plástico	66 %	
TCI			41.83 %
	Metales	45 %	
	Cerámica	27 %	
	Polímeros	28 %	
Botones	Plástico		12.63 %
Cableado	Hierro y plástico		7.63 %

Fuente: Lee *et al.* (2004) [30].

**Tabla 10.** Composición de un monitor CRT de computador

Componente (subcomponente)	Materiales constituyentes	Proporción del peso del material	Proporción del peso del componente
Carcasa	Plástico		17 %
Unidad de protección	Acero		1.8 %
CRT			53 %
(Máscara de sombra)	Acero	7.34 %	
(Vidrio de pantalla)	Vidrio	53.88 %	
(Vidrio de cono)	Vidrio	27.79 %	
(Cañón de electrones)	Plástico, vidrio, acero y cobre	1.539 %	
(Yugo)	Plástico, acero	9.45 %	
Partes metálicas	Acero		4.64 %
TCI			14.34 %
	Oro	0.04 %	
	Cobre	22.00 %	



Componente (subcomponente)	Materiales constituyentes	Proporción del peso del material	Proporción del peso del componente
	Estaño	1.50 %	
	Plomo	2.60 %	
	Fibra de vidrio	30.00 %	
	Resina epóxica	15.00 %	
	Otros metales	29.00 %	
Cableado	Plástico y cobre		5.65 %
Partes de caucho	Caucho		0.4 %
Partes de plástico	Plástico		2.49 %

Fuente: Lee *et al.* (2004) [30].

**Tabla 11.** Composición de un computador portátil

Componente	Material	Proporción del peso del componente	Componente	Material	Proporción del peso del componente
Batería recargable	Litio	13.16 %	Micrófono	Caucho	0.04 %
Carcasa disco duro	ABS	0.88 %	Altavoz	Metal	0.33 %
Cubierta del dispensador de calor	ABS	1.84 %	Carcasa inferior	ABS	7.15 %
Ventilador	ABS	0.59 %	Convertidor de señales	TCl	0.25 %
Dispensador de calor	Metal	4.97 %	Patas de goma	Caucho	0.08 %
Tapa USB	ABS	0.08 %	Bisel LCD	ABS	1.30 %
Cubierta del panel	ABS	0.88 %	Soporte LCD izquierdo y derecho	Metal	0.79 %
Soporte TouchPad	Metal	1.04 %	Interfaz de control	TCl	0.08 %
TouchPad	TCl	0.33 %	Bisagra izquierda y derecha	Metal	1.00 %
Soporte del teclado	Metal	3.22 %	Soporte frontal LCD	Metal	0.59 %
Carcasa superior	ABS	3.13 %	Carcasa de la cámara	ABS	0.08 %
Tarjeta SD	ABS	0.08 %	Soporte de la cámara	Metal	0.21 %
Puerto	ABS	0.25 %	Carcasa LCD	ABS	8.27 %
Bisagra de soporte izquierda y derecha	ABS	0.08 %	Disco duro	Acero	5.01 %
Batería de mercurio	Mercurio	0.13 %	DVD ROM	Acero	8.27 %
Tarjeta madre	TCl	11.41 %	Tarjeta VGA	TCl	1.25 %
Soporte de puertos	Metal	1.84 %	Teclado	ABS	3.47 %
WLAN	TCl	0.08 %	Pantalla LCD		17.34 %
Cámara		0.46 %			

Fuente: Fan *et al.* (2013) [32].

**Tabla 12.** Composición de un celular

Material	Composición (%)	Material	Composición (%)
Aluminio	2.914	Cloro	0.006
Cobre	14.235	Cromo	0.345
Hierro	8.039	Níquel	1.124
Vidrio	10.594	Plomo	0.301
Plástico	59.6	Paladio	0.015
Plata	0.244	Antimonio	0.084
Arsénico	0.001	Estaño	0.689
Oro	0.038	Zinc	0.641
Berilio	0.003	Cristales líquidos	0.150
Bromo	0.941	Bismuto	0.031
Cadmio	0.001	Platino/tantanio	0.004

Fuente: Neira *et al.*, 2006 [21].

