

Perspectiva de implementación en Colombia de procesos de recuperación de metales  
preciosos contenidos en residuos electrónicos

Marcela de la O. Diaz Alvernia

Sergio Andrés Sanabria Ortiz

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Jeferson Oswaldo Ruiz Lizarazo

Magíster en Ingeniería de Materiales

Codirector

Julio Andrés Pedraza Avella

Doctor en Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2021

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	9
1. Objetivos .....	11
1.1. Objetivo general .....	11
1.2. Objetivos específicos .....	11
2. Marco teórico .....	12
2.1. Definición de RAEE .....	12
2.2. Clasificación de RAEE .....	12
2.3. Composición de RAEE .....	14
2.4. Procesos metalúrgicos para la extracción de metales preciosos de RAEE .....	16
2.4.1. Pretratamiento de RAEE .....	16
2.4.2. Recuperación de metales preciosos de rae por procesos pirometalúrgicos de fusión .....	17
2.4.3. Recuperación de metales de rae por procesos hidrometalúrgicos .....	23
3. Elección de la alternativa pirometalúrgica e hidrometalúrgica .....	26
4. Perspectiva nacional .....	30
4.1. Aspecto técnico .....	31
4.1.1. Capacidad de procesamiento .....	33
4.2. Aspecto ambiental .....	35
4.2.1. Marco normativo de disposición de residuos e implementación de materias primas .....	35
4.3. Aspecto social .....	37
4.3.1. Reincorporación de metales preciosos (enfoque a la economía circular) .....	37

4.4. Costos de implementación .....	38
4.5. Posición geográfica.....	40
5. Conclusiones .....	42
6. Recomendaciones .....	43
Referencias bibliográficas.....	45
Apéndices.....	62

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Clasificación de los aparatos eléctricos y electrónicos según el Parlamento Europeo ...	13
Tabla 2. Composición porcentual de los materiales presentes en los RAEE .....	14
Tabla 3. Concentraciones de los metales en tarjetas electrónicas de mayor consumo .....	15
Tabla 4. Importancia relativa de las diferentes alternativas pirometalúrgicas .....	29
Tabla 5. Importancia relativa de las diferentes alternativas hidrometalúrgicas .....	30

**Lista de Figuras**

	<b>pág.</b>
Figura 1. Diagrama de flujo representativo de los procesos que pueden ser aplicables para la recuperación de metales preciosos de los residuos eléctricos y electrónicos .....	17
Figura 2. Árbol jerárquico de las alternativas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas respectivamente.....	27
Figura 3. Esquema representativo de los aspectos principales para la perspectiva de implementación nacional .....	31

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Empresas Colombianas con actividad en reciclaje de RAEE.....	62
Apéndice B . Tecnologías pirometalúrgicas de fundición .....	63
Apéndice C. Diagramas de los procesos pirometalúrgicos implementados por diferentes empresas para la extracción de metales preciosos de RAEE.....	64
Apéndice D. Alternativas de recuperación de metales preciosos de tarjetas electrónicas por procesos hidrometalúrgicos bajo las condiciones de operación de diversos autores.....	69
Apéndice E. Marco practico para el desarrollo del Proceso Analítico Jerarquico.....	74
Apéndice F. Valores de contenido de oro en las respectivas subcategorías de RAEE.....	86
Apéndice G. Determinación de la cantidad de RAEE necesaria para suplir demanda interna de oro(1t) mediante alternativa hidrometalúrgica.....	87

## Resumen

**Título:** Perspectiva de implementación en Colombia de procesos de recuperación de metales preciosos contenidos en residuos electrónicos\*

**Autor:** Marcela de la O. Diaz Alvernia, Sergio Andrés Sanabria Ortiz\*\*

**Palabras Clave:** RAEE, reciclaje, pirometalurgia, hidrometalurgia, oro.

### Descripción:

El creciente desarrollo en innovación tecnológica de los aparatos eléctricos y electrónicos y su progresiva demanda de consumo ha dado lugar a generar y acumular residuos eléctricos y electrónicos que requieren de una efectiva gestión, puesto que una incorrecta manipulación de estos residuos se considera nocivo para el ambiente y la salud pública. Sin embargo, la presencia de metales preciosos en la composición química resulta ser un atractivo económico para su reciclaje, encontrando valor agregado a estos residuos y estableciendo los principios para la economía circular. En este documento se evalúan los procesos desarrollados actualmente para el manejo de residuos eléctricos y electrónicos, con miras a la implementación tecnológica en Colombia. Lo anterior, a partir de los reportes en generación de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) a nivel global y nacional, las etapas de pretratamiento requeridas para los residuos y las alternativas industriales pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas usadas para la extracción de metales preciosos en RAEE. Toda esta información es organizada y evaluada críticamente a través de la metodología del Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process- AHP*) con el fin de analizar la posible implementación nacional de las alternativas de mayor importancia relativa frente a la recuperación de oro.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica y ciencia de los materiales. Director: Mg. Jeferson Owaldo Ruiz Lizarazo. Codirector: Dr. Julio Andrés Pedraza Avella.

### Abstract

**Title:** Perspective of implementation in Colombia of processes of recovery of precious metals contained in electronic waste\*

**Author:** Marcela de la O. Diaz Alvernia, Sergio Andrés Sanabria Ortiz\*\*

**Key Words:** E-waste, recycling, pyrometallurgy, hydrometallurgy, precious metals.

### Description:

The growing development in technological innovation of electrical and electronic equipment and its progressive demand for consumption, has resulted in the generation and accumulation of electrical and electronic waste that require effective management, because improper handling of this waste is considered harmful to the environment and public health. However, the presence of precious metals in the chemical composition turns out to be an economic attraction for their recycling, finding added value to these wastes and establishing the principles for the circular economy. This document evaluates the processes currently developed for the management of electrical and electronic waste, with a view to technological implementation in Colombia. Based on the reports on the generation of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) at global and national level, the pre-treatment stages required for waste and industrial pyrometallurgical and hydrometallurgical alternatives used for the extraction of precious metals in WEEE. All this information is organized and critically evaluated through the methodology of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in order to analyse the possible national implementation of the most important alternatives to gold recovery.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Chemical Physics. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Mgr. Jeferson Oswaldo Ruiz Lizarazo. Codirector: Dr. Julio Andrés Pedraza Avella.

## Introducción

El avance en las tecnologías de la información y las comunicaciones, el crecimiento socioeconómico y el consumo apresurado de productos han acelerado el reemplazo continuo de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) en periodos tan cortos de hasta 22 meses de acuerdo a los reportes de Roman (2015) para el índice de innovación de la sociedad en el 2016. Como consecuencia de ello, a nivel mundial se ha venido presentando un aumento constante de residuos eléctricos y electrónicos (RAEE), los cuales generan grandes complicaciones en su disposición final (Ríos, 2017).

Para el año 2016 la producción global de RAEE fue de 44.7 millones de t. De este valor el 20% de los residuos generados se recolectaron y reciclaron. En Latinoamérica se produce el 9% de los desechos electrónicos de todo el mundo (Universidad Industrial de Santander & Unidad de Planeación Minero Energético, 2018a), siendo Colombia el cuarto mayor productor a nivel mundial de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE).

Los residuos eléctricos y electrónicos consisten en una mezcla compleja de diferentes materiales, donde algunos de ellos contienen una variedad de sustancias tóxicas que pueden contaminar el ambiente y afectar la salud humana si no son correctamente manejados (Kiddee et al., 2013).

Los RAEE más atractivos para el aprovechamiento de materiales corresponden a la categoría de pequeños aparatos de informática y telecomunicaciones, específicamente, las tarjetas electrónicas debido a su amplia gama de componentes metálicos (metales base y valiosos) y componentes poliméricos (Ott, 2008; Baldé et al., 2017; Forti et al., 2020).

Las tecnologías utilizadas para la extracción de metales preciosos contenidos en tarjetas electrónicas se basan principalmente en las técnicas extractivas minero-metalúrgicas, es decir, mediante procesos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos y la combinación de estos dos procesos (Boliden Group, 2016; J. Cui y Zhang, 2008; Kindesjö et al., 2002). Autores como Birich et al., (2019); Hagelüken, (2005); Hagelüken C, (2006); Williams y Drake, (1980) han investigado sobre procesos pirometalúrgicos para la recuperación de metales preciosos de RAEE, mientras que estudios realizados por Petter et al.,(2014); Quinet et al.,(2008); Kasper y Veit (2018b); Li et al., (2018); Ha et al.,(2010); Chang y Halim, (2019) y Kogan y Berkovich (2019) han usado procesos hidrometalúrgicos para la recuperación de oro y plata de los RAEE.

Según el contexto nacional, Colombia inició para el 2007 los primeros estudios liderados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y otras entidades nacionales e internacionales para estimar la cantidad de desechos generados de algunas corrientes RAEE (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Teniendo en cuenta los valores reportados por el informe de Monitor Global E-waste, para el 2014 Colombia produjo 252.000 t de RAEE, es decir, aproximadamente 5,3 kg de los RAEE por habitante. Sin embargo, dicha cifra difiere con la presentada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) (127.000 t/año) puesto que MinAmbiente únicamente tuvo en cuenta residuos de flujo doméstico.

En este trabajo se evaluó mediante el proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process- AHP) las técnicas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas para la recuperación de metales preciosos (especialmente oro) contenidos en los RAEE, obteniendo las tecnologías de mayor importancia relativa a nivel global y analizando la perspectiva de implementación de estas tecnologías en el país bajo criterios ambientales, técnicos, sociales y normativos.

## **1. Objetivos**

### ***1.1 Objetivo General***

Evaluar la posibilidad de implementar en Colombia procesos de recuperación de metales preciosos contenidos en residuos electrónicos

### ***1.2 Objetivos Específicos***

Realizar una revisión bibliográfica que permita conocer los diferentes procesos para la recuperación de metales preciosos contenidos en residuos electrónicos, su grado de desarrollo, ventajas, desventajas y oportunidades de mejora.

Analizar la posibilidad de implementar en Colombia procesos de recuperación de metales preciosos contenidos en residuos electrónicos teniendo en cuenta las condiciones actuales, la geografía y legislación nacional.

## **2. Marco Teórico**

### ***2.1 Definición de los RAEE***

Los AEE son aparatos eléctricos y electrónicos definidos según el Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea como todo aparato que para funcionar debidamente necesitan corriente eléctrica y no superar los 1000 volt en corriente alterna (CA) y 1500 volt en corriente continua (CC). Así mismo, cuando estos aparatos pasan a ser residuos se definen como RAEE (Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos) y se consideran aquellos equipos que han alcanzado su tiempo de servicio y su propietario los ha desechado sin intención de reusarlos (2012/19/UE, 2012; Step, 2014).

### ***2.2 Clasificación de los RAEE***

El parlamento europeo (2012/19/UE, 2012) clasifica los AEE desde el punto de vista de la gestión de residuos, es decir, considerando las posibles fracciones de recolección y separación de los RAEE (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Dicha clasificación comenzó a regir a partir del 15 de agosto de 2018, en donde organizan a los AEE en seis categorías de RAEE como se observa en la Tabla 1.

Cada categoría que se menciona en la Tabla 1 presenta cantidades de residuos y valores económicos diferentes, así como diferentes efectos sobre la salud y medio ambiente en consecuencia a su mala gestión. Es por esto que el manejo (recolección, logística y disposición final) de cada categoría varía (Baldé et al., 2017).

**Tabla 1***Clasificación de los aparatos eléctricos y electrónicos según el Parlamento Europeo*

Categorías RAEE	AEE considerados en la categoría
1. Aparatos de intercambio de temperatura	Neveras, congeladores, aparatos que suministran automáticamente productos fríos, aparatos de aire acondicionado, equipos de deshumidificación, bombas de calor, radiadores de aceite y otros aparatos de intercambio de temperatura que utilicen fluidos diferentes al agua.
2. Monitores, pantallas, y aparatos con pantallas de superficie superior a los 100 cm <sup>2</sup>	Pantallas, televisores, marcos digitales para fotos con tecnología LCD, monitores, computadores portátiles, incluidos los de tipo notebook y tabletas.
3. Lámparas	Lámparas fluorescentes rectas, fluorescentes compactas y fluorescentes; lámparas de descarga de alta intensidad,
4. Grandes aparatos (con una dimensión exterior superior a 50 cm)	Lavadoras, secadoras, lavavajillas, cocinas, cocinas y hornos eléctricos, hornillos eléctricos, placas de calor eléctricas, luminarias; aparatos de reproducción de sonido o imagen, equipos de música (excepto los órganos de tubo instalados en iglesias), máquinas de hacer punto y tejer, grandes ordenadores, grandes impresoras, copiadoras, grandes máquinas tragamonedas, productos sanitarios de grandes dimensiones, grandes instrumentos de vigilancia y control, grandes aparatos que suministran productos y dinero automáticamente, paneles fotovoltaicos.
5. Pequeños aparatos (sin ninguna dimensión exterior superior a 50 cm)	Aspiradoras, máquinas de coser, luminarias, hornos microondas, aparatos de ventilación, planchas, tostadoras, cuchillos eléctricos, hervidores eléctricos, relojes, maquinillas de afeitar eléctricas, básculas, aparatos para el cuidado del pelo y el cuerpo, calculadoras, aparatos de radio, videocámaras, aparatos de grabación de vídeo, cadenas de alta fidelidad, instrumentos musicales, aparatos de reproducción de sonido o imagen, juguetes eléctricos y electrónicos, artículos deportivos, ordenadores para practicar ciclismo, submarinismo, carreras, remo, etc., detectores de humo, reguladores de calefacción, termostatos, pequeñas herramientas eléctricas y electrónicas, pequeños productos sanitarios, pequeños instrumentos de vigilancia y control, pequeños aparatos que suministran productos automáticamente, pequeños aparatos con paneles fotovoltaicos integrados.
6. Aparatos de informática y de telecomunicaciones pequeños (sin ninguna dimensión exterior superior a los 50 cm)	Teléfonos móviles, GPS, calculadoras de bolsillo, encaminadores, ordenadores personales, impresoras, teléfonos.

**Nota:** Recuperado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

### 2.3 Composición de los RAEE

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos son diversos y complejos en términos de su composición, pueden contener más de 1000 sustancias diferentes los cuales son tanto elementos valiosos como tóxicos. Sus componentes están compuestos principalmente de metales ferrosos, no ferrosos, plásticos, cerámicos, vidrios entre otros (Kiddee et al., 2013). En la Tabla 2 se puede ver la composición de las categorías con los flujos más representativos dentro de los RAEE (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

**Tabla 2**

*Composición porcentual de los materiales presentes en los RAEE*

Material	Grandes electrodomésticos	Pequeños electrodomésticos	TIC y electrónica de consumo	Lámparas
Metal ferroso	43	29	36	-
Aluminio	14	9,3	5	14
Cobre	12	17	4	0,22
Plomo	1,6	0,57	0,29	-
Cadmio	0,0014	0,0068	0,018	-
Mercurio	0,000038	0,000018	0,00007	0,02
Oro	0,00000067	0,00000061	0,00024	-
Plata	0,0000077	0,000007	0,0012	-
Paladio	0,0000003	0,00000024	0,00006	-
Indio	0	0	0,0005	0,0005
Plásticos bromados	0,29	0,75	18	3,7
Plásticos	19	37	12	0
Vidrio con plomo	0	0	19	0
Vidrio	0,017	0,16	0,3	77
Otros	10	6,9	5,7	5
Total	100	100	100	100

**Nota:** Adaptado de: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017. Política nacional, gestión integral de residuos).

De acuerdo a la Tabla 2 los residuos TIC son los que presentan mayor contenido de metales valiosos como oro (Au) y plata (Ag). De estos residuos aproximadamente el 70% del peso está entre los metales y plásticos, donde los metales preciosos corresponden a un 2.0 % del peso total de las RAEE de categoría TIC (Ott, 2008). Las tarjetas de circuito impreso (PCBs) son el componente principal de los equipos y aparatos de las TIC (celulares, computadores y tablets) ya que se utilizan para lograr conexiones mecánicas y eléctricas.

La cantidad de oro y plata contenidos en las tarjetas de circuito impreso es casi diez veces más alta que la cantidad contenida en fuentes primarias de alta ley (minerales de oro nativo, oro asociado a sulfuros y telurios de oro (Mihovilovic, 2001), lo que confiere un alto potencial desde el punto de vista ambiental y económico (Caffarey, 2012; Hagelucken C, 2006; Ott, 2008; Roman, 2015; Williams & Drake, 1980). En la Tabla 3 se describen las diferentes concentraciones de metales presentes en las tarjetas electrónicas de mayor consumo.

**Tabla 3**

*Concentraciones de los metales en tarjetas electrónicas de mayor consumo*

Tipo de residuo	Concentración							
	Fe (%)	Cu (%)	Al (%)	Pb (%)	Ni (%)	Ag(ppm)	Au(ppm)	Pd(ppm)
Board TV	28	10	10	1	0.3	280	20	10
Board PC	7	20	5	0.3	1	1000	250	110
Celulares	5	13	1	0.14	0.1	1380	350	210
Dispositivos de audio	23	21	1	0.3	0.03	150	10	4
Reproductores de DVD	62	5	2	0.1	0.05	115	15	4
Calculadoras	4	3	5	2.2	0.5	260	50	5

**Nota:** Adaptado de Unidad de planeación minero-energética (2018).

Las tarjetas electrónicas están compuestas por metales base, metales escasos, metales preciosos y metales pesados, además de algunos componentes orgánicos (conocidos como retardantes de llama) que al someterse a temperaturas entre 270°C-280°C forman dioxinas, furanos y compuestos orgánicos bromados que queda en el ambiente debido al tratamiento térmico, afectando la capa de ozono y la salud pública ( Puckett, 2002; Duan et al., 2011; Agency, 2015).

