

Análisis de las posibilidades disponibles para el aprovechamiento de las baterías
domésticas gastadas en Colombia

Silvia Juliana Bermejo Villamarin

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Pedro Luis Delvasto Angarita

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Dedicado en primer lugar, a mi abuela Nohora, porque su apoyo incondicional fue decisivo para cursar mis estudios de pregrado; ella, con su labor magisterial fue un excelente ejemplo y guía durante mi proceso de formación en el colegio, y gracias a ello adquirí las herramientas necesarias para desenvolverme de manera íntegra a lo largo de mi carrera universitaria.

A mis padres Claudia Juliana y Pedro Alejandro, por ser unos excelentes consejeros y guías en los momentos más difíciles, cuando creía que no iba a poder seguir; su apoyo, paciencia y fuerza, fueron el motor para seguir adelante y poder cumplir mis metas. Su amor incondicional y acompañamiento han sido lo que cada día me hace una mejor persona. A mi abuela Carmen, que a pesar de la distancia siempre ha estado presente de corazón y en cada una de sus oraciones me encomienda y pide que jamás me suelte de la mano de Dios. A mis hermanos, Juan Alejandro y Nicolás Leandro, por acompañarme, no sólo en los momentos difíciles, sino que también en los triunfos a lo largo de este transitar. También, a mi tío Juan Fernando, por ser un excelente amigo, consejero y apoyo; él me ha enseñado que para llegar muy lejos hay que esforzarse y notar que tanto el camino como la meta alcanzada, valen siempre cada esfuerzo y dedicación. A mis amigas Pilar, Laura, Mafe Flórez, Heidy y Mafe Hernández, y a mi novio, Jhonatan, por compartir las mejores experiencias y, sobre todo, por el apoyo tan grande que me han brindado a lo largo de mi vida y particularmente de mi carrera, ya que han sido, al igual que mi familia, un motor para cada día seguir adelante, querer ser mejor y desarrollar mi proyecto de vida

A todas las personas que hacen parte de mi vida, mi sincero reconocimiento y siempre ocuparán un lugar especial en mi corazón.

Silvia Juliana Bermejo Villamarin

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander y a cada uno de los profesores de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, por brindar una excelente formación profesional y de alta calidad. Además, por su acompañamiento con cada uno de los estudiantes para su crecimiento académico y personal.

Agradezco, en especial, al profesor Pedro Luis Delvasto por ser un excelente guía en esta etapa final de mi carrera profesional. Su paciencia, entrega, apoyo y conocimientos dieron pie para lograr culminar mis estudios. Es un excelente docente, que a lo largo de la carrera impartió los mejores conocimientos que fueron fruto para poder alcanzar el título de Ingeniera Metalúrgica.

A mis compañeros y amigos con los que tuve la gran oportunidad de cursar estos estudios, por compartir sus conocimientos y ser una mano amiga y apoyo en cada una de las materias cursadas, logrando juntos llegar casi hasta el final. En especial a María Fernanda, Juan Pablo, Ferney, Gustavo y Javier, que fueron unos excelentes amigos y apoyo, compartiendo sus conocimientos y consejos que me dieron un empujón en cada obstáculo para poder llegar hasta aquí.

A María Fernanda que, a pesar de no ser mi compañera de tesis, me colaboró en todo lo que estuvo a su alcance e hizo parte de todo el proceso de realización de mi trabajo de grado. Además, a lo largo de la carrera fue una excelente compañera y amiga, y le ofrezco mis mayores agradecimientos por estar presente hasta el final de mi camino como estudiante.

Al señor David Pérez, gerente general de la empresa bumanguesa Social RAEE, por su disposición, colaboración y proporción de información para complementar esta investigación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. Marco referencial	13
2.1 Generalidades	13
2.1.1 Clasificación de las baterías	14
2.2 Procesamiento tradicional de pilas y baterías domésticas gastadas	17
2.2.1 Procesos mecánicos	18
2.2.2 Procesos pirometalúrgicos	18
2.2.3 Procesos hidrometalúrgicos	20
2.2.4 Procesos electrometalúrgicos	22
2.3 Actividades de investigación generados por universidades acerca de los procesos de recolección y tratamiento de pilas y baterías domésticas gastadas en colombia	26
2.4 Actividades de investigación generados por industrias acerca de los procesos de recolección y tratamiento de pilas y baterías domésticas gastadas en colombia	28
2.5 Economía circular	29
2.5.1 Transición de la economía lineal a la circular	30
3. Marco metodológico	32
3.1 Tipo de investigación	32

3.2 Instrumentos y vías para la recolección de información	32
4. Resultados y análisis.....	33
4.1 Entrevista con empresa gestora de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (raee) de la ciudad de bucaramanga.....	33
4.2 Análisis internacional de las legislaciones relacionadas con la economía circular	34
4.3 Análisis de las posibilidades disponibles para el aprovechamiento de las baterías domésticas gastadas en colombia	38
4.3.1 Aprovechamiento en la industria alfarera.....	41
4.3.2 Aprovechamiento en la industria de los recubrimientos.....	42
4.3.3 Aprovechamiento en la industria de las fundiciones metálicas	43
5. Conclusiones.....	45
Referencias bibliográficas	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Investigaciones realizadas por diferentes universidades de Colombia, acerca de procesos de recolección y tratamiento de pilas y baterías gastadas</i>	26
Tabla 2. <i>Actividades realizadas por diferentes empresas e industrias para mitigar la contaminación ambiental producida por las pilas y baterías domésticas gastadas y desechadas en el país</i>	28

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Procesos metalúrgicos utilizados en la actualidad para el aprovechamiento de pilas y baterías domésticas gastadas.</i>	17
Figura 2. <i>Productos obtenidos a partir de los diferentes procesos que abarcan cada uno de los sectores de la metalurgia</i>	25
Figura 3. <i>Masa en kilogramos de las baterías recolectadas en las ciudades de Bucaramanga y San José de Cúcuta, desde el año 2013 al año 2020</i>	34

Resumen

Título: Análisis de las posibilidades disponibles para el aprovechamiento de las baterías domésticas gastadas en Colombia *

Autor: Silvia Juliana Bermejo Villamarin **

Palabras Clave: Reciclaje de baterías, valorización de residuos, procesos metalúrgicos, materias primas, economía circular.

Descripción:

El objetivo de este trabajo de investigación fue establecer las posibilidades más factibles para el aprovechamiento de las pilas y baterías domésticas gastadas en Colombia, teniendo en cuenta el grave el impacto ambiental que estas generan, de tal forma que atiendan a los criterios que conjugan la pequeña escala. De acuerdo con esto, mediante un levantamiento bibliográfico, consulta a las industrias colombianas y basado en las legislaciones tanto nacionales como internacionales de la economía circular, se pudo obtener información sobre los procesos actuales de recolección, aprovechamiento y disposición final de las pilas y baterías domésticas gastadas a nivel nacional, las cuales podrían llegar a ser utilizadas como materias primas en distintas industrias con el fin de obtener diferentes productos con un alto valor agregado y que beneficien a la economía nacional, generando empleo y disminuyendo la contaminación ambiental que los desechos de las baterías gastadas producen. Así mismo, que estas industrias de pequeña escala puedan implementarse en el ámbito local. Además, se realizó una pequeña comparación del modelo económico nacional con el internacional, con el fin de determinar cuáles son las falencias que generan una barrera y obstaculizan la transformación del modelo económico lineal en un modelo de economía verde o circular.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Pedro Luis Delvasto Angarita. Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales.

Abstract

Title: Analysis of the available possibilities for the valorization of spent domestic batteries in Colombia*

Author: Silvia Juliana Bermejo Villamarin**

Key Words: Battery recycling, waste recovery, metallurgical processes, raw materials, circular economy.

Description:

The objective of this research work was to establish the most feasible possibilities for the use of spent domestic batteries and batteries in Colombia, considering the serious environmental impact that these generate, in such a way that they meet the criteria that combine the small scale. In accordance with this, through a bibliographic survey, consultation with Colombian industries and based on both national and international legislation of the circular economy, it was possible to obtain information on the current processes of collection, use and final disposal of spent domestic batteries at the national level, which could be used as raw materials in different industries to obtain different products with high added value and that benefit the national economy, generating employment and reducing environmental pollution that waste from spent batteries produces. Likewise, these small-scale industries can be implemented locally. In addition, a small comparison of the national economic model with the international one was made, to determine which are the shortcomings that create a barrier and hinder the transformation of the linear economic model into a green or circular economy model.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Pedro Luis Delvasto Angarita. PhD in Materials Science and Technology.

Introducción

A través del tiempo, se ha evidenciado la necesidad de los seres humanos por avanzar tecnológicamente con el fin de disminuir la realización de distintas funciones y actividades; a pesar de las comodidades que estos avances tecnológicos ofrecen, existe un problema a nivel mundial en escala potencial, la contaminación ambiental. Algunos de los elementos más utilizados para el funcionamiento de aparatos electrónicos y que más producen grandes efectos de daño al ambiente son las pilas y baterías domésticas; éstas al estar fabricadas de materiales tóxicos producen un grave impacto que con el paso del tiempo apuntan a en cambios climáticos e incluso a afectar la salud de los seres humanos (Godoy & Delvasto, 2015).

