



Minería urbana en el Valle de Aburrá: un aporte desde la economía circular

Verónica Mejía Vasco

Trabajo de grado de maestría presentado para optar al título de Magíster en Sostenibilidad

Asesora

Natalia Osorio Sierra, Magíster (MSc) en Sostenibilidad

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Maestría en Sostenibilidad

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

Dedicatoria

A Nico, por ser mi motor y por la alegría que le das a mi mundo
A Juan, por siempre creer en mí y por ser el mejor compañero de vida
Y a Amparo Vasco, por enseñarme a perseverar

Tabla de contenido

1. Resumen.....	9
2. Abstract.....	10
3. Antecedentes.....	11
4. Objetivos.....	14
2.1 Objetivo general.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
5. Marco teórico.....	15
Aparatos Eléctricos y Electrónicos – AEE.....	15
Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos – RAEE.....	16
Economía Circular.....	23
Minería Urbana.....	25
6. Diagnóstico del Manejo y Disposición de RAEE.....	36
Generación de RAEE.....	36
Manejo y disposición de los RAEE.....	43
7. Normatividad asociada.....	49
8. Identificación de Impactos Ambientales y Sociales.....	53
9. Caso de éxito en Minería Urbana.....	68
10. Propuesta modelo circular para la minería urbana.....	71
11. Conclusiones.....	81
12. Referencias.....	82

Lista de tablas

Tabla 1 Categorías y subcategorías de los AEE y sus residuos	17
Tabla 2 Composición media de los materiales por categoría de colección	20
Tabla 3 Generación RAEE en América del Sur	39
Tabla 4 Generación de RAEE en América del Sur, año 2022.....	40
Tabla 5 Composición física porcentual de los residuos sólidos generados en el sector residencial de Medellín por estrato socioeconómico	43
Tabla 6 Comparación de la composición física porcentual de diferentes estudios de caracterización de residuos sólidos en el sector residencial de Medellín para los años 2009, 2001, 2014 y 2018.....	43
Tabla 7 Manejo de residuos eléctricos y electrónicos	47
Tabla 8 Resultados matriz de Leopold	63
Tabla 9 Potencial de mitigación de la minería urbana en algunas ciudades de Latinoamérica	66

Lista de figuras

Figura 1 Crecimiento de la generación de residuos electrónicos vs crecimiento de recogida de residuos.....	12
Figura 2 Economía lineal	13
Figura 3 Cantidades de AEE importadas, fabricadas y exportadas 2019-2022 en Colombia..	16
Figura 4 Componentes de los RAEE	19
Figura 5 Beneficios de la Economía Circular	25
Figura 6 Traslado de materias primas de los yacimientos naturales a la antroposfera y su retención más prolongada a través de la minería urbana.....	26
Figura 7 Presencia de metales en la tecnosfera	27
Figura 8 Valor de las materias primas contenidas en los RAEE.....	28
Figura 9 Países que representan la mayor parte de la oferta mundial de CRM	30
Figura 10 Números de años restantes de reservas de metales raros y preciosos si el consumo continúa al ritmo actual	31
Figura 11 Los metales de la tabla periódica en peligro de extinción	32
Figura 12 Minas Urbanas Globales de Cobre (2018). Todas las cifras en millones de toneladas (Mt) de cobre contenido.	33
Figura 13 Cantidades de AEE importadas, fabricadas y exportadas 2019-2022 en Colombia	34
Figura 14 Regiones con mayor generación de residuos electrónicos per cápita (kg) en 2022	37
Figura 15 Total de residuos generados (billón Kg) por tipo de RAEE en 2022	38
Figura 16 Movimientos transfronterizos de E-waste	39
Figura 17 Estimación generación de RAEE 2016 – 2026 en Colombia	41
Figura 18 Cantidad de residuos peligrosos generados jurisdicción Área Metropolitana del Valle de Aburrá	42

Figura 19 Instalaciones autorizadas para el almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento, y/o disposición final de residuos peligrosos y/o de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)	45
Figura 20 Cantidades de residuos gestionados y validados por ANLA en 2023 correspondientes a la gestión de 2022	46
Figura 21 Aprovechamiento de los residuos reportados por los sistemas de recolección selectiva	47
Figura 22 Línea de tiempo marco normativo nacional RAEE	51
Figura 23 Principales contaminantes y materiales peligrosos de los RAEE si se gestionan de manera inadecuada o son vertidos	54
Figura 24 Impactos por la gestión inadecuada de los RAEE	55
Figura 25 Metodología matriz de Leopold	60
Figura 26 Modelo de negocio AURUBIS	69
Figura 27 La Minería Urbana en el contexto de la Economía Circular	71
Figura 28 Jerarquización de las acciones para la gestión de los RAEE	72
Figura 29 Minería Urbana y Economía Circular	73
Figura 30 Habilitadores para la minería urbana dentro de la economía circular	76

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AEE	Aparatos Eléctricos y Electrónicos
EC	Economía Circular
E-Waste	Electronic Waste
RAEE	Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment

1. Resumen

La innovación tecnológica y a su vez la cultura creciente del consumismo conlleva a la existencia de gran cantidad de Aparatos Eléctricos y Electrónicos -AEE- y por tanto a un incremento en la generación de residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos -RAEE-. En el año 2022 se generaron en el mundo 62 mil millones de kg de RAEE y sólo el 22,3% fueron documentados oficialmente como recogidos y reciclados de manera adecuada.

Dentro de dichos residuos generados se encuentran diferentes componentes que incluyen metales como oro, plata, cobre, platino y paladio, además de minerales denominados “críticos” que pueden ser recuperados mediante la llamada “Minería Urbana” y pueden ser utilizados en la industria como materia prima aportando así a la economía circular.

Revisando la generación de impactos de la minería urbana respecto a la disposición de los RAEE en rellenos sanitarios, se tiene que el considerar la minería urbana para la valorización y aprovechamiento de los metales genera beneficios en términos ambientales, sociales y económicos.

El Observatorio Mundial de Residuos Electrónicos (2024) menciona que, para América del Sur se estimó en el año 2022 una generación de residuos electrónicos de 4.413 millones de kg con una generación per cápita de 10,1 kg y específicamente para Colombia, se generaron 388 millones de kilogramos. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023) también estimó la generación de Residuos Eléctricos y Electrónicos para Colombia, para el año 2026 se estima una generación máxima en 250.013 toneladas netas. Es así como la propuesta de este trabajo de grado habla sobre la potencial solución a la cantidad de generación de los RAEE a través de la economía circular.

Por tanto, considerando entonces la minería urbana como parte integral de la economía circular se presentan los elementos que debe considerar un modelo circular que involucre la minería urbana como parte de este, además de los habilitadores claves que permiten el funcionamiento o aplicación del modelo en el Valle de Aburrá.

Palabras clave: Reciclado de metales, valorización de residuos, minería urbana, economía circular, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

2. Abstract

Technological innovation and in turn the growing culture of consumerism leads to the existence of a large amount of Electrical and Electronic Equipment (EEE) and therefore to an increase in the generation of waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). In 2022, 62 billion kg of WEEE were generated in the world and only 22.3% were officially documented as properly collected and recycled.

Within this waste generated are different components that include metals such as gold, silver, copper, platinum and palladium, as well as so-called "critical" minerals that can be recovered through the so-called "Urban Mining" and can be used in industry as raw materials, thus contributing to the circular economy.

Reviewing the generation of impacts of urban mining with respect to the disposal of WEEE in landfills, it is necessary to consider urban mining for the valorization and use of metals generates benefits in environmental, social and economic terms.

The Global Electronic Waste Observatory (2024) mentions that, for South America, an estimated generation of electronic waste of 4,413 million kg with a per capita generation of 10.1 kg was estimated in 2022 and specifically for Colombia, 388 million kilograms were generated. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023) also estimated the generation of Electrical and Electronic Waste for Colombia, for the year 2026 a maximum generation is estimated at 250,013 net tons. This is how the proposal of this degree project talks about the potential solution to the amount of WEEE generation through the circular economy.

Therefore, considering urban mining as an integral part of the circular economy, the elements that a circular model that involves urban mining as part of it should consider are presented, in addition to the key enablers that allow the operation or application of the model in the Valle de Aburrá.

Keywords: Metal recycling, waste recovery, urban mining, circular economy, waste electrical and electronic equipment

3. Antecedentes

Según Naciones Unidas (2023), hoy la población mundial es más de tres veces mayor que a mediados del siglo XX, alcanzó los 8000 millones a mediados de noviembre de 2022 y se estima que aumentará casi 2000 millones de personas en los próximos 30 años, es decir que ha venido creciendo de forma exponencial.

De igual manera, la producción de bienes y servicios se encuentra en aumento con el fin de satisfacer la demanda de la población; más aun considerando que en los próximos veinte años el mundo evoluciona de ser mayormente pobre a ser mayormente de clase media; para 2030, 5 mil millones de personas, casi dos tercios de la población mundial podrían ser de clase media (Kharas & Gertz, 2016), este aumento de la clase media conlleva a que se presenten mayores ingresos y por tanto un mayor consumo sobre todo de productos tecnológicos.

El desarrollo económico mundial ha elevado el consumo de equipos eléctricos y electrónicos, que incluye una amplia gama de productos con circuitos o componentes eléctricos con alimentación o batería. Además del uso cotidiano en el hogar y en las empresas (dispositivos básicos de cocina, juguetes, herramientas para música y artículos TIC, como teléfonos móviles y ordenadores portátiles), los materiales electrónicos también se utilizan en el transporte, la salud, los sistemas de seguridad y las tecnologías de energía renovable, como fotovoltaica, y sensores o dispositivos en el concepto de “hogar inteligente” (Abdel Azim, et al.,2023)

A su vez, este cambio y avance constante de las tecnologías de manera acelerada llevan a la obsolescencia de aparatos eléctricos y electrónicos – AEE- con una mayor rapidez, haciendo que se presenten ciclos de vida más cortos que llevan a su rápida reposición y por ende su desecho.

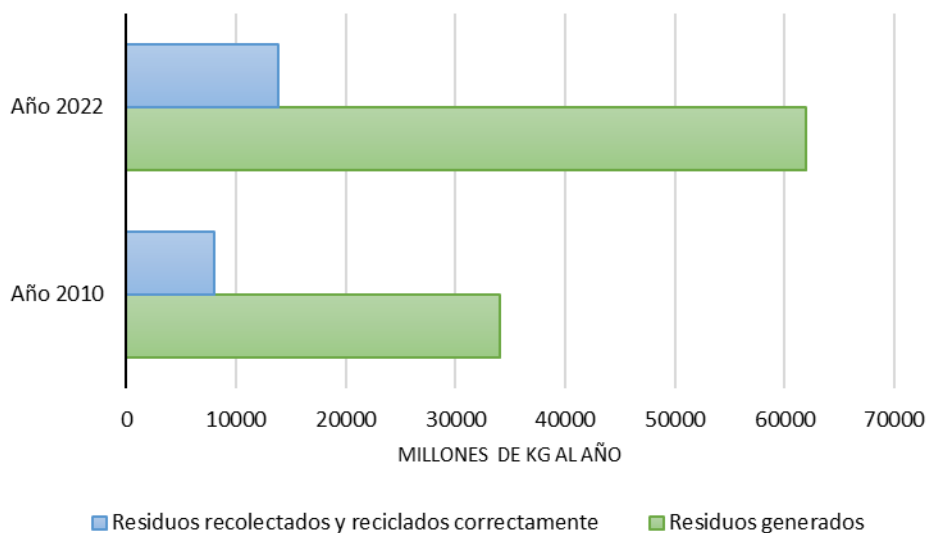
La “obsolescencia” es un término que se refiere a la vida útil, o valor de uso, de un artefacto o servicio en función del tiempo, y en el contexto económico se asocia con la depreciación (Beorlegu et al s.f.). Ahora bien, también se habla de la “obsolescencia programada”, donde los productores reducen deliberadamente la vida útil de los productos y de esta manera incrementar el consumo de estos y por ende del usar y tirar (Fernández Rey, 2014). Además, debe considerarse la “obsolescencia percibida” que como lo menciona Fernández (2014) es aquella que lleva al consumidor a sentir la necesidad de cambiar algo que ha adquirido

por algo más nuevo, antes de lo que realmente necesita. La obsolescencia es utilizada entonces como una herramienta de estímulo para obtener como resultado un incremento en el consumo.

Según el Observatorio mundial de los residuos (2024) la gestión de los residuos electrónicos sigue siendo motivo de preocupación y requiere atención y acción inmediatas, ya que la cantidad de residuos electrónicos ha crecido 5 veces más rápido que la recogida y el reciclaje desde 2010. En 2022, el mundo generó 62 mil millones de kg de desechos electrónicos, de los cuáles 13.800 millones de kg se documentaron como recolectados y reciclados adecuadamente. En 2010, el mundo generó 34.000 millones de kg de residuos electrónicos con una tasa oficial documentada de 8 mil millones de kg, tal como se presenta en la **Figura 1**.

Figura 1

Crecimiento de la generación de residuos electrónicos vs crecimiento de recogida de residuos



Nota. Elaboración propia con información de Cornelis P. Baldé, et al, (2024)

Es así como, la acelerada renovación de los AEE ha provocado un crecimiento exponencial de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), considerando lo expuesto por Statista Research Department (2023) en Colombia la generación de residuos electrónicos alcanzó las 34 mil toneladas métricas en 2021; durante ese año, Colombia se posicionó como uno de los mayores generadores de basura electrónica en América Latina y el Caribe. Y el Observatorio Mundial de Residuos Electrónicos (2024) menciona que, para

Colombia se estimó en el año 2022 una generación de residuos electrónicos de 388 millones de kg. Mientras que el Ministerio del Medio Ambiente (2023) estimó para el 2021 una generación de 197 Kt.

Todo lo anterior alude entonces al aumento de la producción de residuos eléctricos y electrónicos, y más aun considerando que la economía actual es lineal denominada economía *take – make - waste* (extraer, producir, desperdiciar) ver **Figura 2**, una economía donde los productos y materiales generalmente no se utilizan en todo su potencial, además se ha comenzado a notar que este sistema lineal aumenta su exposición a los riesgos, sobre todo el aumento de los precios de los recursos y las interrupciones del suministro (Ellen MacArthur Foundation, s.f.), generando así impactos negativos sobre el ambiente.

Figura 2
Economía lineal



Nota. Elaboración propia, 2024

Este trabajo busca entonces conocer el manejo que se le está dando actualmente a los residuos eléctricos y electrónicos en el Valle de Aburrá, mostrando el potencial de circularidad, revalorización y mitigación de externalidades asociado a la minería urbana como solución circular al problema de los RAEEs aportando así a la sostenibilidad en términos económicos, ambientales y sociales.

4. Objetivos

2.1 Objetivo general

Formular un modelo de revalorización para asegurar la circularidad de los RAEEs en el Valle de Aburrá a través de la vinculación de modelos de negocios, sistemas de recuperación y circuitos de reaprovechamiento continuo de materias secundarias, enmarcados dentro del concepto de Minería Urbana de metales y minerales críticos.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico de la generación, manejo, disposición final y sistemas de revalorización existentes para las corrientes de materiales denominadas como RAEEs.
- Realizar una identificación de los posibles impactos ambientales y sociales de la implementación de la propuesta de un modelo revalorización alrededor de la minería urbana.
- Presentar un análisis sobre el marco regulatorio y la normatividad vigente en Colombia, relacionada con la generación, manejo, aprovechamiento, comercialización y disposición final de los RAEEs.
- Demostrar, mediante un caso de negocio, el potencial de circularidad y revalorización implícito en la minería urbana para el aprovechamiento continuos de los RAEEs

5. Marco teórico

A continuación, se presentan los principales fundamentos teóricos para entender y construir la propuesta de circularidad para la minería urbana.

Aparatos Eléctricos y Electrónicos – AEE

El Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea (2012) define los aparatos eléctricos y electrónicos o AEE como *“todos los aparatos que para funcionar debidamente necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos y los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir tales corrientes y campos y que están destinados a utilizarse con una tensión nominal no superior a 1.000 voltios en corriente alterna y 1.500 voltios en corriente continua”*. En Colombia, la Ley 1612 de 2013 los define como *“todos los aparatos que para funcionar necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos, así como los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir dichas corrientes”*.

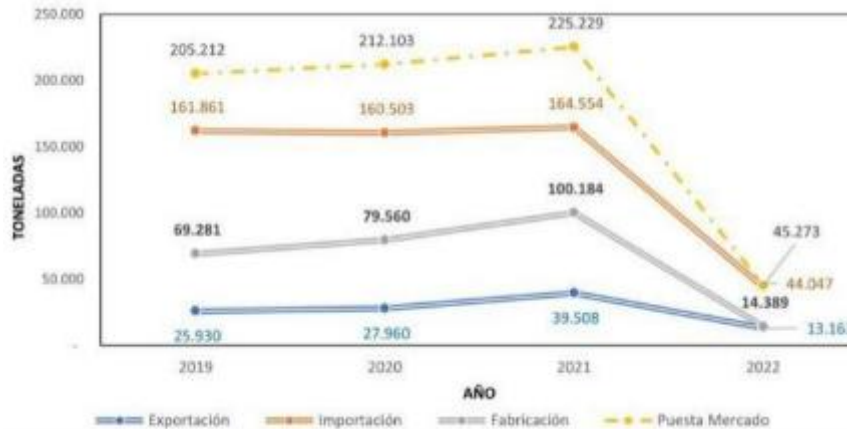
Los AEE también están ganando peso en el sector debido a la expansión del Internet de las cosas (IoT), en especial los sensores o dispositivos relacionados con el concepto de "hogar inteligente" o "ciudad inteligente" (Forti et al., 2020).

Actualmente se evidencia una dependencia mayor del uso de la tecnología y de los beneficios que proporcionan los aparatos eléctricos y electrónicos, lo que ha llevado a un alto consumo de estos aparatos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023), de igual manera el rápido crecimiento económico y el avance tecnológico en la industria eléctrica y electrónica para producir productos eléctricos y electrónicos innovadores a un precio accesible, representa una de las principales causas que han ocasionado el creciente consumo a nivel mundial (Sánchez Alvarado, 2023).

Para Colombia, según el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023) en el año 2022 se pusieron en el mercado 45.273 toneladas de AAE, se exportaron 13.163 toneladas, se importaron 44.047 toneladas y se fabricaron 14.389 toneladas de AAE (ver **Figura 3**).

Figura 3

Cantidades de AEE importadas, fabricadas y exportadas 2019-2022 en Colombia



Nota. Fuente (Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible 2023)

Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos – RAEE

Ahora bien, una vez utilizados, los AEE se eliminan, generando un flujo de residuos que contiene materiales peligrosos y valiosos, dichos residuos se denominan *e-waste* (residuos-e), el término oficial de la Unión Europea es WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment), en español, equivale a RAEE o residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (Forti et al 2020). Un aparato electrónico es considerado RAEE cuando ya no pueda ser usado para el fin que ha sido creado, por obsolescencia o cuando su poseedor toma la decisión de descartarlo.

La Ley 1672 de 2013 de Colombia define a los RAEE como aquellos aparatos eléctricos o electrónicos que son desechados o descartados por sus propietarios, junto con los componentes, subconjuntos o accesorios que forman parte del aparato al momento de ser descartado, allí también se menciona que los RAEE requieren un manejo diferenciado. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Cada tipo de residuo electrónico tiene un tamaño específico, componentes peligrosos y materiales valiosos que afectan la forma en que debe recogerse, tratarse, reciclarse o eliminarse de manera ambientalmente racional (Wagner, y otros, 2022).