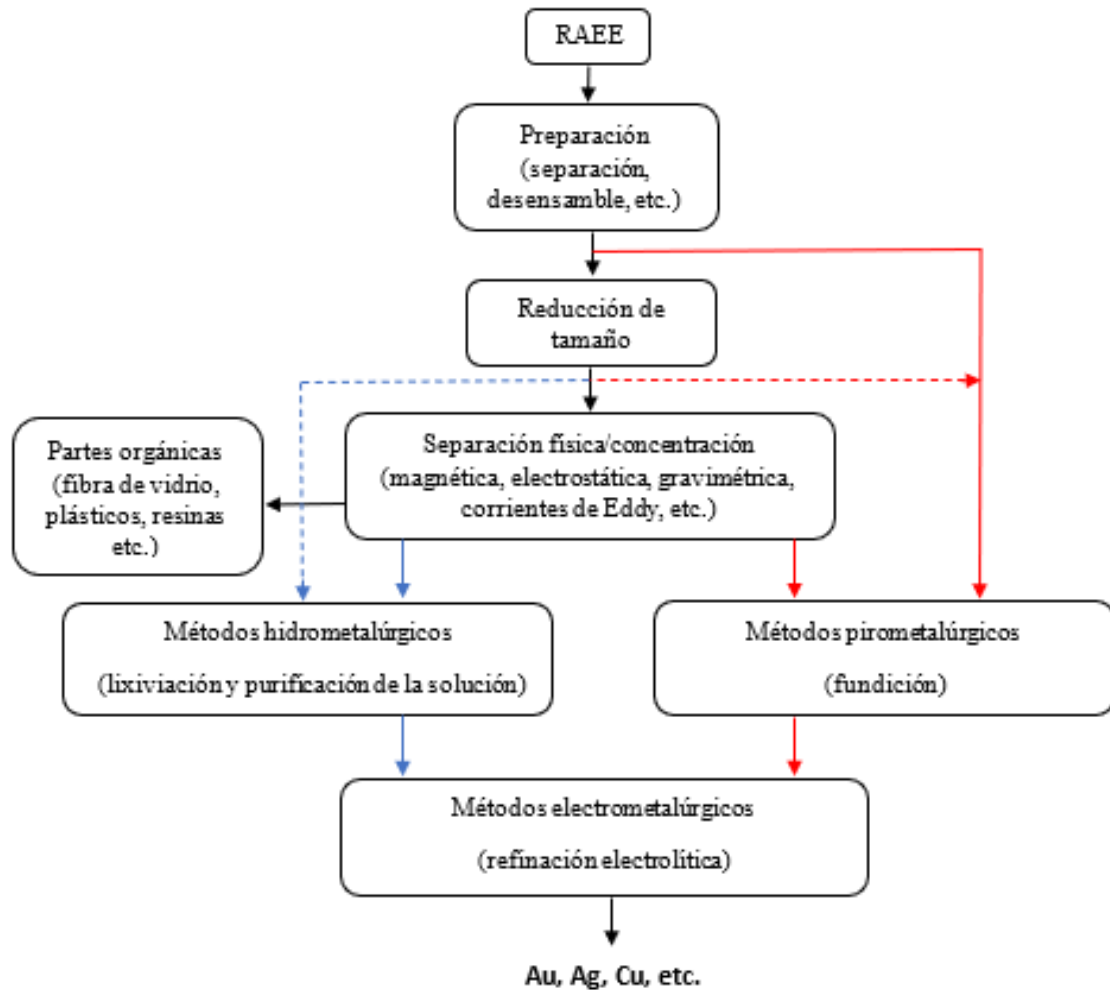
## ***2.4 Procesos metalúrgicos para la extracción de metales preciosos de los RAEE***

### ***2.4.1 Pretratamiento de los RAEE***

La recuperación de metales a partir de los RAEE requiere de etapas de pretratamiento (separación de diferentes componentes) antes de los procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos (Akcil et al., 2015). El pretratamiento involucra tres etapas generales como se observa en la Figura 1: desensamble, reducción de tamaño de partícula y separación. Previo al desensamble se debe hacer un análisis para definir componentes reutilizables, valiosos y peligrosos, para extraerlos primero, como por ejemplo los componentes poliméricos y las soldaduras (Duan et al., 2001; Guo et al., 2016; Hao et al., 2020).

**Figura 1**

*Diagrama de flujo representativo de los procesos que pueden ser aplicables para la recuperación de metales preciosos de los RAEE*



*Nota:* Recuperado y adaptado de (Akcil et al., 2015).

#### **2.4.2 Procesos pirometalúrgicos de fusión**

Actualmente la vía pirometalúrgica es la que domina la extracción de metales preciosos en los RAEE (Khaliq et al., 2014). Los RAEE son tratados en hornos de fundición de forma continua o por lotes (dependiendo de la tecnología y condiciones de producción establecidas) los plásticos se eliminan por combustión y finalmente se forma una fase de escoria con algunos óxidos

metálicos junto con una fase metálica (Cobre o plomo) en donde quedan segregados los metales preciosos (Cui y Zhang, 2008). En el Apéndice B se presentan las tecnologías pirometalúrgicas industriales para la recuperación de metales preciosos a partir de los RAEE y en el Apéndice C los diagramas de los principales procesos implementados. A continuación, se presenta una descripción de las distintas tecnologías de fundición.

**2.4.2.1 Tecnología Noranda.** La *Tecnología Noranda* es usada por la empresa Noranda ubicada en Quebec, Canadá. La empresa inició sus procesos de reciclaje en el año 1970 con el horno de fundición Horne, denominado como el mayor procesador de chatarra electrónica de América del norte. La fundición Horne procesa anualmente 840.000 t de materiales entre concentrado de cobre, chatarra de cobre y chatarra electrónica (130.000 t/año), con el fin de obtener ánodos de cobre de hasta 99,1% de pureza, además de metales preciosos y metales del grupo del platino (Glencore, s.f.)

La tecnología de fundición usada en Noranda se conoce como reactor Noranda, la cual consiste en fundir y convertir el alimento (RAEE y concentrado) en cobre mate a partir de la oxidación del concentrado con una corriente de aire que se inyecta directamente al baño fundido por medio de las toberas. El reactor Noranda consiste en un cilindro horizontal basculante equipado con toberas localizadas entre la boca de carga y la boca de salida de gases (Riveros, 2009). El cobre mate es el producto de la fundición del reactor Noranda con 70-75% de Cu, este producto se dirige al convertidor Noranda para transformar el mate a un cobre de 98% de pureza y finalmente al horno anódico para obtener cobre con un 99,1 % de pureza. Este producto final es llevado a la refinería canadiense de cobre (Canadian Copper Refinery CCR), para allí obtener cobre al 99,99% de pureza, lingotes de oro y plata y concentrados de platino y paladio (Glencore, s.f.). Esta

tecnología se caracteriza por su alta velocidad de reacción y baja producción de polvos en los gases (Saravia, 2019).

**2.4.2.2 Tecnología TSL (Top Submerged Lance).** Esta tecnología es adecuada para el procesamiento de RAEE y concentrados de cobre secundarios. Consiste en un recipiente vertical cilíndrico al que se le inserta una lanza de combustión (inyección de combustible, aire y oxígeno), sumergida en un baño fundido (concentrado y fundente). El producto del proceso es cobre, sin embargo, los metales preciosos se recuperan en un proceso posterior de refinación electrolítica (Hughes et al., 2019).

Con la tecnología TSL se tiene el control preciso de la química del proceso, la temperatura y el potencial de oxígeno del baño, además de presentar una alta velocidad de reacción, baja producción de polvos y altas concentraciones de dióxido de sulfuro (Wood et al., 2010; Saravia, 2019).

**2.4.2.2.1 Kosaka Smelthing & Refining Co.** La planta de reciclaje y fundición Dowa-Kosaka Smelthing & Refining Co. Tda. se encuentra ubicada en Kosaka (Japón) se dedica a la producción de plomo, cobre, zinc, metales preciosos y metales raros a partir del año 2006 con el uso de la tecnología de fundición TSL (Co., 2008).

Hughes et al. (2019) manifiesta que la planta tiene una capacidad para procesar hasta 150.000 t anuales de alimento. Para el 2018 la planta de Kosaka permitió recuperar 5569 Kg de Au, 432 t de Ag, 9061 t de Cu, 21,5 t de Pb y 487t de Sn (Siegmund et al., 2020). La tecnología Outotec Ausmelt TSL de Dowa acepta teléfonos móviles y tarjetas de circuito eléctrico como parte del alimento al horno, además de minerales, residuos de la fundición de zinc de Akita, residuos de

incineración y materiales de baja calidad que contengan metales valiosos (Holdings, 2010; Kaya, 2019).

**2.4.2.2.2 *Global resource and materials.*** Global Resources and Materials (GRM) es un grupo que desde el 2010 ha adoptado la tecnología Outotec Ausmelt TSL, con la cual procesa 110.000 t al año de RAEE, alambres, automóviles y subproductos de fundición para la recuperación de metales valiosos como el oro, la plata y el cobre (Global Resources and materials s.f.); Hughes et al., 2019).

**2.4.2.2.3 *Umicore.*** Umicore está constituida como una de las instalaciones de reciclaje y refinación de metales preciosos más grandes del mundo, la cual puede tratar cerca de 350.000 t/año de flujos de residuos que contienen metales preciosos y metales no ferrosos (escorias, lodos anódicos, matas de cobre, y productos industriales como chatarra electrónica, catalizadores de automóviles y lingotes) (Hagelucken, 2006; Umicore, s.f.).

Las operaciones de metales preciosos se centran en la fundición (TSL Isasmelt), lixiviación y electrorrefinación de cobre y la refinería de metales preciosos (oro, plata y metales del grupo del platino). Para el 2007 la producción fue de aproximadamente 30 t Au, 37 t de metales del grupo del platino, 1.000 t Ag y más 68.500 t de otros 10 metales (Hagelueken, 2006). Umicore dispone de sistemas de purificación de gases y agua, además de la recuperación de azufre para su transformación en ácido sulfúrico (Hagelucken et al., 2010).

**2.4.2.2.4 Aurubis.** La planta de Aurubis en Lünen tiene una entrada total de materia prima de 390.000 t de la cual 300.000 t es material reciclado de distintos orígenes (Aurubis, s.f.). Esta planta tiene el “sistema integrado de reciclaje Kayser” (Kayser Recycling System - KRS) en el cual se procesan materiales secundarios de cobre-plomo-estaño (chatarra, material triturado, residuos, lodos, chatarra electrónica) esto, mediante la combinación de procesos de fundición y refinación de Cu y Pb (Zschiesche et al., 2018).

El procesamiento secundario de Cu comprende algunas etapas principales como son: Horno TSL Isasmelt para fundición reductora, horno de sedimentación para recuperación de cobre, horno Pb-Sn para la producción de aleaciones Pb-Sn, TBRC (Convertidor rotatorio soplado superior) para la conversión de cobre, horno de ánodos y refinación electrolítica para la obtención de metales preciosos (Flores et al., 2020).

**2.4.2.3 Tecnología Outokumpu Flash.** Esta tecnología presenta las operaciones de fundición y convertidor, el concentrado y el oxígeno son inyectados dentro del horno, creando una suspensión donde ocurre la reacción de oxidación. Uno de las principales ventajas de esta tecnología es el uso eficiente de la energía (la oxidación del concentrado genera aporte calórico) y la alta tasa de recuperación de azufre (Saravia, 2019).

**2.4.2.3.1 JX Nippon Mining Metals Corporation.** JX NIPPON MINING METALS CORPORATION desarrolla procesos de reciclaje y tratamientos de desechos industriales, centrados en el cobre (desarrollo de recursos, fundición-refinación, materiales electrónicos y servicios ambientales). Para esto emplea la tecnología Outokumpu Flash para la fundición de metales no ferrosos y la recuperación de metales preciosos (Jae-Hyun et al., 2011). Cada año se procesa aproximadamente 100.000 t de cobre y metales preciosos a partir de fuentes de residuos como partes electrónicas, tarjetas de circuito impreso, y partes que contienen oro del cual 6 t al año de Au es recuperado (Jae-Hyun et al., 2011).

#### **2.4.2.4 Tecnología Kaldo TBRC**

**2.5.2.4.1 Boliden Rönnskär.** La planta de fundición Boliden Rönnskär ubicada en Skellefteå (Suecia) trabaja con la tecnología “horno KALDO” que fue especialmente desarrollada para la recuperación de metales a partir de materias primas secundarias de diferentes purezas (Mark et al., 2000; Zhang et al., 2016; Boliden Group, 2019). Tiene la capacidad de procesar 120.000 t anuales de reciclaje de material eléctrico (principalmente tarjetas de circuito de computadores y teléfonos móviles) (Boliden, s.f.).

De acuerdo con Kindsjö (2002), la carga de chatarra electrónica corresponde al 50-60% del total de toda la cantidad procesada. Para el 2019, la producción anual de oro y plata fue de

12.000 kg (5000 kg provienen de chatarra electrónica) y 384.000 kg (96.000 kg provienen de chatarra electrónica), respectivamente (Boliden, s.f.).

La chatarra electrónica de alto contenido de cobre puede ser procesada directamente en el nuevo horno E-kaldo (Adaptado a partir del 2012) (Boliden Group, 2016). El horno E-kaldo tiene la capacidad de procesar 100.000 t anuales de chatarra eléctrica y electrónica de manera continua sin la necesidad de añadir energía adicional puesto que los polímeros contenidos en esta generan el calor suficiente para la fundición (Boliden Group, 2016; Boliden, s.f.).

### ***2.4.3. Procesos hidrometalúrgicos***

En las últimas dos décadas, han tomado fuerza las investigaciones sobre la recuperación de metales preciosos de los RAEE mediante procesos hidrometalúrgicos. El proceso se basa en el uso de agentes lixiviantes en soluciones de ácidos fuertes y bases (Cui y Zhang, 2008). El tratamiento hidrometalúrgico inicia con la lixiviación de los residuos mediante ácido sulfúrico para la extracción de cobre de los RAEE esto se debe principalmente a la selectividad de los agentes lixiviantes (Hao et al., 2020; Oraby et al., 2019). Posteriormente, a los residuos sólidos obtenidos en esta etapa se les realiza una segunda lixiviación mediante agentes como el cianuro, la tiourea, el tiosulfato o compuestos halogenados con el fin de recuperar los metales preciosos (oro y plata)(Hao et al., 2020; Quinet et al., 2008; Sahin et al., 2015).

En el Apéndice D se presentan las principales alternativas de recuperación de metales preciosos de tarjetas electrónicas por procesos hidrometalúrgicos bajo las condiciones de operación de diversos autores. A continuación, se comenta una descripción de los distintos métodos de lixiviación a partir de su agente lixiviante:

**2.4.3.1. Cianuro.** Las sales de ácido cianhídrico como NaCN y KCN han sido usadas por más de un siglo para la extracción de oro y plata en los procesos metalúrgicos. Debido a su alta disponibilidad, eficiencia de extracción, bajo costo y capacidad de uso por los seres humanos, sigue siendo el mayor lixivante para la extracción de metales preciosos (Akcil, 2010; Mudder et al., 2008; International Cyanide Management Code for the gold mining industry, s.f.).

EL aire enriquecido con oxígeno, el pH, la temperatura, la concentración de cianuro empleado, la presencia de iones/cationes en la interface S/L, la velocidad de agitación y la superficie de contacto son los principales factores a controlar en el proceso de cianuración (Ahamed y Meththika, 2019; Marsden y House, 2006).

Una inadecuada manipulación del cianuro ( $\text{CN}^-$ ) puede resultar nocivo para el ser humano y el ambiente por su alta toxicidad (Petter et al., 2014; Tuncuk et al., 2012). Sin embargo, las regulaciones de este agente son lo suficientemente específicas para una manipulación segura (Akcil et al., 2015; Cui y Zhang, 2008; Zhang y Xu., 2016).

**2.4.3.2. Tiosulfato.** El tiosulfato ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ) es un ion de baja toxicidad que posee un costo relativamente bajo en el mercado. Este ion en solución y en presencia de oxígeno actúa como ligando en la disolución del oro para formar un complejo estable ( $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{-3}$ ) (Xiang et al., 2018). El complejo de tiosulfato permanece estable en medio neutro y alcalino bajo las condiciones adecuadas de pH y concentración de tiosulfato, amoníaco, cobre y oxígeno (Chu et al., 2003; Grosse et al., 2003; Jeffrey, 2001; Kasper y Veit, 2018; Sitando et al., 2018). La velocidad de reacción resulta ser moderadamente mayor a la del cianuro (Zhang et al., 2012).

La principal limitación en el sistema de lixiviación con tiosulfato es la adición de cobre y amoníaco que actúan como catalizadores. La introducción de iones cobre en la solución puede acelerar la tasa de lixiviación de oro, pero causa una oxidación masiva de tiosulfato. Por otra parte,

la presencia de amoníaco debe ser una consideración a tener en cuenta debido a las preocupaciones ambientales (Yang et al., 2019).

**2.5.3.3. Tiourea.** La tiourea es un agente lixivante que ha llevado a estudiarlo por el menor impacto ambiental y presentar una tasa de lixiviación moderadamente mayor a la cinética del tiosulfato y cianuro (Zhang et al., 2012). Por esto la recuperación de oro y plata de minas, concentrados y residuos resulta prometedor, debido también a la alta selectividad de metales preciosos. Sin embargo, presenta algunas preocupaciones para su aplicación debido a su naturaleza cancerígena (Gönen et al., 2007; Gurung et al., 2013).

La tiourea  $CS(NH_2)_2$  forma un complejo catiónico con el oro en medio ácido que puede disolver hasta 99% de oro (Ghosh et al., 2015). El ion férrico introducido al sistema de lixiviación con tiourea resulta ventajoso en la recuperación de oro y plata, debido a que el ion férrico oxida fácilmente la tiourea (Gönen et al., 2007) e incrementa significativamente el potencial redox de la solución (hasta 12g/l de tiourea y 0.1g/L de ion férrico) (Birloaga et al., 2013).

**2.5.3.4. Halógenos.** Se conoce como agentes lixiviantes halogenados al cloruro, bromuro y yoduro. Estos han sido estudiados los últimos años como alternativas a la cianuración para la extracción selectiva de oro en materiales de residuos electrónicos (Sahin et al., 2015; Konyratbekova et al., 2015). La principal ventaja de estos reactivos halogenados es su alta capacidad oxidante, lo que conduce a una elevada velocidad de disolución de oro en comparación a la lixiviación con cianuro en condiciones alcalinas (Cui y Anderson, 2020).