A nivel nacional, se han creado proyectos de recolección de baterías desechadas, surgiendo industrias y empresas que, no solo las recolectan, sino que también les dan un nuevo uso a sus componentes (Ministerio de Ambiente, 2010). En principio se encontraban únicamente dos puntos en la capital del país, pero estos proyectos y empresas fueron creciendo, de las cuales existen ahora aproximadamente 60 puntos de recolección situados en diferentes regiones del país; sin embargo, se pone en consideración si estas propuestas y empresas creadas están siendo eficaces en dicho trabajo y realmente disminuyen de forma notable la contaminación que se produce a partir de los residuos de dichas baterías (Anónimo, 2011).

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, queda claro que se hace necesario estudiar las posibilidades de aprovechar y darle un nuevo valor a las baterías domésticas gastadas, ya que en la mayor parte de nuestro país todavía hay deficiencias en la correcta separación de los residuos y, particularmente, con respecto al manejo de las baterías gastadas, las cuales, finalmente, pueden llegar a los vertederos, convirtiéndose en focos de contaminación. Adicionalmente, los sistemas

de recolección actual se encuentran con la limitación de que el país no cuenta con buenas infraestructuras para el transporte de las baterías recolectadas hacia los centros de reciclaje, lo cual afecta en gran medida los procesos logísticos inherentes al tratamiento de esta clase de residuos (Díaz-López et al., 2018). Este problema, por tanto, está aún a la espera de una solución radical y eficiente, que tome en cuenta la realidad local.

Ergo, la presente investigación se fundamenta en la recopilación de información científico-tecnológica para el establecimiento de posibles alternativas de reutilización en Colombia de algunos de los materiales contenidos dentro de las pilas y baterías domésticas. De esta forma, esta información puede ponerse al alcance de entes gubernamentales y público interesado, para llevar a cabo soluciones de índole local que atiendan este grave problema, desde la perspectiva de la economía circular. Según lo anterior, el objetivo principal de esta investigación es analizar las posibilidades más factibles existentes para el aprovechamiento y valorización de pilas y baterías domésticas gastadas en el país, que mejor se adapten al ámbito local, con el fin de visualizar procesos que sean a pequeña escala, los cuales puedan realizarse con mayor facilidad y puedan abarcar si no todo, a buena parte del territorio nacional.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Establecer, con base en la bibliografía disponible y en consulta a las industrias, las posibilidades más factibles en Colombia, para el aprovechamiento y valorización de los materiales contenidos dentro de las baterías domésticas gastadas.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar un levantamiento de información bibliográfica acerca de los distintos procedimientos existentes, para el reciclaje y valorización de baterías domésticas a nivel internacional.

Establecer, mediante consulta al sector industrial nacional, los procesos existentes en el país para recolección, clasificación, reciclaje y valorización de baterías domésticas.

Analizar tres posibles rutas para aprovechamiento en Colombia de las baterías domésticas gastadas, desde una perspectiva de la economía circular y atendiendo a criterios que conjuguen la pequeña escala de las operaciones en el ámbito local.

2. Marco Referencial

2.1 Generalidades

Una pila es un dispositivo que transforma la energía química que contienen sus materiales activos en energía eléctrica, a través de una reacción electroquímica de oxidación-reducción, también llamada reacción “redox”. Si pilas individuales se interconectan en serie o en paralelo para incrementar la potencia entregada, se les denomina baterías. Sin embargo, ambos términos se suelen utilizar indistintamente (Paradisi et al., 2015). Para sistemas recargables, las baterías deben recargarse mediante un proceso inverso; en este tipo de reacciones está implicada una transferencia de electrones, desde un material a otro, mediante un circuito eléctrico. En una reacción redox, la transferencia de electrones se da de forma directa y solo se involucra calor. Por lo tanto, las baterías tienen la capacidad de tener muy buena eficiencia en la conversión de energía (Linden & Reddy, 2002).

Una batería consta de una o varias celdas, las cuales son una unidad electroquímica básica. Estas pueden estar conectadas en serie o paralelo. La celda consta de tres componentes principales que son (Linden & Reddy, 2002):

- Ánodo o electrodo negativo, que es el reductor y cede electrones al circuito externo. Se oxida durante la reacción.
- Cátodo o electrodo positivo, que es el oxidante y acepta electrones del circuito externo, generando la reducción durante la reacción.
- Electrolito, que es el conductor de iones el cual proporciona el medio de transferencia de cargas, como los iones, dentro de la celda entre el ánodo y el cátodo.

2.1.1 Clasificación de las baterías

Las baterías se clasifican como; primarias, que no son recargables; y secundarias, que si es posible recargarlas:

Baterías primarias

Estas baterías no se pueden recargar eléctricamente de forma fácil o efectiva, por tanto, una vez descargadas deben desecharse; sin embargo, tienen una buena vida útil, alta densidad de energía en tasas de descarga bajas o moderadas, requieren poco o nulo mantenimiento y son fáciles de utilizar. La gran mayoría estas baterías son de una celda familiar, de forma cilíndrica y plana, y pilas de botón o multicelda (Linden & Reddy, 2002).

Se pueden encontrar diferentes tipos de estas baterías tales como: Pilas alcalinas, pilas de zinc-carbón, pilas de litio, baterías de níquel-metalhidruro, entre otras (Espinosa et al., 2004).

Pilas Alcalinas: las pilas alcalinas están compuestas por un ánodo de zinc de una gran superficie específica, un cátodo de dióxido de manganeso de alta densidad, y un electrolito de hidróxido de potasio.

- Cátodo: es una mezcla de dióxido de manganeso electrolítico de alta pureza y carbón conductor.
- Ánodo: es una mezcla gelatinosa de zinc en polvo y electrolito.
- Separadores: están compuestos de materiales especiales que previenen la migración de partículas sólidas en la pila.
- Carcaza de acero: es el envase que contiene los materiales activos de la pila, y sirve como colector del cátodo.
- Colector de latón: es el colector del ánodo.

- Terminales positivas y negativas: son las superficies de contacto, están hechas de acero niquelado.
- Film plástico: es el envoltorio plástico que aísla eléctricamente la pila (Chuquichanca & Leon, 2019).

Baterías Ni – MH: las baterías de Ni-Cd se vendieron predominantemente en el mercado como baterías recargables portátiles hasta 1992, cuando las baterías de Ni-MH ingresaron al mercado y llegaron a reemplazar a más de la mitad. Las baterías de Ni-MH no tenían el problema de la toxicidad del Cd y mostraron un mejor rendimiento en términos de densidad de energía y efecto de memoria. De hecho, La, Ce, Pr y Nd se utilizaron en el ánodo de las baterías Ni-MH que son menos contaminantes.

Generalmente, las baterías de Ni – MH están compuestas de 36-42% en peso de Ni, 25% en peso de Fe, 4% en peso de Co y 8-10% en peso de elementos de tierras raras (REE) como La, Ce, Pr, Nd. Debido a que las baterías de Ni-MH son uno de los usos dominantes de los REE, el suministro global de tales recursos está bajo una presión considerable. Actualmente, debido a la alta demanda global, las ineficiencias en el proceso de extracción de REE y los recursos minerales limitados, el suministro de elementos del grupo de lantánidos se encuentra bajo una seria restricción. Por consiguiente, el reciclaje de las baterías Ni – MH gastadas es atractivo debido a la considerable cantidad de Ni y REE (Assefi et al., 2020).

Baterías secundarias

Estas baterías es posible recargarlas una vez son descargadas, regresando a su estado original pasando corriente mediante ellas en dirección opuesta a la de la corriente de descarga. Éstas son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica y se conocen como “acumuladoras”.

Se caracterizan también por su alta densidad de potencia, curvas de descarga planas y buen rendimiento a baja temperatura. Su retención de carga es menor que la de las baterías primarias, aunque su capacidad que se ha perdido en reposo se recupera mediante la recarga (Linden & Reddy, 2002).

Se pueden encontrar diferentes tipos: baterías de ion de litio, baterías de ion de litio-polímero, entre otras (Espinosa et al., 2004).

Baterías de Ion Litio (LIBs): las baterías de ion Litio, con la mayor energía y potencia por unidad de peso de la batería, deben considerarse como el mejor tipo de batería para varios dispositivos eléctricos portátiles tales como automóviles eléctricos, cámaras digitales, relojes, computadoras portátiles, calculadoras, equipos de comunicación, entre otros. Una LIB se compone principalmente de un cátodo, un ánodo, un electrolito orgánico y un separador cubierto de metal y una cubierta plástica. El cátodo está hecho normalmente de óxidos de litio tales como LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMn_2O_4 , $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ y el ánodo es grafito (Assefi et al., 2020).

Baterías de Níquel-Cadmio: el níquel es un metal estratégico y tiene una amplia gama de aplicaciones como elemento aleante en los aceros inoxidable y aleaciones no ferrosas, en la fabricación de catalizadores, en industrias militares y en la producción de baterías.