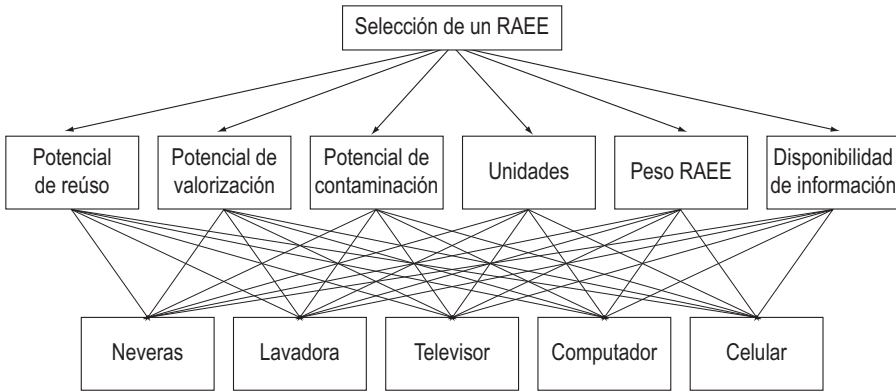
## SELECCIÓN DEL RAEE

Aunque la gestión de todos los tipos de RAEE es importante, ya que contienen materiales peligrosos y valiosos, y se requiere una gestión adecuada para su tratamiento, aprovechamiento y disposición, debido a las diferentes características es necesario seleccionar uno.

En la figura 1 se describe el problema planteado, los criterios utilizados y las alternativas evaluadas de acuerdo con la metodología AHP.

A continuación se describen los criterios utilizados para la selección del RAEE.

**Potencial de reúso o reciclaje:** se refiere a la tasa mínima, medida como el porcentaje del peso promedio de un RAEE, en que debe ser recuperado un residuo por medio del reúso o reciclaje de componentes, materiales y sustancias [3]. Entendiéndose por reúso la acción de extraer un componente de un RAEE para volver a ser utilizado en un aparato nuevo, desempeñando las mismas funciones para las que fue creado.



**Figura 1.** Descripción del problema de selección de RAEE

**Potencial de valorización:** se refiere al mínimo porcentaje, del peso promedio de un RAEE, en que debe ser recuperado un residuo por medio de una o varias de las siguientes opciones de valorización [3]:

- a. Usarlo como combustible o fuente de energía.
- b. Generación o recuperación de disolventes.
- c. Recuperación o reciclaje de sustancias orgánicas, las cuales no son usadas como disolventes.
- d. Recuperación o reciclaje de metales o sus compuestos.
- e. Recuperación o reciclaje de materiales inorgánicos.
- f. Regeneración de ácidos o bases.
- g. Recuperación de componentes usados que disminuyen la contaminación.
- h. Recuperación de componentes de catalizadores.
- i. Refinación u otros usos de aceites.
- j. Uso de los desperdicios obtenidos de las anteriores operaciones.

**Potencial de contaminación:** el potencial de contaminación de un RAEE se determina calculando la proporción del peso de los componentes peligrosos

en el aparato, el cual se muestra en la sección de composición y peso de la caracterización de los RAEE seleccionados.

**Unidades:** hace referencia a la cantidad de RAEE generados en el país anualmente (ver tabla 3).

**Peso RAEE:** hace referencia a la cantidad de toneladas, de cada RAEE generadas anualmente en el país (ver tabla 3).

**Disponibilidad de la información:** es la cantidad y calidad de la información encontrada del RAEE requerida por el caso estudio; esta alternativa se califica de 1 a 5; 5 significa que hay suficiente información y 1 que hay poca.

Para obtener la importancia de los criterios descritos anteriormente se consultó a tres expertos en el tema mediante una entrevista en la que se explicaron la definición de los criterios, y se le pidió a cada experto que diera una calificación de importancia de acuerdo con la escala de Saaty. Las calificaciones de los tres expertos fueron promediadas geométricamente y tabuladas en la matriz de comparación de pares representada en la tabla 13. La razón de consistencia resultante para la evaluación de los expertos fue de 13 %, lo que demuestra coherencia en los resultados.