La capacidad de lixiviación de los agentes halogenados depende de las condiciones químicas de la solución. Sin embargo, el oro presenta mayor estabilidad con el anión de  $I^-$ , seguido del  $Br^-$  y  $Cl^-$  (Hiskey et al., 1988; Konyratbekova et al., 2015).

El sistema yodo/yoduro ha demostrado tener velocidad moderadamente mayor de lixiviación que el cianuro, presentar selectividad por el oro, no corrosivo, fácil regeneración del yoduro y adecuado para lixiviación in-situ. Sin embargo, la mayor desventaja de este agente es el alto consumo de reactivo y el alto costo del mismo (Liang & Li, 2019; Han et al., 2017; Zhang et al., 2012).

El bromuro es también un agente fuertemente oxidante que demuestra mayores tasas de disolución de oro que el cianuro en condiciones acidas (Birich et al., 2018). Las ventajas de este agente oxidante es la alta velocidad de lixiviación siendo moderadamente mayor que la del cianuro y la adaptabilidad a una amplia gama de valores de pH. Sin embargo, su uso es limitado y no ha permitido su uso a nivel industrial como agente lixivante dado que el bromo tiene una presión de vapor a 10 kPa a 0°C y 28 kPa a 35°C, lo que repercute en altos costos para equipos especiales que garanticen la seguridad en el proceso de lixiviación (Liang y Li, 2019; Zhang et al, 2012).

Finalmente, el sistema cloro/cloruro es el único que ha sido utilizado a escala industrial. Sin embargo, la lixiviación con cloruro requiere de equipos especiales de acero inoxidable recubierto que resistan condiciones altamente corrosivas. Además, el cloro gaseoso es muy venenoso por lo que debe ser controlado para evitar riesgos en la salud (Khaliq et al., 2014; Zhang et al., 2012; Cui y Zhang, 2008).

### **3. Elección de las alternativas pirometalúrgica e hidrometalúrgica**

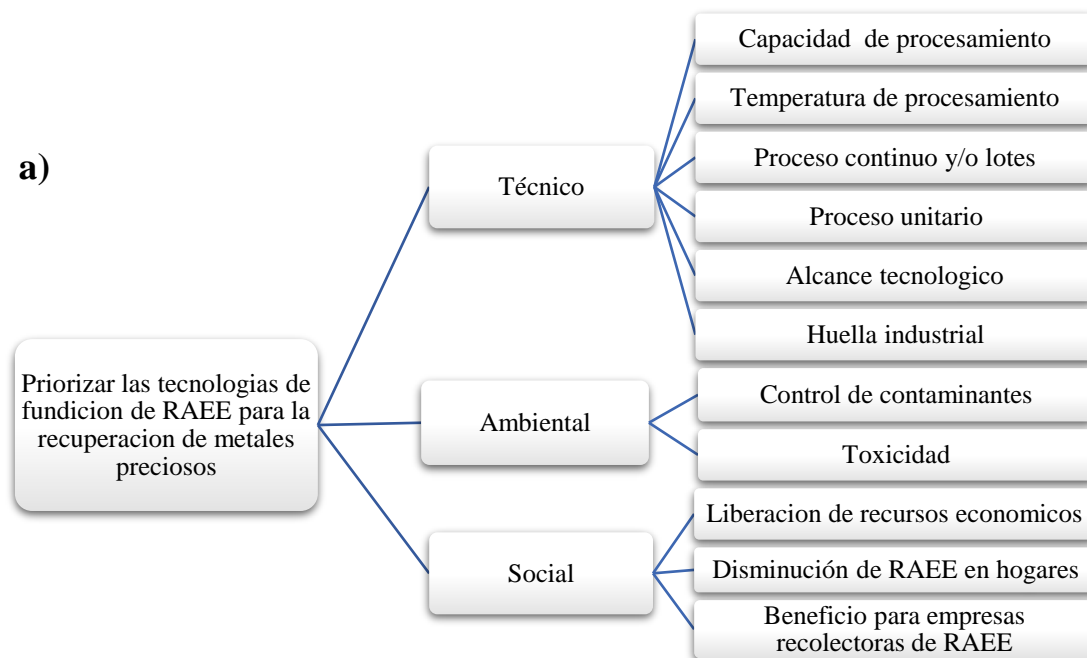
Uno de los métodos más comunes para la toma de decisiones con múltiples criterios es el Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process* - AHP) (Salas, 2011; Yepes, 2018; Rojas et al., 2019). En este estudio se aplica este método para evaluar las alternativas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas con base en el análisis previamente realizado teniendo en

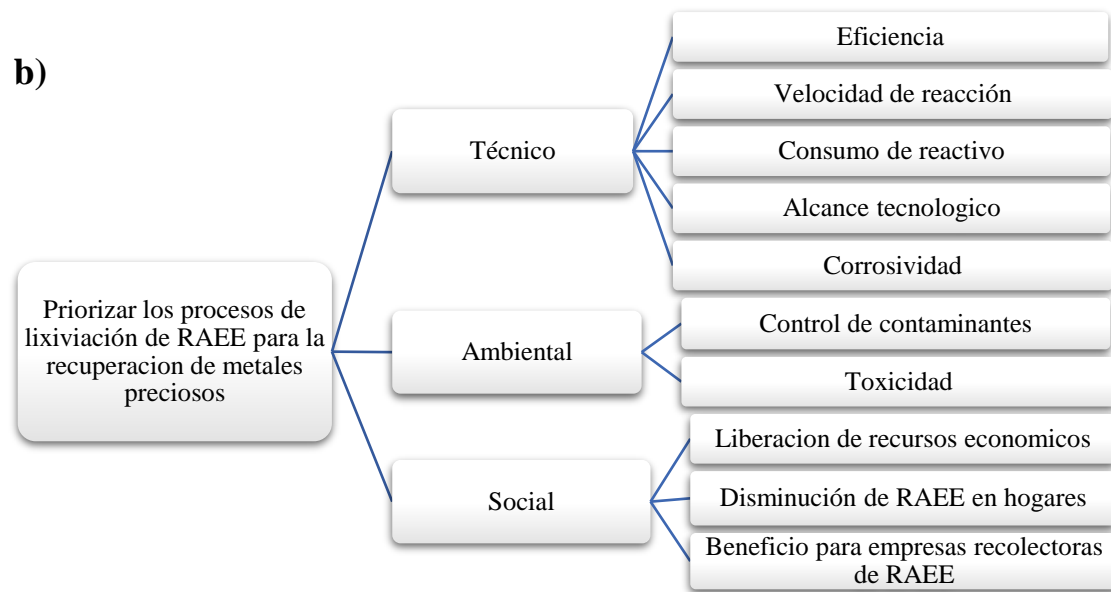
cuenta consideraciones técnicas propias de cada proceso, el impacto ambiental y el aspecto social, esto con el fin de obtener la alternativa de mayor importancia relativa.

Estos criterios se analizan para evaluar la factibilidad de implementación del proyecto, se estudian cuestiones relacionadas a la viabilidad del proceso técnico, el cuidado por los recursos naturales para actuar con responsabilidad ambiental y el impacto social del proyecto y así desarrollar un proyecto sostenible. En la Figura 2 se evidencian las estructuras jerárquicas que es una etapa primordial para la aplicación del método AHP.

**Figura 2**

*Árbol jerárquico de alternativas, a) Pirometalúrgicas, b) Hidrometalúrgicas*





De acuerdo a la Figura 2, las categorías del AHP se organizan de forma jerárquica, estando en primer lugar el objetivo, el según plano los criterios y finalmente los subcriterios, donde cada categoría es dependiente una de otra.

En este caso se cuenta con dos objetivos, uno para la vía pirometalúrgica y otro para la vía hidrometalúrgica. A su vez, cada objetivo consta de 3 criterios: técnico, ambiental y social, que definen los aspectos principales en la evaluación de la alternativa. Además, los subcriterios varían según las condiciones de cada proceso metalúrgico. A partir de lo anterior, es posible con el método AHP evaluar las alternativas de fundición y lixiviación para la recuperación de metales preciosos en los RAEE. En el Apéndice E se presenta el desarrollo completo del método AHP para la selección de las alternativas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas.

La Tabla 4 resume los resultados obtenidos del proceso AHP para la evaluación de las alternativas de los procesos pirometalúrgicos.

**Tabla 4**

*Importancia relativa de las diferentes alternativas pirometalúrgicas*

Subcriterios	Técnico						Ambiental			Social			IR
	CP	TP	PU	AT	HI	CL	CC	TX	LRE	DRH	BER		
Auto vector final	0,16	0,13	0,09	0,11	0,10	0,07	0,23	0,05	0,02	0,02	0,02		
<b>MATRIZ PROPIA DE ALTERNATIVAS</b>													
TSL Ausmelt	0,30	0,16	0,20	0,20	0,08	0,35	0,33	0,25	0,20	0,20	0,20	0,24	
TSL Isasmelt	0,25	0,16	0,20	0,20	0,08	0,35	0,33	0,25	0,20	0,20	0,20	0,23	
Kaldo TBRC	0,30	0,46	0,20	0,20	0,08	0,18	0,17	0,25	0,20	0,200	0,20	0,23	
Convertidor Noranda	0,06	0,14	0,2	0,20	0,39	0,06	0,11	0,13	0,20	0,20	0,20	0,15	
Outokumpu Flash	0,03	0,14	0,20	0,20	0,39	0,06	0,05	0,13	0,20	0,20	0,20	0,14	

**Nota:** CP: Capacidad de procesamiento; TP: Temperatura de proceso; PU: Proceso unitarios; AT: Alcance tecnológico; HI: Huella industrial; CL: Continuo/Lotes; CC: Control de contaminantes; TX: Toxicidad; LRE: Liberación de recursos económicos; DRH: Disminución de RAEE en hogares; BER: Beneficio empresas recolectoras.

Los resultados evidencian que la tecnología TSL Ausmelt es la alternativa con mayor importancia relativa esto se debe principalmente al adecuado control de contaminantes de sus procesos y las empresas industriales como GRM y Dowa poseen una capacidad de procesamiento principalmente de los RAEE en la alimentación del horno. Cabe aclarar que la tecnología TSL Isasmelt es similar a la tecnología TSL Ausmelt, pero divergen en su patente de utilidad. Además, las empresas reconocidas que emplean esta tecnología como UMICORE y Aurubis manejan una capacidad de procesamiento de los RAEE cercana al 10% de todo el alimento mixto (Petter et al., 2014; Tuncuk et al., 2012).

En la Tabla 5 se resumen los resultados del proceso para la evaluación de las alternativas hidrometalúrgicas

**Tabla 5**

*Importancia relativa de las diferentes alternativas hidrometalúrgicas*

Subcriterios	Técnico					Ambiental		Social			IR
	EF	VR	CR	CRR	AT	CC	TX	GRE	DRH	BER	
Autovector final	0,06	0,04	0,28	0,11	0,15	0,05	0,23	0,05	0,02	0,01	
<b>MATRIZ PROPIA DE ALTERNATIVAS</b>											
Cianuro	0,21	0,05	0,51	0,27	0,53	0,03	0,03	0,17	0,17	0,17	0,29
Tiosulfato	0,05	0,12	0,06	0,27	0,05	0,22	0,22	0,17	0,17	0,17	0,14
Tiourea	0,20	0,35	0,06	0,11	0,14	0,22	0,22	0,17	0,17	0,17	0,15
Cloruro	0,31	0,24	0,20	0,03	0,14	0,08	0,08	0,17	0,17	0,17	0,14
Ioduro	0,16	0,14	0,06	0,27	0,10	0,41	0,41	0,17	0,17	0,17	0,20
Bromuro	0,07	0,10	0,10	0,06	0,05	0,05	0,05	0,17	0,17	0,17	0,08

**Nota.** EF: eficiencia; VR: velocidad de reacción; CR: consumo de reactivo; CRR: corrosividad; AT: alcance tecnológico; LR: liberación de recursos; DRH: disminución de RAEE en hogares; BER: beneficio empresas recolectoras; CC: control de contaminantes; TX: toxicidad; IR: importancia relativa

De acuerdo al análisis de la Tabla 5, se evidencia que el cianuro es la alternativa con mayor importancia relativa debido principalmente a la viabilidad económica que presenta y su alcance tecnológico. Sin embargo, al presentar alta toxicidad motiva su remplazo por lixiviantes no cianurados. Agentes lixiviantes como el Ioduro o la tiourea se han destacado como posibles reemplazos del proceso de cianuración, no obstante, se requiere de mayor investigación para el control de las variables de operación y lograr un alcance tecnológico a nivel industrial (Zhang et al, 2012).

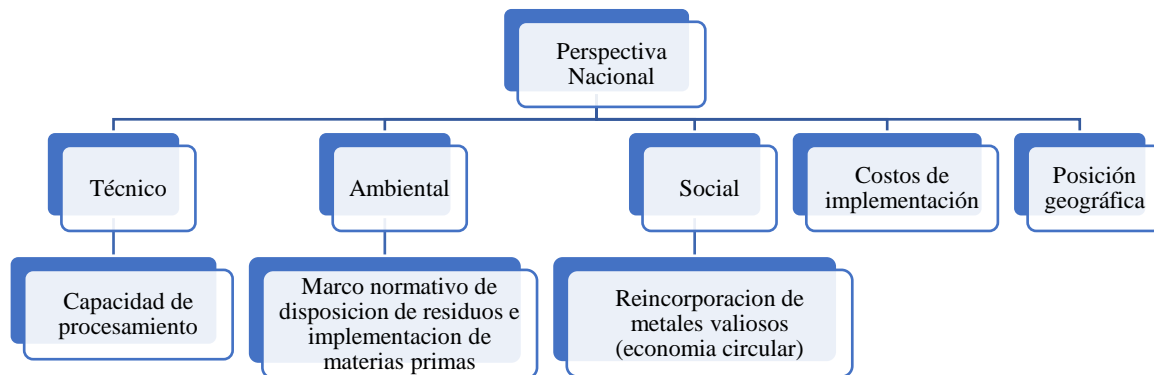
#### 4. Perspectiva nacional

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante el método AHP tanto de las tecnologías pirometalúrgicas como para las tecnologías hidrometalúrgicas, se han definido los aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos para la perspectiva de implementación a nivel

nacional de las dos alternativas con mayor importancia relativa respecto a los criterios establecidos. En la Figura 3 se muestran los aspectos principales de la perspectiva nacional para definir si las alternativas de mayor peso son factibles para implementarlas a nivel nacional.

### Figura 3

*Esquema representativo de los aspectos principales para la perspectiva de implementación nacional*



#### 4.1. Aspecto técnico

De acuerdo al informe de The Global E-waste Monitor, (2020), para 2019, la producción anual de los RAEE fue 53.6 millones de toneladas, es decir, aumentó 8,9 millones de toneladas con respecto al año 2016, de los cuales 9,3 millones de t fueron recogidas y recicladas. El comportamiento demuestra un crecimiento de los RAEE en los tres años de 20%. No obstante, la recuperación y reciclaje de los mismos para 2019 disminuyó 2,7% con respecto al 2016 (Forti et al., 2020).

En el contexto latinoamericano, Colombia se encuentra en el cuarto lugar de mayor generador de residuos electrónicos por debajo de Brasil, México y Argentina (Federico et al., 2015; Roman, 2015). La generación de los RAEE en Colombia tuvo un aumento del 14% para el 2019

con respecto al año 2016, lo que representa una problemática ambiental real y creciente de generación de los RAEE (Baldé et al., 2017; Forti et al., 2020).

Obtener datos precisos de la cantidad de residuos eléctricos y electrónicos generados por las TIC en Colombia es complejo esto se debe al elevado uso del reciclaje informal por parte del consumidor, lo que conlleva a la indebida práctica de su disposición final (Universidad Industrial de Santander & Unidad de Planeación Minero Energético, 2018b), además de que, los sistemas de recolección y gestión de RAEE aún se encuentran en proceso de consolidación y su cobertura solo abarca las principales capitales, dejando a un lado los municipios pequeños y medianos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Según Fajardo et al. (2020) y la Política Nacional de Gestión integral de los RAEE (2017), Colombia produce en promedio al año 16% de los RAEE de equipos de informática y telecomunicaciones (TIC). Es decir, de las 318.000 t de los RAEE producidas para el 2019, 50.880 t/año corresponden a los RAEE de TIC. Sin embargo, la capacidad instalada en el país de gestión formal de los RAEE se calcula en 14.000 t/año (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), labor realizada por 36 empresas del país (Apéndice A), distribuidas en las principales ciudades entre las cuales se encuentran Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla y Bucaramanga.

Estas empresas se encuentran legalmente constituidas y con licencia ambiental para el aprovechamiento y disposición de una o varias categorías de los RAEE. De ellas, solo una cuarta parte realizan actividades de desensamble, recuperación y aprovechamiento local de materiales ferrosos y no ferrosos. Adicionalmente, los componentes de mayor valor como las tarjetas de circuito impreso y las baterías son exportados (principalmente China, Estados Unidos y Hong Kong) debido a las complejas características de extracción de material valioso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Mientras que en las tres cuartas partes de las empresas

con licencia ambiental priman los procesos de reciclaje manual con tecnologías simples de infraestructura (Universidad Industrial de Santander [UIS] y Unidad de Planeación Minero Energético [UPME], 2018b).

Encontrar la posibilidad de abastecer la demanda de consumo interno de oro en Colombia a partir del reciclaje y tratamiento de residuos eléctricos y electrónicos generaría un impacto nacional positivo al reducir la demanda de oro de concentrados de mineral y la acumulación de los RAEE, además de, disminuir el acopio de residuos en vertederos y el procesamiento informal que afecta especialmente la población de mayor vulnerabilidad.