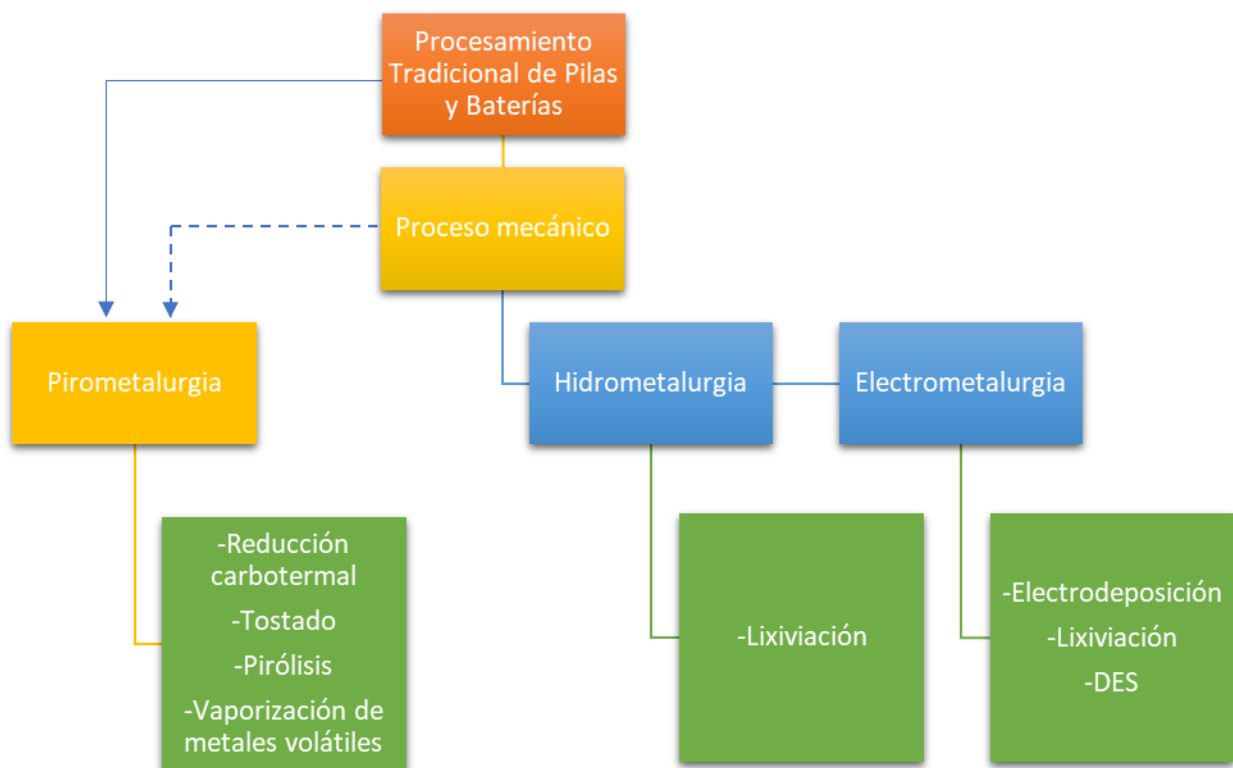
La batería de Ni-Cd gastada contiene componentes valiosos que incluyen aproximadamente un 43% de materiales de cátodo y ánodo hechos de Ni y Cd, separadores de plástico (5%), contenedor de acero (27%) y placa de malla de Ni (25%) como soporte para el polvo anódico. Debido a su alto valor de contenido de Ni metálico, la naturaleza nociva y cancerígena del Cd, su reciclaje ha atraído mucha atención en términos de aplicaciones académicas e industriales (Assefi et al., 2020).

2.2 Procesamiento tradicional de pilas y baterías domésticas gastadas

Actualmente, existe una gran variedad de procesos metalúrgicos utilizados para el reciclaje de pilas y baterías gastadas. En la Figura 1 se muestran algunos de los procesos más comunes utilizados para su aprovechamiento.

Figura 1

Procesos metalúrgicos utilizados en la actualidad para el aprovechamiento de pilas y baterías domésticas gastadas.



Nota. La figura muestra algunos de los procesos pertenecientes a cada tipo de procesamiento metalúrgico. Tomado de Assefi et al., (2020), Sadeghi et al., (2020), Diego & Nava, (2013), Castro Landa, (2018).

Los procesos metalúrgicos de reciclaje de pilas y baterías gastadas pueden clasificarse por procesamiento y por aplicabilidad.

2.2.1 Procesos Mecánicos

Se desarrolla en etapas de reciclaje para baterías de ion – litio que además de gestionar de manera adecuada estos residuos, permite dar un valor agregado a los mismos mediante la caracterización química del material de interés en la batería y determinación de las diferentes etapas de conminución necesarias para llevar el material hasta un tamaño fino, se realiza un análisis composicional inicial sobre el cátodo de las baterías donde se encuentra el cobalto y, también se realizan los procesos de disminución de tamaño que se requieran para determinar el tamaño de partícula obtenido en cada una de estas etapas. Por último, se realiza un análisis granulométrico y una caracterización química final, entregando un material fino y caracterizado para las etapas de recuperación posterior (Sánchez-echeverri et al., 2016).

2.2.2 Procesos Pirometalúrgicos

A continuación, se definen los procesos pirometalúrgicos más utilizados en la industria del reciclaje para el aprovechamiento de pilas gastadas.

Proceso de reducción carbotermal: el proceso empieza con el calentamiento en un horno de baja temperatura (150 - 500°C) para eliminar los electrolitos y el disolvente orgánico. Después, se realiza el tratamiento a alta temperatura (1400 – 1700°C) para formar productos de aleación (como aleación de Co) y escoria (como Li_2O o Li_2CO_3). Además, la reducción carbotermal de las LIB gastadas puede modificarse utilizando escorias aditivas compuestas de Al_2O_3 , CaO , MgO y SiO_2 . Las aleaciones y escorias que se obtienen necesitan un procesamiento posterior por hidrometalurgia que actualmente están llevando a cabo en ciertas empresas. La reducción carbotermal de las LIB gastadas también se ha investigado utilizando carbón activado, grafito y pirólisis al vacío. En el proceso carbotérmico, el Li normalmente pasa a la fase de escoria y, para evitar la dispersión del Li, se han involucrado agua desionizada y escoria alcalina. Además de la

reducción carbotérmica, se ha estudiado el tostado de LIB gastadas con Al, NaHSO₄, CaCl₂, materiales de nitrato, NH₄Cl y Li₂CO₃, y CoO y Co₃O₄.

En 2018 se investigó un método pirometalúrgico para la recuperación de baterías de Ni-Cd utilizando piedra caliza y vidrio de desecho como agentes separadores. Se trata con diferentes proporciones de agentes separadores con chatarra de baterías de Ni-Cd en un horno equipado con varillas calefactoras de SiC a 1450 ° C durante 30 min para obtener diferentes productos incluyendo escoria, lingote y gas de combustión. La escoria está compuesta principalmente por Ca, Si, Al y Mg. Ni, Co y Fe se van acumulando en lingotes debido a su mayor punto de ebullición y mayor densidad. La purificación de Ni, por lo general, requiere un proceso más de refinado.

En las baterías de Ni-MH diferentes elementos están presentes en formas de fases intermetálicas complejas. Los REE y los metales de transición como Fe, Co y Ni exhiben diferentes comportamientos en términos de afinidades de oxígeno, y esta propiedad se puede usar para aislar REE (es decir, La, Ce, Nd, Dy y Pr) en forma de óxidos de metales de transición a alta temperatura. Por ejemplo, esta técnica se desarrolla para la recuperación de los compuestos del ánodo. El material del ánodo de la batería de Ni-MH se oxida primero en aire a 1000 ° C durante 1 hora y luego se reduce en Ar a 1550 ° C durante 1,5 h añadiendo un kit de revelador de residuos (> 99% en peso de Fe) como agente reductor. Los contenidos reducidos de Ni y Co se difunden en la fase de Fe y se obtiene una aleación de ferróniquel. Los contenidos de REE quedan en la fase de escoria dando como resultado material heteroóxido (Assefi et al., 2020).

Proceso de reducción por tostación: es un proceso novedoso para la recuperación sostenible de Li y Co de cátodos de LiCoO₂ gastados. Es la operación de reducción por tostación, en la cual la lámina de Al en el cátodo actúa como un reactivo reductor in situ que convierte LiCoO₂ en Li₂O, CoO y Al₂O₃. El Li y el Al en los productos tostados se pueden lixiviar

selectivamente en una solución de NaOH con una eficiencia de lixiviación de 93,67% y 95,59%, respectivamente. Mientras tanto, el Co, en forma de CoO, se concentra en el residuo de lixiviación alcalina que puede disolverse completamente en una solución de H₂SO₄. La solución de CoSO₄ obtenida con una concentración de Co superior a 160 g/L es beneficiosa para la siguiente operación de evaporación y cristalización. En comparación con los procesos tradicionales, el actual proceso de reducción por tostación in situ se caracteriza por que no es necesario separar los materiales activos del Al ni añadir reductores externos, lo que puede hacer que el proceso de reciclaje de las LIB gastadas sea más simple, más sostenible y económico (Wang et al., 2019).

2.2.3 Procesos Hidrometalúrgicos

Después del proceso de recolección de las pilas gastadas y antes de su tratamiento químico, se requieren algunos pretratamientos mecánicos / físicos. Estos pueden incluir trituración o rotura, procedimientos térmicos, separación de metales ferrosos de compuestos inertes (papel, plástico, desechos ferrosos y no ferrosos) mediante el uso de imanes y tamizado en polvo. Posteriormente, se pueden aplicar procesos hidrometalúrgicos generalmente en plantas de pequeña escala, lo que implica etapas de lixiviación, separación y recuperación de metales.

Lixiviación: el objetivo de la lixiviación es extraer los metales de la matriz sólida a la fase acuosa. Normalmente, se utilizan soluciones fuertemente ácidas o alcalinas, con o sin la presencia de agentes reductores. Los procesos de lixiviación descritos en la literatura se pueden dividir en cuatro tipos principales simplificados: lixiviación neutra, ácida (o reductora de ácido), alcalina y por complejación. Como su nombre indica, estos procesos dependen del tipo de productos químicos aplicados y las reacciones pueden variar desde una simple disolución hasta una disolución más reacciones redox.