La Directiva de la Unión Europea clasifica los AEE en seis categorías orientada a las características de los RAEE:

1. Aparatos de intercambio de temperatura
2. Monitores, pantallas, y aparatos con pantallas de superficie superior a los 100 cm²
3. Lámparas
4. Grandes aparatos (con una dimensión exterior superior a 50 cm)
5. Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior superior a 50 cm)
6. Aparatos de informática y de telecomunicaciones pequeños (sin ninguna dimensión exterior superior a los 50 cm)

Para Colombia, la Resolución 851 de 2022 clasificó en categorías y subcategorías los AEE y sus residuos. Esto fue realizado de acuerdo con la identificación de los productos importados o manufacturados en el país según la nominación del Sistema Armonizado de Designación y Codificación de Mercancías (subpartida arancelaria) que, por sus características, podrían corresponder a un AEE. De esta forma, las cadenas productivas se homologaron a categorías de AEE y los eslabones de productos a subcategorías de AEE (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023) tal como se presenta en la **Tabla 1**

Tabla 1

Categorías y subcategorías de los AEE y sus residuos

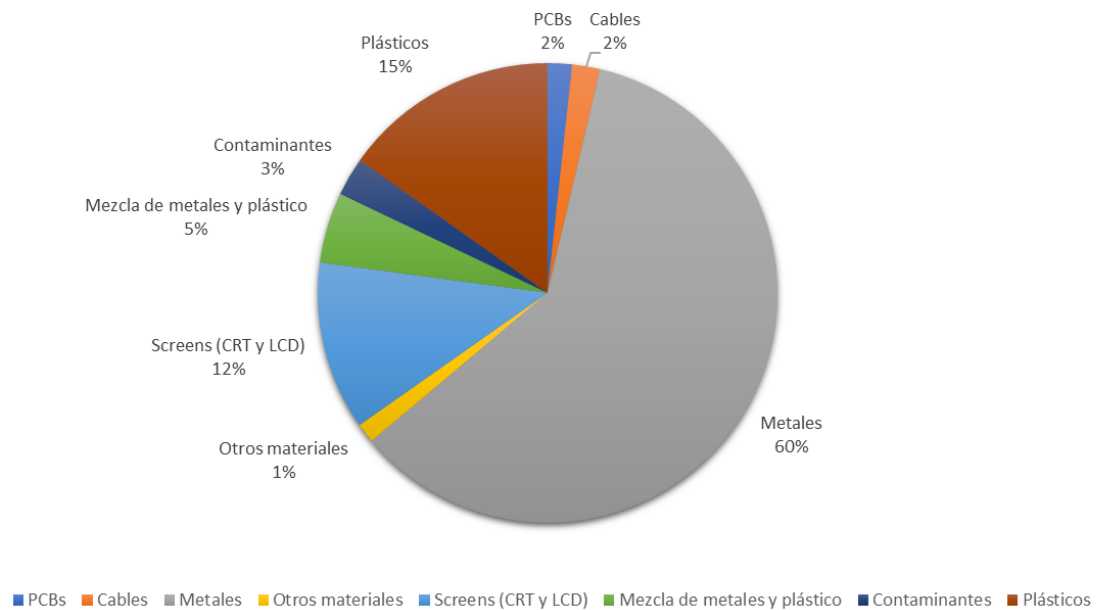
Categoría	Ítem	Subcategoría
1. Aparatos Electrodomésticos	1.1	Cocinas y hornos
	1.2	Enseres de audio y video
	1.3	Enseres mayores de hogar
	1.4	Enseres menores de calentamiento
	1.5	Enseres menores de cocina
	1.6	Enseres menores de hogar
	1.7	Enseres menores personales
	1.8	Equipos de acondicionamiento de aire
	1.9	Herramientas para el hogar
	1.10	Refrigeración doméstica y comercial
2. Electrónica y Equipos de Telecomunicaciones	2.1	Antenas para telecomunicaciones
	2.2	Circuitos electrónicos
	2.3	Componentes electrónicos
	2.4	Computadores y equipos para tratamiento de datos

Categoría	Ítem	Subcategoría
	2.5	Electrónica de consumo
	2.6	Equipos de electrónica de potencia
	2.7	Equipos de instrumentación y control
	2.8	Equipos de telecomunicaciones
	2.9	Equipos electromédicos
	2.10	Periféricos, partes y tarjetas para computadores e impresoras
3. Maquinaria y Equipo Eléctrico	3.1	Cables y conductores
	3.2	Equipo industrial
	3.3	Equipos de control y protección
	3.4	Equipos de iluminación
	3.5	Equipos eléctricos e instalaciones para vehículos
	3.6	Grupos electrógenos
	3.7	Máquinas y aparatos de oficina
	3.8	Motores y generadores
	3.9	Otros aparatos y sistemas
	3.10	Piezas eléctricas
	3.11	Pilas y acumuladores
	3.12	Refrigeración y equipos de acondicionamiento de aire industriales
	3.13	Transformadores

Nota. Fuente (Resolución 851 de 2022)

Considerando lo expuesto por Widmer et al., (2005) la diversa gama de materiales y componentes que se encuentran en los RAEE dificulta asignar una composición generalizada para la totalidad de los residuos. Sin embargo, se podrían designar cinco categorías de materiales: 1) metales ferrosos, 2) metales no ferrosos, 3) vidrio, 4) plásticos y 5) otros materiales. Los metales ferrosos como el hierro y el acero son los materiales más comunes (en % peso) que se encuentran en los RAEE y representan casi la mitad de su peso total. Los plásticos son el segundo componente más abundante en % peso (véase **Figura 4**).

Figura 4
Componentes de los RAEE



Fuente: Elaboración propia con base en Widmer et al, 2005

Ahora bien, en la **Tabla 2** se presenta la composición de los RAEE por categoría de residuo, dichas categorías son las establecidas según la Directiva 2012/19/UE.

Tabla 2*Composición media de los materiales por categoría de colección*

Material	Tipo de elemento	Categoría 1: Equipos de intercambio de temperatura	Categoría 2: Monitores, pantallas, aparatos con superficie superior a los 100 cm²	Categoría 3: Lámparas y aparatos con superficie superior a los 100 cm²	Categoría 4: Grandes aparatos (con una dimensión exterior superior a 50 cm)	Categoría 5: Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior superior a 50 cm)	Categoría 6: Aparatos de informática y de telecomunicaciones pequeños (sin ninguna dimensión exterior superior a los 50 cm)
Acrilonitrilo Butadieno Estireno -ABS	Plástico	-	1.345,20	-	-	-	-
Plata - Ag	Metal	-	0,6	-	-	-	0,5
Aluminio - Al (general)	Metal	1.255,00	482,5	8,1	910	116,8	58,1
Arsénico - As	Metaloide	-	-	-	-	-	-
Oro - Au	Metal	-	0,1	-	-	-	0,1
Berilio - Be	Metal	-	-	-	-	-	-
Bismuto - Bi	Metal	-	0,3	-	-	-	-
Bromo - Br	No metálico	-	2,4	-	-	0,1	1,5
Cadmio - Cd	Metal	-	-	-	-	0,6	0,2
Cerámicas	Cerámica	-	244	0,5	37,6	7,4	20,1
Cloro - Cl	No metal	-	0,3	-	-	0,3	-
Cobalto - Co	Metal	-	0,1	-	-	0,2	0,3
Cromo - Cr	Metal	-	1,3	-	-	-	0,6
CRT Cono de vidrio	Vidrio	-	1.110,20	-	-	-	-
CRT Pantalla de cristal	Cristal	-	2.241,70	-	-	-	-
Cobre - Cu	Metal	958	536,6	2,8	1.736,00	540,9	159
Epoxi	Resina	-	60,4	0,2	-	6	-
Hierro - Fe	Metal	7.848,00	766,8	0,1	4,9	291,8	80,3
Polvo fluorescente	-	-	-	2,4	-	-	-
Vidrio (blanco)	Vidrio	285	945,6	-	403	2,1	-

Material	Tipo de elemento	Categoría 1: Equipos de intercambio de temperatura	Categoría 2: Monitores, pantallas, aparatos con superficie superior a los 100 cm²	Categoría 3: Lámparas y aparatos con superficie superior a los 100 cm²	Categoría 4: Grandes aparatos (con una dimensión exterior superior a 50 cm)	Categoría 5: Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior superior a 50 cm)	Categoría 6: Aparatos de informática y de telecomunicaciones pequeños (sin ninguna dimensión exterior superior a los 50 cm)
Vidrio (blanco - baja calidad)	Vidrio	-	-	9,9	-	-	-
Mercurio - Hg	Metal	-	-	-	-	-	-
Vidrio (blanco - alta calidad)	Vidrio	-	-	4	11	-	-
Vidrio (LCD)	Vidrio	-	131,4	-	-	0,1	4
Cristales líquidos	Cristal líquido	-	-	-	-	-	0,2
Manganeso - Mn	Metal	-	-	-	-	-	-
Níquel - Ni	Metal	-	5,5	-	-	1,2	3,2
Aceite	Aceite	205	-	-	1,7	3,2	-
Otros / inertes	-	420	263	-	11.920,00	55,6	80,1
Otros plásticos	Plásticos	-	-	-	-	1,3	1
Plomo - Pb	Metal	-	8,6	0,1	0,8	0,7	1,1
Placas de circuito impreso - PCB	-	-	-	-	0,7	-	-
Paladio - Pd	Metal	-	-	-	-	-	-
Plásticos generales	Plástico	3.260,00	1.866,30	3	8.514,00	1.854,50	1.240,00
Polietileno de Alta Densidad - PE (HD)	Plástico	-	159	-	-	-	-
Polietileno Tereftalato - PET	Plástico	-	31,8	-	-	-	-
PS (poliestireno)	Plástico	2.660,00	-	-	-	0,1	-
Poliuretano - PUR	Plástico	3.750,00	-	-	169	0,2	-

Material	Tipo de elemento	Categoría 1: Equipos de intercambio de temperatura	Categoría 2: Monitores, pantallas, aparatos con superficie superior a los 100 cm²	Categoría 3: Lámparas y aparatos con superficie superior a los 100 cm²	Categoría 4: Grandes aparatos (con una dimensión exterior superior a 50 cm)	Categoría 5: Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior superior a 50 cm)	Categoría 6: Aparatos de informática y de telecomunicaciones pequeños (sin ninguna dimensión exterior superior a los 50 cm)
PVC	Plástico	24	106,9	-	191	6,4	8,6
Antimonio - Sb	Metal	-	1,3	-	-	0,1	0,2
Estaño - Sn	Metal	-	4,1	0,1	25,5	1,1	4
Acero inoxidable	Acero	1.000,00	-	0,5	907	107,3	51,5
Acero de baja aleación	Acero	16.415,00	2.071,20	2,3	29.411,00	1.599,40	2.470,00
Ciclopentano	Hidrocarburo	47	-	-	-	-	-
Isobutano	Hidrocarburo	11	-	-	-	-	-
CFC11	Gas	245	-	-	-	-	-
CFC12	Gas	97,2	-	-	-	-	-
Madera	Madera	-	70,3	-	-	110,5	-
Zinc - Zn	Metal	-	10,9	-	7,7	1,3	4
Total		38.480	12.468	14	54.240	4.709	4.188

(g)

4

Nota. Fuente (Elaboración propia con base en UNU, CBS, BIO, REC, 2014)

Tal como lo menciona el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023) en la Guía Técnica para la Gestión Integral de los RAEE, la complejidad en el manejo de los RAEE radica en su doble condición; estos son una fuente para la recuperación de materiales valorizables, pero también contienen sustancias que presentan riesgos para la salud y el ambiente.

Economía Circular

Los últimos 150 años de evolución industrial han estado dominados por un modelo unidireccional o lineal de producción y consumo en el que los bienes se fabrican a partir de materias primas, se venden, se usan y luego se desechan o se incineran como residuos (Ellen MacArthur Foundation, 2014). Por lo anterior se ha venido planteando un nuevo modelo económico, la “Economía Circular”. Actualmente el término de Economía Circular (EC) es tendencia considerando la crítica situación del planeta en términos ambientales, por tanto, son innumerables definiciones dadas para la EC.

Según Ellen MacArthur Foundation la economía circular es un marco de soluciones sistémicas que hace frente a desafíos globales como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, los residuos y la contaminación. La economía circular desvincula la actividad económica del consumo de recursos finitos. Y se base en cuatro principios: eliminar los residuos y la contaminación, circulación de productos y materiales, regenerar la naturaleza y pensamiento sistémico.

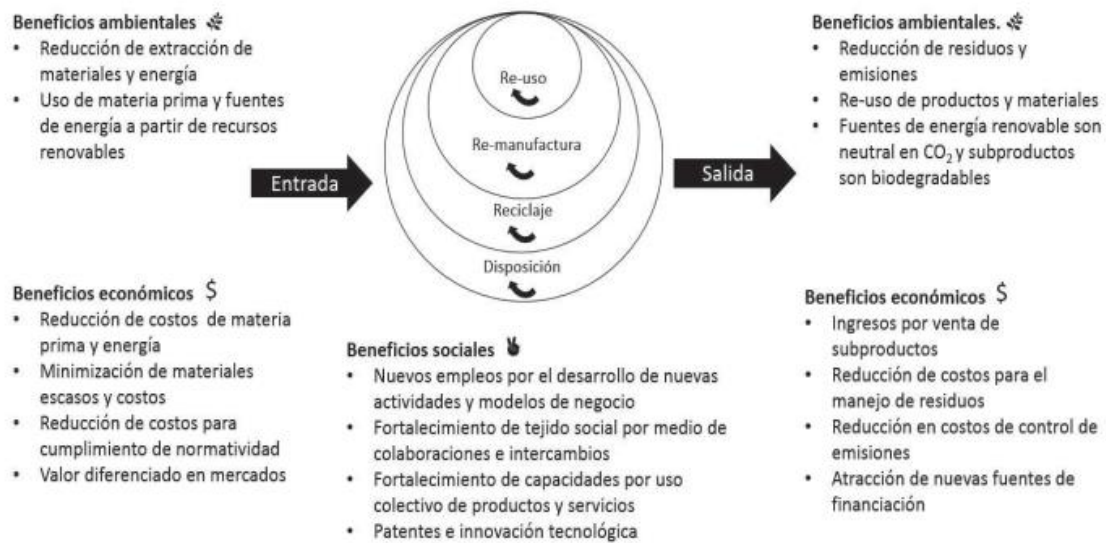
La economía circular se puede conceptualizar como una filosofía del diseño y de organización de sistemas. Inspirada en los seres vivos, emula los ciclos de la naturaleza en la que los “desechos” de una especie se convierten en el “alimento” de otra y así sucesivamente en un sistema cíclico de autosuficiencia. La economía circular presenta una perspectiva ambiciosa, desafiante y atrevida puesto que requiere la transformación radical de los medios de producción, de las cadenas de suministro, de la cultura y de los hábitos de consumo a nivel planetario (Antúnez Sánchez & Matos Guerra, 2020). La economía circular busca entonces que el valor de los productos, materiales y recursos deba permanecer en la economía el mayor tiempo posible, ya que deben diseñarse para regresar al ciclo de producción o al sistema de servicios, aunque sea en otros ciclos (Xavier et al, 2021).

Zuloeta (2022) construye la definición de economía circular como: La economía circular es un modelo de desarrollo económico que opera a todo nivel organizacional, que previene la contaminación ambiental, protege el entorno ambiental y ofrece una ruta hacia la sostenibilidad ambiental, social y económica. La economía circular busca regenerar y restaurar los sistemas naturales reduciendo la entrada de materias primas (vírgenes) y la producción de residuos. Asimismo, la economía circular mantiene los productos y materiales el mayor tiempo posible en uso y que al finalizar su vida útil se convierten en recursos para nuevas actividades, todo ello sopesado en el diseño y desarrollo tecnológico para fabricar nuevos productos que respondan a un mantenimiento, reparación, reutilización, refabricación, restauración y reciclaje duraderos (pág. 24).

De acuerdo con la Estrategia Nacional de Economía Circular del Gobierno Nacional, esta es un nuevo modelo de desarrollo económico que incluye la valorización continua de los recursos, el cierre de ciclos de materiales, agua y energía, la creación de nuevos modelos de negocio, la promoción de la simbiosis industrial y la consolidación de ciudades sostenibles, con el fin, entre otros, de optimizar la eficiencia en la producción y consumo de materiales, y reducir la huella hídrica y de carbono (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio Industria y Turismo, 2019).

Respecto a los beneficios de la Economía Circular, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2019) menciona que el modelo de identificación de beneficios sigue el esquema de las entradas y salidas del modelo de transformación, dado que el modelo circular genera eficiencias en ambos sentidos, generando beneficios ambientales, económicos y sociales, tal como se presenta en la **Figura 5**.

Figura 5
Beneficios de la Economía Circular



Nota. Fuente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible adaptado de (Korhonen, Honkasalo, & Seppala, 2018)

Minería Urbana

Liz Clinckspoor (2022) menciona que la minería urbana es una línea de pensamiento que retoma la circularidad sistémica de la economía circular y entiende que, si la mayor parte de la materia prima extraída de la corteza terrestre se utiliza en las ciudades, los excedentes de estos intercambios materiales producidos permanecen en dichos entornos urbanos. Esta aproximación considera a la ciudad como un distrito minero donde los espacios urbanos son fuente de materiales antropogénicos que se pueden utilizar y reutilizar de manera cíclica (López Gómez, 2020).

La minería urbana, se considera que permite incidir en el avance del concepto de economía circular ya que estas materias primas pueden volver de nuevo a utilizarse y tener otra vida útil en otros dispositivos u objetos (Antúnez Sánchez & Matos Guerra, 2020). La valorización de los residuos electrónicos mediante la minería urbana se ha convertido en una estrategia potencial no sólo para reducir el impacto ambiental y los costos productivos, sino también para optimizar los ciclos en la cadena productiva (Ottoni, Dias, & Xavier, 2020).

Por otro lado, Tercero et al, (2020), menciona que todos los metales y minerales presentes en el stock antropogénico proceden de la minería, incluso si el material ha sido reciclado previamente (véase la **Figura 6**). La minería urbana conduce a una mayor circularidad y amplía el alcance de los recursos geológicos conocidos y aún por descubrir.

Figura 6

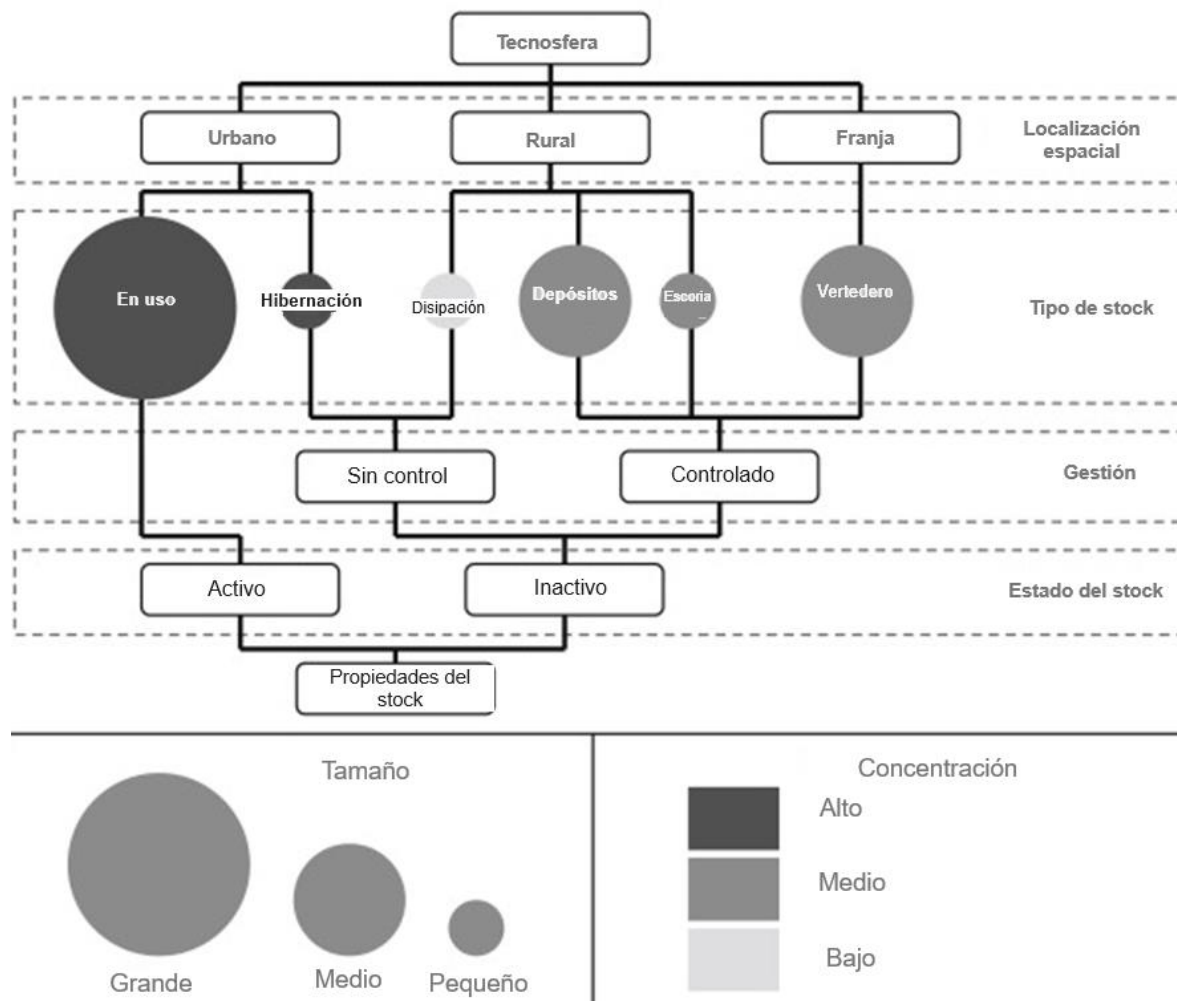
Traslado de materias primas de los yacimientos naturales a la antroposfera y su retención más prolongada a través de la minería urbana



Nota. Fuente: Traducido de Tercero et al (2020)

Johansson et al, (2013) también menciona que para evaluar el potencial de explotación de cualquier yacimiento de recursos es necesario conocer su tamaño, concentración y ubicación. Existen estimaciones cuantitativas del tamaño de las existencias en uso para varios metales, por ejemplo, para el hierro y el cobre, el mayor stock es el actualmente en uso, que se estima comprende al menos el 50% de la cantidad total de metal en la tecnosfera. Los vertederos y los depósitos de relaves pueden ubicarse en una categoría media, donde se encuentran aproximadamente el 10-20% de los recursos metálicos de la tecnosfera. La escoria, las existencias en hibernación y los recursos metálicos disipados se consideran yacimientos de metales aún más pequeños, por lo que constituyen una tercera categoría de tamaño que representa alrededor del 1-5% de las existencias de metales de la tecnosfera. Ahora bien, para la concentración o calidad de los metales dentro de la tecnosfera es más alta en los productos refinados, la mayoría de los cuales se encuentran en existencias en uso o en hibernación, y los productos refinados, ya sea en uso o en hibernación, se encuentran principalmente donde se usan o se han usado, que es principalmente en áreas urbanas (ver **Figura 7**).