Para el 2016 la UPME señala que 62,87 t de oro se produjeron en el país, del cual cerca del 99% fue destinado para exportación y lo restante en consumo interno. Por otro lado, la UPME también señala en su informe de Balance mineral 2012-2016 que la demanda de consumo interno promedio de oro es de 1 tonelada al año, de la cual las 0,76 t corresponden al sector joyero y las 0,24 t restantes es destinada para otros usos industriales (manufactura del oro) (Ministerio de Minas y Energía, 2016; Uribe, s.f.)

#### ***4.1.1. Capacidad de procesamiento***

La tecnología Outotec Ausmelt TSL (usada por Dowa y GRM.Co) es la alternativa pirometalúrgica de mayor importancia relativa. De acuerdo a lo señalado en el Dowa Holding Annual Report (2008) la capacidad de procesamiento con el uso de la tecnología Outotec Ausmelt TSL en Dowa- Kosaka Smelting & Refining Co.Ltd pasó de 30.000 t/año a 150.000 t/año de los RAEE. Para el 2018, en Kosaka Smelting & Refining Co. Ltd se produjeron 5,6 t/año de oro mediante el procesamiento de los RAEE (Nugroho, 2020).

Con base a los datos reportados por Dowa, Colombia necesitaría procesar 26.935 t/año de los RAEE por la tecnología Outotec Ausmelt TS, para satisfacer la demanda interna de oro. Por

consiguiente, el país no estaría en condiciones de suplir dicha demanda de oro debido a que solo tiene la capacidad de gestión formal de los RAEE de 14.000 t/año. Sin embargo, con las 14.000 t/año de los RAEE que el territorio nacional gestiona se podría recuperar 0.52 t de oro para satisfacer el 52% de la demanda interna de oro.

Para el caso de la alternativa hidrometalúrgica, el proceso de cianuración representa la alternativa de mayor importancia relativa para la recuperación de metales preciosos a partir de los RAEE. Es por esto que se toma como base de cálculo el desarrollo experimental realizado para tarjetas electrónicas por el autor Quinet et al., (2008), el cual utilizó 716.2 kg de tarjetas electrónicas trituradas (12, 56% Cu, 0,49% Ag, 0,08% Au y 0,04% Pd) de los cuales recupero el 95% y 93% de oro y plata, respectivamente.

La Política Nacional de Gestión (2017) describe que para el 2014 la proporción de cada subcategoría los RAEE en Colombia tenía 20% TV, 14% PC, 2% celulares, 13% neveras, 11% lavadoras, 13% equipos de audio, 5% equipos de video, 13% bombillos, 8% pilas y 1% otros, para los cuales cada subcategoría contiene diferentes valores de oro en sus tarjetas de circuito, según la UPME (2018) (Apéndice F).

Sin embargo, para este estudio es necesario eliminar el porcentaje de aporte de pilas y bombillas por lo tanto, se requiere recalcular el porcentaje de cada subcategoría y el contenido de oro respectivo. Esto se debe a que Kosaka Smelting & Refining Co.Ltd no procesa residuos de este tipo de procedencia y debemos intentar que las características del alimento tanto para la alternativa pirometalúrgica como hidrometalúrgica se asemejen en lo posible.

Se tomó como base de cálculo una tonelada de los RAEE sin aporte de pilas y bombillos para hallar la cantidad de oro recuperado teniendo en cuenta el porcentaje (95%) descrito por Quinet et al., (2008) (Apéndice G). Como resultado de esta estimación, Colombia necesitaría

17.030 t de los RAEE para abastecer la demanda de consumo interno de oro al año. Por tanto, por esta alternativa tampoco tendríamos la cantidad de RAEE para suplir la demanda de consumo interno del país, limitados por la capacidad de gestión de 14.000 t/año. No obstante, si se procesan estas 14.000 t/año a través de la alternativa de cianuración permitiría recuperar el 82% de la demanda de consumo interno de oro en el país, es decir, 0,82 t de oro.

## ***4.2. Aspecto ambiental***

### ***4.2.1. Marco normativo de disposición de residuos e implementación de materias primas***

En Colombia se estableció la ley 1672 del 19 de julio de 2013 en la cual se indican los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de los RAEE generados en el territorio nacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Anterior a la ley 1672 del 19 de julio del 2013, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible reglamentó, por medio del Decreto 2041 del 2014, las licencias ambientales para la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento (recuperación, reciclado) o disposición final de los RAEE (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Colombia tiene como marco normativo nacional las siguientes medidas para el tratamiento de gases durante los procesos de reciclaje en fundiciones:

- **La ley 99 1993:** Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones.

-**Resolución 619 de 1997:** Se establecen parcialmente los factores a partir de los cuales se requiere permiso de emisión atmosférica para fuentes fijas.

**-Resolución 601 de 2006:** Por la cual se establece la norma de calidad del aire o nivel de emisiones para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.

**-Resolución 909 de 2008:** Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmosfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.

**-Decreto 1076 de 2015:** Por medio del cual se expide el Decreto Único reglamentario del sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

**-Decreto 284 de 2018:** El cual tiene por objeto reglamentar la gestión integral de los RAEE con el fin de prevenir y minimizar los impactos adversos al ambiente.

Las regulaciones o controles son flexibles para el uso del cianuro, lo que conlleva a que su venta sea de libre restricción en forma de cianuro de sodio (NaCN) o cianuro de potasio (KCN) (El nuevo siglo, 2019). Con el fin de prevenir y mitigar los problemas ambientales y de salud por el mal uso del cianuro, el país ha implementado las siguientes normativas con respecto a la lixiviación con cianuro:

**-El Decreto 3930 de 2010:** Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones. **Artículo 28.** Fijación de la norma de vertimiento.

**-Resolución 631 de 2015:** Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. **Artículo 10.** Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales No Domésticas (ARND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades de minería.

### ***4.3. Aspecto social***

#### ***4.3.1. Reincorporación de metales preciosos (Enfoque a la economía circular)***

Según La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), el organismo especializado en telecomunicaciones de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) solo se recicla y recupera el 17.4% de los RAEE al año en el mundo. Con esta situación se desconoce el paradero de una gran cantidad de los RAEE (sin documentación, desecho en vertederos, quema a cielo abierto o comercialización). Esto da lugar a una pérdida de materiales no renovables y compromete los recursos naturales disponibles, al no permitir su reciclaje, entre materiales tóxicos, no tóxicos y de gran valor como el oro, la plata, el cobre en total se pueden encontrar hasta 69 elementos de la tabla periódica en los aparatos eléctricos y electrónicos (UIT, 2020).

La formalización de las empresas gestoras contribuye en un aumento de la capacidad del país de aprovechar y valorizar correctamente los RAEE, eliminar la ilegalidad del sector informal y así evitar la inadecuada disposición de estos residuos como es el caso de los que terminan en chatarrerías comunes o en vertederos. Con las condiciones adecuadas y correctas medidas de seguridad se pueden crear oportunidades a personas que viven del reciclaje para que puedan formalizarse a través de la generación de empleos verdes, tanto en las etapas de recolección como de posterior tratamiento, contribuyendo al desarrollo sostenible del país mediante un enfoque de economía circular (UIS y UPME, 2018b).

Debido a que los sistemas de recolección no están aún bien establecidos, se precisa de una mayor articulación y colaboración entre el estado, multinacionales, pequeñas y medianas empresas, instituciones académicas, empresarios y diversas asociaciones, para la gestión integral de los RAEE, con lo cual se aprovechen estos residuos, se reduzca el impacto ambiental y se cree trabajo formal para miles de personas. (UIT, 2020)

La economía circular comprende actividades como el reciclaje, la reparación, el alquiler y la remanufacturado. Sustituye al modelo lineal tradicional de extraer, fabricar, usar y tirar, lo que permitiría reducir la necesidad de extracción de materias primas, eliminación de desechos, ahorro de energía, generación de empleos y oportunidades comerciales (OIT, 2018; Ecocomputo, 2018).

En Colombia, la economía circular es una estrategia que tiene por objetivo reducir la entrada de nuevos materiales a ciclos productivos reemplazándolos por desechos que mejoraran flujos económicos y ecológicos (Colombianet, s.f.).

Además, si se aplica un enfoque de economía circular lo desechos eléctricos y electrónicos pueden considerarse un recurso que, adecuadamente gestionado, podría promover la obtención de medios de subsistencia, generar empleo, proporcionar acceso a la tecnología, facilitar la modernización tecnológica, proporcionar la transferencia de conocimiento y competencias, proporcionar un capital para fabricar productos básicos de segunda mano y recuperar materiales (Organización internacional del trabajo, 2018).

#### ***4.4. Costos de implementación***

La recuperación de metales preciosos a partir de los RAEE se da en mayor parte como subproductos de las plantas de fundición de Cu y Pb. Sin embargo, en la actualidad existen aplicaciones industriales de procesos pirometalúrgicos que tratan únicamente residuos reciclados para la obtención de estos metales.

La implementación de las vías pirometalúrgicas o hidrometalúrgicas requieren de un sistema eficiente de control de emisiones y disposición de residuos que minimicen el impacto ambiental. No obstante, el manejo de emisiones y residuos para las plantas que procesan concentrados y materiales reciclados presentan una mayor complejidad técnica y ambiental para su control, lo que representa elevados costos de inversión. Lo anterior se demuestra con la

inversión inicial de Umicore, la cual fue de aproximadamente 200 millones de euros para su planta de reciclaje de RAEE en la obtención de metales preciosos (Hagelueken, 2006), mientras que Kosaka Smelting & Refining Co. Ltd invirtió aproximadamente 95 millones de euros para el tratamiento exclusivo de residuos reciclados (Expansion y Company, 2007)

Como menciona el autor Alvear (2014), es posible adaptar la capacidad de procesamiento de la tecnología TSL para la recuperación de metales preciosos a escalas grandes y pequeñas que favorecen la construcción de plantas regionales de menor infraestructura. Utilizando como base de cálculo el valor de inversión inicial de Dowa para la aplicación de la tecnología Outotec Ausmetl TSL en la recuperación de metales preciosos a partir de residuos reciclados, Colombia requeriría una inversión aproximada de 17,1 millones de euros (20,9 millones de dólares) para la implementación de una planta pirometalúrgica con una capacidad de procesamiento mínima de 27.000 t/año.

En el caso de implementar una planta de cianuración a gran escala se estima un costo de inversión de aproximadamente 31 millones de dólares (Recuperación de oro sin cianuro, 2020). Sin embargo, Huaman, (2017) describe el diseño de una planta de cianuración para el tratamiento de 100 t/ día de mineral de oro, el cual determina un costo de inversión de 470.000 dólares para dicha capacidad de procesamiento. Para Colombia el costo de inversión de una planta hidrometalúrgica de cianuración sería de aproximadamente 220.000 dólares con capacidad de procesamiento de 17.030 t/año de los RAEE.

Asimismo, estas operaciones requieren de instalaciones adicionales para el procesamiento y recuperación de los diferentes metales tratados, lo que repercute en grandes inversiones para la fundición o lixiviación, refinación y tratamiento de residuos. Sin embargo, la creciente tendencia de producción de los RAEE y su alto contenido de metales justifica la alta inversión de las

alternativas de recuperación de metales preciosos. Como consecuencia a lo anterior, se pretende que haya una disminución de extracción de materiales vírgenes, generación de desechos y cúmulo en vertederos.

#### ***4.5. Posición geográfica***

Una de las grandes ventajas que tiene Colombia debido a su posición geográfica es poseer una amplia zona costera, sobre los océanos atlántico y pacífico, que facilita la construcción y fortalecimiento de estructuras portuarios y relaciones comerciales internacionales mediante la importación y exportación de materias primas (Goez, 2017). Adicional a esto, tiene la ventaja de estar conectada directamente con cinco países a través de sus fronteras, por lo tanto, Colombia es una plataforma para el comercio mundial (Mesa, 2020). Esto resulta de gran importancia, si se deseara procesar RAEE con una capacidad mayor a 14.000 t/año, por lo cual, sería necesario la importación de RAEE de países vecinos.

De acuerdo a las características de operación e infraestructura para la implementación de alternativas pirometalúrgicas y/o hidrometalúrgicas en la recuperación de metales preciosos a partir de los RAEE, se considera la construcción de la planta de tratamiento en zonas francas del país. Las zonas francas en Colombia están definidas dentro del marco legal y normativo como las áreas geográficas delimitadas dentro del territorio nacional, en las que se desarrollan actividades industriales de bienes y servicios, o comerciales, bajo normas especiales en materia aduanera, tributaria y de comercio exterior (Mesa, 2020).

Según Mesa (2020), el presidente de la Asociación Nacional de Comercio Exterior (Analdex), Javier Diaz, afirma que las principales ventajas que tiene el régimen de zonas francas es la tarifa preferencial de renta (20% descuento) por otro lado, la mercancía que ingresa del exterior a las zonas francas no se consideran importaciones y están exentas de tributos aduaneros

(aranceles e IVA) y finalmente se permite el almacenamiento de mercancía por tiempo indefinido en las zonas francas (Mesa, 2020).

## 5. Conclusiones

Con el uso del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) se determinaron las dos alternativas con mayor importancia relativa, las cuales fueron el proceso de fundición pirometalúrgico Outotec Ausmelt TSL y el método hidrometalúrgico de cianuración, a partir de las cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Se determinó que la cantidad de RAEE requerida para producir una tonelada de oro anual (que es la cantidad de consumo interno de oro nacional) a partir de la alternativa Outotec Ausmelt TSL es de 26.935 t/año, mientras que para la alternativa de cianuración la cantidad requerida de RAEE es 17.030 t/año.

Con las 14.000 t/año de los RAEE que Colombia gestiona es posible recuperar 0,52 % y 0,82% de la demanda interna anual de oro (1t) con el uso de las alternativas pirometalúrgica e hidrometalúrgica, respectivamente.

Por otro lado, Colombia requeriría de una inversión aproximada de 20,9 millones de dólares para implementar la alternativa Outotec Ausmelt TSL con una capacidad mínima de procesamiento de 27.000 t/año, mientras que para la implementación de una planta de cianuración con capacidad mínima de 17.030 t/año de los RAEE, el costo sería aproximadamente 220.000 dólares. De acuerdo a lo anterior, el proceso de cianuración sería la alternativa con menor inversión en la implementación.

La selectividad de los procesos hidrometalúrgicos favorece la recuperación del metal de interés con menor cantidad de residuos, siempre y cuando este haya sido previamente tratado y concentrado, no obstante, los procesos pirometalúrgicos son más flexibles en el alimento, lo que

genera que se puedan procesar junto con residuos secundarios de otras actividades y/o con concentrados de mineral (Cu/Pb).

Ambas alternativas extractivas requieren implementar sistemas de control para el tratamiento de los residuos como consecuencia de los procesos. La emisión de gases y polvos a la atmosfera afecta especialmente a las alternativas pirometalúrgicas, mientras que la generación de efluentes líquidos son los principales problemas ambientales de las técnicas hidrometalúrgicas. En este sentido el cianuro tiene grandes preocupaciones debido a su toxicidad, por lo cual aún se debe investigar más en las alternativas no cianuradas como ioduro, tiourea y tiosulfato con el fin de superen las barreras de ineficiencia, como lo es el alto consumo de lixivante.

El país se consolida pionero en Sudamérica por implementar un marco político de la gestión de RAEE, además de poseer normativas que regulan las emisiones y vertimientos. Adicionalmente, el país requiere solucionar el problema de acumulación y aumentar la tasa de recogida de los RAEE para alcanzar una capacidad de procesamiento viable.

Así mismo, Colombia se encuentra ubicado en un punto estratégico geográficamente para actividades comerciales tanto de importación como de exportación esto actuaría en beneficio si a futuro se planea procesar los RAEE proveniente de otros países.

## **6. Recomendaciones**

Realizar un análisis económico financiero que permita determinar con detalle los costos de implementación, viabilidad económica y ubicación privilegiada de la planta con el fin de evaluar la factibilidad de las alternativas a nivel industrial.

Ejecutar una perspectiva de implementación en Colombia de procesos de recuperación de metales preciosos contenidos en residuos electrónicos a partir de las alternativas hidrometalúrgicas no cianuradas con el objetivo de contrarrestar la toxicidad por uso del proceso de cianuración.

**Referencias Bibliográficas**

- Ahamed A., Janhavi K. y Meththika V. (2019). Hydrometallurgical Recovery of Metals From E-waste. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816190-6.00010-8>
- Agency, E. P. (2015). Flame Retardants in Printed Circuit Boards. *Design for the Environment*, August, 237. [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/pcb\\_final\\_report.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/pcb_final_report.pdf)
- Akcil, A. (2010). A new global approach of cyanide management: International cyanide management code for the manufacture, transport, and use of cyanide in the production of gold. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 31(3), 135–149. <https://doi.org/10.1080/08827501003727022>
- Akcil, A., Erust, C., Gahan, C. S. ekha., Ozgun, M., Sahin, M., & Tuncuk, A. (2015). Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixiviants--A review. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 45, 258–271. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>
- Aurubis. (s.f.). Metal production from recycling material. <https://www.aurubis.com/en/products/recycling/technology>
- Aurubis(s.f.). Environmental Protection at Lünen. <https://www.aurubis.com/en/responsibility-x/environmental-protection-at-sites/environmental-protection-at-lunen>
- Baldé, C., Gray, V., Forti, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *Observatorio mundial de los residuos eléctricos y electrónicos 2017*. [https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM 2017/GEM 2017-S.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM%202017/GEM%202017-S.pdf)

- Baldé, C., Wang, F., Kuehr, R., & Huisman, J. (2014). *E-Waste Monitor*.  
<https://doi.org/10.1007/s00705-012-1479-4>
- Batnasan, A., Haga, K., & Shibayama, A. (2018). Recovery of valuable metals from waste printed circuit boards by using iodine-iodide leaching and precipitation. *Minerals, Metals and Materials Series, Part F5*, 131–142. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-72350-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72350-1_12)
- Behnamfard, A., Salarirad, M. M., & Veglio, F. (2013). Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation. *Waste Management*, 33(11), 2354–2363.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.017>
- Birich, A., Raslan Mohamed, S., & Friedrich, B. (2018). Screening of Non-cyanide Leaching Reagents for Gold Recovery from Waste Electric and Electronic Equipment. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(2), 265–275. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0160-x>
- Birich, A., Stopic, S., & Friedrich, B. (2019). Kinetic Investigation and Dissolution Behavior of Cyanide Alternative Gold Leaching Reagents. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-43383-4>
- Birloaga, I., De Michelis, I., Ferella, F., Buzatu, M., & Vegliò, F. (2013). Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery. *Waste Management*, 33(4), 935–941.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.003>
- Bisceglie, F., Civati, D., Bonati, B., & Faraci, F. D. (2017). Reduction of potassium cyanide usage in a consolidated industrial process for gold recovery from wastes and scraps. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1810–1818. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.103>

Boliden (a). (s.f.). One of the largest recycler of electronic material.