Lixiviación neutra: la lixiviación neutra corresponde al uso de agua desionizada para filtrar el electrolito y otros componentes solubles de las baterías gastadas. En el caso de las pilas alcalinas, este electrolito es KOH mientras que para el zinc-carbono es NH_4Cl , como se mencionó anteriormente. En el caso de una posterior implementación de lixiviación ácida, previamente se utiliza lixiviación neutra para lixiviar estos y otros componentes solubles en agua de las baterías gastadas con el fin de evitar un uso excesivo de ácido, así como para evitar interferencias con otros procesos posteriores, como la electrólisis. Durante la lixiviación neutra, el KOH y el NH_4Cl se disuelven en el agua desionizada y luego pueden recuperarse, listos para su reutilización como electrolitos para baterías nuevas.

Lixiviación alcalina: la lixiviación alcalina se aplica principalmente utilizando una base fuerte (por ejemplo, NaOH).

Lixiviación ácida: la lixiviación ácida se realiza con mayor frecuencia utilizando ácidos minerales, como ácido clorhídrico (HCl), ácido nítrico (HNO_3) y principalmente ácido sulfúrico (H_2SO_4) debido a su bajo costo.

Lixiviación por complejación: este método implica el uso de agentes complejantes. Los complejantes descritos en la bibliografía, que se utilizaron como lixiviantes para este fin, fueron el carbonato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]$ o el cloruro de amonio ($\text{NH}_4\text{-Cl}$). La capacidad de estos agentes de lixiviación se deriva de la formación de complejos solubles de Zn con los ligandos añadidos, que permiten la disolución selectiva de Zn de los residuos de la batería en condiciones menos agresivas (pH casi neutro) que cuando se utiliza lixiviación alcalina (pH > 13) (Sadeghi et al., 2020).

2.2.4 Procesos Electrometalúrgicos

Electrodeposición: la electrodeposición es un proceso por el cual un recubrimiento metálico se aplica a una superficie mediante una corriente eléctrica, por lo general continua. Los principales componentes del proceso son (Diego & Nava, 2013):

- Electrolito, que es la solución que contiene los iones del metal a depositar.
- Ánodo, que es la superficie donde se produce la reacción de oxidación.
- Cátodo, que es la superficie en la cual se presenta la reacción de reducción, y también conocido como electrodo de trabajo.
- Corriente eléctrica (directa o pulsante).

Es una técnica utilizada para revestir piezas de grandes dimensiones y con bajos costos de operación. Esta técnica resulta de gran agrado en la industria del reciclaje en cuanto a pilas gastadas, ya que es de bajo costo y se tiene la posibilidad de cambiar las propiedades mecánicas al recubrir las piezas metálicamente. El objetivo de la electrodeposición es preparar un recubrimiento metálico adherente y con excelentes propiedades físicas, químicas y mecánicas. Además, mediante esta técnica se permite cambiar la composición del baño electrolítico con el fin de obtener depósitos con diferentes propiedades físicas y químicas, así como controlar la velocidad del depósito y espesor final. La selección de un sustrato y el metal de recubrimiento dan lugar a una gran cantidad de combinaciones posibles metal-recubrimiento.

Este procedimiento, por lo general, va después de un proceso de lixiviación del cual se obtienen los metales dispuestos a electrodepositar para obtener el recubrimiento.

Los recubrimientos que se pueden obtener a partir de pilas gastadas de Ni – MH pueden ser de Ni-Co y Zn-Ni (Pinto et al., 2018b).

Disolventes Eutécticos Profundos (Deep Eutectic Solvent – DES): hay una gran variedad de DES que están basados principalmente en ChCl , los cuales han sido ampliamente estudiados en los últimos 16 años y han tenido aplicación en electroquímica, farmacéutica, síntesis, catálisis, así como su reciente investigación en recuperación de metales. Los DES implican la incorporación de iones metálicos en disolución para la deposición, disolución o procesamiento de metales. Las ventajas del uso de los DEP sobre electrolitos acuosos son la solubilidad alta de las sales metálicas y/o los óxidos de los metales, la ausencia de agua y una conductividad alta en comparación con los disolventes no acuosos.

Los DES son sistemas formados a partir de una mezcla eutéctica de ácidos de Lewis o Bronsted y bases que pueden contener una gran variedad de especies aniónicas y/o catiónicas; la interacción entre sus componentes da como resultado reducciones notables del punto de fusión de los eutécticos resultantes que son significativamente más bajos que sus componentes individuales, de ahí el nombre de DES. Son simples de preparar, económicamente viables, biodegradables y no reaccionan con el agua, siendo considerados disolventes verdes.

El uso de los DES en electroquímica presenta la ventaja adicional de que no se tiene la influencia del disolvente presente, es decir, los procesos de oxidación-reducción del agua, con lo que el intervalo de potencial en la cual se puede trabajar es mayor, lo que implica que se recuperan de una manera más eficiente los metales contenidos en el lixiviado. En el caso de los DES, la movilidad iónica se ve limitada por la viscosidad, por lo que la temperatura juega un papel importante, pues a temperaturas mayores a la temperatura ambiente la viscosidad del líquido se ve disminuida y se tiene un importante aumento en la conductividad. Se ha reportado que la electrodeposición de metales (Ni, Co, Zn, Cr, Cu, Pb y aleaciones binarias o ternarias), en los DES, ha resultado ser favorecida por el tipo de disolvente. Lo anterior debido a que adicionalmente a las

ventajas ya mencionadas, se puede tener un control en cuanto a la microestructura y propiedades del depósito metálico.

El DES formado por ChCl Urea puede ser utilizado para lixiviar las baterías de desecho, como una alternativa para reemplazar los medios ácidos tradicionales, reduciendo así los desechos peligrosos y la contaminación del medio ambiente (Castro Landa, 2018).

Mediante los diferentes procesos metalúrgicos, mostrados en la Figura 1, que pueden ser utilizados para el reciclaje de pilas y baterías domésticas gastadas, se puede obtener una gran variedad de productos que se usan en los diferentes sectores de la industria para su posterior uso en la vida cotidiana. Estos se enuncian a continuación en la Figura 2.

Figura 2

Productos obtenidos a partir de los diferentes procesos que abarcan cada uno de los sectores de la metalurgia



Nota. La figura muestra algunos de los productos obtenidos de los procesos anteriormente descritos. Tomado de Molina Silva et al., (2019), Pinto et al., (2018b), Assías et al., (2020), Grzebielucka et al., (2020), Jaramillo, (2020).

2.3 Actividades de investigación generados por universidades acerca de los procesos de recolección y tratamiento de pilas y baterías domésticas gastadas en Colombia

A continuación, se muestra la Tabla 1, la cual contiene distintas investigaciones realizadas por algunas de las universidades del país sobre la disposición final de los residuos de las pilas y baterías domésticas gastadas.

Tabla 1

Investigaciones realizadas por diferentes universidades de Colombia, acerca de procesos de recolección y tratamiento de pilas y baterías gastadas

Universidad	Ciudad	Procedimiento de investigación para la recolección y tratamiento de pilas y baterías	Referencia bibliográfica
Universidad Pontificia Bolivariana	Medellín	Aprovechamiento de los residuos de pilas de zinc y manganeso como aditivo para el asfalto	Jaramillo, (2020)
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia	Sogamoso	Propuesta metodológica para la recuperación de pilas alcalinas y zinc-carbono	Ayala, (2017)
Universidad Industrial de Santander	Bucaramanga	De la incorporación de residuos de baterías alcalinas prístinas y pre-vitrificadas a	Assías et al., (2020)

		ladrillos de arcilla no estructurales	
Universidad Industrial de Santander	Bucaramanga	Pilas y baterías gastadas como recurso metalífero	Delvasto, (2015)
Universidad Católica de Colombia	Bogotá	Campaña de recolección junto con ANDI, “Demos buen uso a lo usado”	<i>¡Demos Un Buen Uso a Lo Usado! - Universidad Católica De Colombia, (n.d.)</i>
Universidad Icesi	Cali	Campaña de recolección “Pilas con las Pilas”	<i>La Universidad Icesi de Cali, Se Alista Para Batir Guinness Record Mundial En Recolección de Pilas Usadas En 24 Horas, (n.d.)</i>

2.4 Actividades de investigación generados por industrias acerca de los procesos de recolección y tratamiento de pilas y baterías domésticas gastadas en Colombia

A continuación, se muestra la Tabla 2, la cual contiene actividades realizadas por algunas de las empresas e industrias del país, sobre la disposición final de los residuos de las pilas y baterías domésticas gastadas.