Por tanto, la existencia de los metales en las áreas urbanas favorece la aplicación de la minería urbana.

Figura 7*Presencia de metales en la tecnosfera*

Nota. Fuente (Traducido de Johansson et al, 2013)

Acorde con Copper Alliance (2020) la minería urbana también puede acercar los recursos geográficamente escasos al lugar donde se necesitan, acortando las distancias de transporte y las cadenas de suministro en el proceso, puede mejorar la seguridad de los recursos, ya que, al aumentar la cantidad de productos e infraestructuras, la cantidad de recursos contenidos en la mina urbana sigue creciendo con el tiempo.

La minería urbana proporciona una fuente de materias primas en gran medida independiente, tanto en el tiempo como en la geografía, y por lo tanto no se ve afectada negativamente de inmediato por las interrupciones a corto plazo del suministro primario Tercero et al (2020). Además, con el surgimiento de herramientas tecnológicas y estratégicas en

logística inversa, la minería urbana puede proporcionar la mejor solución para la gestión de residuos electrónicos (Xavier, et al, 2021).

Considerando lo expuesto por el Observatorio Mundial de Residuos Electrónicos (2020), los RAEE son "minas urbanas", pues contienen varios metales preciosos, críticos y no críticos que, si se reciclan, pueden utilizarse como materiales secundarios. El valor de las materias primas contenidas en los residuos RAEE generados a escala mundial en 2019 ascendió a unos 57.000 millones de dólares, tal como se presenta en la **Figura 8**. En 2022, todos los residuos electrónicos del mundo contenían 31.000 millones de kg de metales, de los cuales se estima que 19.000 millones de kg se recuperaron de forma viable y se volvieron a poner en circulación (Cornelis P. Baldé, et al, 2024).

Figura 8

Valor de las materias primas contenidas en los RAEE

	kt	mill.USD		kt	mill.USD
Ag	1,2	579	In	0,2	17
Al	3 046	6 062	Ir	0,001	5
Au	0,2	9 481	Os	0,01	108
Bi	0,1	1,3	Pd	0,1	3 532
Co	13	1 036	Pt	0,002	71
Cu	18 08	10 960	Rh	0,01	320
Fe	20 466	24 645	Ru	0,0003	3
Ge	0,01	0,4	Sb	76	644

Nota. Fuente (Forti et al, 2020)

Para el año 2022, según el The Global E-Waste Monitor (2024), los residuos electrónicos generados en 2022 contenían 31 mil millones de kg de metales, 17 mil millones de kg de plásticos y 14 mil millones de kg de otros materiales (minerales, vidrio, materiales compuestos, etc.)

Por su contenido y apreciación en el mercado, los metales preciosos y no ferrosos (principalmente oro, plata, cobre, platino y paladio) presentes en los residuos electrónicos representan uno de los principales motivos que han promovido el desarrollo de procesos y tecnologías enfocados a su recuperación (Sánchez Alvarado, 2023). De igual manera, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010), menciona que, aunque el porcentaje de los metales preciosos es relativamente pequeño comparado con el peso total de los RAEE, su concentración, como es el caso del oro, alcanza a ser más alta que la encontrada

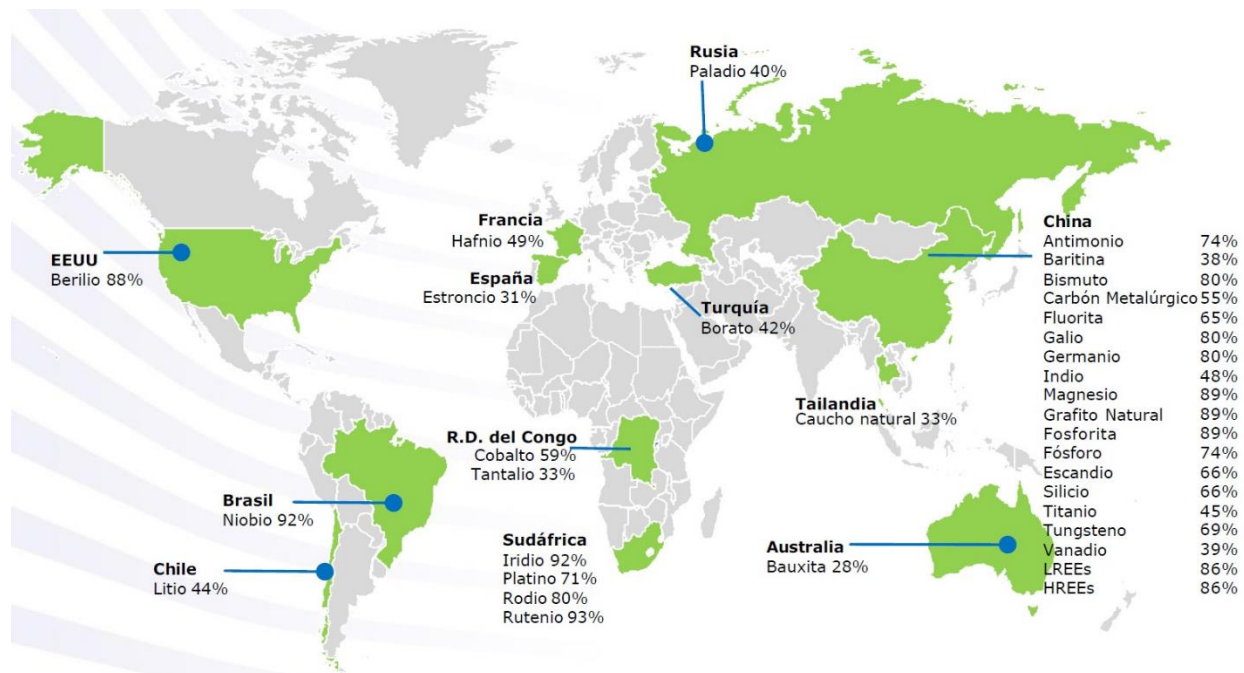
naturalmente en una mina. Además, a pesar de las pequeñas cantidades de metales preciosos en los RAEE, éstos se vuelven muy importantes desde el punto de vista del valor económico de los mismos.

La Comisión Europea (2020) considera lo expuesto por la OCDE, donde pronostica que la demanda mundial de materiales se duplicará con creces, pasando de 79.000 millones de toneladas en la actualidad a 167.000 millones de toneladas en el 2060. Afirma que la competencia global por los recursos aumentará exponencialmente en la próxima década y que la dependencia de materias primas críticas pronto podría reemplazar la dependencia actual del petróleo. También establece que uno de los requisitos previos para lograr la neutralidad climática es el suministro seguro y sostenible de materias primas primarias y secundarias, en particular de materias primas críticas, para tecnologías clave y sectores estratégicos como las energías renovables, la movilidad eléctrica, el sector digital, el espacio y la defensa. Según el Observatorio Mundial de Residuos Electrónicos (2024), en 2022, todos los desechos electrónicos en todo el mundo contenían aproximadamente 4 mil millones de kg de metales clasificados como materias primas críticas, con mayor frecuencia aluminio (Al, 3,9 mil millones de kg), cobalto (Co, 34 millones de kg) y antimonio (Sb, 28 millones de kg). Estos incluían metales del grupo del platino como el paladio (Pd), el bismuto (Bi), el osmio (Os), el rodio (Rh), el platino (Pt), el iridio (Ir) y el rutenio (Ru), y representaban aproximadamente 140 mil kg, de los cuales aproximadamente 121 mil kg eran paladio. Las materias primas críticas se utilizan a menudo en pequeñas cantidades y bajas concentraciones en varios componentes de los AEE.

Los materiales se clasifican en estratégicos o críticos según el equilibrio entre disponibilidad y falta de estos materiales. Existen muchos minerales en los que la mayoría de los países son dependientes, en la **Figura 9** se relacionan los países que representan la mayor parte de la oferta mundial de materias primas críticas, por tanto, la minería urbana cobra gran relevancia frente a dicha dependencia.

Figura 9

Países que representan la mayor parte de la oferta mundial de CRM



Nota. LREEs: Tierras raras ligeras (lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prometio y samario)

HREEs: Tierras raras pesadas (europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio, lutecio)

Traducido de Comisión Europea (2020)

El análisis de la oferta mundial realizado por la Comisión Europea (2020) confirma que China es el mayor proveedor de varias materias primas críticas. Otros países también son importantes proveedores mundiales de materiales específicos. Por ejemplo, Rusia y Sudáfrica son los mayores proveedores mundiales de metales del grupo del platino, Estados Unidos de berilio y Brasil de niobio.

En línea con los materiales críticos, Hunt et al (2013) menciona que numerosos elementos se encuentran en el rango en el que las reservas actuales conocidas se consumirán en menos de 50 años si se mantienen las tasas actuales de extracción, algunos de ellos corren un alto riesgo como resultado de las abundancias bajas en la corteza terrestre, tal como se presenta en la **Figura 10**. Aunque Hunt también menciona que tanto el consumo como las reservas de estos elementos finitos cambian continuamente en respuesta a los movimientos de los mercados, el descubrimiento de nuevos yacimientos minerales, el desarrollo de nuevas aplicaciones, los

avances en las tecnologías de extracción y las mejoras en la eficiencia de uso, recuperación y reciclaje.

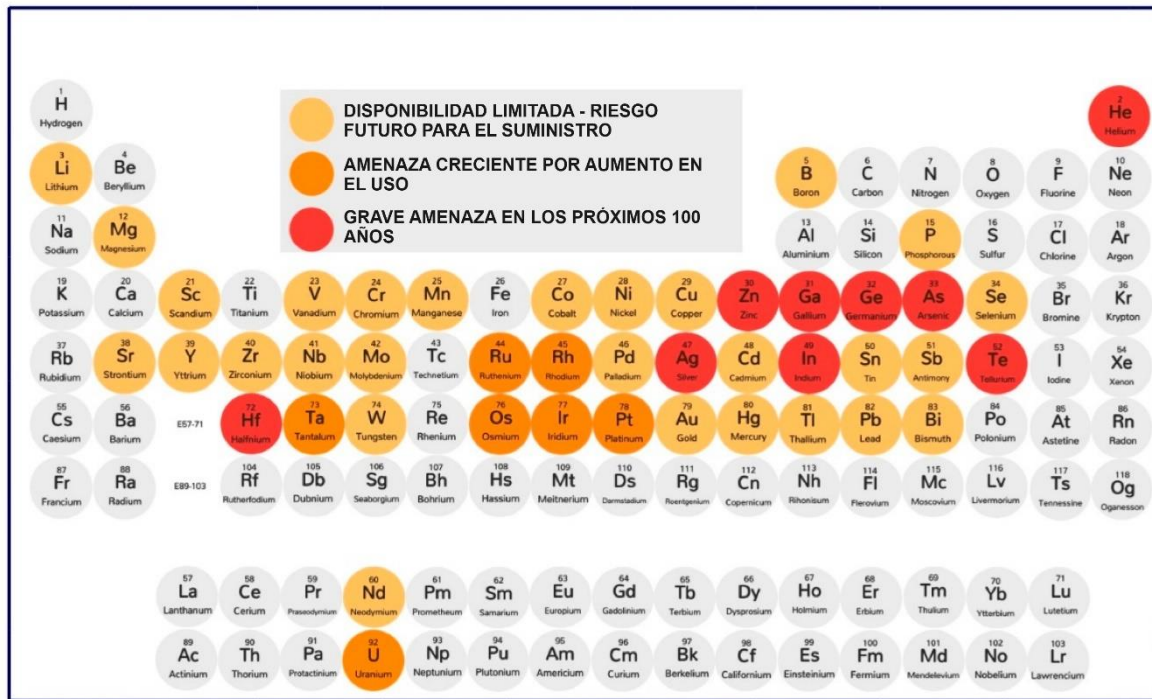
Figura 10
Números de años restantes de reservas de metales raros y preciosos si el consumo continúa al ritmo actual

Años restantes hasta el agotamiento de las reservas conocidas (basado en la tasa actual de extracción)																		2					
1	2																	10					
H																	He						
1.00794																	4.002602						
3	4																	5	6	7	8	9	10
Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne
6.941	9.012182																	10.811	12.0107	14.00674	15.9994	18.99840	20.1797
11	12																	13	14	15	16	17	18
Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar
22.98977	24.3050																	26.98153	28.0855	39.97376	32.066	35.4527	39.948
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
39.0983	40.078	44.95591	47.867	50.9415	51.9961	54.93804	55.845	58.93320	58.6934	63.546	65.39	69.723	72.61	74.92160	78.96	79.904	83.80						
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54						
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
85.4678	87.62	88.9085	91.224	92.90638	95.94	(98)	101.07	102.9055	106.42	107.8682	112.431	114.818	118.760	121.760	127.60	126.9044	131.29						
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86						
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
132.9054	137.327	138.9055	178.49	180.9479	183.84	186.207	190.23	192.227	195.078	196.9665	200.59	204.3833	270.2	208.9804	(209)	(210)	(222)						
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118						
Fr	Ra	Ac ‡	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rq	Uub	Uut	Uuq	Uup	Lv	Uus	Uuo						
(223)	226.025	(227)	(257)	(260)	(263)	(262)	(265)	(266)	(271)	(272)	(285)	(284)	(289)	(288)	(292)								
Lantánidos*																							
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71										
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu										
140.9077	144.24	(145)	150.36	151.964	157.25	158.9253	158.9253	162.50	164.9303	167.26	168.9342	173.04	174.967										
Actinidos ‡																							
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103										
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr										
232.0381	231.0289	238.0289	(237)	(244)	(243)	(247)	(247)	(251)	(252)	(257)	(258)	(259)	(262)										

Nota. Traducido de Hunt et al (2013)

De igual manera Venkatesha Murthy (2022) menciona la existencia de varios metales de tierras raras y estratégicos en “peligro de extinción” (ver **Figura 11**)

Figura 11
Los metales de la tabla periódica en peligro de extinción

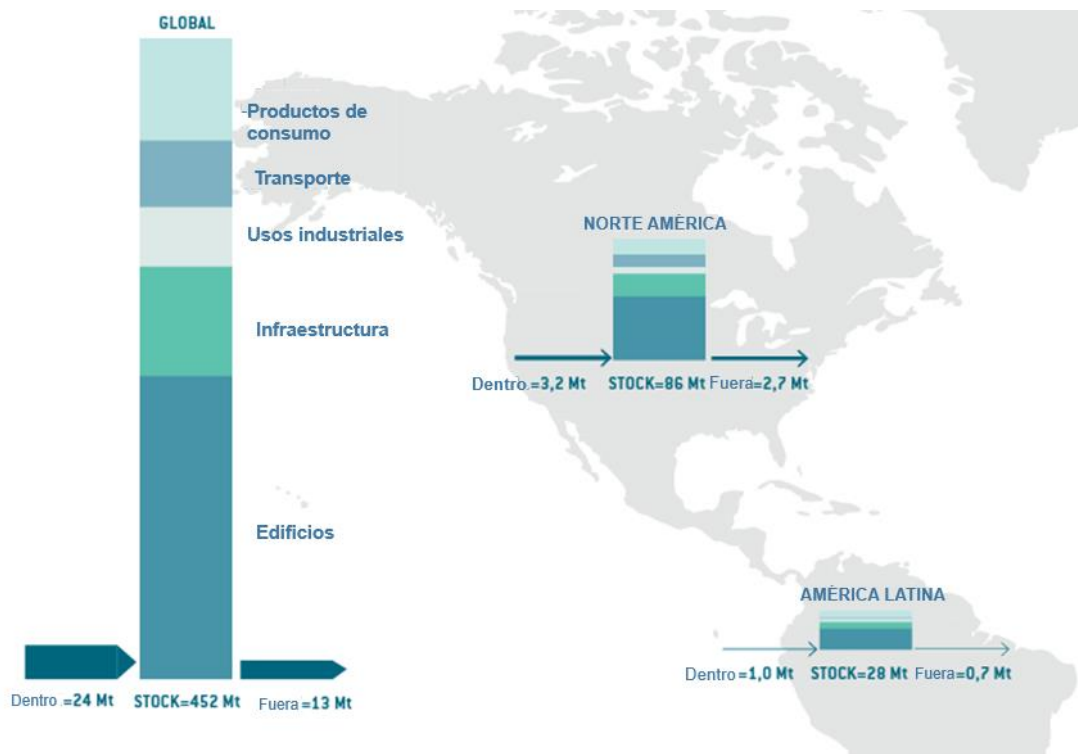


Nota. Fuente (ACS Green Chemistry Institute como se citó en Venkatesha Murthy, 2022)

Para el caso del cobre, por ejemplo, según lo expuesto por Tercero et al, (2020), en 2018, se utilizaron aproximadamente 450 millones de toneladas (Mt) de cobre en todo el mundo. De ellos, 24 Mt eran productos nuevos que entraban en la fase de uso, mientras que 13 Mt de cobre salían de la fase de uso como productos al final de su vida útil y, por lo tanto, estaban disponibles para su reciclaje, mencionan que la cantidad de cobre en la “mina urbana” está aumentando y ha estado ascendiendo de forma continua durante las últimas décadas (ver **Figura 12**).

Figura 12

Minas Urbanas Globales de Cobre (2018). Todas las cifras en millones de toneladas (Mt) de cobre contenido.

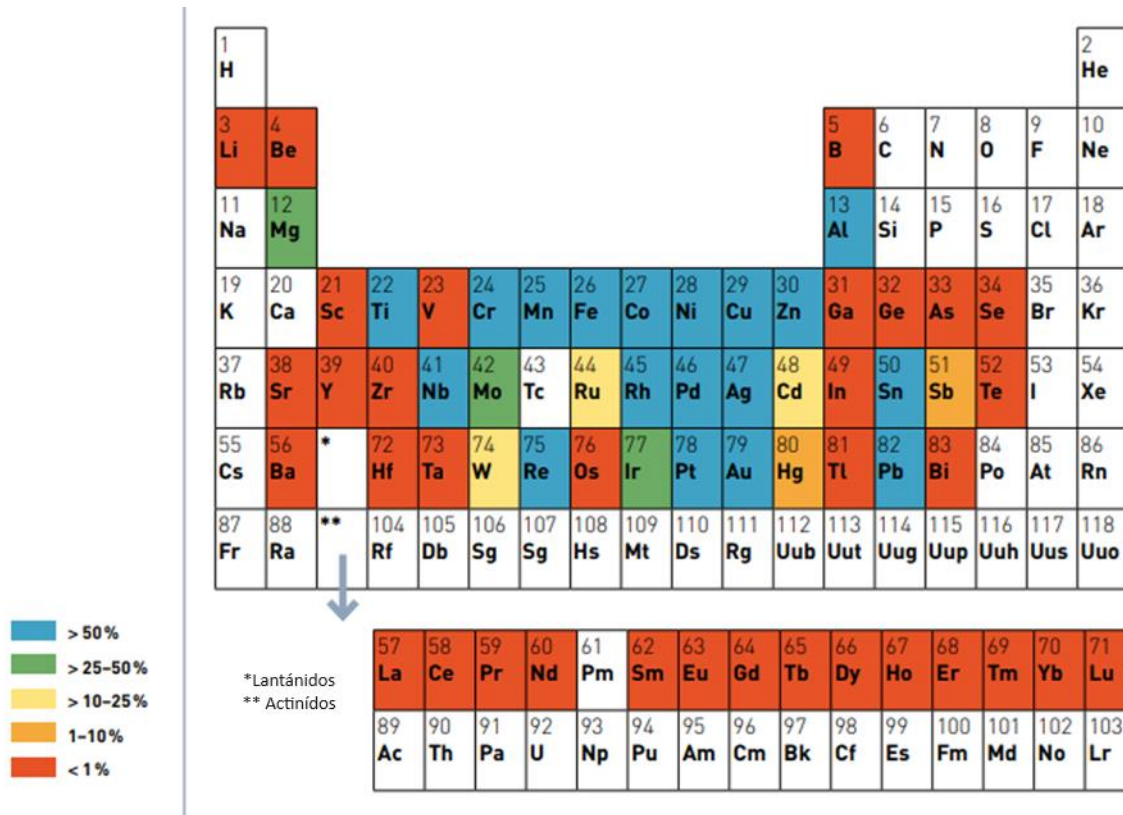


Nota. Traducido de Tercero et al (2020)

Según Graedel et al, (2011), los resultados de la tasa de reciclaje se relacionan con cualquier forma (pura, aleación, etc.) en la que ocurra el reciclaje específico de la sustancia o material. Para reflejar el nivel de certeza de los datos y las estimaciones, los datos los dividen en cinco intervalos: > 50%, > 25– 50%, > 10 –25%, 1–10% y < 1%. Para dieciocho de los sesenta metales considerados se estima que la tasa de reciclaje es superior al 50%. Otros tres metales se encuentran en el grupo > 25-50 %, y tres más en el grupo > 10-25%. En un gran número de casos, el reciclaje al final de su vida útil es escaso o nulo, ya sea porque no es económico o porque no existe una tecnología adecuada (ver **Figura 13**).

