

**PROPUESTA DE ESQUEMA DE VALORIZACIÓN PARA EL ORO OBTENIDO DE
LAS TARJETAS MADRE DESECHADAS DE LOS TELÉFONOS MÓVILES**

ANDRÉS CAMILO TOVAR CORREA

**Proyecto integral de grado para obtener el título de
INGENIERO QUIMICO**

**Orientadora
Diana Marcela Cuesta Parra
Ingeniera Ambiental**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2022**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Diana Marcela Cuesta Parra
Director

Presidente del jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C mayo de 2022

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana Facultad Ingenierías

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora de Programa Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICATORIA

Este logro a mis padres Luis Alfonso Tovar Correa y Erika Correa Roa por estar presente dándome el apoyo necesario para poder cumplirán mis estudios universitarios, quienes nunca han dejado que ningún recurso me falte, les agradezco profundamente por amarme tanto y por ser los padres responsable y ejemplares que siempre han sido, a mis hermanos Johan Alfonso Tovar Corra y Sergio Santiago Tovar Correa que siempre me han apoyado emocionalmente en mi proceso de llegar a ser una persona íntegra y ética, para ser un profesional ejemplar. A mí novia Laura Daniela Ruge Villamil por brindarme su apoyo emocional e intelectual en el desarrollo de este proyecto por tenerme la paciencia suficiente y entenderme en cada paso de di para llegar a ser un ingeniero profesional y de alta calidad.

AGRADECIMIENTOS

Yo Andrés Camilo Tovar Correa, agradezco principalmente a mis padres Luis Alfonso TovarRoja y Erika Correa Roa, la posibilidad de recibir una educación de nivel universitario por el esfuerzo que han hecho, con mi desarrollo como persona ética y como profesional, así como el apoyo monetario que hizo posible el desarrollo de esta investigación, agradezco a Laura Daniela Ruge Villamil mi novia, por el apoyo intelectual en el desarrollo de esta investigación y por las opiniones que fueron de gran ayuda para desarrollo de los inconvenientes presentados, también le agradezco por amarme de la misma forma en que yo lo hago y por siempre demostrarlo. Agradezco a la profesora Diana Marcela Cuesta como mi docente de guía a través del desarrollo de este proceso de investigación y agradezco las horas de acompañamiento, y por la comprensión.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	19
1. GENERALIDADES	20
1.1 Oro	20
1.2 El oro en Colombia	20
1.3 Química del oro	22
1.4 Proceso Químico	23
1.5 Aparatos eléctricos y electrónicos (AEE)	24
1.6 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos	25
1.7 Reciclaje artesanal	25
1.8 Técnicas para la separación de metales preciosos a partir de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)	28
<i>1.8.1 Técnicas Hidrometalúrgicas</i>	29
<i>1.8.2 Técnicas pirometalúrgicas</i>	33
<i>1.8.3 Métodos industriales</i>	34
<i>1.8.4 Técnicas biotecnológicas</i>	35
1.9 Marco Normativo.	38
1.10 Marco de Políticas	38
2. METODOLOGÍA	41
3. DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS TARJETAS MADRE	43
3.1 Análisis Determinación de la Composición Química de las Tarjetas Madre	61

4. DISEÑO DE PROPUESTA DE PROCESO INDUSTRIAL PARA EL RECICLAJE DEL ORO EN LOS DESECHOS ELECTRÓNICOS DE TELÉFONOS MÓVILES	64
4.1 Diseño de proceso	68
4.2 Desarmado de teléfonos	73
4.2.1 Molienda	75
4.2.2 Separación magnética	78
4.2.3 Separación electrostática	79
4.2.4 Análisis de selección	81
4.2.5 Biolixiviación	82
4.2.6 Mecanismo de separación	83
4.6 Filtración	88
5. ANALISIS FINANCIERO VIABILIDAD DEL PROYECTO	94
5.1 Cálculo del producto	95
5.2 Cálculo de los costos	96
5.3 Cálculo de los gastos	96
5.4 Cálculo de los flujos de caja	97
5.5 Cálculo de la relación costo beneficio.	98
6. CONCLUSIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	102
ANEXO	108

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Número de Smartphone vendidos al usuario final a nivel mundial de 2011 a 2021	15
Figura 2. Objetivos de desarrollo sostenible ligados al proyecto.	17
Figura 3. Mayores productores de oro en Colombia.	21
Figura 4. Producción de oro desde el 2012 hasta el 2021.	22
Figura 5. Clasificación de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos.	24
Figura 6. Economía circular de los RAEE	26
Figura 7. Basurero electrónico en Ghana.	27
Figura 8. Esquema general de etapas del proceso de recuperación de materiales.	29
Figura 9. Diagrama de bloques para la recuperación de metales preciosos presentes en chatarra electrónica.	31
Figura 10. Diagrama propuesto por el autor Chimielewski para la recuperación de oro a partir de RAEE.	32
Figura 11. Metodologías de pirometalurgia para la obtención de metales a partir de RAEE	33
Figura 12. Diagrama de procesos de la empresa Noranda para la recuperación de metales.	34
Figura 13. Diagrama de procesos de la empresa RONNSKAR.	35
Figura 14. Esquema de cianuración de metales utilizando microorganismos	37
Figura 15. Marco de Referencia de políticas considerado en la formulación de la Política RAEE	39
Figura 16. Representación gráfica de la composición de un teléfono celular sin batería.	43
Figura 17. Aumento de los artículos respecto a "Composición química del oro en los teléfonos móviles	45
Figura 18. Linealización de la Composición química del oro en los teléfonos móviles.	45