Tabla 2

Actividades realizadas por diferentes empresas e industrias para mitigar la contaminación ambiental producida por las pilas y baterías domésticas gastadas y desechadas en el país

Entidad/Industria	Ciudad	Procedimiento de investigación para la recolección y tratamiento de pilas y baterías
Pilas con el Ambiente	Bogotá	Recolección a nivel nacional de pilas gastadas. Almacenamiento en lugares seguros y transporte de las pilas a sus centros de acopio para la posterior separación de sus componentes e integración de estos a procesos productivos de nuevo
TRONEX SAS e INNOVA AMBIENTAL SAS	Medellín	RECOPILA, que es un programa para recoger pilas usadas, llevarla a un lugar seguro, mientras se entregan a ECOTEC (Tecnologías Ecológicas SAS) para su aprovechamiento y reciclaje
TECNOLOGÍAS ECOLÓGICAS SAS – ECOTEC	Yumbo	Aprovechamiento y reciclaje de pilas alcalinas y salinas 78%, para la recuperación de metales ferrosos, pasta negra de óxido de Zinc y de Manganeso

C.I METALES Y METALES DE OCCIDENTE S.A.	Yumbo	Almacenamiento, tratamiento y aprovechamiento de pilas y acumuladores, equipos libres de bifenilos policlorados PCB y RAEE
LITO S.A.S	Yumbo	Almacenamiento, clasificación y aprovechamiento de pilas y acumuladores
MACROMETALES S.A.S	Yumbo	Almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento y/o disposición final de residuos de RAEE y de pilas y/o acumuladores
RAOC SAS	Yumbo	Almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento y/o disposición final de residuos de RAEE y de pilas y/o acumuladores
REGEN.CO S.A.S	Cartago	Almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento y/o disposición final de residuos de RAEE y de pilas y/o acumuladores

Nota. La figura muestra algunos de los productos obtenidos de los procesos anteriormente descritos. Adaptado de *Conoce El Programa*, (n.d.), Tronex S.A.S, (2015) , CVC, (2019).

2.5 Economía Circular

En los últimos años ha surgido la necesidad de crear un modelo económico alternativo, debido a que, en las últimas décadas, la denominada economía marrón ha sido la principal protagonista en el agotamiento de los recursos naturales y la degradación y pérdida generalizadas de los ecosistemas. Un modelo alternativo llamado economía verde trajo consigo el modelo de

economía circular, los cuales surgen con el objetivo de minimizar el deterioro del medio ambiente (Martínez & Porcelli, 2013).

El concepto de economía circular propone una transformación que permite disminuir el impacto causado por las actividades humanas sobre el medio ambiente. Esto pone al residuo en un papel importante que se sustenta en la reutilización inteligente de lo que es el desperdicio, ya sea orgánico o de origen tecnológico, en un modelo cíclico que imita a la naturaleza. De esta manera, el residuo pierde su condición de tal y se convierte en materia prima “alimentaria” para formar parte de nuevos productos tecnológicos, con un gasto energético muy mínimo (Lett, 2014).

2.5.1 Transición de la economía lineal a la circular

En 1987 el desarrollo sostenible se definió como: “satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro para atender sus propias necesidades”. Durante los años 90 se entendía por sostenibilidad la combinación de tres dimensiones: económica, social y ambiental. A pesar de esto, se mostró que la sostenibilidad no se reduce a la combinación de estas tres dimensiones, sino que la sostenibilidad económica depende de la sostenibilidad social, y estas dos dependen de la ambiental. Adicionalmente, una nueva visión ha formulado que el desarrollo sostenible tiene una cuarta dimensión: “el tiempo”, debido a que las acciones que llevan a la sostenibilidad tienen un impacto de corto, mediano y largo plazo.

Así mismo, la sociedad, las empresas y los gobiernos han abordado la sostenibilidad como un objetivo con modelos industriales diferentes y desde una perspectiva lineal. Incluso muchos de los esfuerzos para solucionar los problemas ambientales suelen reducirse a técnicas correctivas y a la modernización tecnológica, pero no da solución a los impactos que se generan. Por tanto, es

de vital importancia activar la transición hacia un nuevo modelo productivo que reduzca los impactos negativos sobre el medio ambiente, y que sea capaz de generar desarrollo económico y social.

En este escenario, entra el paradigma de la Economía Circular (EC) que se presenta como alternativa a este modelo lineal (Prieto Sandoval et al., 2017).

Según sostiene la Fundación Ellen McArthur, se pueden identificar las siguientes limitaciones en el modelo lineal:

- a. Riesgos de precios: hacia finales del milenio, los precios de los recursos naturales empezaron a ascender de forma progresiva y así continuarán por el aumento poblacional.
- b. Pérdidas económicas y residuos estructurales: la demanda de residuos de la economía actual es demasiado grande.
- c. Riesgos de suministro: alrededor del mundo, se encuentran muchas regiones que poseen poca cantidad de depósitos de recursos no renovables propios, lo que crea una dependencia de las importaciones.
- d. Deterioro de los sistemas naturales: teniendo estos impactos negativos tales como el agotamiento de las reservas, el calentamiento global, la reducción de la capa de ozono, el cambio climático drástico, la disminución de la biodiversidad, la degradación del suelo y la contaminación de los océanos y las fuentes hídricas.

Teniendo este contexto, se pone en consideración la importancia del cambio del modelo económico lineal, por un modelo industrial que sea capaz de ofrecer sistemas económicos resilientes, tal como la economía circular (Martínez & Porcelli, 2013).

3. Marco Metodológico

3.1 Tipo de investigación

En este trabajo de investigación se refleja en su estructura una metodología bibliográfica – documental, cualitativa, centrada en comprender la realidad actual socioeconómica y ambiental nacional e internacional, con énfasis en lo que se debe reforzar en la economía del país en comparación con otros países y teniendo en cuenta las fortalezas y debilidades de las políticas públicas de sostenibilidad en Colombia. Por esta razón, se pone en consideración esta investigación basada en información suministrada por diferentes empresas y, también, extraída vía web.

3.2 Instrumentos y vías para la recolección de información

Se utilizó información recolectada a partir de comunicación con empresas y entidades, páginas web y artículos asociados a la Universidad Industrial de Santander. A parte de lo anterior, se realizó una entrevista sencilla a una de las personas encargadas de la empresa bumanguesa Social RAEE S.A., en la cual se tocaron temas como: la falta de recursos de inversión para el montaje de una planta de aprovechamiento de pilas y baterías gastadas; el proceso de recolección y transporte en Bucaramanga de RAEE hacia la ciudad destino, donde será desmontado y aprovechado; lo que se necesitaría para tener la posibilidad de traer a la ciudad los procesos de aprovechamiento de los residuos de las pilas gastadas.

4. Resultados y análisis

4.1 Entrevista con empresa gestora de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) de la ciudad de Bucaramanga

Se realizó una entrevista el día 19 de julio del año 2021 a las 6:40 de la tarde al Señor Diego Pérez, Químico y Magister en Ingeniería Ambiental, egresado de la UIS, quien es el gerente general de Social RAEE S.A.S. Esta es una empresa de gestión integral de RAEE, la cual diseña estrategias, implementa y administra estos residuos y demás productos regulados por el estado bajo los Sistemas de Recolección Selectiva de Residuos (SRS), para productores o importadores. Esta empresa realiza la recolección, almacenamiento y posterior transporte de los RAEE hacia su destino donde serán desmantelados y aprovechados. Este destino es el departamento del Valle del Cauca.

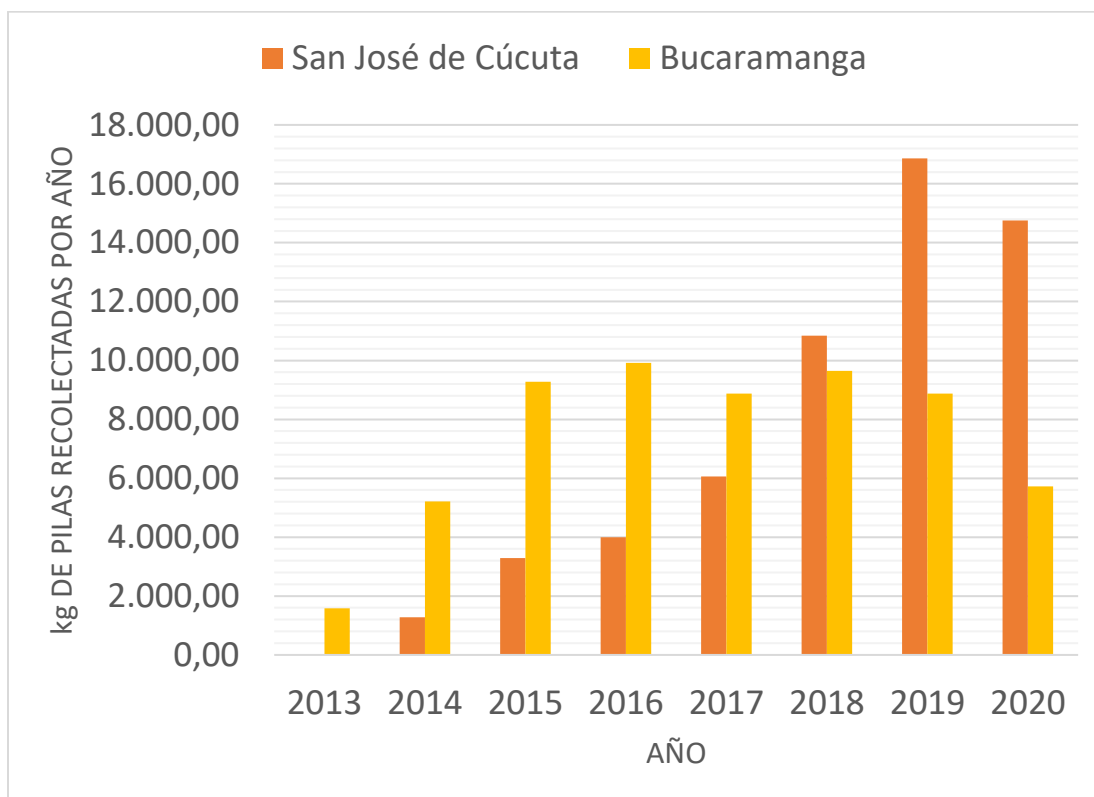
Social RAEE realiza la recolección de estos residuos, en los cuales se incluyen las pilas y baterías domésticas gastadas en la ciudad de Bucaramanga. De acuerdo con la información proporcionada, se conoció que realizar la recolección en dicha ciudad y posterior transporte de únicamente baterías resulta aún difícil, debido a que el mínimo de estas para ser transportadas debe estar por encima de 250 kilos recolectados mensuales, y lo que se llega a recolectar son únicamente 50 kilos al mes. Además, otro de los temas que se tuvieron en cuenta fue si era factible el montaje industrial de equipos para poder aprovechar las pilas gastadas en Bucaramanga, de lo cual se concluyó que el montaje de una planta industrial capaz de aprovechar los residuos de las baterías a partir de procesos metalúrgicos no es factible, ya que no hay inversión ni recursos suficientes para poner un proyecto de estos en marcha, lo que desaprovecha los residuos de las baterías como

posible materia prima para nuevos productos con alto valor agregado y posibles beneficios a la economía nacional.