<https://www.boliden.com/sustainability/case-studies/largest-electronic-material-recycler-in-the-world/>

Boliden (b). (s.f.). From jewelery to circuit boards and much more

than jewellery. <https://www.boliden.com/operations/products/gold>

Boliden (c). (s.f.). Where old mobiles become new metal. [https://www.boliden.com/news/ny-metal-](https://www.boliden.com/news/ny-metal-av-gamla-mobiler)

[av-gamla-mobiler](https://www.boliden.com/news/ny-metal-av-gamla-mobiler)

Boliden Group. (2016). *Metals for modern life*. [https://www.boliden.com/globalassets/media/337-](https://www.boliden.com/globalassets/media/337-6514-metals-for-modern-life-2016_en.pdf)

[6514-metals-for-modern-life-2016\\_en.pdf](https://www.boliden.com/globalassets/media/337-6514-metals-for-modern-life-2016_en.pdf)

Boliden Group. (2019). *A sustainable future with metals. Annual and Sustainability Report 2019*.

<https://www.boliden.com/investor-relations/reports-and-presentations/annual-reports>

Caffarey, M. (2012). Umicore Precious Metals Refining. *Southeast Recycling Development Council*

*Summit, October*, 1–65.

Chang, S. H., & Halim, S. F. A. (2019). Recovery of precious metals from discarded mobile phones

by thiourea leaching. *Materials Science Forum*, 962 MSF, 112–116.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.962.112>

Chauhan, G., Jadhao, P. R., Pant, K. K., & Nigam, K. D. P. (2018). Novel technologies and

conventional processes for recovery of metals from waste electrical and electronic equipment:

Challenges & opportunities – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*,

6(1), 1288–1304. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.032>

Chu, C. K., Breuer, P. L., & Jeffrey, M. I. (2003). The impact of thiosulfate oxidation products on

the oxidation of gold in ammonia thiosulfate solutions. *Minerals Engineering*, 16(3), 265–

271. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00369-2](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00369-2)

Co., D. H. (2008). New stage. *Annual Report 2008*, 42(5), 223–223. [https://doi.org/10.1016/S0048-7120\(08\)74595-X](https://doi.org/10.1016/S0048-7120(08)74595-X)

ColombiaNet Soluciones Tecnológicas Integrales con Sostenibilidad Ambiental. (s.f). *En Colombia implementamos la estrategia nacional de economía circular.* (s.f.). <https://raecolombianet.com.co/economia-circular/>

Continúa debate sobre venta libre de cianuro. (Enero 13 de 2019). *El nuevo siglo.* <https://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/01-2019-continua-debate-sobre-venta-libre-de-cianuro>

Cui, H., & Anderson, C. (2020). *Hydrometallurgical Treatment of Waste Printed Circuit Boards : Bromine Leaching.* 1–18. [https://www.researchgate.net/publication/340384821\\_Hydrometallurgical\\_Treatment\\_of\\_Waste\\_Printed\\_Circuit\\_Boards\\_Bromine\\_Leaching](https://www.researchgate.net/publication/340384821_Hydrometallurgical_Treatment_of_Waste_Printed_Circuit_Boards_Bromine_Leaching)

Cui, J., & Zhang, L. (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2–3), 228–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>

Duan, H., Hou, K., Li, J., & Zhu, X. (2011). Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.057>

- EcoCómputo. (4 de septiembre de 2018). *Economía circular: Oportunidad para abordar la crisis de los residuos eléctricos y electrónicos en el país*. <https://ecocomputo.com/noticias/economia-circular-oportunidad-para-abordar-la-crisis-de-los-residuos-el-ctricos-y-electr>
- Expansion, A. O., & Company, T. (2007). *Moving to the New Stage Semiannual Report 2007. I*. [https://www.mikron.com/fileadmin/user\\_upload/01mikron\\_group/reports/2007/mikron\\_semiannual\\_report\\_2007\\_e.pdf](https://www.mikron.com/fileadmin/user_upload/01mikron_group/reports/2007/mikron_semiannual_report_2007_e.pdf)
- Federico, M., R., K., & C., P. B. (2015). eWaste en América Latina. *GSMA Latin America*, 45. <https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2015/11/gsma-unu-ewaste2015-spa.pdf>
- Flores, G. A., Risopatron, C., & Pease, J. (2020). Processing of Complex Materials in the Copper Industry: Challenges and Opportunities Ahead. *Jom*, 72(10), 3447–3461. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04255-9>
- Flores, Nikolic, S., & Mackey, P. J. (2014). *ISASMELT™ for the Recycling of E-Scrap and Copper in the U . S . Case Study Example of a New Compact Recycling Plant*. 66(5). <https://doi.org/10.1007/s11837-014-0905-3>
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows, and the circular economy potential*. <http://ewastemonitor.info/>
- Gámez, S., Garcés, K., Torre, E. De, & Guevara, A. (2019). Hydrometallurgy Precious metals recovery from waste printed circuit boards using thiosulfate leaching and ion exchange resin. *Hydrometallurgy*, 186(February), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.03.004>
- Ghosh, B., Ghosh, M. K., Parhi, P., Mukherjee, P. S., & Mishra, B. K. (2015). Waste Printed Circuit Boards recycling: An extensive assessment of current status. *Journal of Cleaner Production*,

94, 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.024>

Glencore. (s.f.). Los pasos de la refinación del cobre. <https://www.fonderiehorne.ca/fr/aproposdenous/nos-operations/Pages/cuivre-etapes-affinage.aspx>

Global Resources and materials. (s.f.). Materias primas. [https://www.grm.co.kr/sub.php?code=03\\_prod02](https://www.grm.co.kr/sub.php?code=03_prod02)

Goez, Y. (2017). *Competitividad geoestratégica de Colombia: una ventaja que nos ha dejado como una economía emergente*. Tesis de pregrado. Universidad de San Buenaventura, Medellín

Gönen, N., Körpe, E., Yildirim, M. E., & Selengil, U. (2007). Leaching and CIL processes in gold recovery from refractory ore with thiourea solutions. *Minerals Engineering*, 20(6), 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.11.003>

Grosse, A. C., Dicoski, G. W., Shaw, M. J., & Haddad, P. R. (2003). Leaching and recovery of gold using ammoniacal thiosulfate leach liquors (a review). *Hydrometallurgy*, 69(1–3), 1–21. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00169-X](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00169-X)

Guo, J., Zhang, R., & Xu, Z. (2016). Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) Emitted from Heating Machine for Waste Printed Wiring Boards Disassembling. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 849–854. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.094>

Gurung, M., Adhikari, B. B., Kawakita, H., Ohto, K., Inoue, K., & Alam, S. (2013). Recovery of gold and silver from spent mobile phones by means of acidothiourea leaching followed by adsorption using biosorbent prepared from persimmon tannin. *Hydrometallurgy*, 133, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.12.003>

Ha, V. H., Lee, J. C., Huynh, T. H., Jeong, J., & Pandey, B. D. (2014). Optimizing the thiosulfate leaching of gold from printed circuit boards of discarded mobile phone. *Hydrometallurgy*,

149, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.07.007>

Ha, V. H., Lee, J. chun, Jeong, J., Hai, H. T., & Jha, M. K. (2010). Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phones. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1–3), 1115–1119. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.099>

Hagelueken, C. (2006). Recycling of Electronic Scrap At Umicore Precious Metals. *Acta Metallurgica Slovaca*, 12(June 2006), 111–120. [https://www.researchgate.net/publication/284043293\\_Recycling\\_of\\_Electronic\\_Scrap\\_at\\_Umicore\\_Precious\\_Metals\\_Refining](https://www.researchgate.net/publication/284043293_Recycling_of_Electronic_Scrap_at_Umicore_Precious_Metals_Refining)

Hagelüken, C. (2005). Recycling of electronic scrap at Umicore's integrated metals smelter and refinery. *Proceedings - European Metallurgical Conference, EMC 2005*, 1(May 2006), 307–323. [https://www.researchgate.net/publication/240629115\\_Recycling\\_of\\_Electronic\\_Scrap\\_at\\_Umicore%27s\\_Integrated\\_Metals\\_Smelter\\_and\\_Refinery](https://www.researchgate.net/publication/240629115_Recycling_of_Electronic_Scrap_at_Umicore%27s_Integrated_Metals_Smelter_and_Refinery)

Hagelüken C. (2006). Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling. *Proceedings of the 2006 IEEE Conference, May*, 218–223. <https://doi.org/10.1109>

Hagelüken C y W Cort, C. (2010). Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through 'Design for Recycling. Gold Bulletin. [https://www.researchgate.net/publication/225372169\\_Recycling\\_of\\_gold\\_from\\_electronics\\_Cost-effective\\_use\\_through\\_'Design\\_for\\_Recycling'](https://www.researchgate.net/publication/225372169_Recycling_of_gold_from_electronics_Cost-effective_use_through_'Design_for_Recycling')

Han, C., Wang, W., Xie, F., & Zhang, T. (2017). Mechanism and kinetics of mercuric sulfide leaching with cuprous-thiosulfate solutions. *Separation and Purification Technology*, 177, 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.01.001>

- Hao, J., Wang, Y., Wu, Y., & Guo, F. (2020). Metal recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspectives. *Resources, Conservation and Recycling*, 157(July 2019), 104787. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104787>
- Hiskey, J. B., & Atluri, V. P. (1988). Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review : Dissolution Chemistry of Gold and Silver in Different Lixiviants Dissolution Chemistry of Gold and Silver in Different. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 4(April 2013), 95–134. <https://doi.org/10.1080/08827508808952634>
- Holdings, D. (2010). *Annual Report 2010*. <https://ir.dowa.co.jp/en/ir/library/annual.html>
- Huaman, A. (2017). *Implementación de una planta metalúrgica para el tratamiento de minerales de oro de acopio y propios aplicando el proceso de cianuración en la ciudad de Chala*. Tesis de pregrado. Arequipa. Perú
- Hughes, S., Jåfs, M., Johto, H., Stål, J., & Karonen, J. (2019). Outotec solutions for e-scrap processing. *Minerals, Metals and Materials Series*, 283–294. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-10386-6\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10386-6_33)
- Huisman, J., van der Maesen, M., Eijsbouts, R. J. J., Wang, F., Baldé, C. P., & Wielenga, C. a. (2012). The Dutch WEEE Flows. Where Do WEEE Go From Here. *2011 Dutch E-Waste Quantification*, 46. <http://www.ihdp.unu.edu/file/download/9654.pdf>
- International Cyanide Management Code for the gold mining industry.(s.f).Use in mining. <https://www.cyanidecode.org/cyanide-facts/use-mining>
- Jae-Hyun, Kim, J.-S., Moon, S.-M., & Min, J.-W. (2011). *Recycling Industry of Urban Mines by Applying Non-Ferrous Metallurgical Processes in Japan* (pp. 12–27). [https://www.researchgate.net/publication/264134798\\_Recycling\\_Industry\\_of\\_Urban\\_Mines](https://www.researchgate.net/publication/264134798_Recycling_Industry_of_Urban_Mines)

\_by\_Applying\_Non-Ferrous\_Metallurgical\_Processes\_in\_Japan

Jeffrey, M. I. (2001). Kinetic aspects of gold and silver leaching in ammonia-thiosulfate solutions.

*Hydrometallurgy*, 60(1), 7–16. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00151-1](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00151-1)

Jing-ying, L., Xiu-li, X., & Wen-quan, L. (2012). Thiourea leaching gold and silver from the printed

circuit boards of waste mobile phones. *Waste Management*, 32(6), 1209–1212.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.026>

Kasper, A. C., & Veit, H. M. (2018b). Gold recovery from printed circuit boards of mobile phones

scraps using a leaching solution alternative to cyanide. *Brazilian Journal of Chemical*

*Engineering*, 35(3), 931–942. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20180353s20170291>

Kasper, A. C., Veit, H. M., García-Gabaldón, M., & Herranz, V. P. (2018). Electrochemical study of

gold recovery from ammoniacal thiosulfate, simulating the PCBs leaching of mobile phones.

*Electrochimica Acta*, 259, 500–509. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.10.161>

Kaya, M. (2019). *Industrial-Scale E-Waste/WPCB Recycling Lines*. In Minerals, Metals and

Materials Series. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26593-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26593-9_8)

Khaliq, A., Rhamdhani, M. A., Brooks, G., & Masood, S. (2014). *Metal extraction processes for*

*electronic waste and existing industrial routes: A review and Australian perspective*.

*Resources*, 3(1), 152–179. <https://doi.org/10.3390/resources3010152>

Kiddee, P., Naidu, R., & Wong, M. H. (2013). *Electronic waste management approaches: An*

*overview*. *Waste Management*, 33(5), 1237–1250.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.006>

Kindesjö, U., Huisingh, D., & Rodhe, H. (2002). *Phasing out lead in solders : An assessment of*

*possible impacts of material substitution in electronic solders on the recycling of printed circuit boards.* Thesis for the fulfilment of the Master of Science in Environmental Management and Policy Lund, Sweden

Kogan, V. S., & Berkovich, I. V. (2019). *Silver, gold and palladium leaching from electronic scrap using bromine- bromide solution.* Kompleksnoe Ispol'zovanie Mineral'nogo Syr'â/Complex Use of Mineral Resources/Mineraldik Shikisattardy Keshendi Paidalanu, 4(311), 35–47. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.36>

Konyratbekova, S. S., Baikunurova, A., & Akcil, A.(2015). Non-cyanide Leaching Processes in Gold Hydrometallurgy and Iodine-Iodide Applications: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review.* <https://doi.org/10.1080/08827508.2014.942813>

Kuyucak, N., & Akcil, A. (2013). *Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes.* *Minerals Engineering*, 50–51, 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.027>

Lennartsson, A., Engström, F., Samuelsson, C., Björkman, B., & Pettersson, J. (2018). *Large-Scale WEEE Recycling Integrated in an Ore-Based Cu-Extraction System.* *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(2), 222–232. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0157-5>

Li, H., Eksteen, J., & Oraby, E. (2018). *Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives – A review.* *Resources, Conservation and Recycling*, 139(June), 122–139. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.007>

Logsdon, M., Hagelstein, K y Mudder, T. (Abril de 2001). *El manejo del cianuro en la extracción de oro. Traducido de la publicación en inglés titulada the management of cyanide in gold*

*extraction*. Consejo internacional de Metales y medio ambiente.  
[Http://www.panoramaminero.com.ar/icmme.pdf](http://www.panoramaminero.com.ar/icmme.pdf)

Mark, F. E., & Lehner, T. (2000). *Plastics recovery from waste electrical & electronic equipment in non-ferrous metal processes*. Association of Plastics Manufactures in Europe, 1–23.

Marsden J. & House L. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*.  
[https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=OuoV-o\\_Xf](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=OuoV-o_Xf)

Masilela, M., & Ndlovu, S. (2019). *Extraction of Ag and Au from chloride electronic waste leach solutions using ionic liquids*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1).  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.11.054>

Méndez-Fajardo, S., Böni, H., Vanegas, P., & Sucozhañay, D. (2019). *Improving sustainability of E-waste management through the systemic design of solutions: The cases of Colombia and Ecuador*. *Handbook of Electronic Waste Management: International Best Practices and Case Studies*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817030-4.00012-7>

Mesa, V. L. (20, marzo 2020). Los beneficios aduaneros y tributarios, los mayores atractivos de las Zonas Francas. *La República*. <https://www.larepublica.co/especiales/zonas-francas-2020/los-beneficios-aduaneros-y-tributarios-los-mayores-atractivos-de-las-zonas-francas-2980766>

Mihovilovic, D. (2001). *Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones*

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos* (Vol. 104). [www.sustainable-recycling.org](http://www.sustainable-recycling.org)

Mudder, T. I., Botz, M. M., & Akçil, A. (2008). *Cyanide and society: A critical review*. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 47(3), 27–42.

- Oraby, E. A., Li, H., & Eksteen, J. J. (2019). *An Alkaline Glycine - Based Leach Process of Base and Precious Metals from Powdered Waste Printed Circuit Boards*. Waste and Biomass Valorization. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00780-0>
- Organización Internacional del Trabajo. (14 de mayo de 2018). *Perspectivas sociales y del empleo en el mundo 2018 - Sostenibilidad medioambiental con empleo [Resumen]*. [https://www.ilo.org/global/research/global-reports/weso/greening-with-jobs/WCMS\\_628710/lang--es/index.htm](https://www.ilo.org/global/research/global-reports/weso/greening-with-jobs/WCMS_628710/lang--es/index.htm)
- Ott, D. (2008). *Diagnóstico de Computadores y Teléfonos Celulares*. 146. [https://quimicos.minambiente.gov.co/images/RAEE/documentos\\_raee/080331\\_EMPA-CNPMLTA\\_Diagnostico\\_e-waste\\_colombia.pdf](https://quimicos.minambiente.gov.co/images/RAEE/documentos_raee/080331_EMPA-CNPMLTA_Diagnostico_e-waste_colombia.pdf).
- Parlamento Europeo y el Consejo de la Union Europea (2006). Directiva 2006/21/EC “the management of waste from extractive industries and amending”. Europa
- Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea (2012). Directiva 2012/19/UE “Sobre los residuos eléctricos y electrónicos (RAEE)”. Europa
- Petter, P. M. H., Veit, H. M., & Bernardes, A. M. (2014). *Evaluation of gold and silver leaching from printed circuit board of cellphones*. Waste Management, 34(2), 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.032>
- Puckett, J., Byster, L., Westervelt, S., Gutierrez, R., Davis, S., Hussain, A., Dutta, M. (2002). *Exporting Harm The High-Tech Trashing of Asia*. The Basel Action Network (BAN) Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC)Svt C, 1–51. [www.greenpeace-china.org.hk](http://www.greenpeace-china.org.hk)
- Quinet, P., Proost, J., Van, A., & Lierde. (2008). *Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes*. Proceedings of the 2008 Global Symposium on

Recycling, Waste Treatment and Clean Technology, REWAS 2008, 22(04), 1673–1677.