Figura 19. Aumento de los documentos respecto a "Recuperación de oro de los teléfonos celulares".	46
Figura 20. Linealización de la curva presente en la figura 19	46
Figura 21. Aumento de los documentos respecto a "Extracción química del oro de residuos de PCB"	47
Figura 22. Linealización de la curva presente en la figura 21.	47
Figura23. Representación gráfica, "Composición química del oro en los teléfonos móviles"	48
Figura 24. Representación gráfica de torta de las sub-áreas correspondientes al tema, "Composición química de oro en los teléfonos móviles"	49
Figura 25. Representación gráfica, "Recuperación del oro de teléfonos celulares"	50
Figura26. Representación gráfica en forma de torta de las sub áreas correspondientes al tema, "Gold recovery from cell phones"	50
Figura 27. Representación gráfica, "Extracción química del oro de los desechos PCB"	51
Figura28. Representación gráfica en forma de torta de las sub áreas correspondientes al tema, "Extracción química del oro de los desechos PCB"	52
Figura 29. Representación gráfica de la dispersión de la composición del oro	56
Figura30. Representación gráfica de la dispersión de la composición del cobre	60
Figura31. Representación gráfica de la dispersión de la composición del hierro.	60
Figura 32. Representación gráfica de la dispersión de la composición del Aluminio	61
Figura 33. Concentración de metales en los tableros de circuito impreso de teléfonos móviles	63
Figura 34. Ubicación del oro en los tableros de circuito impreso.	64
Figura35. Estructura de una tarjeta de circuito impreso	65
Figura 36. Los tipos de sustratos implementados en los tipos de tarjeta de circuito impreso.	66

Figura 37. Clasificación de las tarjetas de circuito impreso	66
Figura 38. Estructura de modelo de las tarjetas de circuito impreso para teléfonos móviles.	67
Figura 39. Diagrama de bloques	70
Figura 40. Tarjeta madre de un teléfono inteligente moderno.	73
Figura 41. Tarjeta madre de un teléfono móvil Nokia X2	74
Figura 42. Piezas que conforman un teléfono Samsung Galaxy S7	75
Figura 43. Diagrama de balance triturador	76
Figura 44. Molino de RAEE.	77
Figura 45. Diagrama separador magnético.	78
Figura 46. Separación Magnética	79
Figura 47. Principio de operación de un separador electrostático.	80
Figura 48. Diagrama separación electrostática.	80
Figura 49. Microorganismos estudiados para la extracción de oro.	81
Figura 50. Crecimiento bacteriano.	82
Figura 51. Diagrama de balance Biolixiviación.	83
Figura 52. Producción bacteriana de cianuro en función del tiempo y haciendo variar el pH.	84
Figura 53. Eficiencia en términos de porcentaje de extracción de oro en el tiempo	85
Figura 54. Eficiencia en términos de porcentaje de extracción de oro en el tiempo analizando los diferentes tipos de medios ácidos	86
Figura 55. Filtro de carbón activado.	88

Figura 56. Diagrama de Flujo de Proceso (PFD)	90
Figura 57. Equipos necesarios para el proceso	94
Figura 58. Comportamiento de la relación B/C con la Tio	99

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Composición de una tarjeta madre	44
Tabla 2. Resumen de la cantidad de artículos en cada base de datos, con la frase de búsqueda.	53
Tabla 3. Resumen de la cantidad de documentos encontrados con palabras clave.	53
Tabla 4. Resumen de los artículos consultados.	54
Tabla 5. Resumen estadístico según tabla 4.	56
Tabla 6. Resultados obtenidos de los documentos bibliográficos para el resto de metales.	57
Tabla 7. Resumen composición de metales.	59
Tabla 8. Porcentaje de recuperación de Oro y plata en función de la concentración de cianuro sódico	87
Tabla 9. Balance de materia para las corrientes representadas en el PFD.	91
Tabla 10. Balance de materia para las corrientes representadas en el PFD.	92
Tabla 11. Datos necesarios para los cálculos de los beneficios.	95
Tabla 12. Datos necesarios el cálculo de los flujos de caja	96
Tabla 13. Datos necesarios el cálculo de los flujos de caja	97
Tabla 14. Datos necesarios el cálculo de los flujos de caja.	97
Tabla 15. Flujos de caja aproximados para el proyecto	98

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un esquema de valorización para el oro, el cual se puede reciclar de los desechos de teléfonos móviles, más específicamente de las tarjetas de circuito impreso.

Se investigaron diferentes referentes teóricos que brinden información sobre la composición teórica de los metales en los desechos PCB, debido a que el desarrollo fue desde una metodología teórica, el resultado obtenido corresponde a: un 55% de fibra de vidrio, 30% de resinas epóxicas y el faltante 20% se distribuye aproximadamente entre los metales, expresada en porcentaje, de Cu [8,94 – 53,68].%, Fe [21,60 – 34,52].%, Al [14,12- 21,56].%, Sn [1,84 – 9,42].%, Ni [3,25 - 6,52].%, Zn [4,79 – 8,75].%, Pb [4,51 – 8,84].% y para el oro un intervalo de [0,08558206 – 0,13484].%.

Como segunda parte se diseñó una propuesta de proceso industrial, basada en la conexión de las técnicas clásicas de recuperación de metales preciosos en desecha RAEE y la implementación del uso de biocianuro como agente extractor del oro, la secuencia del procesos fue basada de autores que ya habían propuesto las operaciones necesarias para separar los metales de los residuos PCB, para la minimización del impacto ambiental del cianuro se propuso la biodegradación de cianuro, lo anterior permite obtener resultados más sostenibles y amigables con el medio ambiente apoyando los ODS.

Finalmente y debido a que el proyecto es netamente teórico, se realizaron los costos de la implementación de una planta piloto, los indicadores financieros de datos de costos y gastos operacionales de un proceso.