Posteriormente se construyó la matriz normalizada de comparación por pares con base en la tabla 13, para así calcular el peso promedio de cada criterio (%), el cual se observa en la tabla 14. Toda la información utilizada de los criterios para realizar la evaluación de los RAEE se presenta en la tabla 15.

**Tabla 13.** Matriz de comparación de pares de criterios

	Potencial de reuso	Potencial de valorización	Potencial de contaminación	Disponibilidad de información	Unidades	Peso RAEE
Potencial de reuso	1.00	1.71	0.69	0.69	1.19	1.26
Potencial de valorización	0.58	1.00	0.36	0.52	1.00	0.95
Potencial de contaminación	1.44	2.76	1.00	1.33	2.47	2.08
Disponibilidad de información	1.44	1.91	0.75	1.00	1.12	1.00
Unidades	0.84	1.00	0.41	0.89	1.00	0.74
Peso RAEE	0.79	1.05	0.48	1.00	1.36	1.00

**Tabla 14.** Importancia de los criterios

	<b>Importancia</b>
Potencial de reuso	16.42 %
Potencial de valorización	10.90 %
Potencial de contaminación	27.38 %
Disponibilidad de información	18.45 %
Unidades	12.44 %
Peso RAEE	14.41 %

**Tabla 15.** Información de los criterios para los RAEE

	<b>Peso RAEE</b>	<b>RAEE (Unidades)</b>	<b>Potencial de contaminación</b>	<b>Disponibilidad de información</b>	<b>Potencial de valorización</b>	<b>Potencial de reuso y reciclaje</b>
Neveras	34,593.6	479,867	11.40%	1	80 %	75 %
Televisores	32,811.1	2,389,739	38.83%	3	75 %	65 %
Lavadoras	17,144.2	435,353	19.29%	1	80 %	75 %
Computadores	3,478.3	1,183,091	34.34%	5	75 %	65 %
Celulares	2,998.0	11,992,110	1.53%	5	75 %	65 %

Se procedió a realizar la evaluación de las alternativas relacionada con los criterios, y con esta evaluación se determinó la importancia de cada alternativa respecto al criterio evaluado. Los resultados se muestran en la tabla 16.

**Tabla 16.** Matriz de comparación de pares de alternativas

	<b>Potencial de reuso y reciclaje</b>	<b>Potencial de valorización</b>	<b>Potencial de contaminación</b>	<b>Disponibilidad de información</b>	<b>Unidades</b>	<b>Peso</b>
Neveras	33 %	33 %	16 %	4 %	8 %	36 %
Televisores	11 %	11 %	30 %	18 %	19 %	35 %
Lavadoras	33 %	33 %	21 %	4 %	7 %	20 %
Computadores	11 %	11 %	28 %	37 %	13 %	5 %
Celulares	11 %	11 %	4 %	37 %	53 %	4 %

Para priorizar las alternativas se realizó la multiplicación de la matriz de comparación de pares de alternativas y la de comparación de pares de criterios (tablas 13 y 16), y se obtuvo que el RAEE seleccionado para realizar el estudio de la configuración de la cadena logística inversa es el televisor, con un peso de 22,00 %. Los resultados se muestran en la tabla 17. Y en ellos se puede apreciar que los valores son muy cercanos, lo cual pone de manifiesto que estos aparatos son igualmente prioritarios y merecen atención en el proceso de configurar cadenas de logística inversa que permitan un adecuado manejo de los mismos.

**Tabla 17.** Resultados de la evaluación de los RAEE

Ranking	RAEE	Peso (%)
1	Televisores	22.00 %
2	Neveras	20.43 %
3	Computadoras	19.95 %
4	Lavadoras	19.37 %
5	Celulares	18.25 %

## CONCLUSIONES

Por medio de un AHP y consulta a expertos se seleccionó el televisor como residuo para desarrollar un caso estudio y validar la aplicabilidad del método, sin embargo, los resultados de la priorización de los RAEE demostró que aunque cada uno de los residuos difiere significativamente de los demás en cuanto a sus características de tamaño, peso, volumen, composición, peligrosidad y cantidad generada, no existe gran diferencia entre la importancia dada a cada uno para la selección del RAEE al cual se le va a hacer gestión, de acuerdo con los criterios evaluados. Esto revela la gran importancia de hacer una gestión adecuada de todos estos aparatos al final de su vida útil.