Ríos, J. F. (2017). *Gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos ( RAEE ) en el municipio de Armenia , Quindío* Management of waste electrical and electronic equipment ( WEEE ) in the municipality of Armenia , Quindío Gestão dos resíduos de equipamentos elétr. Revista Libre Empresa, 14, 167–187.  
<http://dx.doi.org/10.18041/libemp.2017.v14n1.27108%0AGestión>

Riveros, Gabriel. (2009). *Curso MI 51 A Pirometalurgia*. Universidad de Chile Departamento de ingeniería de minas. [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/2/MI51A/1/material\\_docente/bajar%3Fid\\_material%3D240637](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/2/MI51A/1/material_docente/bajar%3Fid_material%3D240637)

Rojas, F., Del Pilar, M., Herrera, C. y Aurelio, J. (s.f). *Aplicación del proceso de análisis jerárquico (AHP) para la selección de medios de transporte con energía renovable basados en los factores socioeconómicos, legales y ambientales en la ciudad de Bogotá*. Maestría en Ingeniería de la Gestión. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá

Roman, I. (2015). *eWaste en Colombia*. *Gsma*, 14. <https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2015/02/ewaste-colombia.pdf>

Sahin, M., Akcil, A., Erust, C., Altynbek, S., Gahan, C. S., & Tuncuk, A. (2015). *A Potential Alternative for Precious Metal Recovery from E-waste: Iodine Leaching*. Separation Science and Technology (Philadelphia), 50(16), 2587–2595.  
<https://doi.org/10.1080/01496395.2015.1061005>

Salas, B. J., Leyva, C. M. y Calenzani, F. A. (2014). *Modelo del proceso jerárquico analítico para optimizar la localización de una planta industrial*. Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial 17(2): 112-119 (2014) UNMSM

- Salas, V. S. (2011). *Modelo de priorización de proyectos de inversión pública con enfoque multicriterio: caso SEMAPA*. Departamento de Administración, Economía y Finanzas. Revista Perspectivas versión On-line ISSN 1994-3733 Perspectivas n.28 Cochabamba
- Saravia, E. (2019). *Estudio de competitividad de la industria de fundiciones de cobre. [Tesis de pregrado]*. Universidad de Concepción. Chile.
- Senanayake, G. (2004). Gold leaching in non-cyanide lixiviant systems: *Critical issues on fundamentals and applications*. Minerals Engineering, 17(6), 785–801. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.008>
- Senanayake, Gamini. (2004). *Analysis of reaction kinetics, speciation and mechanism of gold leaching and thiosulfate oxidation by ammoniacal copper(II) solutions*. Hydrometallurgy, 75(1–4), 55–75. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.06.004>
- Senanayake, Gamini. (2005). Gold leaching by thiosulphate solutions: *A critical review on copper(II)-thiosulphate-oxygen interactions*. Minerals Engineering, 18(10), 995–1009. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.01.006>
- Siegmund, A., Grogan, J., Shibata, E., Alam, S y Kerney, U.,[eds.], (2020), PbZn 2020: 9th International Symposium on Lead and Zinc Processing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37070-1\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37070-1_65)
- Sitando, O., Dai, X., Senanayake, G., Nikoloski, A. N., & Breuer, P. (2020). *A fundamental study of gold leaching in a thiosulfate-oxygen-copper system in the presence of activated carbon*. Hydrometallurgy, 192, 105232. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105232>
- Sitando, O., Senanayake, G., Dai, X., Nikoloski, A. N., & Breuer, P. (2018). *A review of factors affecting gold leaching in non-ammoniacal thiosulfate solutions including degradation and*

*in-situ generation of thiosulfate.* Hydrometallurgy, 178(March), 151–175.  
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.02.016>

Sparrow, G. J., & Woodcock, J. T. (1995). *Cyanide and Other Lixiviant Leaching Systems for Gold with Some Practical Applications.* Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 14(3–4), 193–247. <https://doi.org/10.1080/08827509508914125>

Stamminger, R., Siddharth Prakash, Günther Dehoust, Martin Gsell, T. S., & Öko-Institut e.V. – Institut für Angewandte Ökologie, F. (2016). *Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen "Obsoleszenz"*. <https://www.umweltbundesamt.de/>

Solving the E-Waste Problem. (2014). *One Global Definition of E-waste.* 3576(June).  
[https://www.step-initiative.org/files/\\_documents/whitepapers/StEP\\_WP\\_One%20Global%20Definition%20of%20E-waste\\_20140603\\_amended.pdf](https://www.step-initiative.org/files/_documents/whitepapers/StEP_WP_One%20Global%20Definition%20of%20E-waste_20140603_amended.pdf)

The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. (21 de Agosto de 2020). *Cyanide-free gold recovery.* <https://www.csiro.au/en/Research/MRF/Areas/Unlocking-Australian-ores/Going-for-gold>

Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (2012). *Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling.* Minerals Engineering, 25(1), 28–37.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.019>

Umicore. (s.f.). *Recyclables Umicore Precious Metals Refining.*  
<https://pmr.umicore.com/en/reciclables/e-scrap/>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2007). *Produccion mas limpia en la minería del oro en*

Colombia mercurio, cianuro y otras sustancias.

<http://bdigital.upme.gov.co/jspui/handle/001/921>

Union Internacional de Telecomunicaciones. (Junio de 2020). *Crear una economía circular para los equipos de TIC*. <https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/e-waste.aspx>

Universidad Industrial de Santander, & Unidad de Planeación Minero Energético. (2018a). *Análisis internacional RAEE. 3*. [https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Estudio\\_Economia\\_Circular.zip](https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Estudio_Economia_Circular.zip)

Universidad Industrial de Santander, & Unidad de Planeación Minero Energético. (2018b). *Análisis internacional RAEE. 3*. [https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Estudio\\_Economia\\_Circular.zip](https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Estudio_Economia_Circular.zip)

Uribe, E. J. (s.f). *El mercado de oro en Colombia*. Revista del Banco de la República número 1035. [https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/rbr\\_nota\\_1035.pdf](https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/rbr_nota_1035.pdf)

Williams, D. P., & Drake, P. (1980). *Recovery of Precious Metals From Electronic Scrap*. In Electric Power Research Institute (Workshop Proceedings) EPRI WS. Pergamon Press Canada Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-025396-1.50046-4>

Wood, J., Creedy, S., Matuszewicz, R., & Reuter, M. (2010). *Secondary Copper Processing Using Outotec Ausmelt Tsl Technology*. Outotec Ausmelt Pty Ltd, 12 Kitchen Road, Dandenong, VICTORIA, 3175

Xiang, P., Zhang, Y., & Liu, Q. (2018). Gold Leaching from Printed circuit Board Scrap with ThiosulfaXiang, P., Zhang, Y., & Liu, Q. (2018). Gold Leaching from Printed circuit Board Scrap with Thiosulfate. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 394(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/2/022001>.

- Yang, Y., Gao, W., Xu, B., Li, Q., & Jiang, T. (2019). *Study on oxygen pressure thiosulfate leaching of gold without the catalysis of copper and ammonia*. *Hydrometallurgy*, 187(May), 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.05.006>
- Yepes, V. (27 de noviembre de 2018). *Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP)*. Universidad Politecnica de Valencia. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/27/proceso-analitico-jerarquico-ahp/>
- Yin, J. F., Zhan, S. H., & Xu, H. (2014). *Comparison of leaching processes of gold and copper from printed circuit boards of waste mobile phone*. *Advanced Materials Research*, 955–959, 2743–2746. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.955-959.2743>
- Zhang, Y., Liu, S., Xie, H., Zeng, X., Li, J. (2012). *Current status on leaching precious metals from waste printed circuit boards*. *ELSEVIER*, 560-568. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.077>
- Zhang, L., & Xu, Z. (2016). *A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment*. *Journal of Cleaner Production*, 127, 19–36. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.004>
- Zhang, X. M., & Senanayake, G. (2016). *A Review of Ammoniacal Thiosulfate Leaching of Gold: An Update Useful for Further Research in Non-cyanide Gold Lixiviants*. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37(6), 385–411. <https://doi.org/10.1080/08827508.2016.1218872>
- Zschiesche, C., Ayhan, M., & Antrekowitsch, J. (2018). *Challenges and Opportunities of a lead smelting process for complex feed mixture*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8>

## Apéndices

## Apéndice A. Empresas Colombianas con actividad en reciclaje de RAEE

EMPRESA	CIUDAD
Gaia vitare	
Lito sas	
Planeta verde reciclaje integral sas	
Tradepro scrap s.a.s	
Organizacion de control ambiental y desarrollo empresarial-ocade	
Lasea soluciones eu	
Belmont trading colombia s.a.s	Bogotá
Computadores para educar	
Megaservicio plus	
Orinoco e-scrap sas (tradepro escrap s.a.s	
Westech recyclers of latin america s a s	
Mejoramiento global	
Jacobs international s a s	
Asesorias servicios ecologicos e industriales s.a.s	
Catex colombia s.a.s	
Innovacion ambiental-innova s.a, e.s.p	medellín
Baterias mac de colombia s.a	
Ecotec tecnologia ecologicas sas	
Recuperadora y fundiciones m&s s.a.s	
Quiroz carrillo oscar ivan (establecimiento comercializadora y remates la nacional)	Cali
Ecoraee s.a.s	
Recycling solutions s.a.s	
Eco green recycling s.a.s	Barranquilla
Gecoraee sas	
Social raee sas	
Lito sas	Bucaramanga
C.i. recyclables s.a.s	
Comercializadora excedentes y metales s.a	Cartagena
Serpro ingeniería s.a.s	Pasto

**Apéndice B . Tecnologías pirometalúrgicas de fundición**

**Tabla C**

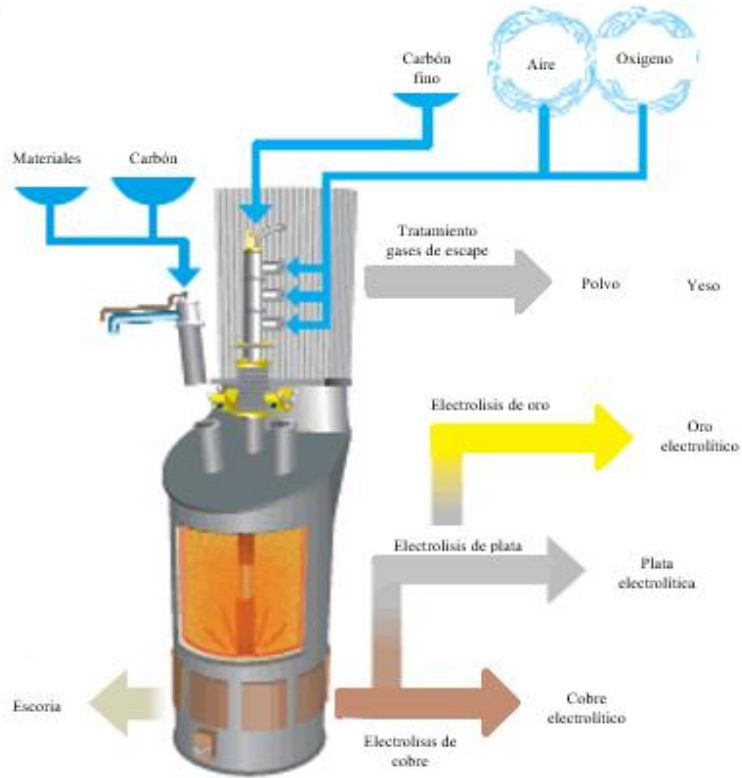
*Tecnologías pirometalúrgicas de fundición.*

Tecnologías	Generalidades	Capacidad de procesamiento de RAEE	Temperatura de operación	Continuo	Lotes	Proceso unitario	Alcance tecnológico	Huella industrial	Control de contaminantes	Toxicidad	Referencias
TSL Ausmelt	Horno vertical el cual se inserta una lanza de combustión y se sumerge en el material fundido. Las tecnologías Isasmelt y Ausmelt son procesos de fusión por lanza, difieren en su patente tecnológica.	Alcanza el 100%	1250-1300°C	SI	SI	NO	Industrial: Dow y GRM	pequeña, es un horno vertical	El sistema es tan compacto que elimina casi toda las emisiones de gases, baja producción de polvos. La escoria sale con bajo contenido de Cu y MP, usado para cemento o vertederos	Baja	Hughes et al., 2019 Isasmelt, (s.f) Mineria America Latina, 1994
TSL Isasmelt	Alimento mixto (10% en umicore)		1000-1200°C	SI	SI	NO	Industrial: Umicore, Aurubis	Pequeña, es un horno	Baja fuga de gases, horno compacto.	Baja	
Glencore/No randa	Horno cilíndrico horizontal equipado con toberas	15% de RAEE	1200°C-1250°C	SI	NO	NO	Industrial, Noranda	Grande, es horizontal	Limpieza de gas humedo por Venturi y eliminación de Hg, Baja producción de polvos		Khaliq et al., 2014 Rivero, (s.f)
Kaldo TBRC	Convertidor rotatorio de soplado superior, es un horno inclinado y con movimiento rotatorio en el cual se inyecta oxígeno a través de una lanza	Alcanza 100% de residuos electricos y electronicos	1500°C	no	SI	NO	Industrial (Boliden)	Pequeña	Sistema Compacto, evita perdida de emisiones	Baja	Ingeniería, (s.f) Hughes et al., 2019 mogroup, (s.f).
Outokumpu Flash	Horno vertical que permite la fusión del material en suspensión	Alimento mixto (Acepta solo es una porción de RAEE)	1230°C	SI	NO	NO	Industrial JX Nippon	Grande, horno horizontal	Manejo de polvos Disminución de emisiones	relativamente baja	Ingeniería, (s.f) Hughes et al., 2019

**Apéndice C. Diagramas de los procesos pirometalúrgicos implementados por diferentes empresas para la extracción de metales preciosos de RAEE.**

**Figura C1**

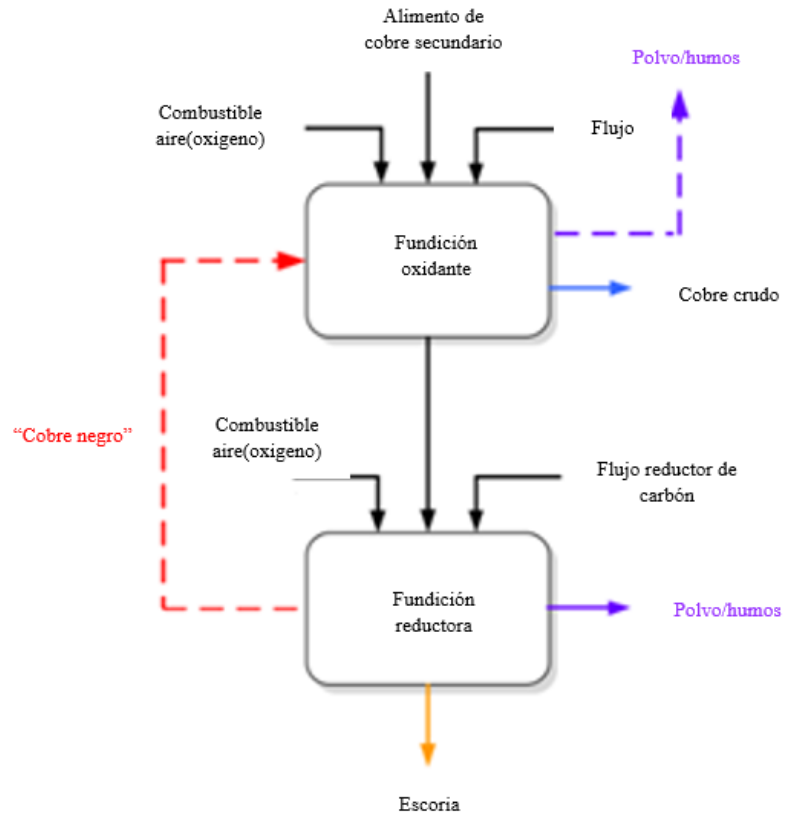
*Horno de fundición TSL y productos del proceso de DOWA METALS AND MINING en Kosaka*