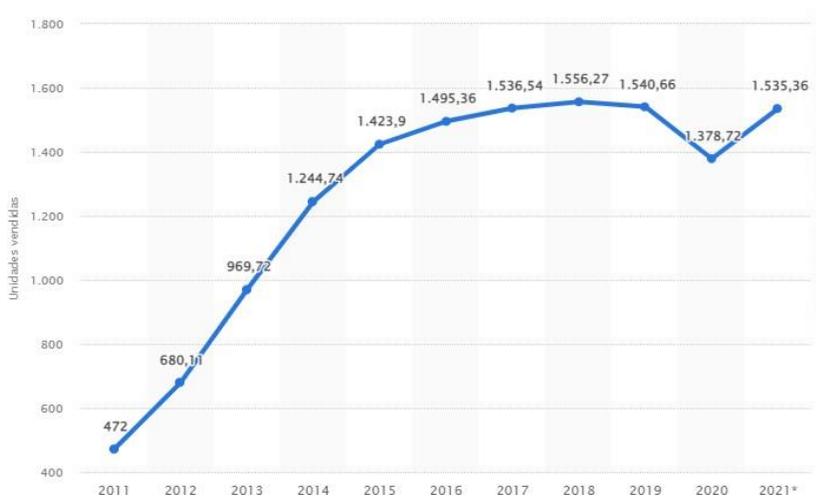
Palabras clave: Gold, RAEE, Print Circuit Borad , biolixiviación, extracción.

INTRODUCCIÓN

El aumento acelerado de la industria electrónica representada en la Figura 1 [1], muestra que en 10 años solo en términos de teléfonos inteligentes, se pasó de producir y vender 472 millones de unidades en el 2011 a vender 1 535 millones de unidades, esto representa un aumento el 325%. Este aumento desenfrenado ha generado un problema social y ambiental, el manejo de volúmenes crecientes de desechos electrónicos, especialmente los provenientes de la telecomunicación. El consumo de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) está asociado con el creciente desarrollo económico mundial, los AEE se han vuelto de vital importancia en las sociedades modernas no solo en su vida cotidiana, sino que han permitido una mejora en su condición de vida.

Figura 1.

Número de Smartphone vendidos al usuario final a nivel mundial de 2011 a 2021



Nota. La grafica 1 representa el aumento de ventas de teléfonos celulares desde el 2011 al 2021, la imagen permite ver la diversificación de la industria de electrónica solo en cuanto a los teléfonosmóviles. Tomado de: R. Fernández, «Statista,» 27 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/521667/numero-de-smartphones-vendidos-en-el-mundo-al-usuario-final/>. [Último acceso: 10 Febrero 2022].

La caída de ventas que se muestra en la gráfica anterior en el año 2020, representa el impacto que tuvo la pandemia causada por el SARS-CoV-2, que significó la interrupción de los procesos de producción de los teléfonos inteligentes en China, el fabricante de dispositivos más grande del mundo, así pues esto se reflejó en la reducción de las ventas para el año 2020. [1].

Justo después de ser utilizados los AEE son desechados, generando así un flujo de residuos que contienen materiales peligrosos o valiosos. Estos residuos se denominan residuos-e o residuos de aparatos eléctrico y electrónico (RAEE). [2].

El volumen de equipos eléctricos y electrónicos que se desechan está aumentando en todo el mundo. Para el 2019 se generaron 53,6 millones de toneladas métricas (Mt) de residuos-e o RAEE, lo que significa un aumento del 21% desde el 2014. El aumento de RAEE se debe al incremento del consumo de AEE, su ciclo de vida corto y las pocas opciones de reparación. A nivel mundial, en 2019, Asia produjo el mayor volumen de RAEE, seguida de América y Europa; para ese mismo año, el 17.4% de los residuos generados llegaron a instalaciones de tratamiento y reciclaje, lo que equivale a 9.3 Mt de RAEE [2].

En Colombia, la decisión de descartar equipos eléctricos y electrónicos al final de su ciclo de vida suele tomar bastante tiempo ya que se acostumbra a ser almacenados en el hogar o en las bodegas de las empresas, lo que significa un manejo inadecuado de estos RAEE. Existe, a nivel nacional una *Política nacional para la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*, la cual se formuló en el año 2017, esta Política considera la situación y dinámicas actuales de los RAEE en Colombia. La generación de residuos electrónicos alcanzó las 326 mil toneladas métricas en 2020 a nivel nacional, lo que significó un incremento de alrededor de 17,3% en comparación con lo generado en 2015 [3].

El incremento de RAEE, la falta de tratamiento de estos y su eliminación mediante acumulación en rellenos sanitarios e incluso la incineración, generan grandes problemas tanto para el medio ambiente como para la salud de las personas. Es por esto que la gestión y disposición de los RAEE está relacionada directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial con el ODS 8, el ODS 3, el ODS 6, el ODS 14, el ODS 11 y el ODS 12.

Figura 2.

Objetivos de desarrollo sostenible ligados al proyecto.



Nota. La imagen representa los ODS ligados con la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Tomados de: Las Naciones Unidas, [En línea]. Disponible: [Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible \(un.org\)](https://un.org) [Acceso: ene.09, 2022].

Los RAEE son mal llamados “minas urbanas”, ya que contienen varios metales preciosos los cuales pueden reciclarse y ser utilizados como materiales secundarios. Hablando específicamente de los desechos de aparatos telefónicos, pueden encontrarse hasta 69 elementos de la tabla periódica, incluidos metales preciosos [2]. Hoy en día, debido a diferentes problemas que tiene la minería por las bajas concentraciones de metales preciosos en la tierra, las fluctuaciones de los precios del mercado, entre otros problemas, es necesario buscar métodos de reciclaje de residuos electrónicos.

Las placas de circuito impreso (PCB) son los componentes principales de todos los dispositivos eléctricos y electrónicos, estas PCB son elaboradas a partir de fibra de vidrio tejida o resina reforzada con papel de celulosa y múltiples tipos de metales. En los residuos de PCB se encuentran muchas subpartes peligrosas, como metales pesados (plomo, cadmio, arsénico, zinc, níquel y cromo), plástico de cloruro de polivinilo (PVC) y retardantes bromados (BFR). Además de metales como cobre, hierro, aluminio, estaño, metales nobles como oro, plata, platino y paladio, así como elementos radiactivos como el tantalio, el germanio y el niobio [4]. La concentración de oro

utilizado en PCB de teléfonos móviles tienen un nivel de concentración de aproximadamente 280 gramos por tonelada de residuos electrónicos [2].