A continuación, en la Figura 3 se muestra el reporte de datos obtenidos de la recolección de pilas en las ciudades de Bucaramanga y San José de Cúcuta en los últimos años, que fue suministrado en la anterior entrevista.

Figura 3

Masa en kilogramos de las baterías recolectadas en las ciudades de Bucaramanga y San José de Cúcuta, desde el año 2013 al año 2020



Nota. En la figura están plasmados los datos proporcionados a cerca de la recolección de pilas, por el gerente de Social RAEE, Diego Pérez, quien mediante comunicación vía Zoom proporcionó la información.

4.2 Análisis internacional de las legislaciones relacionadas con la Economía Circular

- Unión Europea.

A finales de 2015 la Comisión Europea adoptó un paquete muy ambicioso de propuestas para convertir su economía regional en una economía circular eficiente y ayudar a las empresas y a los consumidores europeos en esta transición. La aproximación hacia una economía circular constituyó el núcleo del Programa de Eficiencia en el Empleo de los Recursos, establecido en el marco de la Estrategia Europa 2020, para garantizar que el crecimiento económico sea menos dependiente del uso de los recursos y se preserve el medio ambiente. Entre las medidas más relevantes destacadas por el Comunicado de prensa emitido por la Comisión Cerrar el Círculo, figuran:

- La financiación de más de 650 millones de euros con cargo a Horizonte 2020 y de 5.500 millones de euros con cargo a los Fondos Estructurales y de Inversión Europeos;
- la adopción de medidas para reducir el despilfarro de alimentos; un límite de fechas de vencimiento más prolongadas y herramientas que permitan alcanzar la meta de reducir a la mitad el desperdicio de alimentos a más tardar en 2030;
- la elaboración de normas de calidad para las materias primas secundarias;
- la adopción de medidas en el Plan de Trabajo sobre Diseño Ecológico tendientes a promover la reparabilidad, durabilidad y reciclabilidad de los productos y la eficiencia energética;
- una revisión del Reglamento sobre abonos y reforzar el papel de los bionutrientes;
- una estrategia para el plástico, su reciclabilidad, biodegradabilidad, la presencia de sustancias peligrosas y de cumplimiento a la reducción significativa de los desechos marinos;
- una serie de acciones sobre la reutilización del agua, y
- una propuesta legislativa para reformar la Directiva Marco de Residuos, la de Envases, la de Vertederos y, en menor medida, otras Directivas de Residuos.

Entre los elementos clave de esta propuesta sobre residuos revisada figuran los siguientes objetivos comunes a 2030: reciclar el 65% de los residuos municipales y el 75% de los residuos de envases; reducir a un máximo del 10% la eliminación de todos los residuos en vertedero; promover la reutilización y la simbiosis industrial, para convertir los subproductos de una industria de materias primas de otra y apoyar a los regímenes de recuperación y reciclado.

Todas estas medidas permitirán crear 580.000 nuevos puestos de trabajo y podrían aportar a las empresas un ahorro neto de 600 mil millones de euros reduciendo al mismo tiempo las emisiones anuales totales de gases de efecto invernadero entre un 2 al 4%. En los sectores de la reutilización, la refabricación y la reparación, por ejemplo, el coste de la remanufactura de teléfonos móviles podría reducirse a la mitad si fueran más fáciles de desmontar (Martínez & Porcelli, 2013).

Es tanto el avance de la unión europea en esta materia que ahora son los gobiernos quienes implementan medidas que garantizan el éxito del modelo; un ejemplo esto se puede apreciar con el Gobierno escocés el cual ha sido reconocido por su intensa apuesta por la economía circular al implementar una política para aprovechar los residuos sólidos de los alimentos y algunas industrias, como es el caso de la producción de su famoso whisky y el comercio del salmón. Así mismo, creó unas normatividades que obligan a la construcción de edificios con materiales que se puedan reutilizar fomentando el desarrollo sostenible del País (Duque et al., 2019).

- Colombia

El concepto de Economía circular en el país es muy reciente, por lo que la información y aplicabilidad son relativamente nuevos; el Gobierno de Colombia introduce con la Estrategia Nacional de Economía Circular nuevos elementos para fortalecer el modelo de desarrollo económico, ambiental y social del país. En Colombia las primeras iniciativas directamente

relacionadas con la economía circular surgen en el año 1997 con la política para la gestión integral de residuos, en el año 2000 con la expedición de la política de parques industriales ecoeficientes por parte de la Secretaria Distrital de Ambiente, el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente – DAMA de esa época. Luego en 2007 el desarrollo de la normatividad sobre la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y la política de compras públicas verdes en 2010, contribuyen a la conceptualización de la economía circular como se conoce a nivel global (Duque et al., 2019).

Pese a que el enfoque de la misión de crecimiento verde se basa en la utilización de materiales, en el país el uso de estos para la producción es ineficiente (se usa más de lo que se necesita y hay alto desperdicio en los procesos de producción), mientras la tasa de recuperación de residuos es muy baja. Materiales estratégicos para la producción de bienes de la vida moderna como biomateriales, polímeros, cemento y hormigón, papel, acero y textiles, podrían tener un uso más eficiente y generar menos contaminación (Duque et al., 2019).

Colombia aún está muy atrás en la implementación de este modelo en comparación con la Unión Europea; por tal motivo es necesario la concientización de estos principios mediante la unión de las universidades y empresas y así lograr óptimos beneficios, no dejando de lado al Gobierno el cual debe de ser la entidad encargada de brindar las herramientas necesarias para lograr una impecable transición de economía lineal a circular, y promover leyes que se enfoquen en la preservación de los recursos mediante los procesos productivos (Duque et al., 2019).

4.3 Análisis de las posibilidades disponibles para el aprovechamiento de las baterías domésticas gastadas en Colombia

Tal y como puede apreciarse en la Figura 3, se tienen los datos de recolección de los últimos años para las ciudades de San José de Cúcuta y Bucaramanga. Analizando una por una, se determina que a pesar de que las políticas medio ambientales que impulsan al cuidado del medio ambiente pongan en consideración nuevos procedimientos para la disminución de los desechos producidos, no se considera eficiente la recolección de estas. Del año 2013 al año 2019 puede que se haya presentado un aumento significativo en la recolección de los productos, pero de 2019 hasta el 2020, la cantidad de pilas recolectadas disminuyó. En este caso, hablando de la ciudad de San José de Cúcuta, se puede inferir que la causante de la disminución de pilas recolectadas haya sido la emergencia sanitaria que se presentó por el covid-19. Para el caso de Bucaramanga, comparado con las cifras de San José de Cúcuta, la cifra de pilas recolectadas se mantuvo constante, pero muy baja. De acuerdo con la entrevista realizada, una de las razones por las que no se hace eficiente la recolección es la falta de inversión y de recursos no sólo para el transporte de las pilas hacia las plantas de almacenamiento, sino que también para una infraestructura y equipos de los cuales se pueda disponer para el aprovechamiento de las pilas recolectadas. En la ciudad de Bucaramanga, además de que las cifras son menores que las de San José de Cúcuta, al igual que en ésta, disminuyeron de forma significativa entre 2019 y 2020. Es por esto por lo que se genera la necesidad de buscar nuevas alternativas que permitan que el reciclaje de las pilas desechadas sea más eficiente y crezca, no sólo en las ciudades mencionadas, sino que también en el resto del país. Esto es sólo un ejemplo que muestra que hace falta presencia del gobierno para mitigar y disminuir la contaminación ambiental, ya que, a pesar de las políticas públicas existentes y las propuestas

acerca de economía circular, el camino para llegar a un país con una economía en miras de producir menos residuos aún es muy largo.