Figura 13

Cantidades de AEE importadas, fabricadas y exportadas 2019-2022 en Colombia



Nota. Fuente (Graedel et al, 2011)

Por tanto, tal como lo menciona Michielin (2023), la importancia de la minería urbana como herramienta en la aplicación de la economía circular se sustenta en dos pilares importantes: la recuperación de valor mediante la reinsertión de materiales residuales como insumos en la cadena de suministro y la mitigación de los potenciales impactos ambientales y sociales de la generación de residuos a través de la circularidad. El enfoque de la minería urbana ofrece una variedad de beneficios, particularmente para garantizar cadenas de suministro seguras y sostenibles.

La minería urbana entonces según lo expuesto por García Roba (2022) ofrece soluciones en relación con los problemas derivados de la escasez de materias primas metálicas y minerales, y del auge de los precios de estas, facilitando el avance hacia una economía circular que permita recuperar estos materiales, para volverlos a utilizar en la fabricación de nuevos productos.

Tal como lo expone Barbosa Botelho et al (2023), la minería urbana está estrechamente vinculada al concepto de economía circular: ambos buscan promover el uso sostenible de los

recursos y reducir los residuos. El objetivo de la economía circular es cerrar el círculo de la producción de materiales reutilizando, reduciendo y reciclando los residuos, manteniendo los productos y materiales en uso y regenerando los sistemas naturales. Su objetivo es minimizar los residuos y la contaminación promoviendo el uso de recursos renovables, reduciendo los no renovables y aumentando la eficiencia en estos. En general, la combinación de economía circular y minería urbana puede ayudar a reducir el impacto ambiental de la extracción de recursos, conservar los recursos naturales y promover el crecimiento económico sostenible.

6. Diagnóstico del Manejo y Disposición de RAEE

Generación de RAEE

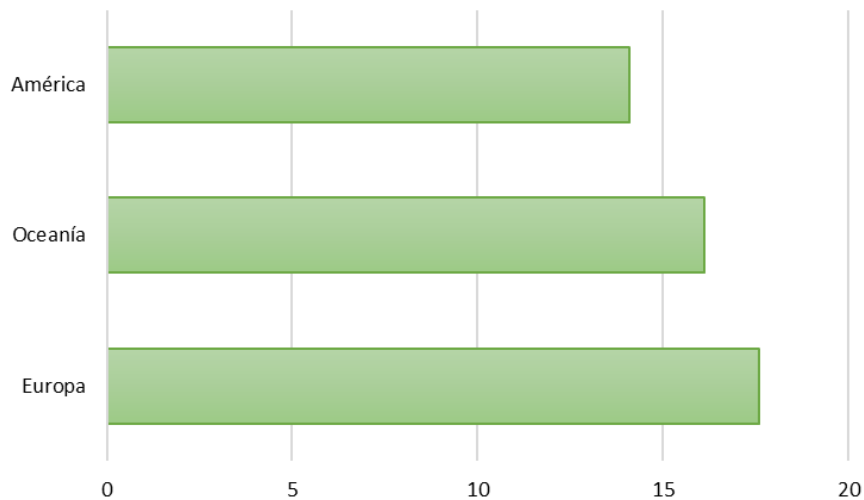
Considerando lo expuesto por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023), la cantidad de RAEE generados depende directamente de la cantidad de los AEE puestos en el mercado, de los tiempos de vida útil de estos aparatos, los hábitos de uso y las decisiones de los usuarios a la hora de reemplazar o descartar el aparato en uso, así como otros factores como la obsolescencia programada de los aparatos, la ampliación de la cobertura de las redes de internet y, en ocasiones, las pocas opciones que existen de reutilizar o reparar estos aparatos.

El Observatorio Mundial de Residuos Electrónicos (2024) menciona que en 2022 el mundo generó 62 mil millones de kg de residuos electrónicos, esto es una media de 7,8 kg per cápita. En 2010, el mundo generó 34.000 millones de kg de residuos electrónicos, y esa cantidad ha aumentado anualmente en un promedio de 2.300 millones de kg al año, se prevé que aumente a 82 mil millones de kg para 2030.

En 2022, tal como se presenta en la **Figura 14**, las regiones que generaron la mayor cantidad de residuos electrónicos per cápita fueron Europa (17,6 kg), Oceanía (16,1 kg) y América (14,1 kg). También mencionan que 13.800 millones de kg de residuos-e quedaron oficialmente documentados como recogidos y reciclados de manera adecuada, lo que equivale al 22,3% de los residuos-e generados.

Figura 14

Regiones con mayor generación de residuos electrónicos per cápita (kg) en 2022

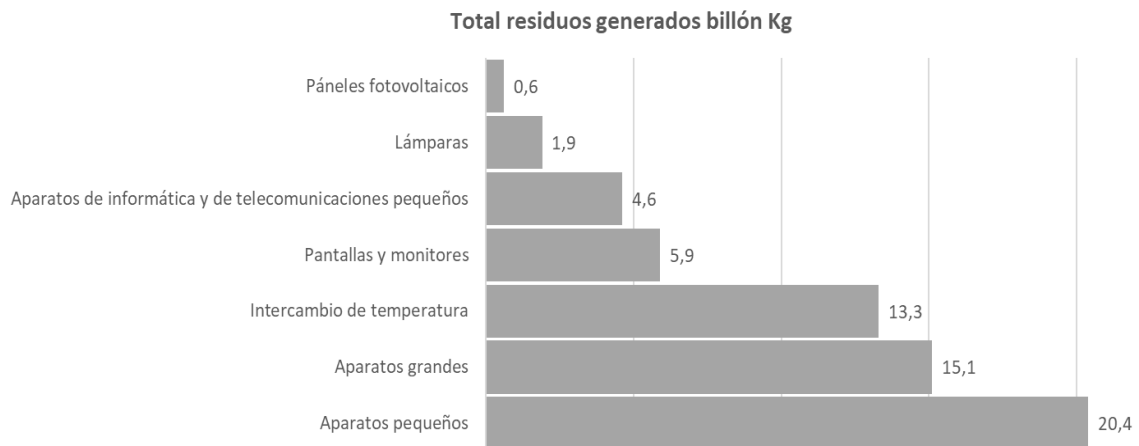


Nota. Fuente (Cornelis P. Baldé, et al, 2024)

Ahora bien, tal como se presenta en la **Figura 15** dichos residuos generados (billón kg) a nivel mundial lo componen principalmente aparatos pequeños (20,4), grandes (15,1) y de intercambio de temperatura (13,3). Las pantallas y monitores, las lámparas, los aparatos de informática y de telecomunicaciones pequeños y los paneles fotovoltaicos representan un porcentaje menor de los residuos-e generados en 2022, a saber, 5,9; 4,6; 1,9 y 0,6 billón kg respectivamente (Cornelis P. Baldé, et al, 2024).

Figura 15

Total de residuos generados (billón Kg) por tipo de RAEE en 2022

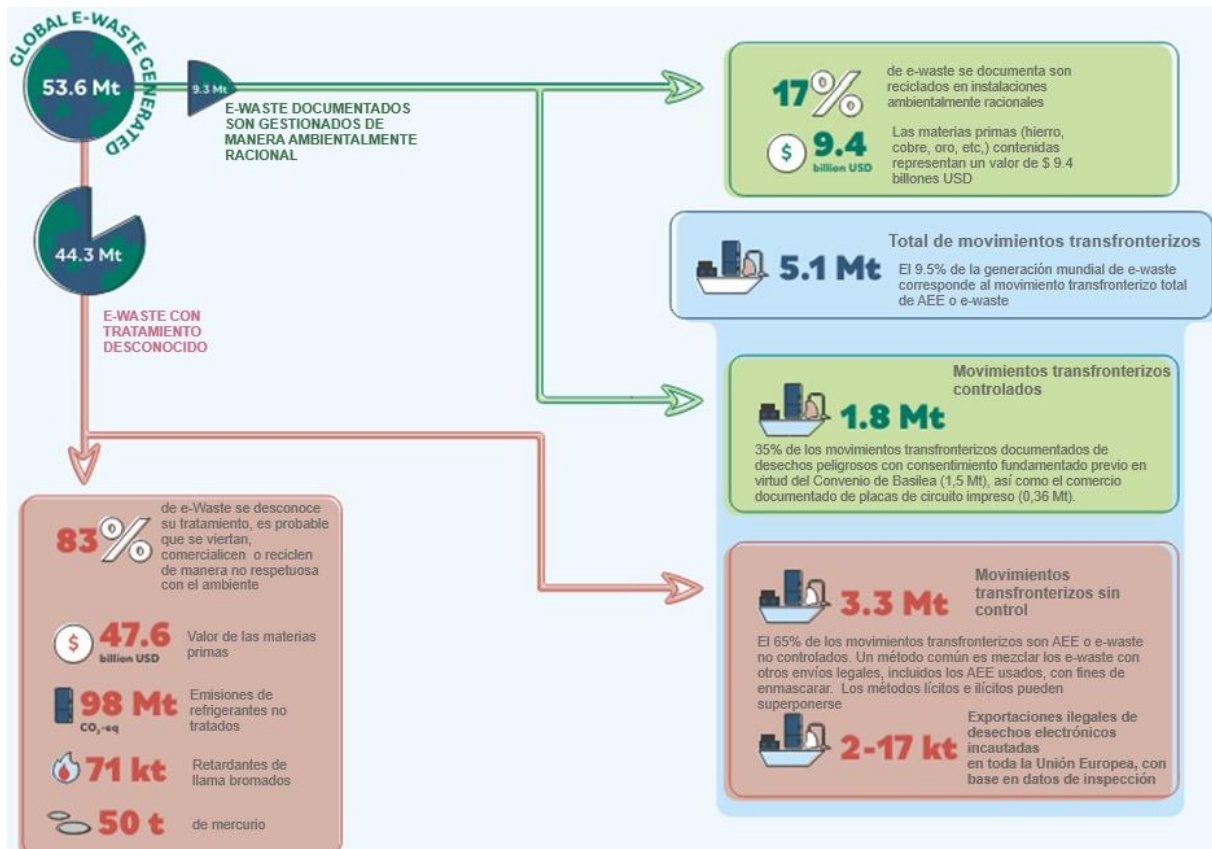


Nota. Fuente: Adaptado de Cornelis P. Baldé, et al, (2024)

Además, una cantidad considerable de residuos electrónicos todavía se exporta ilegalmente con la excusa de ser recuperados o hacerse pasar por restos de metal. Esos flujos generalmente no están documentados y, por lo tanto, no son rastreables, aunque los países en desarrollo suelen ser los destinatarios finales (Abdel Azim, et al, 2023).

El Global Transboundary E-waste Flows Monitor (2022) estimó que 5,1 Mt de E-Waste cruzaron las fronteras de los países en 2019. De los 5,1 Mt, 1,8 Mt se envían de forma controlada y 3,3 Mt se envían de forma descontrolada (ver **Figura 16**), los AEE usados o los desechos electrónicos pueden favorecer los movimientos ilegales y suponen una amenaza para la salud y la correcta gestión de residuos electrónicos.

Figura 16
Movimientos transfronterizos de E-waste



Nota. Fuente: Traducido de C.P. Baldé, et al, (2022)

Para América del Sur, se estimó en el año 2022 una generación de residuos electrónicos de 4.413 millones de kg con una generación per cápita de 10,1 kg, y una tasa de recolección de 2,7% (ver **Tabla 3**).

Tabla 3
Generación RAEE en América del Sur

Residuos electrónicos generados				Residuos electrónicos documentados como recolectados y reciclados formalmente	
Kg Per Cápita en 2010	Kg Per Cápita en 2022	Millón kg en 2010	Millón kg en 2022	Millón kg en 2022	Tasa recolección 2022 (%)
5,8	10,1	2.285	4.413	117,1	2,7

Nota. Adaptado de Cornelis P. Baldé, et al, (2024)

El país de Suramérica con mayor generación de residuos electrónicos generados es Argentina con 517 millones de kg, mientras que la tasa de generación más alta por habitante fue Uruguay con 12,9 kg/hab. Y específicamente para Colombia se presentó una generación de 7,5 kg/hab. (ver **Tabla 4**).

Tabla 4
Generación de RAEE en América del Sur, año 2022

País	Residuos e-generados (millón Kg)	Residuos-e generados (kg/hab)
Argentina	517	11,4
Bolivia (Estado Plurinacional de)	89	7,3
Brasil	2.443	11,4
Chile	230	11,7
Colombia	388	7,5
Ecuador	108	6
Guyana	7	8,1
Paraguay	57	8,4
Perú	221	6,5
Surinam	7	11,1
Uruguay	44	12,9
Venezuela (República Bolivariana de)	303	10,8

Nota. (Adaptado de Cornelis P. Baldé, et al, 2024)

Para Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023) también estimó la generación de Residuos Eléctricos y Electrónicos en el periodo 2016 – 2026, realizando una estimación de generación máxima, la generación media y la generación mínima, tal como se presenta en la **Figura 17**.

La generación máxima para el año 2026 se estima en 250.013 toneladas netas, la generación media para ese mismo año se estima de 215.771 toneladas netas, mientras que la generación mínima se estima de 189.193 toneladas netas.

Figura 17
Estimación generación de RAEE 2016 – 2026 en Colombia

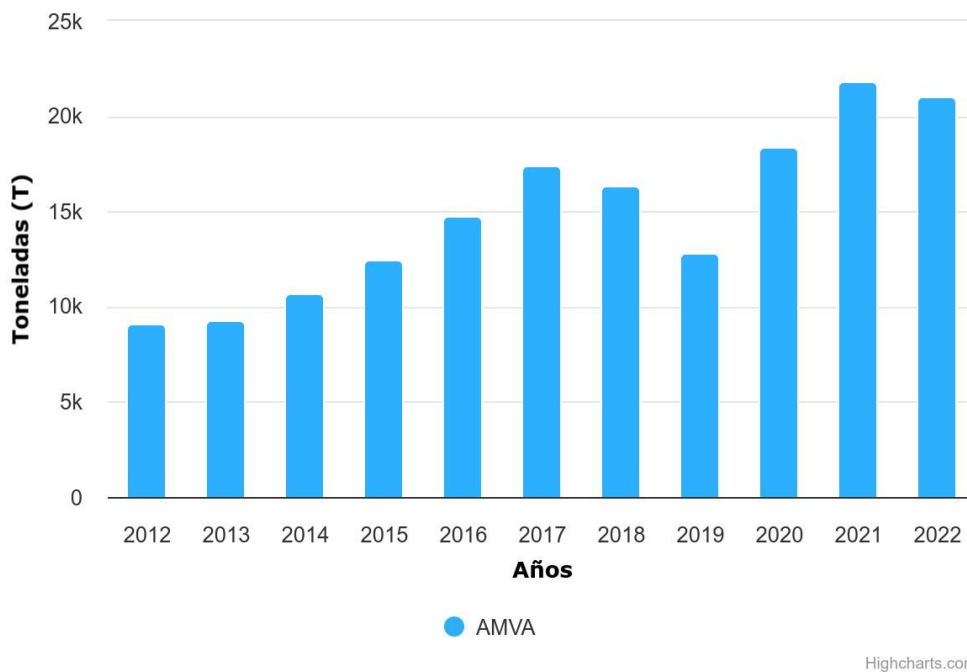


Nota: La generación máxima considera las importaciones más la fabricación nacional, la generación media considera las importaciones en peso neto y la generación mínima las importaciones menos las exportaciones en peso neto. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2023)

Respecto a la generación de RAEE en el Valle de Aburrá, no se encontró información específica relacionada con la cantidad de los RAEE generados. Sin embargo, se realizó la consulta en las bases de datos del IDEAM, donde se presenta la cantidad de residuos peligrosos generados en la jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá desde el año 2012 al año 2022, dicha información es construida con la información auto-declarada por los generadores (ver **Figura 18**)

Figura 18

Cantidad de residuos peligrosos generados jurisdicción Área Metropolitana del Valle de Aburrá



Nota. Fuente (IDEAM 2023)

De igual manera se consultó el informe de caracterización de los residuos sólidos generados en el Municipio de Medellín (2019) considerando que es el municipio del Área Metropolitana del Valle de Aburrá con mayor población. En dicho informe se realizó una estimación de la producción de residuos sólidos per cápita del sector residencial, en la **Tabla 5** se presenta la composición porcentual de los RAEE según el estrato socioeconómico y en la **Tabla 6** se presenta la comparación de la composición física porcentual de diferentes estudios de caracterización de residuos sólidos en el sector residencial de Medellín para los años 2009, 2001, 2014 y 2018.

Tabla 5

Composición física porcentual de los residuos sólidos generados en el sector residencial de Medellín por estrato socioeconómico

Estrato socioeconómico	RAEE %
1	0,13
2	0,67
3	0,63
4	0,61
5	0,21
6	0,75
Promedio	0,5

Nota. Elaboración con base en Municipio de Medellín (2019)

Tabla 6

Comparación de la composición física porcentual de diferentes estudios de caracterización de residuos sólidos en el sector residencial de Medellín para los años 2009, 2001, 2014 y 2018

Componente	Porcentaje %			
	2009	2011	2014	2018
RAEE	0,5	0,24	0,19	0,5

Nota. Elaboración con base en Municipio de Medellín (2019)

Manejo y disposición de los RAEE

Como se mencionó anteriormente, 13.800 millones de kg de residuos-e a nivel mundial quedaron oficialmente documentados como recogidos y reciclados de manera adecuada, lo que equivale al 22,3% de los residuos-e generados. 16.000 millones kg se recolectaron fuera de los sistemas formales en países de ingresos altos y medio altos con infraestructura de gestión desarrollada, 18.000 millones de kg se manejan en países de ingresos medio bajo sin una infraestructura de gestión desarrollada y 14.000 millones de kg se eliminan como residuos “residuales” donde la mayoría se depositan en vertederos.

Sin embargo, la gestión de los RAEE está relacionada con varios factores, Cornelis P. Baldé (2024) considera tres factores:

1. Nivel de ingresos y el poder adquisitivo: las regiones con ingresos más altos tienden a generar más RAEE a medida que consumen más bienes y tienen un mayor acceso a los AEE.
2. Legislación y reglamentación sobre RAEE: los países que regulan y hacen cumplir la gestión de los RAEE con instrumentos jurídicamente vinculantes que establecen objetivos de recolección y reciclaje, o con leyes o políticas sobre RAEE, tienen una tasa promedio documentada de recolección y reciclaje formal del 25%. Los países que no cuentan con una legislación de este tipo, ni siquiera en forma de proyecto, tienen tasas de recaudación iguales al 0%.
3. Madurez de los sistemas de gestión de los RAEE: los países con sistemas de gestión de RAEE bien establecidos y formalizados tienden a tener tasas de recolección más altas. Sin embargo, vale la pena señalar que la recolección informal de desechos electrónicos, aunque no siempre está documentada, también puede ser eficiente y contribuir significativamente a los esfuerzos generales de recolección.

Para Colombia, se cuenta con la Guía Técnica para la Gestión Integral de los RAEE (2023) donde se busca proporcionar orientación y herramientas prácticas para todos los actores involucrados en el ciclo de vida de los AEE. Allí se aborda la definición de qué es un RAEE, su clasificación, los requisitos para la logística y recolección de los RAEE, el transporte, al igual que las opciones de tratamiento, reutilización y reciclaje disponibles en el país.