En esta investigación se realizó un esquema de valorización basado en el oro reciclable a partir de los RAEE; iniciando con un estudio y análisis bibliométrico sobre la composición química de las tarjetas madre de los aparatos telefónicos, a partir de una metodología teórica, debido a la presente pandemia causada por el SARS-CoV-2, con el fin de obtener la información relevante para la investigación. Por otro lado se diseñó una propuesta de proceso industrial para el reciclaje de oro de los RAEE en la cual se presentan las etapas, materiales y equipos que deben ser utilizados, de manera que el proceso sea ambientalmente amigable y sostenible, en esta propuesta contemplaron múltiples aspectos físicos en la descripción de un proceso a nivel industrial.

Posteriormente para conectar los dos primeros objetivos específicos, se realizó un análisis financiero con la finalidad de determinar la viabilidad económica del proyecto.

OBJETIVOS

Objetivo general

Proponer un esquema de valorización basado en el oro reciclable de los desechos de tarjetas madre de los teléfonos móviles.

Objetivos específicos

- Determinar la composición química de las tarjetas madre de teléfonos móviles, obtenidos de la basura electrónica.
- Diseñar una propuesta de proceso industrial, para el reciclaje del oro en los desechos electrónicos de teléfonos móviles.
- Realizar un análisis financiero de la viabilidad del proyecto, dirigido como una posible opción de emprendimiento en la ciudad de Bogotá.

1. GENERALIDADES

En el presente capítulo se describen las generalidades y conceptos que fueron considerados para la realización del proyecto, sobre los aparatos eléctricos y electrónicos, los residuos generados por estos aparatos, los tipos de gestión utilizados para la llamada “basura electrónica”. Así como la explicación del concepto de química y proceso químico para ligarlo a la investigación. Por último se describen las técnicas utilizadas para la separación de metales preciosos de los RAEE.

1.1 Oro

La palabra “oro” proviene del latín Aurum, por lo que su símbolo químico es Au, es un elemento químico cuyo número atómico es 79 y se ubica en el grupo 11 de la tabla periódica. Es un metal precioso para el hombre, fue el primer metal noble conocido por el hombre, particularmente por encontrarlo en forma metálica, no como compuesto químico. Una de sus características especiales es su elevada densidad, la cual solo es superada por la del osmio, iridio y platino. El Oro puro no se oxida, es químicamente inactivo, no se afecta por ácido fuertes, sin embargo, es fácilmente soluble en mezclas que contengan cloro y se disuelve fácilmente en soluciones cianuradas. [5].

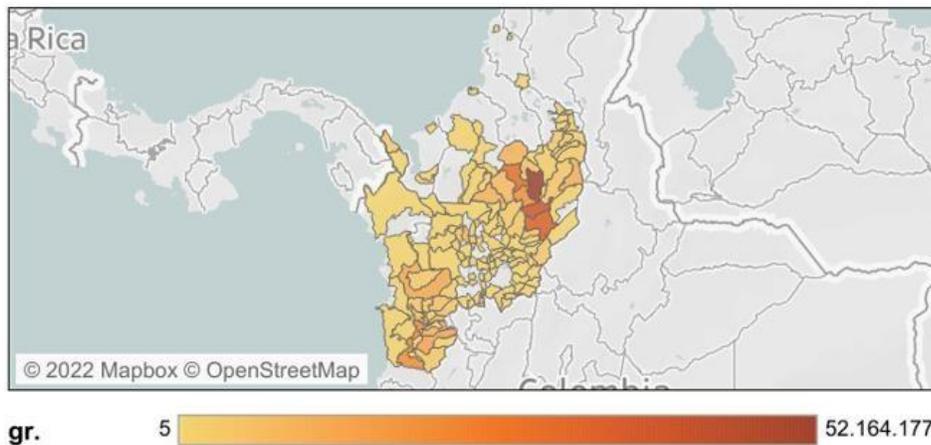
1.2 El oro en Colombia

En Colombia, el oro no es el principal recurso mineral explotado pero tiene un papel importante en el crecimiento del sector minero energético. La producción en de oro en 2018 fue de 35,97 t, en 2019 de 38,1 y para el 2020 48,48 t como lo representa la Figura 3. Según el Gobierno nacional dice que este sector puede ser clave para la reactivación económica sostenible del país, ya que para el 2020 el oro alcanzó su precio más alto en su historia.

La explotación de oro está concentrada en tres departamentos: Antioquia, Bolívar y Chocó, con el 87% del total nacional. [6]. Representa da en la figura 2.

Figura 3.

Mayores productores de oro en Colombia.

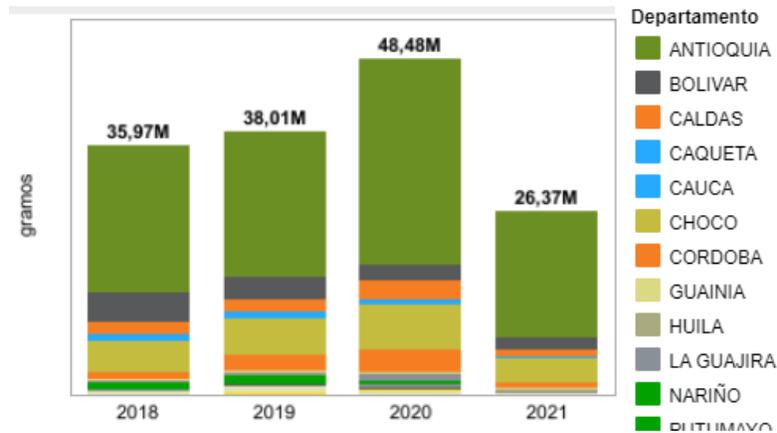


Nota. La imagen representa los departamentos donde más se produce oro: Antioquia, Bolívar, Chocó y Córdoba. Tomado de: Unidad de Planeación Minero Energética, 2022 [En línea]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.aspx>

La Figura 3 representa los departamentos que más cantidad de oro producen en Colombia, lo que significa que cualquier tipo de investigación que aporte para la obtención de oro diferente a la minería, presenta una oportunidad para minimizar la presión en el sector minero nacional que se reduce a minimizar los impactos de la minería clásica en los departamentos de mayor producción de oro en Colombia.