La caracterización de los RAEE estudiados en esta investigación evidencia la necesidad de implementar sistemas de recolección selectiva en Colombia que se encarguen de la gestión adecuada de este tipo de residuos, debido a su contenido de materiales peligrosos con alto potencial de contaminación del medio ambiente.

Por otro lado, la presencia de materiales valiosos que se pueden recuperar de estos residuos es una gran oportunidad de negocio; y además la posibilidad de reusar estos aparatos evidencia un gran potencial para cerrar la brecha tecnológica existente en los países en vía de desarrollo, como Colombia, al ponerlos al alcance de las clases con menos capacidad económica.

Es importante destacar la aplicación y uso de las herramientas multicriterio en procesos de decisión complejos como este, pues permiten tener mayor alcance de estudio y considerar las problemáticas desde perspectivas más amplias, orientadas hacia soluciones integrales.

## REFERENCIAS

- [1] L. M Uribe Restrepo *et al.*, "Manejo de los RAEE a través del Sector Informal en Bogotá, Cali y Barranquilla", Programa Seco/Empa sobre la Gestión de RAEE en América Latina, Colombia, Reporte técnico, abril de 2010.
- [2] *Lineamientos Técnicos para el Manejo de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*. Viceministerio de Ambiente. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, D. C.(2010).
- [3] *Directiva 2002/96/ce del parlamento europeo y del consejo de 27 de enero de 2003 sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)*, 2002L0096 C.F.R. (2003).
- [4] Redacción Vida Hoy (2012, 12 de noviembre). Fabricantes deberán destruir equipos eléctricos y electrónicos viejos. Diario *El Tiempo*. Disponible en: [http://www.eltiempo.com/vida-de-hoy/ecologia/fabricantes-deberan-destruir-equipos-electricos-y-electronicos-viejos\\_12345931-4](http://www.eltiempo.com/vida-de-hoy/ecologia/fabricantes-deberan-destruir-equipos-electricos-y-electronicos-viejos_12345931-4)
- [5] T. J. Barker and Z. B. Zabinsky, "A multicriteria decision making model for reverse logistics using analytical hierarchy process", *Omega*, vol. 39, n°5, pp. 558-573, 2011.
- [6] P. Aragonés-Beltrán, J. P. Pastor-Ferrando, F. García-García, and A. Pascual-Agulló, "An Analytic Network Process approach for siting a municipal solid waste plant in the Metropolitan Area of Valencia (Spain)", *Journal of Environmental Management*, vol. 91, n° 5, pp. 1071-1086, 2010.
- [7] D. Queiruga, G. Walther, J. González-Benito, and T. Spengler, "Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain", *Waste Management*, vol. 28, n° 1, pp. 181-190, 2008.
- [8] C. Achillas, C. Vlachokostas, D. Aidonis, N. Moussiopoulos, E. Iakovou, and G. Banias, "Optimising reverse logistics network to support policy-making