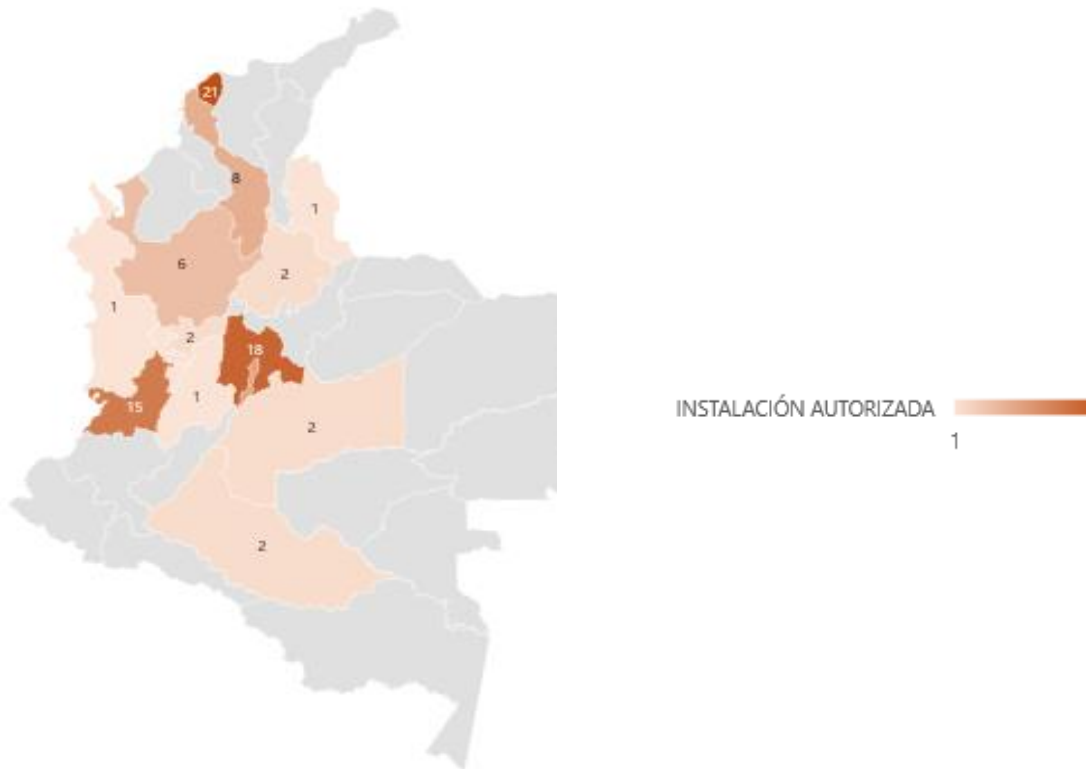
Es importante considerar que el manejo de los RAEE en Colombia es una actividad objeto de licenciamiento ambiental de acuerdo a lo establecido en el artículo 2.2.2.3.2.3 del Decreto 1076 de 2015, el cual establece que *“las Corporaciones Autónomas Regionales, las de Desarrollo Sostenible, los Grandes Centros Urbanos y las autoridades ambientales deberán otorgar o negar licencia ambiental para la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento (recuperación/reciclado) y/o disposición final de Residuos de Aparatos Eléctricos (RAEE) y de residuos de pilas y/o acumuladores”*.

Se realizó entonces la consulta en la base de datos registrados ante las Autoridades Ambientales y consolidados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2024), sobre las instalaciones autorizadas para el almacenamiento, tratamiento,

aprovechamiento, y/o disposición final de residuos peligrosos y/o de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Dicha consulta arrojó un total de noventa y dos (92) instalaciones autorizadas en 16 departamentos del país tal como se presenta en la **Figura 19**. El departamento con mayores instalaciones autorizadas es el Atlántico con 21 seguido por Cundinamarca con 18, Antioquia presentó 6 instalaciones autorizadas.

Figura 19

Instalaciones autorizadas para el almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento, y/o disposición final de residuos peligrosos y/o de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)



Nota. Fuente (Elaboración con base en Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM-2024)

En Colombia, también se ha implementado la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que busca, como su nombre lo indica, extender la responsabilidad del productor del AEE en toda la cadena de la vida útil. Los primeros productos regulados correspondían a residuos peligrosos, como envases o empaques de plaguicidas, medicamentos vencidos, baterías de plomo-ácido usadas, pilas y acumuladores, y lámparas y tubos de descarga fluorescente.

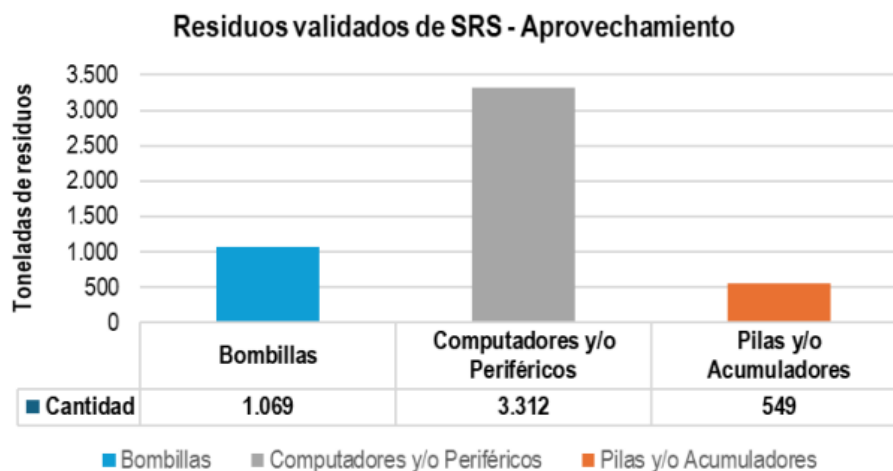
Posteriormente, se regularon residuos de manejo diferenciado como los computadores y periféricos, y las llantas usadas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Se ha establecido entonces que los productores de AEE de consumo masivo, es decir, aquellos AEE utilizados en hogares, en establecimientos comerciales, empresas o instituciones, deben conformar e implementar un Sistema de Recolección y Gestión -SRyG- de RAEE, el cual estará bajo la vigilancia y control de la ANLA (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023)

Ahora bien, acorde a lo presentado por la Autoridad de Licencias Ambientales – ANLA- en su Informe de Gestión (2023), las cantidades gestionadas de los residuos de computadores, y/o periféricos y de pilas y/o acumuladores para el año 2022 se presentan en la **Figura 20**. Y en la **Figura 21** se presenta la descripción de las actividades bajo las cuales son aprovechados los subproductos de 3 de las corrientes de los Sistemas de Recolección.

Figura 20

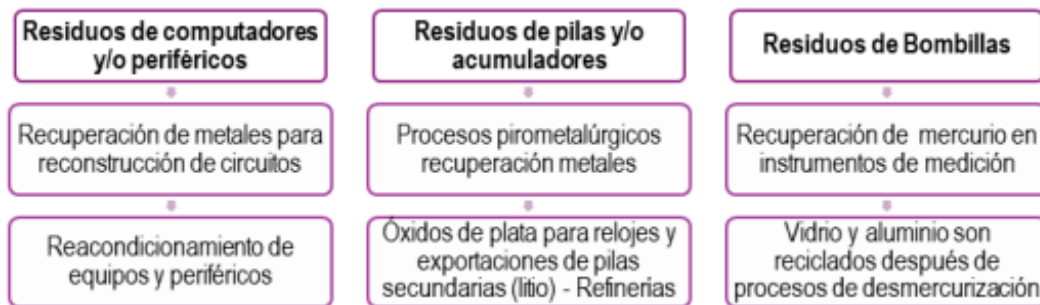
Cantidades de residuos gestionados y validados por ANLA en 2023 correspondientes a la gestión de 2022



Nota. Fuente (ANLA, 2023)

Figura 21

Aprovechamiento de los residuos reportados por los sistemas de recolección selectiva



Nota. Fuente (modificado de ANLA, 2023)

Respecto al manejo de este tipo de residuos, para el Valle de Aburrá, también existen planes de gestión de devolución posconsumo, donde se presenta la entrega y recolección voluntaria en puntos ubicados en almacenes de grandes superficies y puntos específicos de la ciudad. Desde la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia -ANDI- se plantea el grupo Retorna, de los que hacen parte los programas posconsumo EcoComputo y Red Verde (ver **Figura 7**).

Tabla 7

Manejo de residuos eléctricos y electrónicos

Lito S.A.	Gestión y aprovechamiento de residuos peligrosos y Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. Realizan destrucción de marca, segregación de los componentes aprovechables y gestión para su utilización como materias primas (Lito, 2023).
EcoCómputo	Es un colectivo de empresas pionero en la gestión integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), especialmente computadores y/o periféricos, está conformado por cuarenta y nueve (49) empresas del sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) (EcoCómputo, 2023) .
Red Verde	Es un programa posconsumo de electrodomésticos en Colombia. Se encarga en nombre de las empresas miembros del colectivo de la administración, operación y financiación del sistema de recolección selectiva y gestión ambiental de los electrodomésticos cuando han cumplido su ciclo de vida y son descartados por los consumidores (Red verde, 2023).

También existe la aplicación RECYPUNTOS, es una App con cobertura a nivel nacional que busca conectar al generador bien sea un hogar, empresa o cualquier persona, con las múltiples soluciones existentes en el país en materia de residuos (RECYPUNTOS, 2020).

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2019) estableció una alianza con el Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales de Colombia, donde a través de la plataforma BORSI, buscaban fomentar el intercambio de residuos y subproductos industrializables, mediante transacciones de compraventa, canje o donación entre demandantes y oferentes, a través de la recuperación, el reciclaje y la reintroducción de dichos materiales a las cadenas productivas, sin embargo dicha plataforma actualmente ya no está disponible.

7. Normatividad asociada

Se realiza una revisión de las principales normativas internacionales y nacionales asociada de los RAEE y a la minería urbana, se encuentra que la minería urbana no cuenta actualmente con una legislación para su ejecución, la normatividad existente corresponde al manejo, el posconsumo y la disposición final de los RAEE.

En el marco internacional, diferentes convenios e iniciativas abordan de manera directa e indirectamente la gestión, el manejo y la disposición final de los RAEE; estos han sido fundamentales y un punto de partida para que las naciones creen sus propias legislaciones sobre el tema.

El 16 de septiembre de 1987, un total de 46 países firmaron el “Protocolo de Montreal relativo a las sustancias agotadoras de la capa de ozono”, como resultado concreto de los objetivos planteados por el Convenio de Viena para reducir y finalmente eliminar la producción y el consumo de numerosas sustancias que son responsables del agotamiento de la capa ozono. El Protocolo fue negociado en 1987 y entró en vigor el 1º de enero de 1989, desde ese momento el documento ha sido revisado en varias ocasiones. El protocolo busca reducir y eliminar el uso de las sustancias agotadoras de ozono (SAO) y los hidrofluorocarbonos (HFC), estos últimos incluidos en la Enmienda de Kigali (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

El Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación. Las disposiciones del Convenio se centran en tres objetivos principales: 1) la reducción de la generación de desechos peligrosos y la promoción de una gestión ambientalmente racional, cualquiera que sea el lugar de eliminación; 2) la restricción de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos, excepto cuando se considere que están en conformidad con los principios de gestión ambientalmente racional; y 3) un sistema regulatorio que se aplica a los casos en que se permiten movimientos transfronterizos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2011).

El 22 de mayo de 2001, una Conferencia de plenipotenciarios celebrada en Estocolmo, adoptó el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. El Convenio entró en vigor el 17 de mayo de 2004. Este es un tratado global para proteger la salud humana y el medio ambiente de las sustancias químicas que permanecen intactas en el medio ambiente durante largos períodos, se distribuyen geográficamente ampliamente, se acumulan en el tejido

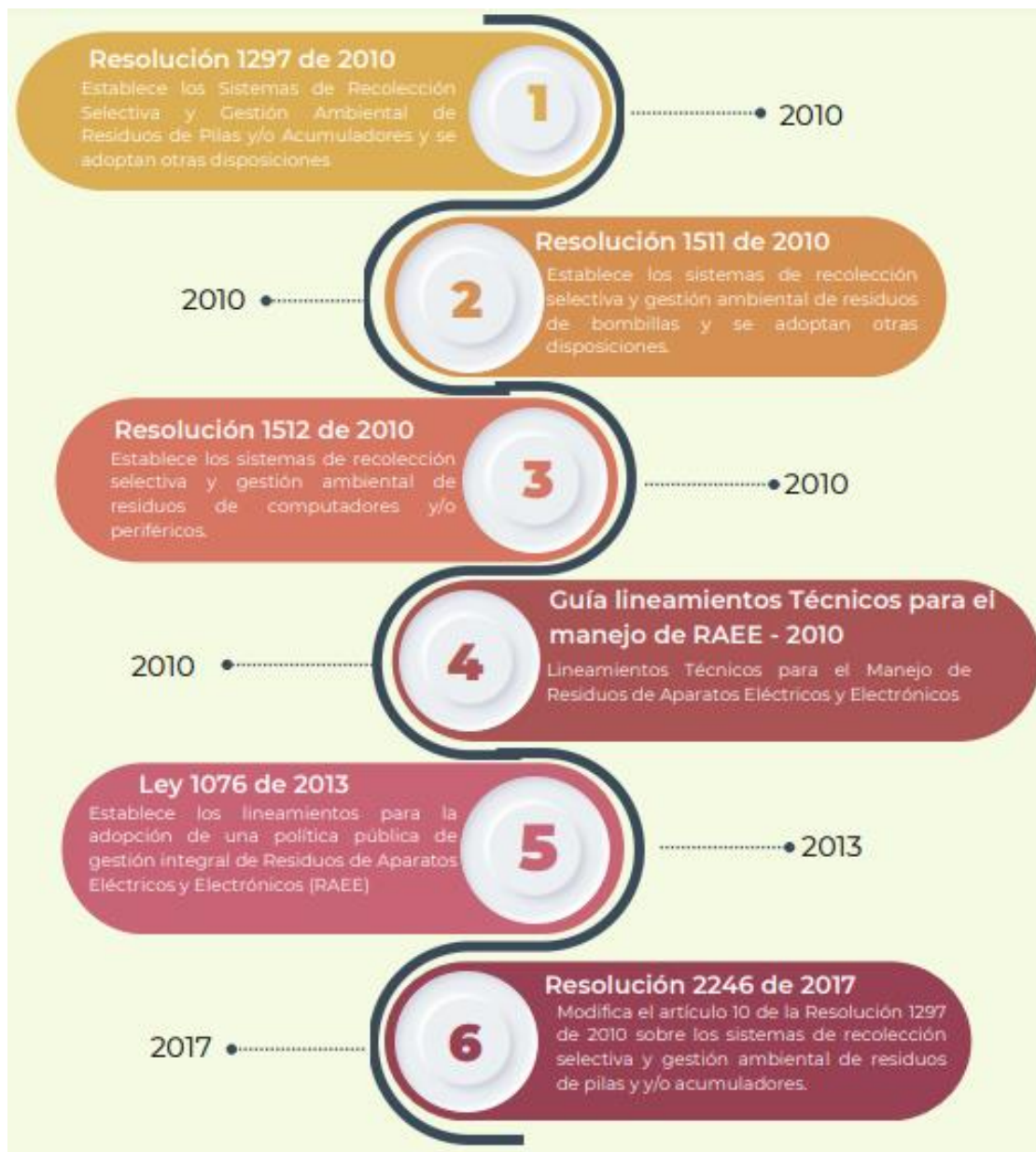
adiposo de los seres humanos y la vida silvestre y tienen impactos dañinos en la salud humana o el medio ambiente (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2019).

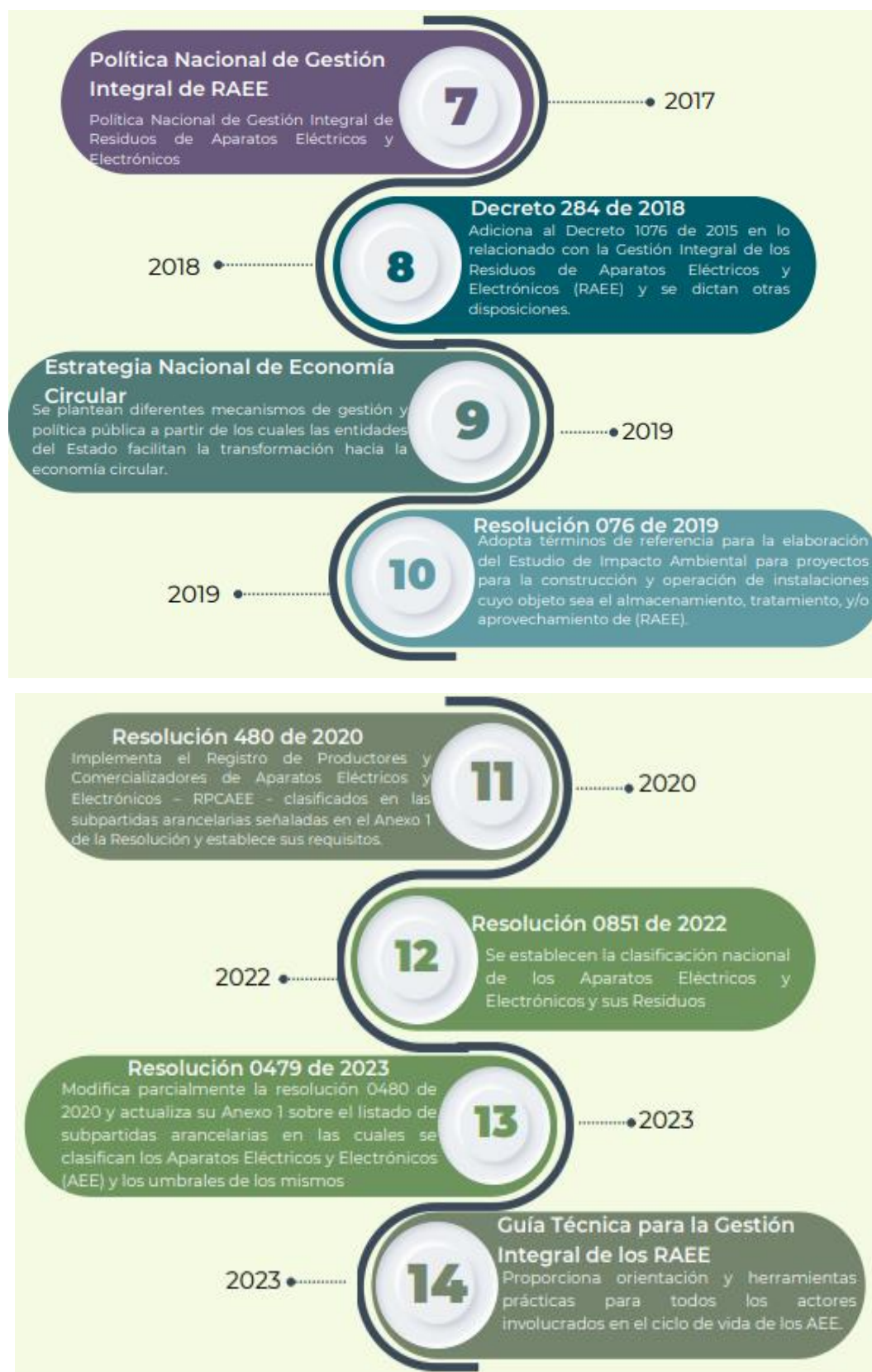
También se reconoce el Convenio de Rotterdam, este crea obligaciones jurídicamente vinculantes para la aplicación del procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo (CFP). Se basa en el procedimiento de CFP voluntario ya existente, iniciado por el PNUMA y la FAO en 1989 y concluido el 24 de febrero de 2006. Los objetivos del Convenio son promover la responsabilidad compartida y los esfuerzos conjuntos de las Partes en la esfera del comercio internacional de ciertos productos químicos peligrosos a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente frente a posibles daños; y contribuir a su utilización ambientalmente racional, facilitando el intercambio de información acerca de sus características, estableciendo un proceso nacional de adopción de decisiones sobre su importación y exportación y difundiendo esas decisiones a las Partes (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2010).

El Convenio de Minamata, adoptado en la Conferencia de Plenipotenciarios en 2013 en Kumamoto, Japón, entró en vigor en agosto de 2017. El objetivo de este tratado global es proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropógenas de mercurio y compuestos de mercurio. Incluye disposiciones en materia de información pública, educación ambiental, fomento de la participación y fortalecimiento de capacidades. 134 países han ratificado este instrumento (Naciones Unidas, s.f.).

En 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, la agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, la gestión de los RAEE se correlaciona con la mayoría de los ODS.

Específicamente para Colombia se han venido generando normativa asociada a los RAEE, en la **Figura 22** se presenta la línea de tiempo de dicha normatividad.

Figura 22*Línea de tiempo marco normativo nacional RAEE*



Nota. Fuente (Elaboración propia, 2024)

8. Identificación de Impactos Ambientales y Sociales

El ciclo de vida de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) desde la obtención de la materia prima, su transformación, manufactura, distribución, venta, uso y manejo posconsumo, puede presentar un alto impacto sobre el ambiente. Por ello, la gestión de los Residuos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) a través de la minería urbana es una oportunidad para obtener mejoras tanto ambientales como económicas (Clerc et al, 2021).