Figura 4.

Producción de oro desde el 2012 hasta el 2021.



Nota. La imagen representa la producción en millones de gramos en el intervalo de tiempo 2012- 2021 en los principales departamentos productores. Tomado de: Unidad de Planeación Minero Energética, 2022 [En línea]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/oro.aspx>

La Figura 4 muestra como la diversificación del sector minero de oro en Colombia se está expandiendo desde el 2018, sin embargo como se muestra en el año 2021, sufrió una disminución en la cantidad de toneladas producidas, significa que deben encontrarse nuevas forma de obtener el oro.

1.3 Química del oro

El oro es un elemento de la naturaleza, presente en la tabla periódica, de número atómico 79 y cuenta con una masa atómica de 197 g/mol, es brillante y está clasificado como metal de transición, por la tabla periódica y metal noble, esto representa un alta resistencia a la interacción con los ácidos, es decir los ácidos no pueden generar en el reacciones redox y lo hace muy resistente a la corrosión, también cuenta con particulares propiedades eléctricas, esto genera un amplia gama de aplicaciones en la industria electrónica entre otras industrias. [7].

En la naturaleza se encuentra presente generalmente en forma de mineral ya que es su forma termodinámicamente más estable, esto implica que para la extracción del oro de los minerales generalmente como pirita, calco pirita, vetas de cuarzo entre otros, se encuentra generalmente en fase sólida en incrustaciones, inclusiones o pequeñas pepitas, debido a que es inerte por su alta

estabilidad química en este estado de mineral, se puede extraer de la rocas mediante procesos químicos de carácter inorgánico. [7].

Químicamente el oro se considera inerte, pero es soluble en soluciones cianuradas, soluciones basadas en bromo o cloro y con el mercurio formando amalgamas líquidas, sin embargo existen más formas de hacer que oro pueda reaccionar, sin embargo requieren de modificación de condiciones de temperatura y presión. [7].

Físicamente es un elemento sólido en temperatura menor a 1064°C , cuenta con una densidad de 19300 Kg/m^3 y con una conductividad eléctrica de 317 W/k m y una muy alta resistencia al paso del tiempo, causado por su baja interacción química con fluidos y la humedad. [8].

1.4 Proceso Químico

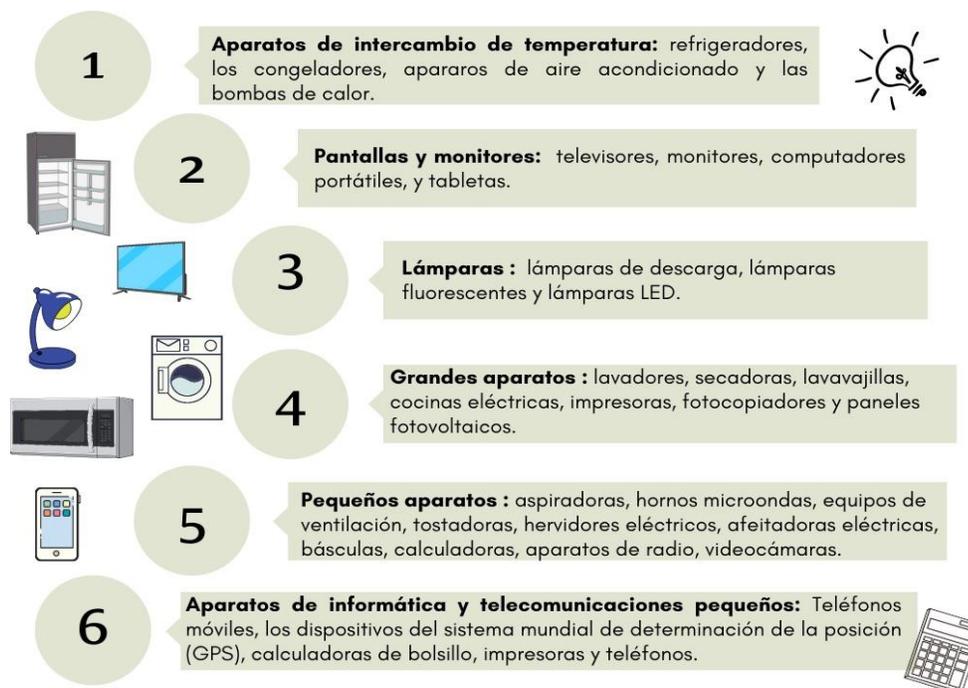
Un proceso químico definido desde la perspectiva de la ingeniería química, es una serie de operaciones y procesos unitarios que se ordenan de una manera lógica con el objetivo de transformar materias primas en productos con valor agregado, para ejecución de un proceso químico las operaciones se diseñan equipos especializados y son conectados de acuerdo con la secuencia lógica, y buscando lograr integración energéticas con el fin de hacer un mejor aprovechamiento de la energía que se utiliza en el proceso. [9].

1.5 Aparatos eléctricos y electrónicos (AEE)

Los AEE encierran un amplio catálogo de productos los cuales están presentes en prácticamente toda nuestra vida cotidiana y están dotados de circuitos o componentes eléctricos que para funcionar necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos. Los AEE desempeñan un papel cada vez mayor en los ámbitos del transporte, salud, sistemas de seguridad y los generadores de energía, en particular los fotovoltaicos. [3]. Los AEE se clasifican en seis categorías generales, las cuales se relacionan con las características de gestión de sus residuos. En la Figura 4, se observan las categorías de los AEE.