- in the case of Electrical and Electronic Equipment”, *Waste Management*, vol. 30, n° 12, pp. 2592-2600, 2010.
- [9] M. Banar, A. Özkan, and A. Kulac, “Choosing a recycling system using ANP and ELECTRE III techniques”, *Turkish journal of engineering and environmental sciences*, vol. 34, pp. 145-154, 2010. doi:10.3906/muh-0906-47.
- [10] K. Rousis, K. Moustakas, S. Malamis, A. Papadopoulos, and M. Loizidou, “Multi-criteria analysis for the determination of the best WEEE management scenario in Cyprus”, *Waste Management*, vol. 28, n°10, pp. 1941-1954, 2008.
- [11] K. K. Pochampally and S. M. Gupta, “A business-mapping approach to multi-criteria group selection of collection centers and recovery facilities”, *Electronics and the Environment, 2004. Conference Record. 2004 IEEE International Symposium on*, pp. 249-254, 2004.
- [12] L. H. Yamane, V. T. de Moraes, D. C. R. Espinosa, J. A. S. Tenório, “Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers”, *Waste Management*, vol. 31, n° 12, pp. 2553-2558, 2011.
- [13] J. Lohse, S. Winteler, J. Wulf-Schnabel, Collection targets for waste from electrical and electronic equipment (WEEE). The Directorate General (DG XI) Environment, Nuclear Safety and Civil Protection of the Commission of the European Communities, 1998.
- [14] F. Blaser, “Gestión de residuos electrónicos en Colombia: Diagnóstico de Electrodomésticos y de Aparatos Electrónicos de Consumo”, Colombia, Reporte técnico, octubre de 2009.
- [15] J. Huisman, F. Magalini, R. Kuehr, C. Maurer, S. Ogilvie, J. Poll, and C. Delgado, “Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)”, Final Report. Bonn, Alemania: United Nations University, 2008.
- [16] S. M. Ogilvie, “WEEE & Hazardous Waste: AEA Technology”, final report, marzo 2004.
- [17] P. K. Ahluwalia and A. K. Nema, “Multi-objective reverse logistics model for integrated computer waste management”, *Waste Management & Research*, vol. 24, n° 6, pp. 514-527, 2006.
- [18] P. K. Ahluwalia and A. K. Nema, “A life cycle based multi-objective optimization model for the management of computer waste”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 51, n° 4, pp. 792-826, 2007.
- [19] W. Chen-Shu and C. Tung-Hsiang, “Personal Computer Waste Management Process in Taiwan via System Dynamics Perspective”, *New Trends in*



*Information and Service Science* 2009. NISS '09. International Conference on, 2009.

- [20] Mobil Phone Working Group, "Guidance document on the environmentally sound management of used and end-of-life mobile phones", The Secretariat of the Basel. Cartagena, Colombia, 2011.
- [21] J. Neira, L. Favret, M. Fuji, R. Miller, S. Mahdavi, and V.D. Blass, "End-of-Life Management of Cell Phones in the United States", M.S thesis Master's of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara, California, Estados Unidos, 2006.
- [22] D. Ott, "Gestión de residuos electrónicos en Colombia: Diagnóstico de computadores y teléfonos celulares", Swiss E-waste program. Reporte final, Medellín, marzo de 2008.
- [23] Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Encuesta Nacional de Calidad de Vida 2011. Bogotá, D. C.: DANE, 2012.
- [24] IPSOS-Napoleón Franco. Percepción, usos y hábitos frente a las Tecnologías de la Información y la Comunicación. Colombia Digital, 2010.
- [25] Asociación de Regiones y Ciudades para el Reciclaje (ACRR), "La gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos-Guía dirigida a autoridades locales y regionales", Reporte final, Bélgica, septiembre de 2003.
- [26] LegisComex. Colombia-Importaciones detalladas, Bogotá, D. C.: Legis, 2012.
- [27] Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Estimaciones 1985-2005 y proyecciones 2005-2020 de hogares nacional y departamental por área. Estimación y proyección de hogares 1985-2020 y viviendas 1993-2020 nacional. Bogotá, D. C.: DANE, 2010.
- [28] Departamento Administrativo Nacional Estadística. Encuesta de Calidad de Vida 2008. Bogotá, D. C.: DANE, 2009.
- [29] I. C. Nnorom, O. Osibanjo, and M. O. C. Ogwuegbu, "Global disposal strategies for waste cathode ray tubes", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, n° 3, pp. 275-290, 2011.
- [30] C.H Lee, C.T. Chang, K. S. Fan, and T. C. Chang, "An overview of recycling and treatment of scrap computers", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 114, n° 3, pp. 93-100, 2004.
- [31] S. Salhofer, M. Spitzbart, and K. Maurer. *Recycling of LCD Screens in Europe - State of the Art and Challenges*, in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Berlin-Heidelberg: Springer, 2011, pp. 454-458.
- [32] S.K. Fan, C. Fan, J.H. Yang, and K.F.R. Liu, "Disassembly and recycling cost analysis of waste notebook and the efficiency improvement by re-design process", *Journal of Cleaner Production*, vol. 9, pp. 209-219, 2013.

- [33] P.J Park, K. Tahara, I. T. Jeong, and K. M. Lee, "Comparison of four methods for integrating environmental and economic aspects in the end-of-life stage of a washing machine", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 48, n° 1, pp. 71-85, 2006.