**Nota:** Recuperado y adaptado de DOWA CCR Report 2010 (<http://www.dowa-csr.jp/>)

**Figura C2**

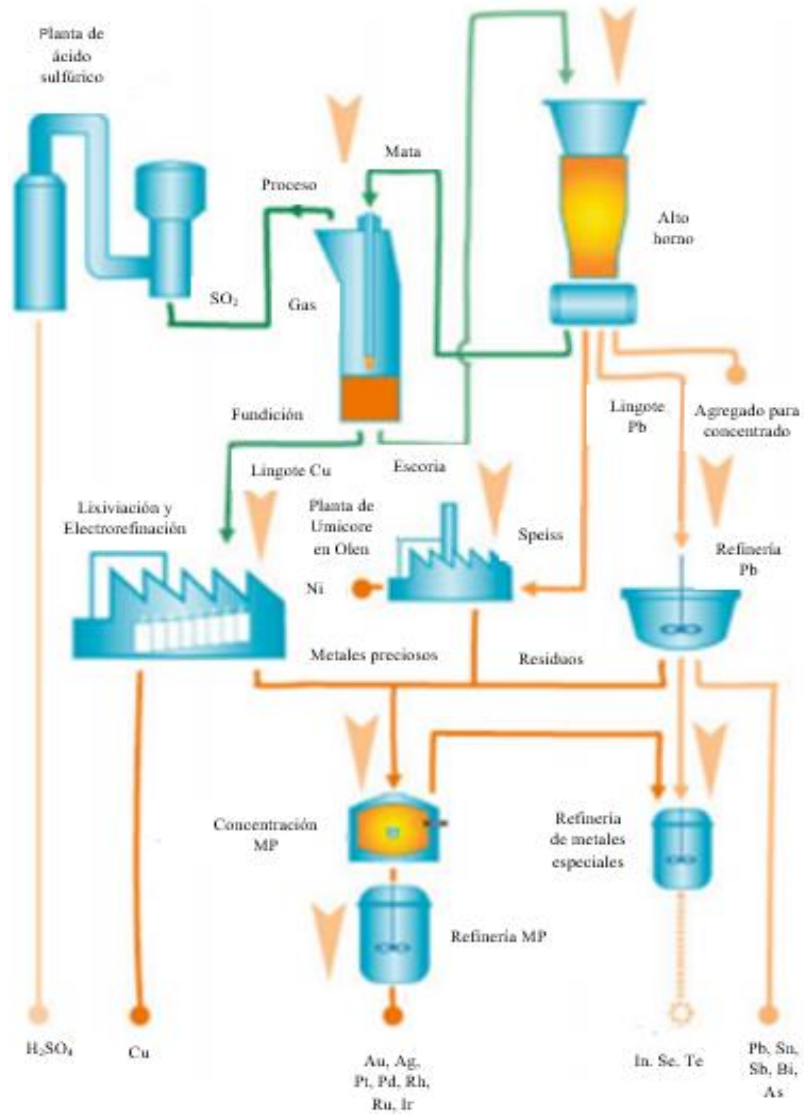
*Diagrama de flujo de fundición oxidativa/fundición reductora adoptado por Global Resources and Materials en la recuperación de metales preciosos.*



**Nota:** Tomado de: Secondary copper processing using outotec ausmelt TSL technology (Wood et al., 2011).

**Figura C3.**

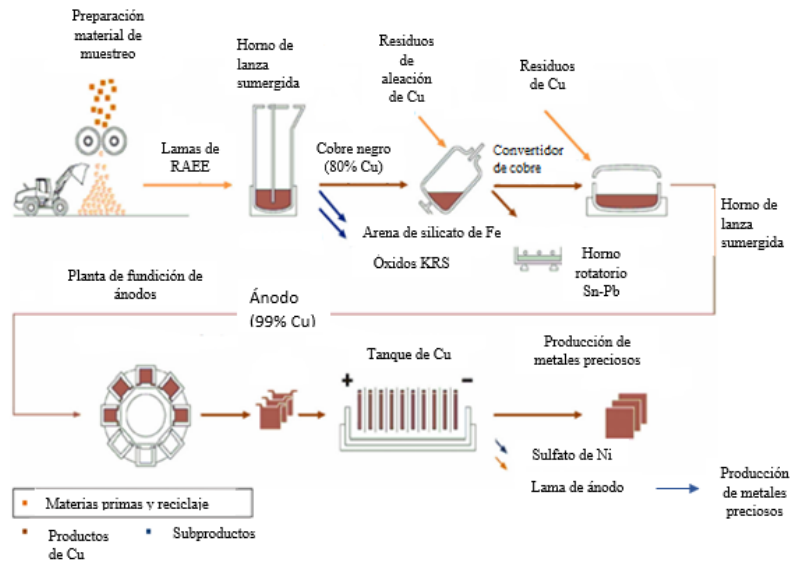
*Diagrama de la fundición y refinería integradas de metales de Umicore en Hoboken*



*Nota:* Adaptado de Recycling of Electronic Scrap at Umicore Precious Metals Refining (Hagelken, 2010)

**Figura C4**

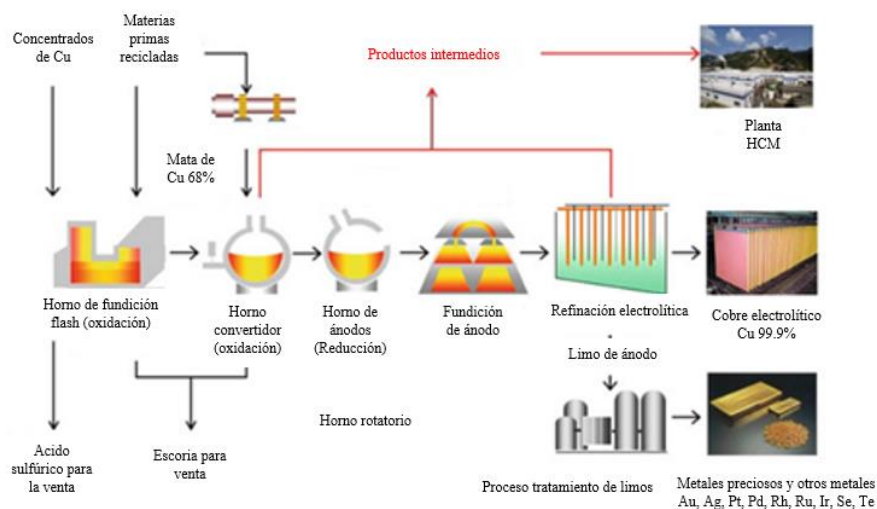
*Diagrama de planta Aurubis ISASMELT parte del Sistema de reciclaje Kayser*



*Nota:* Recuperado y adaptado de ISASMELT for the Recycling of E-Scrap and Copper in the U.S. Case Study Example of a New Compact Recycling Plant (Flores et al., 2014).

**Figura C5**

*Diagrama del proceso de fundición de cobre y recuperación de metales de JX- NMMC*

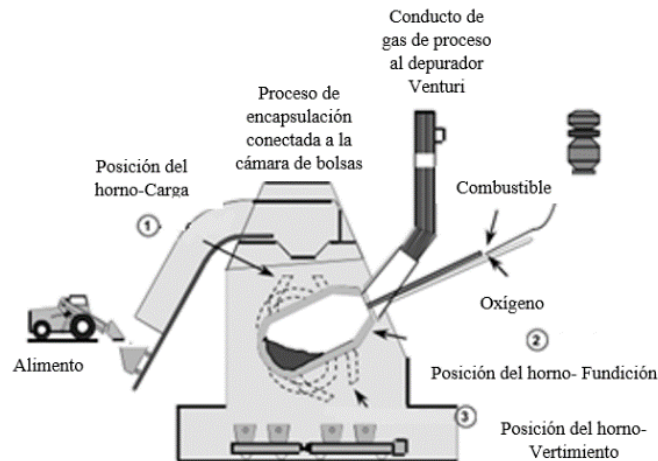


*Nota:* Recuperado y adaptado de Pb-Zn 9th International Symposium on Lead and Zinc Processing 2020

(p.532). (Siegmund et al., 2020)

**Figura C6**

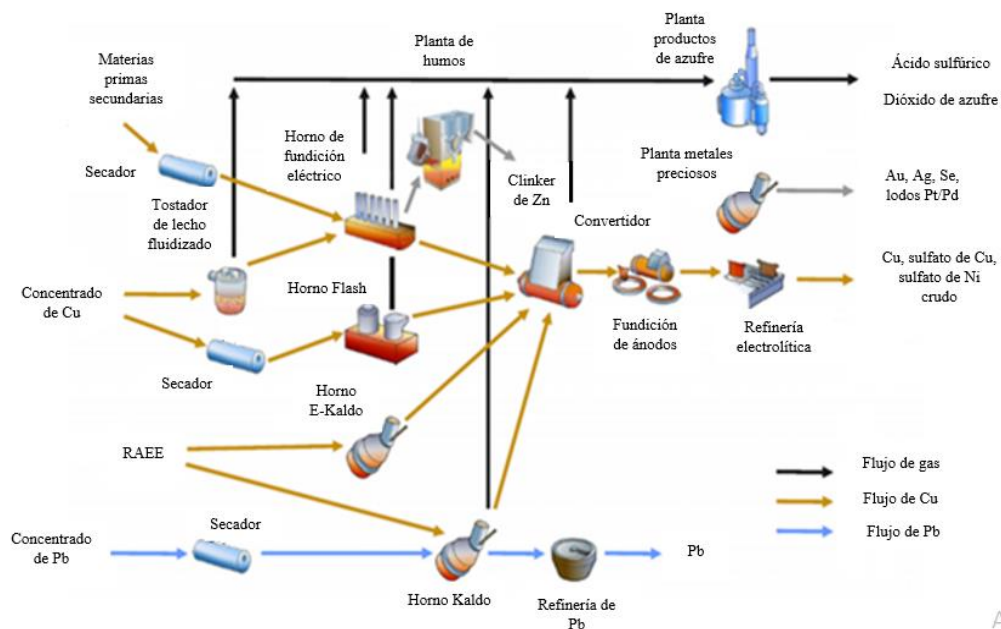
*Horno de fundición Kaldo de Boliden Rönnskär*



*Nota* : Recuperado y adaptado de *Plastics Recovery from Waste Electrical & Electronic Equipment in Non-Ferrous Metal Processes* (p.10) por Mark & Lehner, 2020. APME

**Figura C7**

*Diagrama de flujo del proceso en la fundición Rönnskär, Boliden.*



*Nota*: Recuperado y adaptado de: *Lennartsson et al., 2018. Journal of Sustainable Metallurgy*

**Apéndice D. Alternativas de recuperación de metales preciosos de tarjetas electrónicas por procesos hidrometalúrgicos bajo las condiciones de operación de diversos autores.**

Medio Lixiviante	Caracterizac. PCB	Concentrac.	pH	T (°C)	Tiemp. (h)	Metal Recuperado	Nivel de extensión de la tecnología	Autor (es)
<b>Cianuro de sodio</b>	368 ppm Au 557 ppm Ag	0.13 M	11	25	24	87.9% Au 86.4% Ag 96.5% Cu	Lab	Oraby et al., 2019
<b>Cianuro de sodio</b>	0.06% Au 0.52% Ag 27.37% Cu 0.04% Pd	0.1 M Cianuro	11	20	24	95% Au 93% Ag 99% Pd 41.8% Cu	Lab	Quinet et al., 2008
<b>Cianuro de potasio</b>	879.89g/Ton Au 272 g/Ton Ag 379,6 g/Ton Cu	6-8%	12.5	25	2 a 4	60-70% Au	Lab	Petter et al, 2014
<b>Cianuro de potasio</b>	489,1g/T de Au	6-8%	12.5	25	2	88% Au	Lab	Kasper et al., 2018
<b>Tiosulfato de sodio</b>	440g/Ton Au	72.7 mM Tiosulfato 10 mM Cu <sup>2+</sup> 0.266 M amoniac	~10	40	<10 min	91% Au	Lab	Ha et al., 2014
<b>Tiosulfato de Amonio</b>	272.25 g/Ton Ag 879.89 g/Ton Au 379.65 kg/Ton Cu	0.1 M Tiosulfato de amonio 0.2 M Hidróxido de amonio 0.015 M - 0.03 M [Cu <sup>2+</sup> ] 0.01-0.05-	9.0 ~10 .1	25~ 26	4	15% Au 3% Ag	Lab	Petter et al., 2014

Medio Lixiviante	Caracterizac. PCB	Concentrac.	pH	T (°C)	Tiemp. (h)	Metal Recuperado	Nivel de extensión de la tecnología	Autor (es)
		0.1 M H2O2						
<b>Tiosulfato de Amonio</b>	625.97g/ton Au 1770 g/ton Ag 389.77Kg/ton Cu	2.5M Ácido sulfúrico 20% en vol. de Peróxido de hidrogeno al 35%, 0.12M Tiosulfato de amonio 0,2 Amoniaco al 30% 20mM de cobre (+2) 0.1 M Tiosulfato de sodio 0.2 M	8.5 a 11	25	3h Etapa acida 4h Tiosulfato	91.22% Au 75.19% Ag >99%Cu	Lab	Rondón, 2017.
<b>Tiosulfato de sodio</b>	879.89 g/Ton Au 272.25 g/Ton Ag	Hidróxido de amonio 0.015 M - 0.03 M [Cu 2+] 0.01-0.05-0.1 M H2O2	9.9 ~10 .9	25~26	4	15% Au 3% Ag	Lab	Petter et al., 2014
<b>Tiosulfato de Amonio</b>	453.4g/To n Au 1962.9g/T on Ag 273g/Ton Cu	0.7M Tiosulfato de amonio, Amoniaco hasta ajustar pH	10.5	25	6	81% Au 88 % Ag 32 % Cu	Lab	Gaméz et al., 2019

Medio Lixiviante	Caracterizac. PCB	Concentrac.	pH	T (°C)	Tiemp. (h)	Metal Recuperado	Nivel de extensión de la tecnología	Autor (es)
<b>Tiosulfato de sodio</b>	0.91% de Au	0.5M Tiosulfato, 0.05M Ion cobre, 1.2M Amoniac, 0.1M Na2SO3	10	25	4	95.3% Au	Lab	Xiang et al., 2018
<b>Tiourea</b>	398.6 mg Cu 0.043 mg Au 0.54 mg Ag	24 g/L tiourea 0.6% de Fe3+ 0.5 mol/L H2SO4	1	25	2	90% Au 50% Ag	Lab	Jing-ying et al., 2012
<b>Tiourea</b>	136 mg/kg Au 689 mg/kg of Ag	20 g/L of thiourea, 6 g/L of ferric ion, 0.1 M of sulfuric acid Au: 0,5 M Tiourea 0,05 M H2SO4	2	25	1	90% Au 75% Ag	Lab	Birloaga & Veglio, 2016
<b>Tiourea</b>	3.47 mg/g 7.17 mg/g	0.01 M de ion férrico Ag: 0.5 M Tiourea 0.01 M H2SO4	-	40 Au 60 Ag	2:Au 4:Ag	3.17 mg/g : 91% Au 6.78 mg/g : 96% Ag	Lab	Gurung et al., 2013

Medio Lixiviante	Caracterizac. PCB	Concentrac.	pH	T (°C)	Tiemp. (h)	Metal Recuperado	Nivel de extensión de la tecnología	Autor (es)
<b>Tiourea</b>	141 ppm Au 2111 ppm Ag	1 Lix. 2 M H2SO4	-	1. Lix 60	1 Lix. 6	98% Au 100% Ag	Lab	Lee et al., 2018
		2 Lix. 60 g/L Tiourea 2 M H2SO4 0.5 M H2O2		2. Lix 60	2 Lix. 4			
<b>Yoduro</b>	67 mg/Kg Au 326g/kg Cu	Paso 1:  yodo 5g/L yoduro de potasio 30g/L	Pas1 -	Pas1 25	Pas1 1 h	93.4% Au	Lab	Yin et al., 2014
		Paso 2:  ácido sulfúrico a 2,5 g/l peróxido de hidrógeno al 5%	Pas2 1.5	Pas2 40	Pas 2: 3 h	95.7% Ag		
<b>Yoduro</b>	323.3ppm Au 688ppm Ag 1040ppm Cu	3% Yoduro 1% H2O2	7	35	4	>95% Cu 99.98% Au	Lab	Sahin, M. et al., 2015
<b>Cloruro</b>	162 µg/g Au 618 µg/g Ag	200 ml (32% HCL- 55% HNO3)	1	25	3 h	90%	Lab	Masile na & Ndlovu, 2018

Medio Lixiviante	Caracterizac. PCB	Concentrac.	pH	T (°C)	Tiemp. (h)	Metal Recuperado	Nivel de extensión de la tecnología	Autor (es)
<b>Cloruro</b>	66% Cu 0.045% Au	0.1 M HCl densidad de pulpa 160g/L	-	25	3 h Cu 10m. Au	93.06% Au 94.91% Cu	Lab	Eun- young Kim., et al 2011
<b>Bromuro</b>	0.137 %Ag 0.0058% Au	6.6 g·dm <sup>-3</sup> Br <sub>2</sub> 20 g de dm <sup>-3</sup> Bromuro (NaBr)	2	25	3 h	98,64% Au 97,23% Ag	Lab	Kogan & Berko vich, 2019
<b>Bromuro</b>	145ppm Au 513ppmA g 24.1ppm Cu	1.17M NaBr 0.77 M Br <sub>2</sub> 2 M HCl		23. 5	10	Au Ag Cu Ni >95%	Lab	Cui & Ander son., 2020

### **Apéndice E. Marco práctico para el desarrollo del Proceso Analítico Jerárquico**

Debido a la naturaleza del proyecto y la diversidad de criterios que deben ser analizados para cada método metalúrgico se procede a determinar la alternativa pirometalúrgica e hidrometalúrgica con mayor importancia relativa a partir del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), dicho resultado se usará en la evaluación de perspectiva nacional Colombiana.

#### ***Desarrollo de la estructura jerárquica***

Una de las partes más relevantes para el desarrollo del método AHP, es el ordenamiento de la estructura jerárquica de lo que se desea evaluar, está conformada por el objetivo general, los criterios, subcriterios y alternativas como se puede ver en la figura 2 del documento.

En esta etapa es importante definir el objetivo de la estructura jerárquica pirometalúrgica e hidrometalúrgica los cuales son: "Priorizar las tecnologías de fundición para residuos eléctricos y electrónicos para la recuperación de metales preciosos" y "Priorizar los procesos de lixiviación para residuos eléctricos y electrónicos para la recuperación de metales preciosos" respectivamente.

#### ***Identificación de los criterios***

En este caso los criterios son aquellos que permiten evaluar las alternativas y afectan directamente a los objetivos, para este caso se incluyeron 3 criterios principales los cuales son : Técnico , Ambiental y Social.

El criterio técnico define los datos relacionados con el desarrollo de la alternativa para el diseño ingenieril de la misma, este aspecto apoya en la toma de decisión respecto a la importancia de una alternativa sobre otra siempre y cuando sean de la misma vía extractiva (pirometalúrgica o hidrometalúrgica). Por otro lado, el criterio ambiental está relacionado con el impacto y los efectos que puede causar el uso de una alternativa sobre el medio ambiente y la salud. En este caso este criterio será medido mediante el control de contaminantes y toxicidad que representa la ejecución

de la alternativa y finalmente el criterio social, pretende medir el impacto que representa la ejecución de las alternativas sobre el bienestar de la sociedad.