Figura 5.

Clasificación de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos.



Nota. La figura representa las seis categorías en las que se clasifican los aparatos eléctricos y electrónicos. Modificado de: V. Forti, C. P. Baldé, R. Kuehr y B. Garam, «Observatorio Mundial de los Residuos Electrónicos - 2020: Cantidades, flujos y potencial de la economía circular.» Universidad de las Naciones Unidas/ Instituto de las Naciones Unidas para Formación Profesional e Investigaciones- coorganizadores del programa SCYCLE, Unión Internacional de Telecomunicaciones y Asociación Internacional de Residuos Sólidos, Bonn/ Ginebra/ Rotterdam, 2020.

1.6 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Cuando un aparato eléctrico y electrónico (AEE) es descartado, se convierte en un residuo de aparato eléctrico y electrónico (RAEE), también conocidos popularmente como chatarra o basura electrónica o a nivel mundial como *e-waste*.

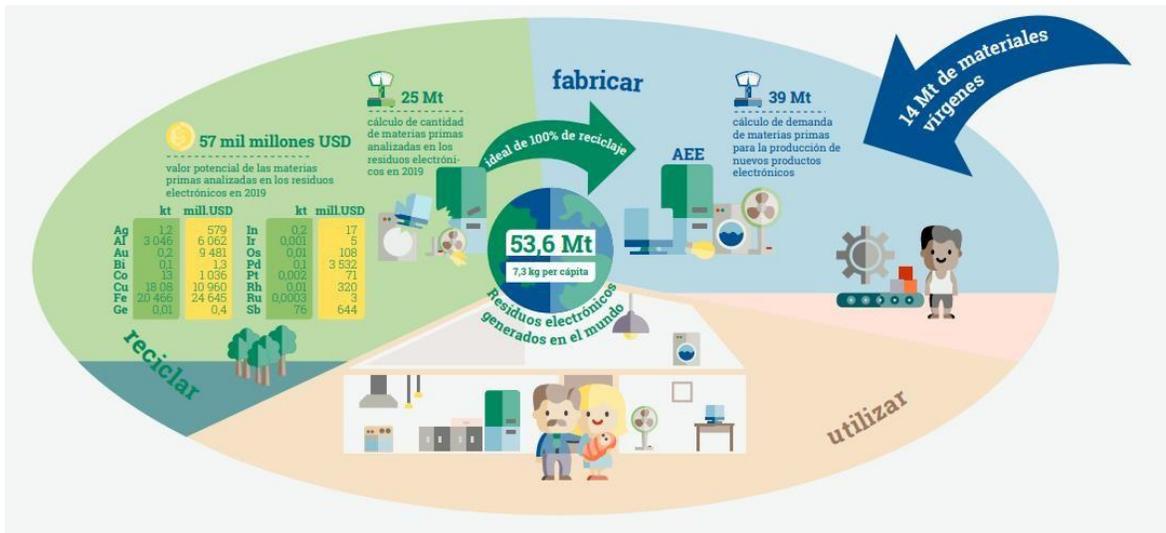
El descarte de un AEE depende de su vida útil, lo cual es una práctica habitual de la industria electro-electrónica ya que obliga al consumidor a renovar sus cada vez en tiempos más cortos, así mismo tiene que ver con la publicidad que motiva a los usuarios a reemplazar sus equipos aun cuando estos son completamente funcionales [10]. En cuanto más acelerada sea la producción de AEE, mayor será la generación de RAEE. De lo anterior se puede deducir que en las últimas décadas la generación de RAEE ha ido aumentando exponencialmente.

1.7 Reciclaje artesanal

Esto sucede en los países de bajos recursos económicos donde los gobiernos reciben la basura de otros países, la gente con mayores necesidades son las que se dedican a tomar los desecho de los aparatos electrónicos y son los encargados de desarmar los dispositivos y los llevan a procesos de quema al aire libre con el fin de recolectar los remanentes metales que son capaces de sobrevivir al proceso de quema, este tipo de procesos implican una serie de problemas, como la salud de las personas que se dedican a esto o están en contacto continuo con ambientes los cuales se ven gravemente afectados por los efectos nocivos que los gases resultantes de estos procesos son liberados, además que los desechos después de este problema son desechado en rellenos en su mejor escenario, porque también resultan en las fuentes hídricas de los países en donde se ejecutan estas prácticas [2]. En resumen toda esta situación puede ser causada por muchos factores como ignorancia del que puede hacerse con estos desechos después de haber cumplidos sus ciclos útiles, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6.

Economía circular de los RAEE



Nota. Representación de la economía circular con el reciclaje de RAEE. Fuente: Forti, C. P. Baldé, R. Kuehr y B. Garam, «Observatorio Mundial de los Residuos Electrónicos - 2020: Cantidades, flujos y potencial de la economía circular.» Ginebra/ Rotterdam, 2020. [En línea]. Disponible en: [Surge in GlobalE-waste, up 21 per cent in 5 years \(globalewaste.org\)](http://Surge in GlobalE-waste, up 21 per cent in 5 years (globalewaste.org))

El problema general del reciclaje de estos desechos, son los altos costos para la recuperación de algunos materiales por ejemplo, el germanio y el indio, ya que su montaje no está diseñado para ser reciclado. En los RAEE se pueden encontrar hasta 69 elementos de la tabla periódica, los cuales hacen que los RAEE sean una mina de recursos secundarios. A nivel mundial se recicla acorde con la normatividad mundial cerca del 17,4% de RAEE [2]. Se dice que si los países recogen y reciclan adecuadamente estos desechos podrían obtenerse metales de buena calidad de una manera más sostenible. En Colombia, según la Alianza Mundial para las Estadísticas de Residuos Electrónicos se recolecta y recicla de manera formal el 1% de los residuos eléctricos y electrónicos generados anualmente. Se generan 6,3 kg de RAEE per cápita. [3].