Es necesario, como primera medida, asegurar la debida gestión, la manipulación, transporte o desensamble del RAEE ya que al realizarse de manera incorrecta puede conducir a la liberación de sustancias que afectan la salud y el ambiente, es así como la disposición final incorrecta, la recuperación inadecuada de materiales y el reciclaje no especializado de los RAEE son las vías principales que conducen a la contaminación del ambiente y a la afectación de la salud humana (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023), a su vez, en un segundo plano, debe considerarse el potencial de circularidad de los materiales aprovechables no-peligrosos.

Según The Global E-Waste Monitor (2024), la mayoría de los RAEE se gestionan fuera de los esquemas formales de recolección y reciclaje. Como resultado de una gestión no satisfactoria de los desechos electrónicos, cada año se liberan al medio ambiente 58 mil kg de mercurio y 45 millones de kg de plásticos que contienen retardantes de llama bromados. Esto tiene un impacto directo y severo en el medio ambiente y la salud de las personas.

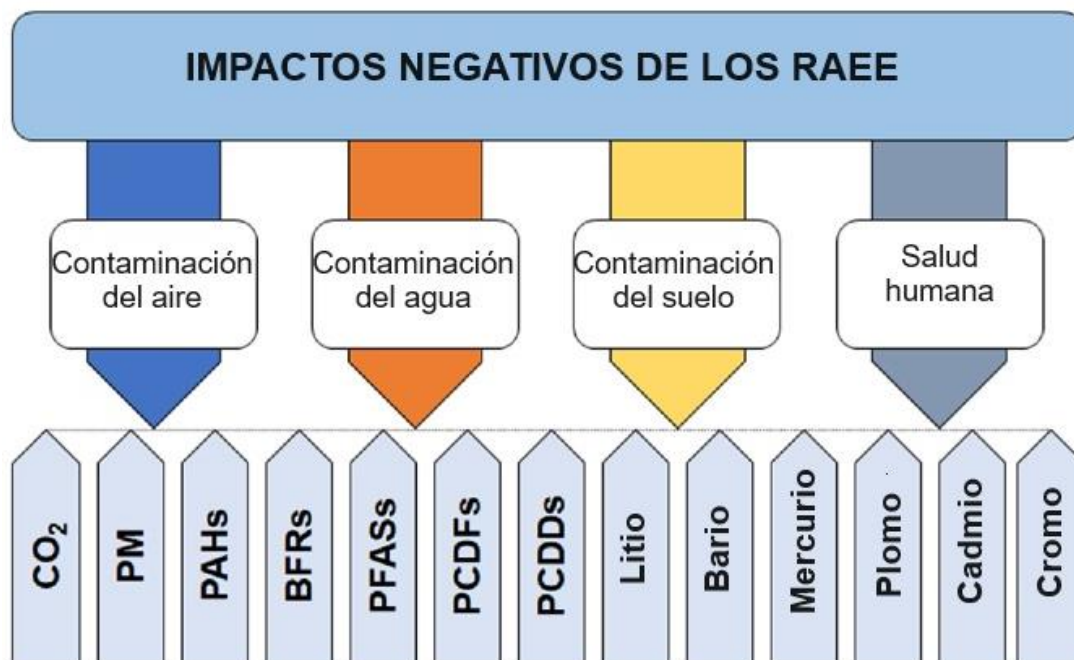
Específicamente, la generación de residuos como resultado de las actividades del ciclo de vida de los aparatos eléctricos y electrónicos *“contienen más de mil sustancias diferentes, muchas de las cuales son tóxicas”* (Pérez Alcázar, 2013) (p. 2). Además de que *“las sustancias nocivas que contienen pueden originar problemas medioambientales si no hay un tratamiento adecuado o se eliminan de forma incontrolada, dando como resultado la contaminación de los vertederos, del suelo, agua y del aire, representando un riesgo a la salud humana y al medio ambiente”* (pág. 5). Se resalta además que *“en la actualidad más del 90% de estos residuos se depositan en vertederos, se incineran o se valorizan sin ningún tratamiento previo y, por lo tanto, buena parte de los diversos agentes contaminantes que se encuentran en el flujo de residuos urbanos proceden de ellos ...”* (pág. 5). Este mismo estudio recopiló información del documento *“Environmental Consequences of Incineration and Landfilling of Waste from*

Electrical and Electronic Equipment” del Nordic Council of Minister (1995), el cual señala que las principales sustancias problemáticas para el medio ambiente son “*los metales pesados, tales como el mercurio, plomo, cadmio, y cromo; las sustancias halogenadas, como clorofluocarbonos (CFC), bifenilos policlorados (PCBs), cloruro de polivinilo (PVC) y algunos retardantes bromados, así como asbestos y arsénico*”.

All Ghulamy & Abushammala (2023) también mencionan que cuando los RAEE se vierten o se gestionan de manera inadecuada, genera impactos al aire, al agua, al suelo y a la salud humana; pueden liberarse diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos, como metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), bifenilos policlorados (PCB), sustancias perfluoroalquilos y polifluoroalquilos (PFAS), retardantes de llama bromados (BFR), dibenzofuranos policlorados (PCDF) y dibenzodioxinas policloradas (PCDD) (ver **Figura 23**).

Figura 23

Principales contaminantes y materiales peligrosos de los RAEE si se gestionan de manera inadecuada o son vertidos



En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023), menciona los principales impactos en la salud y el ambiente por la gestión inadecuada de los RAEE (ver **Figura 24**).

Figura 24*Impactos por la gestión inadecuada de los RAEE*

Nota. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2023)

En general, se evidencia en la bibliografía que se vienen manejando diversas metodologías para establecer los impactos ambientales del manejo de residuos de AEE (como es el caso de Pérez Alcázar (2013), Dextre Minaya (2020), Lozaya Araque (2013), Sanz Capdevila (2013) y otros).

Pérez Alcázar (2013), toma como caso de estudio una aspiradora doméstica, y se trabajó la metodología de análisis de ciclo de vida según la norma 14044:2006. De los resultados se destaca: *“lo que más impacto sobre el ambiente tiene es la etapa de uso de la aspiradora. El consumo energético que tiene a lo largo de toda su vida útil es lo más perjudicial para la salud humana, para el ecosistema y para los recursos (agotamiento de recursos). El impacto que tiene el transporte y el escenario fin de vida es prácticamente despreciable frente al consumo eléctrico y a la fabricación de la aspiradora”* (pág. 53).

La investigación de Dextre Minaya (2020) establece que el objetivo principal de la investigación es cuantificar los impactos ambientales del manejo de los RAEE por una empresa operadora de residuos utilizando la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)”. Este documento señala que *“la aplicación de la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV) en sistemas de producción, y hoy en sistemas de tratamiento de residuos, la convierte en una herramienta potente para la gestión de residuos electrónicos. Para ello, se siguió los lineamientos*

de la NTP-ISO 14044:2013. Primero se cuantificaron las cargas ambientales de cada proceso unitario del tratamiento primario de RAEE. Utilizando la metodología de balance de masa y energía. A este primer proceso se le conoce dentro del ACV como el desarrollo del inventario de ciclo de vida (ICV). Posteriormente, se evaluaron los impactos ambientales por cada proceso de tratamiento primario de RAEE.” (p. v). *“se ha escogido la metodología de evaluación de impacto ambiental, denominada RECIPE, un método internacionalmente aceptado que, combina la solidez científica del método CML2001 (Center of Environmental Science of Leiden University), y la fácil interpretación del método Eco-Indicator 99 (ECORAEE, 2014). RECIPE evalúa 18 categorías de impacto de punto intermedio (midpoint) y 3 categorías de impacto de punto final (endpoint).*

Este estudio, obtuvo como resultado que *“de las 18 categorías de impacto ambiental seleccionados, el tratamiento de RAEE solo contribuye directamente con 9 categorías... No obstante, los valores se encuentran por debajo de cero, lo que implica una contribución positiva en la reducción de impactos como: el calentamiento global, ecotoxicidad terrestre, marina y de agua dulce, toxicidad humana, eutrofización marina, formación de material particulado y de oxidantes fotoquímicos, y la acidificación terrestre.*

En valores absolutos, el impacto ambiental que más se reduce es la POF (Formación de oxidantes fotoquímicos), seguido por el CC (Cambio climático) y la TA (acidificación). Asimismo, entre los procesos unitarios que más contribuyen en la reducción de los impactos resultantes se encuentra la recepción y clasificación (R-C), seguido por el acondicionamiento (AC) y la disposición final de residuos peligrosos (DF-P) (pág. 56).

Adicionalmente en términos de contribuciones globales, el autor establece que: *“Las emisiones indirectas al agua y aire de la disposición final de RRSS peligrosos generan un mayor impacto negativo, especialmente en las categorías relativas a la ecotoxicidad terrestre y acuática, al agotamiento de recursos minerales, y a la eutrofización, no obstante, este mismo proceso contribuye de forma positiva a reducir impactos como el cambio climático, eutrofización, formación de oxidantes fotoquímicos y la acidificación terrestre al aislar los componentes peligrosos segregados de los RAEE mediante la encapsulación subterránea. El proceso de acondicionamiento sigue en orden de contribución negativa, especialmente en la ecotoxicidad marina, formación de material particulado y ocupación de tierras agrícolas; éste último podría relacionarse directamente con el área de terreno que ocupa la planta de*

tratamiento. El proceso de recepción y clasificación genera un impacto negativo sobre el cambio climático, ecotoxicidad marina y toxicidad humana, especialmente por sus emisiones atmosféricas ascendentes de mercurio y nitrato.

Finalmente, de las 18 categorías de impacto analizadas, todos los procesos del tratamiento primario de RAEE contribuye de forma positiva a reducir la categoría de impacto de agotamiento de agua (WD)” (pág. 59 - 60).

Lozaya Araque (2013) toma como caso de estudio una plancha de cabello, para lo cual utiliza una metodología para el análisis de los impactos ambientales “*procedentes de los distintos aspectos ambientales relacionados con los AEE*”, la cual “*puede variar en complejidad, tiempo requerido, información necesaria o aportada, coste asociado, ser cuantitativa o cualitativa... pero todos se basan en la realización de un ACV (análisis del ciclo de vida).*

Las conclusiones de este estudio indican que “*Se observa como destaca el impacto procedente del conjunto de componentes eléctricos frente a los componentes térmicos, ya que la puntuación indicada para los componentes eléctricos es alrededor de 0,75 veces mayor. Lo mismo ocurre si estos se comparan con la energía consumida a lo largo del ciclo de vida, superándola en alrededor de 0,37 veces*” (pág. 48).

Además, señala lo siguiente: “*se observa cómo entre el montaje final (aparato y conjunto de elementos que acompañan al aparato en su adquisición) y la electricidad suponen prácticamente el porcentaje total de cada categoría de impacto, haciendo casi despreciables al resto de etapas (transporte y fin de vida)*” (pág. 49).

En el estudio de Sanz Capdevila (2013) se plantean como metodologías para la estimación del impacto ambiental: La Matriz MET, Eco indicadores y el Análisis del ciclo de vida ACV. Este autor tiene como objeto de su investigación un cohete de juguete teledirigido y establece cuatro principales impactos como resultado:

1. Efecto invernadero: el cual consiste en el “*aumento de la temperatura media del planeta a consecuencia del efecto invernadero ocasionado por el incremento de la concentración de gases como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), óxidos de Nitrógeno (N₂O) o el vapor de agua;*

2. Disminución capa de ozono: el cual describe como la *“disminución de la capa de ozono estratosférica, que nos protege de los rayos ultravioleta, producida principalmente por la presencia de compuestos halogenados (CFC) en las capas altas de la atmósfera.*

3. Eutrofización: que define como la *“concentración excesiva de nutrientes en el medio acuático o terrestre;*

4. Acidificación: la cual describe como la *“disminución del PH del medio (suelo o medio hídrico) a consecuencia de la emisión de substancias ácidas (compuestos de azufre, compuestos de nitrógeno, ácido clorhídrico...). Esta acidificación tiene consecuencias graves sobre el funcionamiento de los ecosistemas, como la pérdida de nutrientes del suelo o la movilización de sustancias tóxicas y se expresa en Kg equivalentes de SO₂”.*

Dado que estos estudios se aplican de forma específica a un AEE determinado, los resultados de los impactos ambientales obtenidos se extrapolan de forma general y cualitativa para generar un análisis global. En ese sentido, las conclusiones de los estudios consultados establecen como los principales impactos ambientales los siguientes:

- PCG (Efecto invernadero)
- PDOE (disminución capa de ozono)
- PE (Eutrofización)
- PA (Acidificación)

Es así como, para este trabajo se realiza una evaluación cualitativa de los impactos ambientales y sociales asociados a la minería urbana de los RAEE, para lo cual se siguió lo establecido en la metodología de aplicación de la matriz de Leopold, la cual fue alimentada considerando la descripción de las actividades y los impactos analizados para generar finalmente una discusión de resultados y conclusiones.

Se utiliza entonces como base el ejemplo de matriz de Leopold encontrada en el repositorio de ESPOL (2024), teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

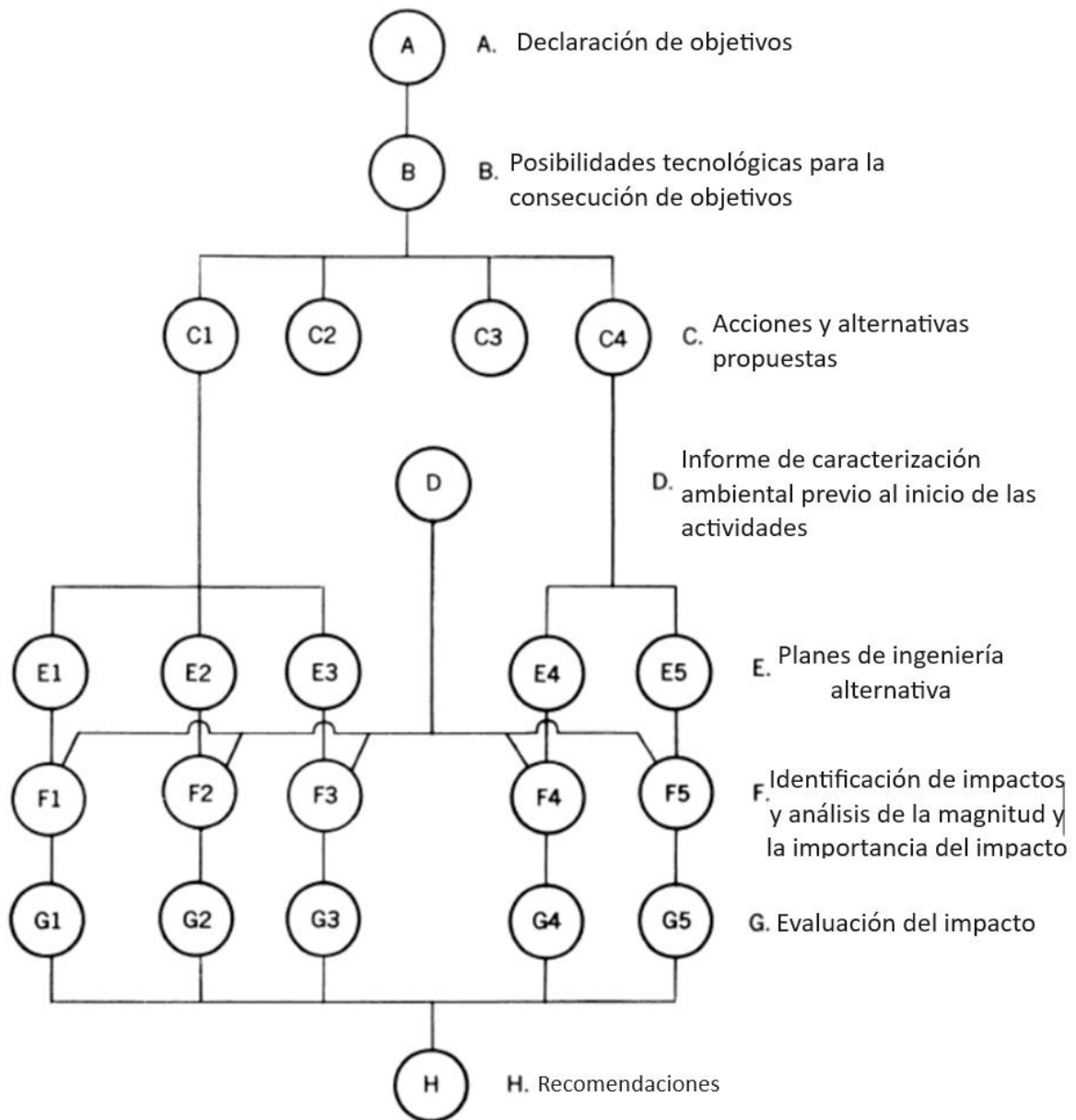
Se tienen en cuenta dos actividades para el análisis en la matriz: 1. Minería urbana y 2. Disposición de residuos en rellenos sanitarios. Esto debido a que la discusión se centra en la minería urbana dentro de un modelo circular como opción de aprovechamiento de los RAEE, pues se vienen evidenciando disposiciones finales en rellenos sanitarios en lugar del aprovechamiento y/o valorización para minimizar los impactos.

Adicionalmente se contemplan los impactos sobre varios factores ambientales:

- Las características físicas y químicas de la tierra (en términos de recursos minerales, suelos y forma del terreno)
- El agua superficial y subterránea
- La atmósfera (en términos de calidad del aire por aporte de gases y partículas)
- Y los aspectos culturales sobre salud y seguridad de la población afectada y la generación de empleo.

Para aplicar la matriz de Leopold, se sigue la metodología extraída de Ponce (2011), la cual establece que: *“fue desarrollada en 1971, en respuesta a la Ley de Política Ambiental de los EE.UU. de 1969. La Matriz de Leopold establece un sistema para el análisis de los diversos impactos. El análisis no produce un resultado cuantitativo, sino más bien un conjunto de juicios de valor. El principal objetivo es garantizar que los impactos de diversas acciones sean evaluados y propiamente considerados en la etapa de planeación del proyecto”* (p.1). Esta metodología sigue lo establecido en el diagrama para desarrollo de programas de acción que se puede consultar en la **Figura 25**, la cual se extrae del documento “A procedure for evaluating environmental impact” de Leopold (1972):

Figura 25
Metodología matriz de Leopold



Nota. Fuente (Traducida de Leopold 1972)

Para analizar los impactos ambientales (que la metodología denomina como “F”), es necesario definir los siguientes aspectos:

Magnitud: entendiéndolo como “*grado, tamaño o escala*” del impacto evaluado sobre sectores específicos del medio ambiente, la cual puede ser evaluada en base a hechos. Es una variable cuantitativa y puede ser positiva o negativa dependiendo del impacto que presente sobre el factor ambiental analizado (Ponce (2011), p. 3).

Importancia: la cual se establece en base a juicios de valor de los impactos evaluados sobre características y condiciones ambientales específicas. Es una variable cualitativa (Ponce (2011), p. 3). La importancia de cada impacto ambiental debe incluir la consideración de las consecuencias que acarrearán cambiar la condición particular de los factores ambientales (Leopold, 1971) (p. 2).

La evaluación de los impactos se realiza entonces por medio de una matriz, la cual relaciona en el eje horizontal las acciones que causan impactos ambientales y en el eje vertical las condiciones ambientales existentes que pueden verse afectadas. Esto permite realizar una revisión de las interacciones que se involucran en el proceso.

Es importante anotar que *“la manera más eficaz de utilizar la matriz es identificar las acciones más significativas. En general, sólo alrededor de una docena de acciones serán significativas. Cada acción se evalúa en términos de la magnitud del efecto sobre las características y condiciones medioambientales que figuran en el eje vertical. Se coloca una barra diagonal (/) en cada casilla donde se espera una interacción significativa* (Ponce, 2011) (pág. 12).

“Se evalúan las casillas marcadas más significativas, y se coloca un número entre 1 y 10 en la esquina superior izquierda de cada casilla para indicar la magnitud relativa de los efectos (1 representa la menor magnitud, y 10 la mayor). Asimismo, se coloca un número entre 1 y 10 en la esquina inferior derecha para indicar la importancia relativa de los efectos. El siguiente paso es evaluar los números que se han colocado en las casillas. Es conveniente la construcción de una matriz reducida, la cual consiste sólo de las acciones y factores que se han identificado como interactuantes. Debe tomarse especial atención a las casillas con números elevados. El alto o bajo número en cualquier casilla indica el grado de impacto de las medidas. La asignación de magnitud e importancia se basa, en la medida de lo posible en datos reales y no en la preferencia del evaluador. El sistema de calificación requiere que el evaluador

cuantifique su juicio sobre las probables consecuencias. El esquema permite que un revisor siga sistemáticamente el razonamiento del evaluador, para asistir en la identificación de puntos de acuerdo y desacuerdo. La matriz de Leopold constituye un resumen del texto de la evaluación del impacto ambiental” (Ponce, 2011) (p. 12). Para este ejercicio, si se considera que el impacto es negativo, a la evaluación de la magnitud se le incluye el signo menos (-) para la calificación. En la **Tabla 8** se presentan los resultados obtenidos en la matriz de Leopold.