### *Escala para las mediciones*

Para realizar las comparaciones entre los criterios y subcriterios se usó una escala de razon de importancia, preferencia o probabilidad propuesta por Thomas Saaty, como se muestra en la tabla E1 :

**Tabla E1**

*Valores de escala Saaty para comparaciones*

Intensidad	Definición	Explicación
1	Igual	Dos actividades contribuyen de igual forma al cumplimiento del objetivo La experiencia y el juicio favorecen
3	Moderada	levemente a una actividad sobre la otra La experiencia y el juicio favorecen
5	Fuerte	fuertemente una actividad sobre la otra. Una actividad es mucho mas favorecida
7	Muy fuerte o demostrada	que la otra: su predominacion se demostró en la practica. La evidencia que favorece una actividad
9	Extrema	sobre la otra es absoluta y totalmente clara.
2,4,6,8	Para transar entre los valores anteriores	Cuando se neesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes.

Intensidad	Definición	Explicación
Recíproco	Si la actividad X se le ha asignado uno de los valores numericos distintos de cero mencionados cuando se compara con la actividad Y, entonces Y tiene el valor recíproco cuando se la compara con X ( $a_{xy} = 1/a_{yx}$ )	Hipótesis del método

**Nota:** Adaptado de Villegas s.f.

***Comparación binaria entre los criterios y subcriterios***

Con base en la escala propuesta por Saaty procedemos a comparar cada criterio por medio de una matriz de ponderacion de los criterios con respecto al objetivo general como se observa en la tabla E2 (Tomaremos como ejemplo el del metodo pirometalurgico).

**Tabla E2**

*Matriz de comparación de los criterios respecto al objetivo gteneral*

<b><i>"Priorizar las tecnologías de fundición para residuos eléctricos y electrónicos para la recuperación de metales preciosos"</i></b>	Técnico	Ambiental	Social
Técnico	1,00	3,00	7,00
Ambiental	0,33	1,00	5,00
Social	0,14	0,20	1,00

En dicha matriz los valores de la diagonal principal se asumen con el valor 1, ya que cada criterio es igual de importante consigo mismo. Los valores por debajo de la matriz son la inversa

de los valores situados en la parte superior, es decir, si el criterio tecnico es 3 veces mas importante que el ambiental con respecto al objetivo, entonces el valor del criterio ambiental es 3 veces menos importante que el criterio tecnico respecto al objetivo general.

Para este caso el criterio ambiental es moderadamente mas importante que el criterio ambiental y muy fuertemente mas importante que el criterio social respecto al objetivo. Para el caso del criterio ambiental es moderadamente menos importante que el criterio técnico y fuertemente mas importante que el critreio social con respecto al objetivo y finalmente el criterio social es muy fuertemente menos importante que el criterio tecnico y fuertemente menos importante que el ambiental.

De la misma manera se realiza la matriz de comparación entre subcritreios de acuerdo al cirterio superior como se observa en la tabla E3, tabla E4 y tabla E5.

**Tabla E3**

*Matriz de comparación de subcriterios respecto al criterio técnico*

Técnico	CP	TP	CL	PU	AT	HI
CP	1,00	1,00	4	1,00	1/5	5,00
TP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CL	1/4	1,00	1,00	1,00	1/5	3,00
PU	1,00	1,00	1,00	1,00	1/3	1,00
AT	0,2	1,00	1/3	1,00	1,00	3,00
HI	1/5	1,00	1/3	1,00	1/3	1,00

**Nota:** CP: Capacidad de procesamiento; TP: Temperatura de proceso; PU: Proceso unitarios; AT: Alcance

tecnológico; HI: Huella industrial; CL: Continuo/Lotes

**Tabla E4**

*Matriz de comparación de subcriterios respecto al criterio ambiental*

Ambiental	CC	TX
CC	1,00	5,00
TX	1/5	1,00

**Nota:** CC: Control de contaminantes; TX: Toxicidad

**Tabla E5**

*Matriz de comparación de subcriterios respecto al criterio social*

Social	LRE	DRH	BER
LRE	1,00	1,00	1,00
DRH	1,00	1,00	1,00
BER	1,00	1,00	1,00

**Nota:** LRE: Liberación de recursos económicos; DRH: Disminución de RAEE en hogares; BER: Beneficio

empresas recolectoras

**Calculo y determinación de los autovectores para los criterios**

El autovector o también conocido como vector propio permite determinar la importancia relativa de los criterios evaluados. Los autovectores se enuncian en la tabla E6 a continuación:

**Tabla E6**

*Calculo de los autovectores y autovectores normalizados para los criterios*

<i>"Priorizar las tecnologías de fundición para residuos eléctricos y electrónicos para la recuperación de metales preciosos"</i>	Técnico	Ambiental	Social	Wi	Ci
<b>Técnico</b>	1,00	3,00	7,00	2,76	0,65
<b>Ambiental</b>	0,33	1,00	5,00	1,19	0,28
<b>Social</b>	0,14	0,20	1,00	0,31	0,07

**Nota:** Wi: Autovector; Ci: Autovector normalizado

El autovector de cada criterios (ver ecuación E1,E2,E3) y vector normalizado de cada criterio (ver ecuación E5,E6,E7) se hallo de la siguiente manera:

$$W_{\text{técnico}} = (1,00 \cdot 3,00 \cdot 7,00)^{\frac{1}{3}} = 2,76 \text{ (Ecuación E1)}$$

$$W_{\text{ambiental}} = (0,33 \cdot 1,00 \cdot 5,00)^{\frac{1}{3}} = 1,19 \text{ (Ecuación E2)}$$

$$W_{\text{social}} = (0,14 \cdot 0,20 \cdot 1,00)^{\frac{1}{3}} = 0,31 \text{ (Ecuación E3)}$$

$$\Sigma W_i = W_{\text{técnico}} + W_{\text{ambiental}} + W_{\text{social}} \text{ (Ecuación E4)}$$

$$\Sigma W_i = 4,25$$

$$C_{\text{técnico}} = \frac{2,76}{4,25} = 0,65 \text{ (Ecuación E5)}$$

$$C_{\text{ambiental}} = \frac{1,19}{4,25} = 0,28 \text{ (Ecuación E6)}$$

$$C_{\text{social}} = \frac{0,31}{4,25} = 0,07 \text{ (Ecuación E7)}$$

Los valores de  $C_{\text{técnico}}$ ,  $C_{\text{ambiental}}$  y  $C_{\text{social}}$  se consideran los pesos o importancias relativas de los criterios, es decir el criterio con mayor importancia relativa es el criterio tecnico que efectivamente coincide con el el objetivo principal del proyecto.

De la misma manera se procedió con las matrices de comparación de todos los subcriterios de cada criterio como se muestra en la tabla E7, tabla E8 y tabla E9.

**Tabla E7**

*Autovector y autovector normalizado para los subcriterios del criterio tecnico*

Tecnico	CP	TP	CL	PU	AT	HI	Wi	Ci
CP	1,00	1,00	4,00	1,00	1/5	5,00	1,26	0,25
TP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,2
CL	1/4	1,00	1,00	1,00	1/5	3,00	0,73	0,14
PU	1,00	1,00	1,00	1,00	1/3	1,00	0,83	0,16

Tecnico	CP	TP	CL	PU	AT	HI	Wi	Ci
AT	0,20	1,00	1/3	1,00	1,00	3,00	0,76	0,15
HI	1/5	1,00	1/3	1,00	1/3	1,00	0,53	0,10

**Tabla E8**

*Autovector y autovector normalizado para los subcriterios del criterio social*

Social	LRE	DRH	BER	Wi	Ci
LRE	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33
DRH	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33
BER	1,00	1,00	1,00	1,00	0,33

**Tabla E9**

*Autovector y autovector normalizado para los subcritreios del criterio ambiental*

Ambiental	CC	TX	Wi	Ci
CC	1,00	5,00	2,24	0,83
TX	1/5	1,00	0,45	0,17

Una vez hallados estos valores se debe verificar que los valores de la matriz y los vectores son consistentes, es decir, que tan consistentes son los juicios efectuados. Para esto se debe calcular el  $\lambda_{max}$  o también conocido como autovalor (ver ecuación E8), este debe ser un valor que pertenezca a los números reales y debe ser mayor o igual a n (para este cálculo ejemplo, el número de criterios), mientras más cerca esté el valor a n, la matriz de comparación de criterios será más consistente.

$$\lambda_{max} = (\lambda_{técnico} + \lambda_{ambiental} + \lambda_{social}) \text{ (Ecuación E8)}$$

$$\lambda_i = C_i * (\sum \text{Columna del criterio } i) \text{ (Ecuación E9)}$$

$$\lambda_{técnico} = 0,65 * (1,00 + 0,33 + 0,14) = 0,96$$

$$\lambda_{ambiental} = 0,28 * (3,00 + 1,00 + 0,20) = 1,17$$

$$\lambda_{\text{social}} = 0,07*(7,00 + 5,00 + 1,00) = 0,94$$

$$\lambda_{\text{max}} = 3,06 \text{ (E13)}$$

Como podemos observar el valor de  $\lambda_{\text{max}} = 3,06$ , este valor concuerda con que debe ser mayor o igual a n (para este caso el numero de criterios).

Posterior a esto se determinan el valor del índice de consistencia (CI) (Ecuación E13) para calcular la razón de consistencia (CR) (Ecuación E14).

$$CI = \frac{\lambda_{\text{max}} - n}{n - 1} \text{ (Ecuación E13)}$$

$$CI = \frac{3,06 - 3}{3 - 1}$$

$$CI = 0,0324438$$

$$CR = \frac{CI}{Rci} \text{ (Ecuación E14)}$$

En donde Rci= índice de consistencia aleatorio

$$Rci = \frac{1,98 * (n - 2)}{n}$$

$$Rci = \frac{1,98 * (3 - 2)}{3} = 0,66$$

$$CR = \frac{0,0324438}{0,66} = 0,0492 \leq 0,10 \text{ **Consistente**}$$

Se demuestra que la razón de consistencia de la matriz de criterios es consistente según nuestro juicio ya que el resultado de  $CR_{\text{criterios}}$  fue 0,0492, valor que entra dentro del rango de consistencia razonable ( $CR \leq 0,10$  Consistencia razonable  $CR > 0,10$  Inconsistencia).

De igual forma se procedió para verificar la razón de consistencia para las matrices de todos los subcriterios de cada criterio. La tabla E10 resumen las ponderaciones de cada criterio con respecto al objetivo y las ponderaciones de cada subcriterio con respecto a cada criterio, en la

columna final se determina la poderacion final que es la multiplicacion entre las dos poderaciones antes mencionadas y asi obtener el autovector final.

**Tabla E10**

*Autovectores de los criterios y subcriterios de los procesos pirometalurgicos y autovector final de los subcriterios con respecto a los criterios*

<b>Criterio</b>	<b>Autovector</b>	<b>Subc.</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Autovector final</b>
<b>TÉCNICO</b>	0,65	CP	0,25	0,16
		TP	0,19	0,13
		PU	0,14	0,09
		AT	0,16	0,11
		HI	0,15	0,09
		CL	0,10	0,07
<b>AMBIENTAL</b>	0,28	CC	0,83	0,23
		TX	0,17	0,05
		LRE	0,33	0,02
<b>SOCIAL</b>	0,07	DRH	0,33	0,02
		BER	0,33	0,02

El autovector final se multiplica con la matriz de ponderaciones de cada subcriterio con respecto a las alternativas , este paso final determinará las importancias relativas de cada proceso de fundicion lo cual nos conlleva a nuestro objetivo general.

***Comparación binaria entre alternativas***

Las matrices de los subcriterios con respecto a las alternativas se determina de igual manera que en la comparacion binaria de criterios y subcriterios. En la tabla E11 se resume dichas matrices.

**Tabla E11**

*Resumen de las matrices de comparación de las alternativas pirometalurgicas en relacion a los subcriterios*

	CP	TP	PU	AT	HI	CL	CC	TX	LRE	DRH	BER
<b>TSL Ausmelt</b>	0,30	0,16	0,20	0,20	0,08	0,35	0,33	0,25	0,20	0,20	0,20
<b>TSL Isasmelt</b>	0,25	0,10	0,20	0,20	0,08	0,35	0,30	0,25	0,20	0,20	0,20
<b>Kaldo TBRC</b>	0,30	0,46	0,20	0,20	0,08	0,18	0,17	0,25	0,20	0,20	0,20
<b>Convertirdor Noranda</b>	0,06	0,14	0,20	0,20	0,38	0,06	0,11	0,13	0,20	0,20	0,20
<b>Outokumpu Flash</b>	0,03	0,14	0,20	0,20	0,38	0,06	0,05	0,13	0,20	0,20	0,20

Como se habia mencionado antes para determinar las importancias relativas de las alternativas se procese a multiplicar la matriz de resumen de comparacion de las alternaticas en relacion a los subcriterios (ver tabla E11) y el autovector final (ver tabla E10). En la tabla E12 se demuestra el resultado de dicho producto.

**Tabla E12**

*Importancia relativa de cada alternativa de los procesos de fundición pirometalurgica*

Alternativa	Importancia Relativa
<b>TSL Ausmelt</b>	0,24
<b>TSL Isasmelt</b>	0,23
<b>Kaldo TBRC</b>	0,23
<b>Convertirdor Noranda</b>	0,15
<b>Outokumpu Flash</b>	0,13

En la tabla E12 la alternativa de fundicicon mayor importancia relativa es Outotec TSL Ausmelt.

De igual forma se efectuan los calculos para hallar las importancias relativas de los métodos hidrometalurgicos.

En la tabla E13 se reumen los resultados de las matrices de comparacion de las alternativas hidrometalurgicas, la cual es necesaria para la multiplicacion matricial con el autovector final de la tabla E14, el resultado de ese producto es la importancia relativa de las diferentes alternativas hidrometalurgicas la cual se puede observar en la tabla E15.

**Tabla E13**

*Resumen de las matrices de comparación de las alternativas hidrometalurgicas en relación a los subcriterios*

	EF	VR	CR	CRR	AT	LR	DRH	BER	CC	TX
<b>Cianuro</b>	0,21	0,05	0,51	0,27	0,53	0,17	0,17	0,17	0,03	0,03
<b>Tiosulfato</b>	0,05	0,12	0,06	0,27	0,05	0,17	0,17	0,17	0,22	0,22
<b>Tiourea</b>	0,19	0,35	0,06	0,11	0,14	0,17	0,17	0,17	0,22	0,22
<b>Cloruro</b>	0,31	0,24	0,20	0,03	0,14	0,17	0,17	0,17	0,08	0,08
<b>Ioduro</b>	0,16	0,14	0,06	0,27	0,09	0,17	0,17	0,17	0,41	0,41
<b>Bromuro</b>	0,07	0,10	0,10	0,06	0,05	0,17	0,17	0,17	0,05	0,05

**Nota:** EF: eficiencia; VR: velocidad de reacción; CR: consumo de reactivo; CRR: corrosividad; AT: alcance tecnológico; LR: liberación de recursos; DRH: disminución de RAEE en hogares; BER: beneficio empresas recolectoras; CC: control de contaminantes; TX: Toxicidad.

**Tabla E14**

*Autovectores de los criterios y subcriterios de los procesos hidrometalurgicos y autovector final de los subcriterios con respecto a los criterios*

Criteria	Autovector	Subc.	Autovector	Autovecotor final
<b>TÉCNICO</b>	0,65	EF	8,97	0,06
		VR	5,99	0,04
		CR	43,99	0,29
		CRR	17,58	0,11
		AT	23,55	0,15
<b>SOCIAL</b>	0,07	GRE	64,91	0,05
		DRH	27,89	0,02
		VER	7,19	0,01

<b>Criterios</b>	<b>Autovector</b>	<b>Subc.</b>	<b>Autovector</b>	<b>Autovector final</b>
<b>AMBIENTAL</b>	0,28	CC	16,67	0,05
		TX	83,33	0,23

**Tabla E15**

*Importancia relativa de cada alternativa de los procesos de lixiviación hidrometalurgicos*

<b>Alternativa</b>	<b>Importancia relativa</b>
<b>Cianuro</b>	0,29
<b>Tiosulfato</b>	0,14
<b>Tiourea</b>	0,15
<b>Cloruro</b>	0,14
<b>Ioduro</b>	0,20
<b>Bromuro</b>	0,08

Como se observa en la tabla E15 la alternativa de mayor importancia relativa es el proceso de cianuración.

**Apéndice F. Valores de contenido de oro en las respectivas subcategorías de RAEE.****Tabla F***Oro contenido en las subcategorías RAEE*

<b>RAEE</b>	<b>% de subcategoría en gestión</b>	<b>% Recalculado</b>	<b>ppm Au</b>	<b>%Au</b>	<b>Au(kg) en 1 ton de RAEE</b>
TV	20	25,5	20	2x10 <sup>-3</sup>	0,0051
PC	14	18	250	0,025	0,045
Celulares	2	2,6	350	0,035	0,0091
Neveras	13	16,7	0	0	0
Lavadoras	11	14	0	0	0
Equipos de audio	13	16,7	10	1x10 <sup>-3</sup>	0,00167
Equipos de video	5	6,4	15	1,5x10 <sup>-3</sup>	0,00096
Bombillos	13	0	0	0	0
Pilas	8	0	0	0	0
Otros	8	0	0	0	0
<b>Total</b>					<b>0,06183</b>

**Apéndice G. Determinación de la cantidad de RAEE necesaria para suplir demanda interna de oro(1t) mediante alternativa hidrometalúrgica.**

Producción de oro de 1 t con 95% de recuperación según (Quinet et al., 2008)

$$\frac{1 \text{ t Au}}{95\%} = 1,053\text{tAu}$$

Tomando como base de cálculo 1000 kg RAEE:

$$x = \frac{1000\text{kg RAEE} \cdot 1053\text{kgAu}}{0,06183\text{kg Au}}$$

$$x = 17,030\text{t RAEE}$$