Dentro de los procesos actuales para la obtención de metales preciosos de la basura electrónica, existen dos: la hidrometalurgia y la pirometalurgia.

Basurero electrónico presente en Ghana

En un barrio llamado Agbogbloshie en Accra, la capital de Ghana, se encuentra el principal vertedero de desechos tecnológicos del mundo. A diario miles de personas se exponen a una muerte lenta para ganarse un poco de dinero, como se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura 7.

Basurero electrónico en Ghana.



Nota. La figura muestra la cantidad de desechos electrónicos y como los habitantes están expuestos a los gases contaminantes. Tomado de: Semana, «Se produjeron 41,8 millones de toneladas de basura electrónica en 2014,» 19 04 2015. [En línea]. Available: <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/basura-electronica-aumento-418-millones-toneladas-nivel-mundial/32888/>. [Último acceso: 2022].

A este país llegan millones de desechos electrónicos procedentes de toda Europa, Estados Unidos y China, según lo informa el Ministerio de Medio Ambiente de Ghana [11]. Esto sucede ya que en Ghana no hay leyes que prohíban la importación de basura electrónica. Los RAEE contienen una serie de metales que resultan valiosos para muchos de los habitantes de este lugar, sin embargo, su extracción no se realiza de la mejor manera y ha traído consigo una alta carga contaminante en el lugar, lo cual pone en riesgo la vida muchos habitantes de este sector [12]. Según el Banco Mundial, cerca de un cuarto de los 35 millones de ghaneses viven por debajo del umbral de la pobreza, que sitúa en 1.25 dólares al día [11].

Según un estudio del profesor Martin Oteng- Ababio de la Universidad de Ghana, este país en recuperación de metales valiosos genera a los trabajadores ingresos de unos 3,5 dólares diarios casi dos veces y medio el sueldo diario de un trabajador medio allí. Es el motivo por el que miles de personas se han visto atraídas por el negocio de la basura electrónica [13].

Un informe reciente de la Real Sociedad Británica de Química señala que un teléfono inteligente medio contiene 30 elementos químicos diferentes. Estos materiales son tratados en fogatas al aire libre, liberando polvo y humos contaminantes derivados de la quema, sobre todo de PVC. Y sumado a la nula experiencia en el tratamiento de estos desechos, muchos niños terminan

sufriendo de distintas enfermedades respiratorias [13].

1.8 Técnicas para la separación de metales preciosos a partir de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)

El hecho de no aprovechar el valor de los materiales que se encuentran en los RAEE, significa un desperdicio de materias primas y energía. De los RAEE se pueden extraer materiales valiosos como metales ferrosos y no ferrosos, metales preciosos, plásticos y vidrios, los cuales pueden ser utilizados en otros procesos productivos.

Hablando específicamente de metales preciosos como el oro, el oro reciclado produce 80% menos de emisiones de gases de efecto invernadero que la extracción de minerales nuevos, además se evitaría el impacto ecológico y ambiental que produce la minería primaria [10].

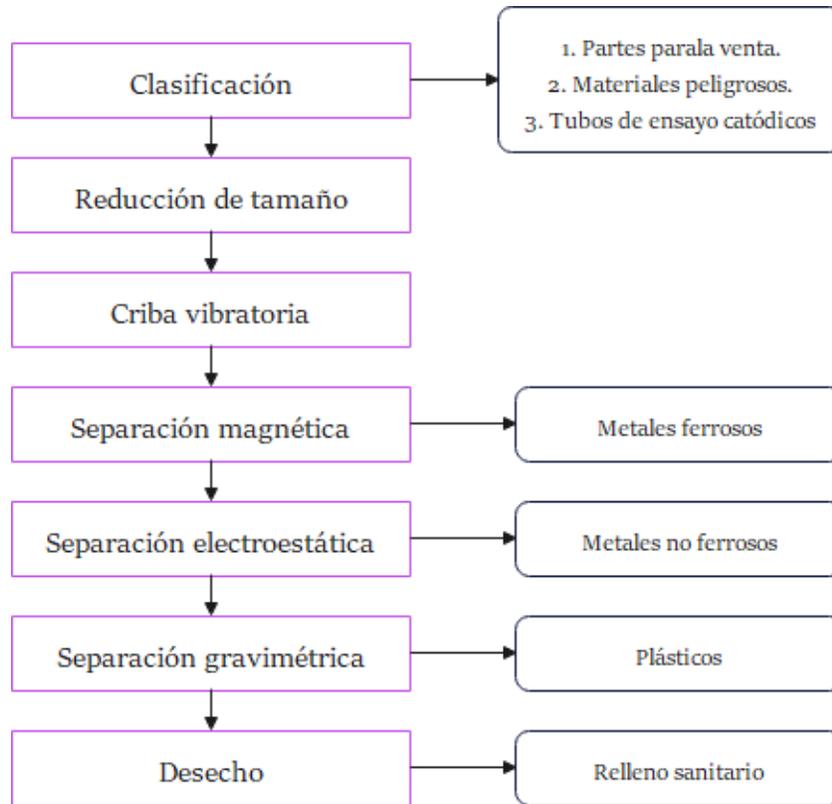
Para cualquier técnica de recuperación de metales preciosos de los RAEE, implica mantener un proceso con tecnologías eficientes para la ejecución de las operaciones unitarias que no generen pérdidas ni a la atmósfera ni a las corrientes de agua.

La Figura 8. Representa un esquema simplificado de las etapas del proceso de recuperación demateriales.