Tabla 8
Resultados matriz de Leopold

			Magnitud: 1-10 Importancia: 1-10	ACCIONES CON POSIBLES EFECTOS				
Valoración	Magnitud: 10 = Grande, 5 = Mediano, 1 = Pequeña	Importancia 1 = Nada, 10 = Alta		F. Renovación de recursos e. Minería Urbana	Total Acción 1	H. Emplazamiento y tratamiento de residuos b. Rellenos sanitarios	Total Acción 2	Total Acciones
FACTORES AMBIENTALES	A. Características físicas y químicas	1. Tierra	a. Recursos minerales	2 / 8	16	-6 / 4	-24	-8
			c. Suelos	2 / 4	8	-6 / 4	-24	-16
			d. Forma del terreno	1 / 2	2	-1 / 3	-3	-1
		2. Agua	a. Superficial	5 / 8	40	-4 / 8	-32	8
			b. Subterránea	1 / 2	2	-6 / 8	-48	-46
		3. Atmósfera	a. Calidad del aire (gases, partículas)	2 / 5	10	-2 / 6	-12	-2
	C. Factores culturales	4. Aspectos culturales	b. Salud y seguridad	5 / 10	50	-5 / 6	-30	20
			c. Empleo	5 / 2	10	1 / 2	2	8
					Total Acción 1	129	Total Acción 2	-127

Nota. Fuente (Elaboración propia, 2024)

Estos resultados permiten dar cuenta de que la actividad de reciclaje de residuos asociado a la minería urbana representa un impacto positivo en todos los factores ambientales evaluados, mientras que la disposición en rellenos sanitarios en su mayoría representa impactos negativos (6 de 7 factores evaluados). Además, la minería urbana a su vez aporta al incremento de la vida útil de los rellenos sanitarios.

Respecto a la afectación de las características físicas y químicas del entorno, se consideraron los siguientes medios:

- **Tierra**

En cuanto a la disponibilidad de recursos minerales, se le asigna una magnitud de 8 y una importancia de 2 a la minería urbana, ya que puede reducir la demanda de materias primas primarias, conllevando a la sustitución de todo el producto, sus componentes o materiales y fomenta la reducción de la explotación de nuevos materiales (Xavier et al, 2021). Mientras que para el relleno sanitario se considera una magnitud de -6 y una importancia de 4, dado que la técnica del relleno sanitario involucra la necesidad de seguir explotando nuevos recursos.

Respecto a la afectación a suelos se asigna una magnitud 2 e importancia 4 a la actividad de minería urbana, pues no se afectan los suelos directamente, al tratarse de un aprovechamiento de los RAEE, a diferencia de la disposición en relleno sanitario que sí implica afectar el suelo y sus recursos directamente (magnitud -6 e importancia 4). Adicionalmente la forma del terreno se analizó de forma similar, generando afectación en la disposición en rellenos sanitarios (magnitud -1 e importancia 3) y un impacto positivo en la minería urbana debido a que no se interviene directamente la forma del terreno para dicha actividad (magnitud 1 e importancia 2).

Caprile (2020), menciona que la ocupación de grandes superficies de tierra destinadas al enterramiento de residuos genera la cancelación de diversos servicios ambientales del suelo, entre los que se encuentran la producción de biomasa, la filtración y purificación del agua, la regulación de la erosión y la regulación del clima. En particular, el impacto en el ciclo de carbono del suelo repercute de manera directa en el sistema climático terrestre.

En general las calificaciones de los impactos son negativas, demostrando así que el impacto es mayor debido a la disposición por la técnica de relleno sanitario.

- **Agua**

Este es el factor ambiental que mayor impacto positivo representa, debido a que la intervención de fuentes de agua superficial por la técnica de relleno sanitario (magnitud -4 e

importancia 8) se elimina con el aprovechamiento de los RAEE (magnitud 5 e importancia 8), lo cual implica un impacto mayor al tener en cuenta los servicios ecosistémicos que dependen de dichas fuentes. Considerando que el contenido de sustancias de carácter peligroso que pueden contener los RAEE y que a su vez pueden tener contacto con las fuentes de aguas superficiales cercanas a los rellenos sanitarios, se argumenta la importancia del aprovechamiento de estos residuos.

Para el agua subterránea, para la técnica del relleno sanitario se presenta una calificación negativa y mayor, dada por la generación de lixiviados que afectan las aguas subterráneas.

- **Atmósfera**

Es claro que al optar por el aprovechamiento de los RAEE mediante la minería urbana se minimiza el impacto de la generación de emisiones de gases y partículas peligrosas a la atmósfera del ambiente intervenido (afectando a su vez la salud de la población cercana); por esta razón se le otorgan magnitud de 2 e importancia de 5, mientras que para la técnica del relleno sanitario se califica con magnitud de -2 e importancia de 6. Según M.L. Ortiz en Chavarría Acuña (2022), la generación de metano y bióxido de carbono por la degradación anaeróbica de la materia orgánica contenida en los residuos sólidos es del orden de 220 metros cúbicos por tonelada de residuo con un alto valor energético, y se considera que en los rellenos sanitarios se deposita todo tipo de residuos. En general se aprecia en las calificaciones obtenidas que el impacto negativo es mayor por sus implicaciones en la salud de la población circundante.

La **Tabla 9** muestra estimaciones del potencial de la minería urbana, en términos de reducción de emisiones de efecto invernadero. El potencial de mitigación para la región va de 500 mil toneladas de CO₂ e a 3 millones de toneladas de CO₂ e. Materiales como el papel, cartón, plástico y aluminio figuran como los de mayor potencial, en términos de mitigación de emisiones.

Tabla 9*Potencial de mitigación de la minería urbana en algunas ciudades de Latinoamérica*

Material	Potencial de ahorro por tonelada de RSU en Kg CO2e (promedio de AL)	Potencial de ahorro de emisiones asumiendo el 100% del minado de materiales con base en datos de generación de RSU de 2010 (millones de toneladas CO2e)				
		Buenos Aires (1.825.000 tons)	Río de Janeiro (2.187.026 tons)	Sao Pablo (3.629.144 tons)	Bogotá (2.372.500 tons)	Lima (3.262.625 tons)
Papel y cartón	397-95	0,724 - 0,173	0,868 - 0,208	1,44 - 0,344	0,942 - 0,225	1,295 - 0,310
Plástico	131-0	0,239-0	0,286-0	0,475-0	0,310 - 0	0,427 - 0
Aluminio	157	0,286	0,343	0,570	0,372	0,512
Acero	15	0,027	0,032	0,054	0,035	0,049
Vidrio	18	0,033	0,039	0,065	0,042	0,058
Biomasa	25	0,045	0,054	0,09	0,059	0,081
	Total	1,354 - 0,564	1,622 - 0,676	2,694 - 1,123	1,76 - 0,733	2,422 - 1,01

Nota. Fuente (Ramos 2016)

Mientras que para un relleno sanitario Park et al., (2017) menciona que anualmente estos emiten 0,03 Gt de carbono, lo que equivale aproximadamente al 40% de lo emitido por el sector energético

- **Aspectos culturales**

Finalmente, en términos de salud y seguridad se le otorga una magnitud de 5 e importancia de 10 al aprovechamiento de RAEE a través de la minería urbana, mientras que al relleno sanitario se le otorga magnitud de -5 e importancia de 6. Según Cárdenas Valbuena et al, (2022) estudios previos han demostrado que el lixiviado resultante de la disposición de los residuos contiene microorganismos patógenos como *Escherichia coli* en concentraciones altas ($0,66 \times 10^4$ microorganismos patógenos/100 mililitros), lo anterior puede contaminar cuerpos de agua y posibles riesgos para la salud. Adicionalmente, se considera la generación de empleo en ambas alternativas, sin embargo, se considera que la minería urbana conlleva a una cadena de empleos mayor.

La implementación de la minería urbana permite ampliar el mercado existente y los servicios que éste requiere (transporte, servicios de logística, entre otros), generando la oportunidad de crear nuevas empresas y empleos, e incrementar la concientización social a partir de las campañas de sensibilización (Clerc et al, 2021). De igual manera menciona que la complejidad de los desechos y materiales de los RAEE hace que el desmantelamiento y la clasificación manual sean actividades importantes dentro de la cadena de flujo de materiales. Si

se controla bien con garantías adecuadas de salud y seguridad, esto tiene un gran potencial para la creación de empleos.

9. Caso de éxito en Minería Urbana

- **Aurubis**

Es una empresa alemana con sedes en varios países que procesa concentrados metálicos, chatarra y materiales reciclados que contienen metales para obtener diversos metales de la más alta pureza y productos para aplicaciones de última generación. Son uno de los principales recicladores de cobre del mundo. Hoy procesan alrededor de 1 millón de toneladas de cátodos de cobre con el 99,9% de pureza los cuales se pueden vender en las bolsas de valor, aunque también procesan algunos de ellos para obtener una variedad de productos intermedios hechos de cobre y aleaciones de cobre. Además, ofrecen la opción de comprar residuos de producción o chatarra de cobre a los clientes y devolverles cobre refinado (Aurubis, 2023).

El modelo de negocio se basa en tres pilares principales: el procesamiento de materias primas de la industria minera, el procesamiento de materiales de reciclaje y de la industria electrónica, y el negocio de productos. El núcleo de este posicionamiento único dentro de la cadena de valor del metal es el uso de diferentes flujos metalúrgicos, y cada uno de estos tres pilares está influenciado por diferentes ciclos de mercado. Dicho modelo se presenta gráficamente en la **Figura 26**.

Figura 26
Modelo de negocio AURUBIS



Nota. Traducido de Aurubis, 2024

Además de los concentrados de cobre, utilizan chatarra de cobre y varios tipos de materias primas de reciclaje de metales orgánicos e inorgánicos, residuos industriales e intermedios metalúrgicos comprados como materia prima. La mayor parte de la chatarra de cobre y las materias primas de reciclaje que contienen metales para cuatro fundiciones secundarias en Lünen (Alemania), Olen y Beerse (ambas en Bélgica) y Berango (España) se obtienen en los mercados europeos y norteamericanos. Además, utilizan chatarra de cobre con alto contenido de cobre para fines de enfriamiento en sus dos fundiciones primarias en Hamburgo (Alemania) y Pirdop (Bulgaria). Las empresas comercializadoras de metales son los principales participantes para la oferta de materiales reciclados, las materias primas también llegan directamente desde la industria a través de su enfoque de cierre del proceso.

Los mercados de venta de sus productos son variados e internacionales. Entre los clientes directos de las divisiones de Aurubis se encuentran empresas de la industria de semirremolques de cobre, la industria del cable y el alambre, el sector eléctrico y electrónico y la industria química, así como, proveedores de los sectores de energías renovables, construcción y de automóviles.

Para cerrar la cadena de valor del cobre y otros metales, dan una alta prioridad al enfoque de cierre del proceso. Este enfoque se centra en materiales como los residuos de producción y los residuos que se acumulan a lo largo de la cadena de valor del cobre en la producción, por ejemplo, con sus clientes.

Aurubis tiene un negocio principal de alto rendimiento: el procesamiento de materias primas que contienen metales, tanto concentrados como materiales de reciclaje. Buscan conectar sus sitios de manera específica y optimizar los flujos de materiales que les permite tomar aún mejor ventaja de las sinergias en el Grupo. También esperan utilizar sus años de experiencia en el procesamiento de materiales de reciclaje complejos, junto con tecnología de fundición de última generación, para establecer y expandir capacidades escalables.

Utilizan el Sistema de Reciclaje – KRS- si es necesario, el procesamiento comienza con el muestreo, seguido de un paso de preparación del material. Dependiendo de la consistencia y composición, las materias primas se trituran, se tratan en una planta de preparación de materiales o se acondicionan directamente para formar mezclas de entrada. Esto garantiza que se puedan tratar materiales muy gruesos, húmedos o en polvo. En algunos casos, el aluminio y los plásticos se separan de los materiales y se venden a otras empresas de reciclaje.

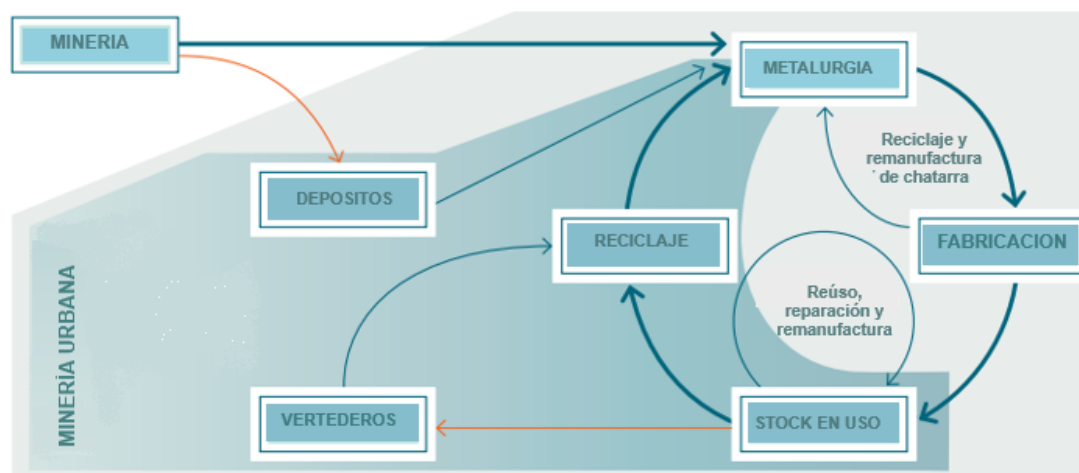
En general sus objetivos de mercado apuntan a un crecimiento sostenible y rentable, por medio del “*aumento del reciclaje en todo el mundo, ciclos de materiales cerrados, vehículos eléctricos y una digitalización avanzada que aumentará la demanda de materiales reciclados*” (Aurubis, 2024). Además, su estrategia viene acompañada de un principio de uso responsables de los recursos; lo cual apunta incluso a ser carbono neutral antes del 2050 con estrategias como el uso de hidrógeno en producción (Aurubis, 2024).

10. Propuesta modelo circular para la minería urbana

Tercero et al (2020), mencionan que eventualmente, cada producto llega al final de su vida útil. Ni siquiera los ciclos repetidos de reutilización, reparación y remanufactura pueden evitarlo. En este punto, el producto desechado se convierte en una fuente potencial de materias primas capaces de volver a la economía, ya sea inmediatamente (reciclaje) o más tarde a través de la recuperación de las existencias o vertederos. Aquí es donde la Minería Urbana encaja en la Economía Circular, como el último bucle que captura los productos desechados y devuelve las materias primas secundarias a la economía. Por lo tanto, la Minería Urbana es una parte integral de la Economía Circular.

Figura 27

La Minería Urbana en el contexto de la Economía Circular



Nota. Traducido de Tercero et al (2020)

De igual manera, Tercero et al (2020) menciona que los elementos individuales de la Economía Circular no son nuevos en sí mismos. Estos incluyen, entre otros, el diseño de productos que enfatiza la reutilización y reparación, diferentes medidas de eficiencia energética y de recursos, modelos de negocios innovadores y reciclaje de productos al final de su vida útil. Este proceso considera entonces toda la cadena de valor desde la extracción de materiales hasta la recuperación de materiales.

Es así como, para la construcción del modelo circular es considerada también la jerarquización de las acciones para la gestión de los RAEE que presenta el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023) (ver **Figura 28**).

Figura 28

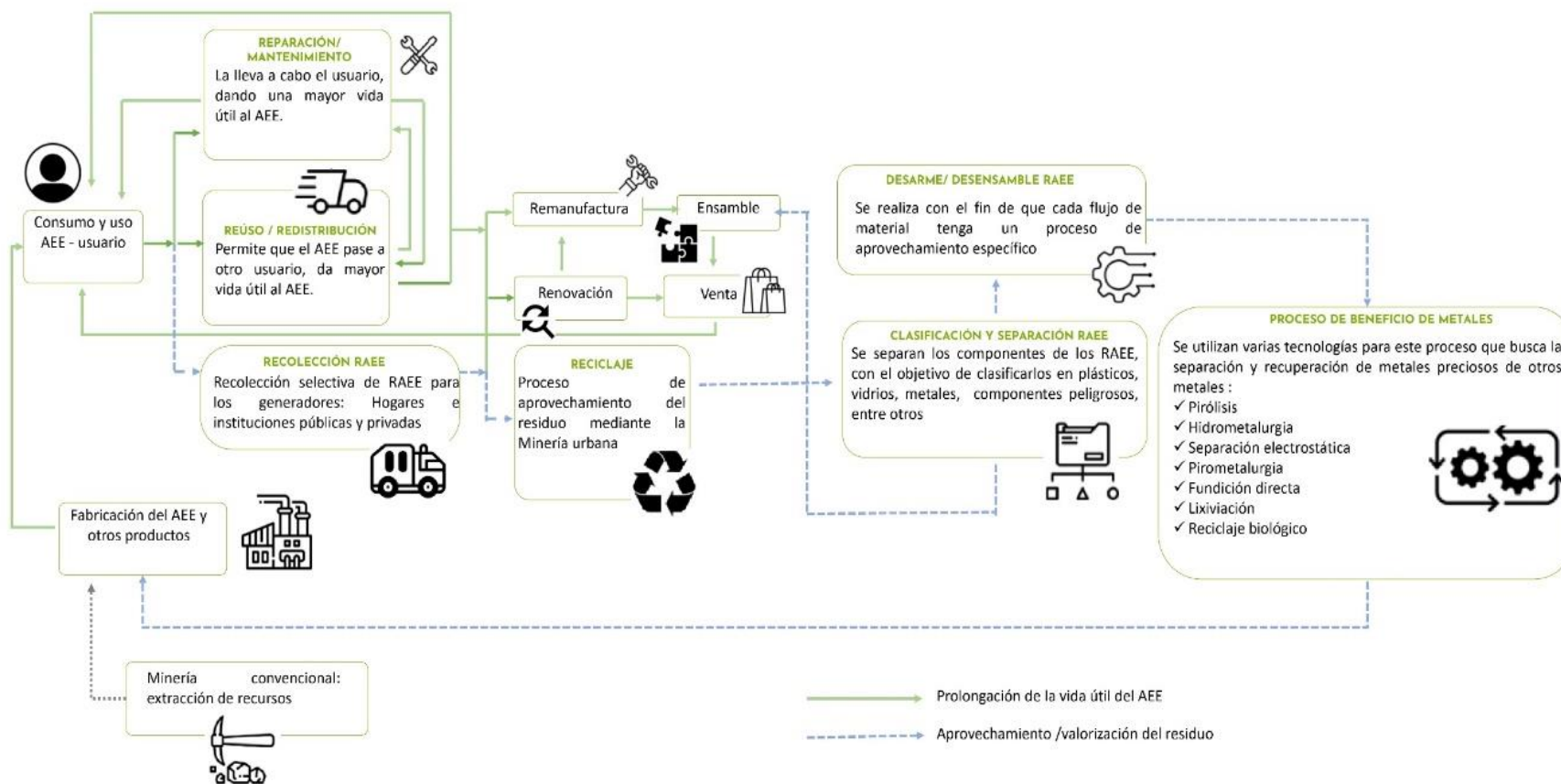
Jerarquización de las acciones para la gestión de los RAEE



Nota. Fuente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2023)

Considerando entonces la Minería Urbana como parte integral de la economía circular, y la bibliografía consultada en la elaboración de este trabajo, en la **Figura 29** se presentan los elementos que debe considerar un modelo circular que involucre la minería urbana como parte de este y de manera posterior se describe en que consiste cada uno de estos elementos.

Figura 29
Minería Urbana y Economía Circular



Nota. Elaboración propia, 2024

Se considera entonces como primer elemento la extracción de los recursos y materias primas vírgenes necesarios para la fabricación del AEE a través de la minería convencional, sin embargo, para esta fabricación, la economía circular considera que los materiales requeridos provengan de los demás bucles identificados de manera que se disminuya el uso de las materias primas vírgenes.