De acuerdo con lo anterior, se realiza un análisis comparativo de la economía circular internacional, con la nacional. De esta manera, se infiere que Colombia aún está muy atrás en la implementación del modelo de Economía Circular, en comparación con la Unión Europea (Martínez & Porcelli, 2013). Pese a las iniciativas que se han generado por parte del Estado, traídas de otros países, éstas no se han llevado a cabo por falta de recursos, atención e inversión, lo cual hace difícil esta tarea. Además, a pesar de la existencia de políticas públicas de regulación de producción de residuos, se requiere la presencia del Estado de manera imperativa para su cumplimiento, ya que a pesar de esto las empresas e industrias muchas veces pasan por alto la responsabilidad que deben tener con la disposición final del producto una vez este se convierte en residuo. Es por esto, que se hace necesaria la correcta implementación de los principios de la Economía Circular, ya sea mediante la unión de universidades y empresas, las cuales podrían realizar diferentes procesos de aprovechamiento y disposición final de los residuos de las baterías gastadas, no dejando de lado los entes gubernamentales, siendo estos los encargados de brindar las herramientas necesarias para llevar a cabo este tipo de proyectos, que conlleven a la transición de la economía lineal a la circular y se promuevan las leyes enfocadas en la preservación del ambiente, la acción y cumplimiento de las mismas. Con lo anterior, se facilitaría la producción de nuevas materias primas a partir de los residuos de las baterías gastadas, saldando la contaminación que estas producen y beneficiando la economía nacional (Duque et al., 2019).

Como puede observarse en la Tabla 2, a pesar de la existencia de varias empresas que procesan los residuos de las baterías gastadas para la creación de nuevas materias primas, estas industrias se concentran únicamente en el departamento del Valle del Cauca, aumentando así el

riesgo de que estas terminen en vertederos. La primera razón, es que aún falta concientización y actividades de información a la ciudadanía sobre la disposición final correcta de estos residuos; y la segunda razón, es que el transporte de las pilas gastadas hacia el Valle del Cauca no es eficiente. Lo anterior, se sustenta en la poca cantidad de pilas recolectadas mensualmente y en el deterioro de las vías a nivel nacional, ya que la factibilidad del transporte de estas pilas para las empresas de recolección depende de la obtención de ganancias a partir de la entrega de estas a las industrias de aprovechamiento. Por ende, el mal estado de las vías en el país afecta estos procedimientos, debido a que se elevan los costos en los sistemas de transporte y si la cantidad de pilas recolectadas es muy baja, no hay ningún beneficio para la empresa encargada de la recolección (Zamora Fandiño & Barrera Reyes, 2012).

En Colombia, desde el año 2016 se prohibió como disposición final de baterías gastadas los rellenos sanitarios por decreto, alentando al movimiento transfronterizo de los desechos bajo el Convenio de Basilea y la valorización obligatoria de los desechos de las baterías dentro del país. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el transporte de las baterías hacia los lugares de aprovechamiento no sólo se ve afectado por la cantidad de pilas que deben ser recolectadas, sino que también geográficamente, los centros de recolección urbanos están muy dispersos, la orografía es muy compleja y la infraestructura vial y ferroviaria es demasiado débil, lo que hace de estas operaciones logísticas ineficientes y un proceso de exportación de los residuos de las baterías casi imposible (Assías et al., 2020). Por esta y muchas más razones, yace la necesidad de mirar otro rumbo de posibilidades que se adecúen a la economía local e insistir en la participación del Estado para poder invertir e implementar nuevas industrias y proyectos que abarquen la mayoría de las ciudades del país, y de este modo se haga visible y eficiente el aprovechamiento de las pilas gastadas, para disminuir el impacto ambiental.

Una posible ruta, de acuerdo con el anterior análisis y propuesta por la autora de este trabajo, sería la creación de un programa ambiental con aporte de recursos por parte del Estado hacia empresas ambientales para que en conjunto con universidades se realicen pruebas y ensayos que puedan llevar a la creación de una industria de aprovechamiento con procesos no tan complejos tales como procesos de desmantelamiento mecánicos, procesos pirometalúrgicos o la adecuación de equipos que permitan la realización de procesos hidrometalúrgicos, en los cuales se puedan realizar prácticas estudiantiles que generen beneficios económicos a partir de la producción de materias primas obtenidas de los residuos de las pilas y, además, un apoyo para los estudiantes en cuanto a experiencia laboral y finalización de sus estudios universitarios.

Con base en lo anteriormente discutido y en la revisión bibliográfica efectuada para la elaboración del marco referencial del presente trabajo, se proponen por su mayor factibilidad tres posibles metodologías para el aprovechamiento local en Colombia de los residuos de pilas y baterías domésticas desechadas. Partiendo del enfoque de Economía Circular, estos residuos podrían utilizarse para la fabricación de cerámicas, recubrimientos electro-galvánicos y fundiciones metálicas. Las condiciones para cada una de estas posibilidades de aprovechamiento se especifican a continuación.

4.3.1 Aprovechamiento en la industria alfarera

Desde el punto de vista de la economía circular, en esta industria la idea es impactar el flujo de materiales a nivel local con sustancias recuperadas de las baterías gastadas. Así mismo, la producción de ladrillos y tejas de arcilla sinterizada es una industria a pequeña escala en la mayoría de los países, mediante la cual materias primas extraídas de las baterías gastadas, tales como el óxido de manganeso, podrían incorporarse en la fabricación de vidrio y materiales para la construcción a base de arcilla. Además, varios estudios avalan la viabilidad de incorporar estos

residuos inorgánicos a sustratos de arcilla sinterizada, sin cambios sustanciales e incluso mejoras en las propiedades mecánicas y físicas del producto que obtenido. Por consiguiente, la fabricación de ladrillos de arcilla a pequeña escala sería impactada con éxito gracias a esta solución sostenible, beneficiando la economía de la industria alfarera y al medio ambiente, mitigando la alta producción de desechos de las baterías gastadas. Y, por tanto, con la creación de nuevas industrias locales, aumentaría la generación de nuevos empleos (Assías et al., 2020).

4.3.2 Aprovechamiento en la industria de los recubrimientos

Las baterías gastadas al ser consideradas como un mineral antropogénico, es decir, que puede adoptar muchas opciones de materia prima de reciclaje, pueden convertirse en materiales electroquímicamente activos, lo cual aporta una opción muy versátil que es utilizar las baterías gastadas como materia prima para procedimientos de galvanoplastia. Por unidad de masa, los metales galvanizados tienen un precio de mercado más alto que los metales a granel. Por tanto, partiendo de procedimientos hidrometalúrgicos de las baterías gastadas, el lixiviado de estas se convierte en un electrolito adecuado y apto para galvanoplastia (Rueda et al., 2021). Las pilas alcalinas contienen Zn y las pilas Ni-MH contienen Ni en su formulación. Combinando Zn y Ni en una solución obtenida del reciclaje hidrometalúrgico de baterías alcalinas y Ni-MH, se pudieron obtener revestimientos de aleación de Zn-Ni. Los recubrimientos de Zn-Ni son conocidos por proporcionar un buen acabado superficial y mejores propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión que el acero galvanizado tradicional (Pinto et al., 2018a). De esta manera, los recubrimientos metálicos obtenidos pueden utilizarse para aplicaciones específicas, ya sea de protección contra la corrosión o para procesos electrocatalíticos, como revestimientos aleados para el tratamiento de aguas y remediación ambiental. Se afirma que la producción de metales cíclicos (como los contenidos en las baterías gastadas de tipo Ni – MH), aumente en los próximos años, lo

cual podría estimular la creación de nuevos empleos que los gobiernos y el sector privado pueden utilizar para superar la crisis económica provocada por la pandemia del año 2020, promoviendo así la innovación en el sector del reciclaje y logrando los objetivos de desarrollo sostenible de la Naciones Unidas (Rueda et al., 2021).

4.3.3 Aprovechamiento en la industria de las fundiciones metálicas

Una de las industrias metalúrgicas que están en la capacidad de realizar labores de reutilización de las baterías gastadas es la industria de la fundición basada en el horno cubilote. Un uso para estas baterías sería que, con pequeñas cantidades de estas en procesos convencionales, con énfasis en los cambios químicos que se producen en las corrientes de escorias y aleaciones, sería emplear las pilas gastadas como materia prima alternativa para diferentes fundiciones metálicas (Cuadrado & Benavides, 2018). Un tratamiento que se ha investigado es la fusión reactiva, que es la inertización de los materiales de los electrodos de las baterías mediante aluminio líquido como medio de reacción. Este proceso, que es una variante de reciclaje pirometalúrgico, permite desactivar los óxidos tóxicos y los metales base contenidos en las baterías, convirtiéndolas en dos fases, una fase metálica, que es una aleación de aluminio y una fase no metálica, escoria, que contiene óxido de aluminio. Los materiales contenidos en las baterías pueden utilizarse para modificar la tensión superficial de otros elementos contenidos en la aleación que se quiere obtener, tales como óxidos de manganeso que pueden ser una barrera que rodea el charco metálico, mejorando la cinética del proceso de fundición, entre otros beneficios (Molina Silva et al., 2019).

De acuerdo con lo anterior, se infiere que las baterías gastadas pueden utilizarse en procesos que no son tan complejos, como los procesos de fundición, lo que trae consigo la disminución de la contaminación ambiental por la toxicidad de pilas desechadas que van a parar a

vertederos. Así mismo, mediante la utilización de estas como materia prima para los procesos de fundición, el beneficio económico que se genera para la industria podría ser muy alto.