Una vez se cuenta con las materias primas, se considera entonces la fabricación del AEE para que este llegue al consumo y uso por parte del usuario. El fabricante o productor del AEE es uno de los actores más importantes dentro del modelo, es necesario que estos reconozcan desde la fabricación, la necesidad de considerar la reparación y el desmontaje del AEE tanto como sea posible como parte del proceso de diseño, y transmitir esta información a los usuarios junto con los productos, no solo fomentaría una reparación y reacondicionamiento más generalizados, sino que también contribuiría a asignar los productos al final de su vida útil a las rutas de reciclaje adecuadas, lo que permitiría la máxima recuperación de materias primas (Tercero et al 2020). Debe considerarse la selección de materias primas que conlleven a una mayor vida útil del AEE, es decir con mayor durabilidad, que sean actualizables para evitar la obsolescencia de manera rápida, además que desde el diseño se posibilite el intercambio de piezas mediante la estandarización de componentes y que estos componentes sean fácilmente identificables, lo que también facilitará su separación y un posterior tratamiento adecuado. De igual manera, desde el diseño debe considerarse la minimización o la eliminación de los materiales que no sean reciclables.

El usuario inicial que adquiere el AEE, debe entonces considerar realizar el mantenimiento y la reparación del AEE procurando extender la vida útil del mismo; como se mencionó anteriormente, para estas reparaciones los fabricantes brindan la opción para que pueda ser realizado por el mismo usuario, suministrando la información necesaria en diferentes plataformas, páginas en internet o en los manuales para el usuario y así evitar que las reparaciones deban realizarse desde el fabricante.

En el momento que el usuario inicial toma la decisión de dejar de usar el AEE, este se espera vuelva a ser redistribuido y usado por otro usuario, este círculo puede repetirse cuantas veces lo desee el usuario o el AEE lo permita. Luego se considera una renovación o reacondicionamiento del AEE para que éste entre nuevamente a la cadena de valor a través de

la venta del AEE a otro usuario. Cuando el AEE no permite una renovación o reacondicionamiento, el AEE puede requerir de una remanufactura llegando así al ensamble, a la venta y a un nuevo usuario. Este nuevo usuario realizará los mantenimientos y reparaciones que el AEE requiera para que este siga ampliando su vida útil.

Finalmente, si el AEE no puede repararse, reacondicionarse, ni remanufacturarse pasaría al reciclaje, el AEE se convierte en materia prima secundaria sólo cuando no es posible mantenerlo en uso; en este bucle del reciclaje es donde se aplica la minería urbana.

Cuando el AEE deja de utilizarse se considera un RAEE, de manera transversal a todos los elementos es importante que se presente la correcta recolección selectiva de los RAEE para todos los generadores, una recolección eficaz minimiza los residuos “residuales” y maximiza el reciclaje.

A los RAEE se les realiza una clasificación y separación de los componentes con el objetivo de clasificarlos en plásticos, vidrios, metales, componentes peligrosos, entre otros, buscando que estos materiales puedan volver a la cadena de valor mediante el ensamble de otros AEE o que siga con el proceso del reciclaje a través de la minería urbana, el reciclaje es entonces el último bucle para mantener el valor de las materias primas dentro del proceso de la economía circular contribuyendo a un uso más sostenible de los recursos naturales. Al llegar al reciclaje pasa a un desarme y/o desensamble del RAEE con el fin de que cada flujo de material cuente con un proceso de aprovechamiento específico y pase al proceso de beneficio de metales.

Para el proceso de beneficio de metales se utilizan diferentes tecnologías que buscan la separación y recuperación de metales preciosos de otros metales, entre estas se encuentran: pirólisis, la hidrometalurgia, la separación electrostática, la pirometalurgia, la fundición directa, la lixiviación, el reciclaje biológico, entre otras tecnologías.

El proceso entonces de beneficio de metales lleva nuevamente a la fabricación del AEE utilizando materias primas provenientes del reciclaje y llevando nuevos AEE al usuario.

Para que el modelo circular funcione de manera correcta se deben tomar en cuenta seis habilitadores claves (ver **Figura 30**), los cuales son transversales en todo el modelo: gestión del conocimiento, marco regulatorio, infraestructura, alianzas, innovación y tecnología y financiamiento.

Figura 30

Habilitadores para la minería urbana dentro de la economía circular



Nota. Elaboración propia, 2024

- **Gestión del conocimiento**

La gestión del conocimiento refiere a la educación, capacitación concientización y sensibilización para todos los actores involucrados: la comunidad en general, los productores, comercializadores y gestores.

Se hace indispensable del apoyo de una ciudadanía comprometida y bien informada, por tanto, debe considerarse un programa de información y participación comunitaria que permita mantener informados a los usuarios sobre la correcta gestión del AEE en todo el ciclo de su vida útil, brindar la información necesaria para que el usuario conozca sobre los Sistemas de Recolección y Gestión –SRyG- que existen, además la realización de campañas suficientes de recolección de los RAEE y por cada tipo de RAEE.

En este habilitador se encuentra el usuario como parte fundamental, al tomar conciencia y decisión de la compra de los AEE mediante un consumo responsable, no considerando AEE

de poca durabilidad o de mala calidad, reutilizando, haciendo el mantenimiento y las reparaciones necesarias para extender la vida útil del AEE.

En la gestión del conocimiento se encuentra también la promoción del ecodiseño para los fabricantes de los AEE, de manera que se utilicen materiales que tengan menos impacto ambiental, menos recursos y un menor uso de materiales en el proceso de fabricación. También las posibilidades del uso de materiales biodegradables en los AEE.

De igual manera, tal como lo menciona El Observatorio Mundial de Residuos Electrónicos (2024), para que la industria y los gobiernos exploten realmente el potencial positivo de la economía circular del sector de la electrónica, es necesario disponer gratuitamente de datos fiables para fundamentar la toma de decisiones desde todos los niveles.

- **Marco regulatorio**

Dentro del marco regulatorio aún hay mucho por hacer. Es necesaria la formulación y aplicación de un marco jurídico eficaz que sienta las bases para una economía circular y una minería urbana.

Desde la fabricación del AEE debe generarse una normatividad asociada a la obsolescencia programada, dado que muchos fabricantes son grandes multinacionales, debería contarse con normatividad que requiera que la importación de los AEE cumpla con garantías mínimas de obsolescencia programada; además el productor debería garantizar la existencia de piezas de recambio por un periodo de tiempo acorde a la vida útil del AEE.

De igual manera sobre la responsabilidad extendida del productor – REP-, que busca ampliar la responsabilidad de este en toda la vida útil del AEE, si bien la REP es una política considerada en Colombia, es necesario ampliar los productos que son regulados.

Para los comercializadores de AEE deberían considerar la obligación de retoma del producto en todos los puntos de venta, de manera que se brinden más opciones al usuario para disponer el RAEE.

Considerar etiquetas verdes o ecológicas que identifiquen a los AEE que cumplan con determinados criterios como: uso de materias primas recicladas, uso de materiales o sustancias peligrosas, disponibilidad de planes posconsumo, información sobre disposición final del AEE y vida útil del AEE. Y para la contratación pública considerar dichas etiquetas verdes o ecológicas, además de criterios ambientales para proveedores.

Regular los tiempos de garantía de los AEE considerando tiempos de garantía más amplios, también ayuda a una prolongación de la vida útil del AEE, y que en dicha garantía prevalezca la reparación ante la sustitución del AEE, además considerar que los equipos remanufacturados también cuenten con los tiempos de garantía asociados a un AEE nuevo. Promover el diseño estandarizado o normalizado de manera que se presenten mayores opciones para la reparación y el reacondicionamiento del AEE.

Se requiere entonces del fortalecimiento de la regulación de los RAEE en todas sus actividades, del apoyo técnico para la obtención de licencias ambientales que permita la formalización de las cadenas de valorización y aprovechamiento de los RAEE, además de garantizar el correcto manejo de los impactos asociados al proceso.

El establecimiento de metas de generación según tipo de generador, tasas mínimas de reciclaje y cobros e impuestos por incumplimiento de estas o por la generación de los residuos, sanciones por disposición en rellenos sanitarios y establecimiento de tasas de recogida de RAEE. Establecimiento de impuestos a los fabricantes que utilicen materiales difíciles de reciclar o materiales peligrosos, con el fin de incentivarlos a utilizar materiales reciclados o menos dañinos.

Otro tema importante por considerar dentro del marco regulatorio es la usabilidad del material recuperado, en muchos casos, principalmente en Europa, el uso de material secundario está regulado para proteger la salud y la seguridad pública o el medio ambiente (Tercero et al, 2020).

Finalmente, tal como lo menciona Rachna et al (2017), los acuerdos y reformas internacionales y globales en el campo de la minería urbana, así como la cooperación y coordinación entre los actores, son esenciales para aprovechar el potencial de la recuperación de materiales secundarios de manera eficiente y efectiva.

- **Infraestructura**

Es importante contar con el desarrollo de infraestructura para la minería urbana, infraestructura especializada con procesos químicos y metalúrgicos para extraer metales preciosos y otros elementos críticos (lixiviación electroquímica, electrorefinación y otras técnicas especializadas), infraestructuras más avanzadas de reciclaje y control de la contaminación para mejorar la tasa de recuperación de recursos.

Además de la implementación de centros de recolección y clasificación especializados para RAEE. Debe contarse con infraestructura eficaz y accesible.

La aplicación de una logística inversa eficaz para facilitar la devolución de estos residuos del consumidor hacía el productor y hacía un aprovechamiento en las instalaciones adecuadas.

- **Alianzas**

Implementación de programas de economía circular regional que identifique conexiones con diferentes actores, además, brindar capacidades locales para el fortalecimiento de redes de recolección que permita contar con rutas selectivas para los RAEE.

Generación de alianzas público-privadas para el fortalecimiento de las capacidades instaladas en todos los municipios, además de los planes posconsumo. Dentro de estas alianzas público-privadas debe considerarse la integración de los sectores formal e informal para la aplicación de la minería urbana.

- **Innovación y tecnología**

Debe trabajarse fuertemente en la transferencia tecnológica, propiciando la participación conjunta entre gobierno, empresas, universidades, centros de investigación. Innovar en tecnologías apropiadas y eficaces según el tipo de metal, con la que se logre separar los componentes en metales ferrosos, metales no ferrosos, plásticos y circuitos electrónicos; el desarrollo de tecnologías de valorización que optimicen la recuperación de aparatos y piezas con el menor gasto posible de energía y nuevos materiales por encima de las técnicas de eliminación (vertido, incineración). También se debe evitar la valorización energética, que aporta escasos beneficios en términos de circularidad y recuperación de los recursos (Cociña, 2018).

Aplicar la innovación y la tecnología en el rediseño de los AEE, buscado diseños que propicien la circularidad y una reducción de materiales para fabricación.

Con productos cada vez más complejos distribuidos en todo el mundo, el desarrollo de tecnologías avanzadas de reciclaje y el acceso adecuado a las mismas es un requisito previo para la recuperación efectiva de los potenciales de recursos con la minería urbana (Tercero et al, 2020).

- **Financiamiento**

Considerar incentivos para las empresas que realizan minería urbana; brindar facilidad y financiamiento para la importación de los equipos requeridos para tal fin. De igual manera

considerar incentivos para la compra de materias primas provenientes de la minería urbana, además de incentivos a la recolección.

Generar sistemas de incentivos enfocados en los usuarios y consumidores en el momento de la devolución del AEE a los sitios autorizados para tal fin.

Realizar una asignación presupuestal para la financiación de proyectos que apunten a una economía circular y la creación de instrumentos económicos para favorecer soluciones que aporten a la economía circular.

Incentivar la comercialización de AEE con etiquetas verdes o ecológicas.

11. Conclusiones

La sostenibilidad es, sin duda, un tema crucial en la actualidad, siendo necesario considerar que las generaciones futuras tengan al menos las mismas oportunidades y recursos que las generaciones actuales. Por tanto, la economía circular aporta a esta sostenibilidad, y está siendo de gran interés para los gobiernos, investigadores, académicos, empresas y la comunidad en general.

El cierre del ciclo de productos y la adopción de prácticas sostenibles son esenciales para garantizar un futuro más equitativo para todos. Es un compromiso como sociedad el repensar las prácticas actuales, y la aplicación de un modelo circular que considere la minería urbana es clave para alcanzar objetivos sostenibles.

Considerando la tendencia al crecimiento del uso de los AEE y por ende el aumento en la generación de RAEE, la escasez de minerales críticos y estratégicos, la minería urbana surge como una alternativa de solución facilitando el avance hacia una economía circular, además de reducir el impacto ambiental, los costos productivos y optimizar los ciclos en la cadena productiva.

La generación, gestión y manejo dado a los RAEE en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá no se encuentra documentada de manera suficiente, contar con la información necesaria ayuda a la construcción de políticas públicas y a la toma de decisiones, de manera que se pueda trabajar en pro de una economía circular que cubra este aspecto.

Existen desafíos en la implementación de la economía circular. Estos incluyen la falta de infraestructura adecuada para el reciclaje, la conciencia limitada del público y la necesidad de colaboración entre gobiernos, empresas y ciudadanos. Por tanto, la importancia de considerar habilitadores claves que ayuden a la implementación de la economía circular: gestión del conocimiento, marco regulatorio, infraestructura, alianzas, innovación y tecnología y financiamiento.

12. Referencias

- All Ghulamy, S., & Abushammala, H. (2023). Challenges and Opportunities in the Management of Electronic Waste and Its Impact on Human Health and Environment. *Sustainability*, *15*, 1837.
- Amilton Barbosa Botelho Junior, F. P. (2023). The sustainable development goals, urban mining, and the circular economy. *The Extractive Industries and Society*.
- Annalisa Abdel Azim, R. B. (2023). Highlighting the Role of Archaea in Urban Mine Waste Exploitation and Valorisation. *Recycling* *8*, no. 1: 20.
- Antúnez Sánchez, A., & Matos Guerra, I. (2020). La Minería Urbana. Un análisis desde el ordenamiento jurídico en Cuba. Una apuesta al desarrollo sostenible desde la Economía circular. *Derecho y cambio social*, 551-592. Obtenido de Derecho y cambio social.
- Aurubis. (2023). *Aurubis Metals for Progress*. Obtenido de <https://www.aurubis.com/ueberuns/konzern/konzernprofil>
- Aurubis. (15 de 01 de 2024). *Aurubis Strategy*. Obtenido de Aurubis: <https://www.aurubis.com/en/about-us/group/strategy>
- C.P. Baldé, E. D. (2022). *Global Transboundary E-waste Flows Monitor 2022*. Obtenido de E-Waste Monitor: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2022/06/Global-TBM_webversion_june_2_pages.pdf
- Caprile, M. D. (2020). *Modelado de los impactos ambientales de la disposición final de residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios basado en el Análisis de Ciclo de Vida*. Obtenido de Universidad Nacional de General Sarmiento: https://repositorio.ungs.edu.ar/bitstream/handle/UNGS/759/Tesis_Caprile.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cárdenas Valbuena, R., López Quemba, G. A., Talero Moreno, D., Cely Grijalba, A. P., Murillo Naranjo, L. M., Velasco Quiroga, G. A., & Contreras Pacheco, F. (2022). Impacto ambiental y riesgos potenciales generados en los rellenos sanitarios: revisión narrativa de la literatura. *Revista de Investigación en Salud, Universidad de Boyacá*, 100-117.
- Chavarría Acuña, O. A. (2022). Comparación de los impactos ambientales ocasionados por la técnica de incineración y rellenos sanitarios para la gestión de residuos sólidos. *Ingeniería*

- vol.32 n.2. Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S2215-26522022000200135&script=sci_arttext
- Cociña, B. P. (2018). Gestión y prevención de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) una propuesta para promover la economía circular. *Actualidad Jurídica Ambiental* N°84 , 6-36.
- Consortio Residuos Sólidos Medellín. (2019). *Informe de la caracterización de residuos sólidos generados en el sector residencial del área urbana y rural del Municipio de Medellín y sus cinco corregimientos.* Obtenido de <https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/MedioAmbiente/Programas/Shared%20Content/Documentos/2019/Informe%20-Residencial%20Final.pdf>
- Cornelis P. Baldé, R. K.-C. (2024). *The global e-waste monitor 2024.* Obtenido de <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>
- EcoCómputo. (2023). Obtenido de <https://ecocomputo.com/nosotros#quienes-somos>
- Ellen Macarthur Foundation. (2014). *Towards the circular economy: Accelerating the scale-up across global supply chains.*
- Ellen MacArthur Foundation. (s.f.). *Qué es la economía lineal.* Obtenido de <https://ellenmacarthurfoundation.org/es/que-es-la-economia-lineal>
- ESPOL. (2024). *Repositorio ESPOL.* Obtenido de Matriz de Leopold: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi1wrX-2saDAxV-SDABHf3lDkIQFnoECA4QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.dspace.espol.edu.ec%2Fbitstream%2F123456789%2F20903%2F6%2FMatriz%2520de%2520Leopold%2520Terra%2520Market.xls&usg=AOvVaw1-u>
- Fernández Rey, L. (2014). *La obsolescencia programada: sus consecuencias en el ambiente y la importancia del consumo responsable.* Obtenido de UCES - Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales: http://dspace.uces.edu.ar:8180/jspui/bitstream/123456789/2867/1/Obsolescencia_Fernandez-Rey.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM-. (2024). *Instalaciones autorizadas para el almacenamiento, aprovechamiento, y/o disposición final de residuos*

- peligrosos y/o aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)*. Obtenido de <http://rua-respel.ideam.gov.co/respelpr2009/mapa.php>
- Johansson, N., Krook, J., Eklund, M., & Berglund, B. (2013). An integrated review of concepts and initiatives for mining the technosphere: towards a new taxonomy. *Journal of Cleaner Production*, *Volume* 55, 35-44. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612001941>
- Kharas, H., & Gertz, G. (2016). *The New Global Middle Class: A Cross-Over from West to East*. Obtenido de Wolfensohn Center for Development at Brookings: https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/03_china_middle_class_kharas.pdf
- Leopold, L. B. (1971). *A procedure for evaluating environmental impact (Vol. 645)*. Illinois: University of Illinois.
- Lito. (2023). Obtenido de <https://lito.com.co/servicios/>
- López Gómez, F. A. (2020). Minería Urbana: ¿Realidad o leyenda? *The Conversation*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). *Guía técnica para la gestión integral de los RAEE*.
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2023). *Resolución 0479*. Obtenido de <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30046492>
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (31 de Octubre de 2017). *Resolución 2246*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-2246-de-2017.pdf>
- Naciones Unidas. (s.f.). *Convenio de Minamata sobre el Mercurio*. Obtenido de <https://observatoriop10.cepal.org/es/tratado/convenio-minamata-mercurio>
- Otoni, M., Dias, P., & Xavier, L. H. (2020). A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *Volumen* 261. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620310374>
- Park, J. K., Mahoney, J., Clark, T., & Krueger, N. (2017). A Review of Urban Mining in the Past, Present and Future. *Advances in Recycling & Waste Management*, 2:127.
- Ponce, V. (. (2011). *La Matriz de Leopold para la evaluación del impacto ambiental*. Obtenido de http://ponce.sdsu.edu/la_matriz_de_leopold.html

- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2010). *Convenio de Rotterdam*.
Obtenido de <https://www.pic.int/ElConvenio/Generalidades/tabid/1941/language/es-CO/Default.aspx>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2011). *Convención de Basilea*.
Obtenido de <https://www.basel.int/TheConvention/Overview/tabid/1271/Default.aspx>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2019). *Convenio de Estocolmo*.
Obtenido de <https://chm.pops.int/TheConvention/Overview/tabid/3351/Default.aspx>
- Rachna Arora, K. P. (2017). Potential and relevance of urban mining in the context of sustainable cities. *IIMB Management Review, Volume 29, Issue 3*, 210-224.
- Ramos, G. C. (2016). Residuos sólidos municipales, minería urbana y cambio climático. *El Cotidiano - Universidad Autónoma Metropolitana*, 75-84.
- RECYPUNTOS. (2020). Obtenido de <https://recypuntos.org/>
- Red verde. (2023). Obtenido de <https://www.redverde.co/que-es-red-verde/>
- Sánchez Alvarado, R. G. (2023). Reciclaje de los RAEE en función de la eficiencia ambiental, económica y energética. *Eficiencia Energética* , 21-23.
- Venkatesha Murthy, S. R. (2022). A Review on Global E-Waste Management: Urban Mining towards a Sustainable Future and Circular Economy. *Sustainability 14*.
- Wagner, M., Baldé, C., Luda, V., Nnorom, I. C., Kuehr, R., & Iattoni, G. (2022). *Monitoreo regional de los residuos electrónicos para América Latina: resultados de los trece países participantes en el proyecto UNIDO-GEF 5554*. Obtenido de https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2022/01/REM_LATAM_2022_ESP_Final.pdf
- Xavier, L. H., Giese, E. C., Ribeiro-Duthie, A. C., & Freitas Lins, F. A. (2021). Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. *Resources Policy, Volúmen 74*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420717305433>
- Zarama, L. E. (2022). *Propuesta de mejoramiento técnico y estratégico de la tecnología más usada a nivel nacional para el aprovechamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos RAEE, bajo el enfoque de economía circular*. Obtenido de Repositorio Universidad Santo Tomás: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/46269>