5. Conclusiones

A partir del análisis y del levantamiento bibliográfico realizados anteriormente, se concluye que pesar de la implementación de políticas ambientales en pro de una economía verde, el modelo económico nacional sigue teniendo falencias en cuanto a la disposición final de las pilas gastadas, y se evidencia la falta de más campañas sobre puntos de recolección que lleguen hasta los municipios para evitar que las pilas terminen en la basura y en vertederos. Además, aun existiendo programas y corporaciones que van en pro de la recolección de las pilas domésticas desechadas, se hace difícil su implementación debido a que las vías terrestres y ferroviarias se encuentran en un estado de deterioro tal, que disminuye la factibilidad de transportar las pilas recolectadas, por lo que se elevan los costos de su transporte y afecta el cubrimiento de este alrededor de todo el país. De esta manera, después de hacer un análisis exhaustivo de todas estas causas, yace la necesidad de buscar nuevas alternativas que hagan de los procesos de reciclaje de las pilas gastadas un objetivo posible de alcanzar; dichas alternativas son: la utilización de las pilas para materias primas en distintas industrias que pueden ser implantadas a nivel local. Por ejemplo, en la ciudad de Bucaramanga, para lograr una implementación exitosa de ese tipo de proyectos se hace necesaria la ayuda tanto de empresas públicas y privadas como de universidades, teniendo como protagonistas a los entes gubernamentales, para que estos no se queden en solo propuestas y se lleven a la práctica. Finalmente, se determinó que las industrias a las que las pilas podrían servir como materias primas de alto valor agregado y gran utilidad son: la industria alfarera, la industria de revestimientos y la industria de fundiciones metálicas. Así mismo, con la implementación de las conclusiones mencionadas, el aprovechamiento de baterías domésticas

gastadas se realizaría de forma eficaz y correcta, tomando como fundamento los principios traídos del exterior sobre el modelo de la economía circular.

Referencias Bibliográficas

- Anónimo. (2011, November). Colombia es pionera en recolección de pilas usadas. *Dinero*, s. p.
<https://www.dinero.com/pais/articulo/colombia-pionera-recoleccion-pilas-usadas/141025>
- Assefi, M., Maroufi, S., Yamauchi, Y., & Sahajwalla, V. (2020). ScienceDirect Pyrometallurgical recycling of Li-ion , Ni – Cd and Ni – MH batteries : A minireview. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 24, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.01.005>
- Assías, S. G., Clavijo, C., Usma, S., & Delvasto, P. (2020). On the Incorporation of Pristine and Pre - vitrified Alkaline Battery Waste into Non - structural Clay Bricks. *Waste and Biomass Valorization*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01259-z>
- Ayala, C. A. (2017). *Propuesta metodológica para la recuperación de las pilas alcalinas y zinc-carbono*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Castro Landa, M. (2018). *Recuperación de metales a partir de baterías níquel-hidruro metálico usando disolventes eutécticos profundos* . Universidad Autónoma Metropolitana.
- Chuquichanca, E. J., & Leon, D. V. (2019). *Obtención de óxido de zinc a partir de pilas carbono-zinc desechables*. Universidad Nacional del Callao.
- Conoce el Programa*. (n.d.). Pilas Con El Ambiente. Retrieved July 8, 2020, from <https://www.pilascolombia.com/conoce>
- Cuadrado, J. J., & Benavides, L. A. (2018). *Evaluación teórica del impacto de la incorporación de baterías gastadas en un proceso pirometalúrgico convencional* [Universidad Industrial de Santander].
<http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127%0Ahttp://publicacoes.cardiol.br/portal/ijcs/portugues/2018/v3103/pdf/3103009.pdf%0Ahttp://www.scielo>

- .org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-75772018000200067&lng=en&tlng=CVC, C. A. R. del V. del C. (2019). *Listado de empresas con licencia ambiental o plan de manejo ambiental de la CVC para el manejo de residuos peligrosos*.
<https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2019-11/ListadoPrestadoresRespel-19112019.pdf>
- Delvasto, P. (2015). *Urban mining: Spent batteries as a metalliferous resource*. October 2016. *¡Demos un buen uso a lo usado! - Universidad Católica De Colombia*. (n.d.). Retrieved July 22, 2021, from <https://www.ucatolica.edu.co/portal/demos-un-buen-uso-a-lo-usado/>
- Díaz-López, J. C., Angarita, J., Vargas-Angarita, C. Y., Blanco, S., & Delvasto, P. (2018). Electrolytic recovery of nickel and cobalt as multi-elemental coatings: An option for the recycling of spent Ni-MH batteries. *Journal of Physics: Conference Series*, 1119(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1119/1/012003>
- Diego, I. Q. M., & Nava, U. (2013). “ *ELECTRODEPOSICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE Ni-P* ” *Presidente Invitado Ing . Federico Manríquez Guerrero*.
- Duque, M., Lopez, C., Hernández, L., & Ruiz, L. (2019). La Economía Circular en Colombia: un paralelo con la experiencia Europea. *3er Congreso Internacional En Administración de Negocios Internacionales*, 691.
- Espinosa, D. C. R., Bernardes, A. M., & Tenório, J. A. S. (2004). An overview on the current processes for the recycling of batteries. *Journal of Power Sources*, 135(1–2), 311–319.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.03.083>
- Godoy, K. A. M., & Delvasto, P. L. (2015). Quantification of the metals Ni, Cd, Zn, Mn, Fe and Co in leachates during degradation of three types of used commercial batteries (alkaline, Ni-Cd AND Ni-MH). *Revista de Investigación*, 39(September 2015), 131–156.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376144131007>

- Grzebielucka, E. C., Regina, S., Antunes, M., Philippini, C., Borges, F., Grossa, P., & Grossa, P. (2020). *Synthesis of Brown Inorganic Pigments with Spinel Structure from the Incorporation of Spent Alkaline Batteries 2 . Experimental Procedure*. 23(1), 1–8.
- Jaramillo, A. F. (2020). *Gestión Tecnológica Para El Aprovechamiento De Los Residuos De Pilas De Zinc y Manganeso Como Aditivo En la Industria Asfáltica*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- La Universidad Icesi de Cali, se alista para batir Guinness Record Mundial en recolección de pilas usadas en 24 horas*. (n.d.). Retrieved July 22, 2021, from <https://www.icesi.edu.co/unicesi/todas-las-noticias/782-la-universidad-icesi-de-cali-se-alista-para-batir-guinness-record-mundial-en-recoleccion-de-pilas-usadas-en-24-horas>
- Lett, L. A. (2014). Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular. *Revista Argentina de Microbiología*, 46(1), 1–2. [https://doi.org/10.1016/S0325-7541\(14\)70039-2](https://doi.org/10.1016/S0325-7541(14)70039-2)
- Linden, D., & Reddy, T. B. (2002). *Handbook of Batteries*. In R. R. Donnelly & Sons Company (Third edit). McGraw-Hill.
- Martínez, A., & Porcelli, A. M. (2013). El desafío del cambio económico: la economía circular y su excepción en las diferentes legislaciones y en la normativa voluntaria. *Pensar En Derecho* #13, 129. <http://www.derecho.uba.ar/publicaciones/pensar-en-derecho/revistas/3/revista-pensar-en-derecho3.pdf#page=99>
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2010). *Ley No. 1672 de 19 Julio de 2013 por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de pilas y/o acumuladores y se adoptan otras disposiciones*. (p. 10).
- Molina Silva, J., Vera Serna, P., & Delvasto, P. (2019). Characterization of the metallic phase and

- the slag phase obtained during the inertization of the cathodes of spent alkaline batteries using liquid aluminum Characterization of the metallic phase and the slag phase obtained during the inertization of the. *Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1386/1/012056>
- Paradisi, A. M., Romero, C., Rodríguez, R. O., & Delvasto, P. (2015). Caracterización fisicoquímica de los materiales activos presentes en pilas gastadas del tipo Ni-Cd segregadas de un lote de pilas desechadas en la ciudad de Caracas. *Avances En Química*, *10*(1), 11–19.
- Pinto, J., Quiroz, D., Delvasto, P., & Blanco, S. (2018a). Characterization of a zinc-nickel alloy coating obtained from an electrolytic bath produced with spent batteries as raw materials. *Conference Series*.
- Pinto, J., Quiroz, D., Delvasto, P., & Blanco, S. (2018b). Synthesis and characterization of Zn / Ni-Co bilayer coatings using the metals recovered from spent household batteries as raw materials. *Conference Series*.
- Prieto Sandoval, V., Jaca García, M., & Ormazabal, M. (2017). Economía circular: relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Memoria Investigaciones En Ingeniería*, *15*(15), 85–95.
- Rueda, H., Arenas, M., Vargas-Balda, R., Blanco, S., & Delvasto, P. (2021). Production of a nickel-based catalyst for urea electrooxidation using spent batteries as raw material: Electrochemical synthesis and implications from a circular economy stand-point. *Sustainable Materials and Technologies*, *29*, e00296. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00296>
- Sadeghi, S. M., Jesus, J., & Soares, H. M. V. M. (2020). A critical updated review of the hydrometallurgical routes for recycling zinc and manganese from spent zinc-based batteries. *Waste Management*, *113*, 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.049>
- Sánchez-echeverri, J. P., Betancur-pulgarín, J. F., & Ocampo-carmona, L. M. (2016).

Conminución y análisis granulométrico para un proceso de recuperación de cobalto a partir de baterías de teléfonos móviles. 19(2), 240–251.

Tronex S.A.S. (2015). *¿Qué es RECOPILA?* <http://www.recopila.org/Que-es-Recopila>

Wang, W., Zhang, Y., Liu, X., & Xu, S. (2019). A Simplified Process for Recovery of Li and Co from Spent LiCoO₂ Cathode Using Al Foil As the in Situ Reductant [Research-article]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7, 12222–12230. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01564>

Zamora Fandiño, N., & Barrera Reyes, O. L. (2012). *Diagnóstico de la infraestructura vial actual en Colombia* (Vol. 66). Universidad EAN.