De acuerdo con la Figura 8. La cantidad de materiales de materiales usados en los dispositivos electrónicos es múltiple, por esta razón es necesario clasificarlos desde los procesos de desarme, a partir de esto, propone una secuencia lógica para la clasificación de estos materiales, pero a través de operaciones unitarias, sin embargo, a través del desarrollo de procesos se ha podido generar dos grandes técnicas, no obstante, también es posible encontrar metodologías que combinan las técnicas hidro y piro metalúrgicas.

Figura 8.

Esquema general de etapas del proceso de recuperación de



Nota. Representación de la metodología para recuperar materiales de interés de desechos eléctricos y electrónicos (RAEE). Tomado de: Hai-Yong Kang, Julie M. Schoenung. “Electronic Waste Recycling: A Review Of Usa Infrastructure And Technology Options”, 2005. [En línea]. Disponible en: [doi:10.1016/j.resconrec.2005.06.001](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.06.001) (usp.br)

1.8.1 Técnicas Hidrometalúrgicas

Dentro del contexto del presente proyecto la Hidrometalurgia se entiende como una de las técnicas implementada desde hace varias décadas para extracción de metales preciosos de desechos electrónicos, que se basa en la implementación de solventes para lograr la extracción de estos elementos, esto se hace necesario porque en el caso específico del oro se encuentra en estados amalgamados en las tarjetas madre de los teléfonos inteligentes, lo que hace complicado la extracción y a su vez necesaria la implementación de procesos con solventes fuertes. Debido a que son muchos los metales presentes en estos desechos electrónicos, los procesos hidrometalúrgicos varían de acuerdo con cual sea la sustancia de interés como lo explica el autor Honorio Oliveros

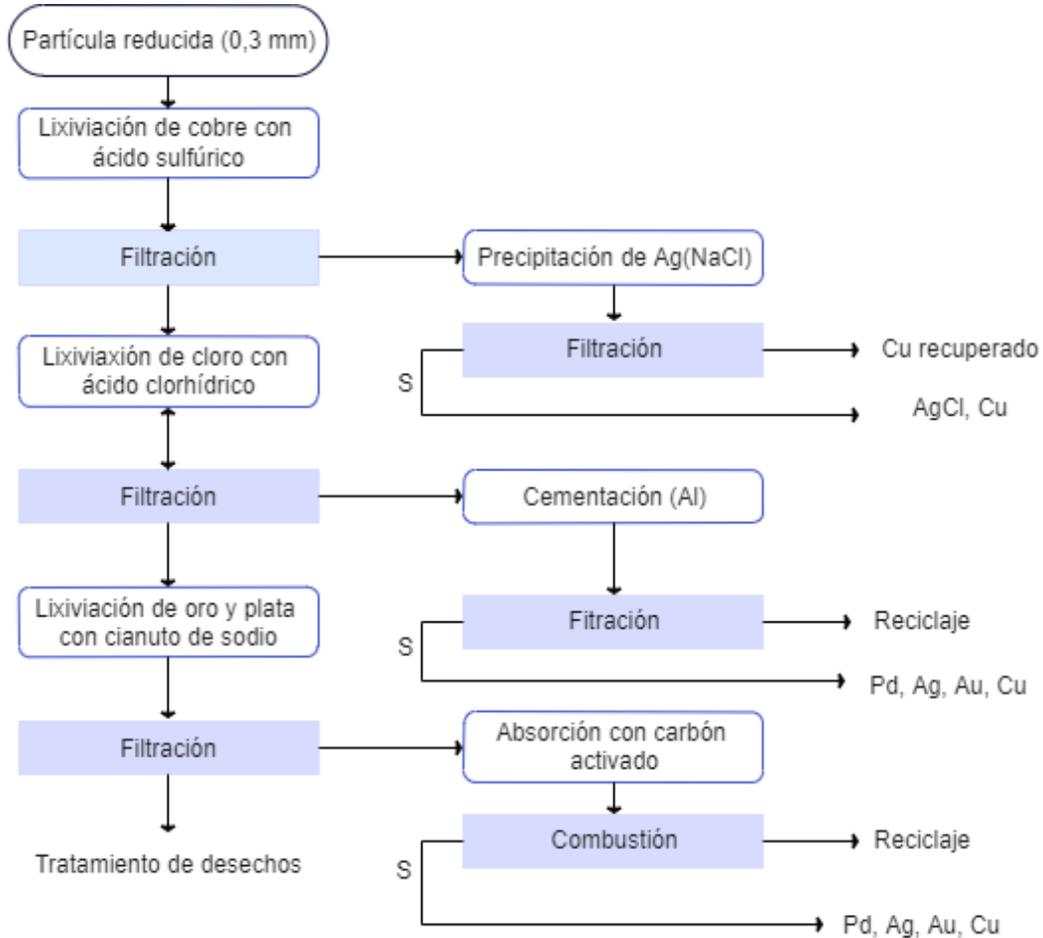
Gómez en la página 29 de su análisis del estado del arte. [14].

«Los procesos hidrometalúrgicos para procesar chatarra electrónica, utilizan diferentes solventes ácidos o básicos, como el cianuro de sodio NaCN, la tiourea $((NH_2)_2CS)$, el tiosulfato (S_2O^{2-}) , y los ácidos fuertes clorhídrico HCl, sulfúrico H_2SO_4 , y el HNO_3 . Siendo el cianuro de sodio la técnica de lixiviación más utilizada en el mundo por más de una centuria, por sus altos rendimientos en la lixiviación metálica, los bajos costos y el equipamiento convencional requerido. La tabla 2 presenta algunas características de la lixiviación del oro con solventes alternativos al cianuro de sodio.» [14].

A partir de ideas de diferentes autores, es posible identificar las diferentes etapas de los procesos de separación de metales de los residuos electrónicos, proporcionando una base para el desarrollo de la propuesta de esta investigación. Como se puede evidenciar en la Figura 9 se muestra la metodología para la recuperación de metales preciosos a partir de RAEE y en la Figura 10 la recuperación de oro de RAEE.

Figura 9.

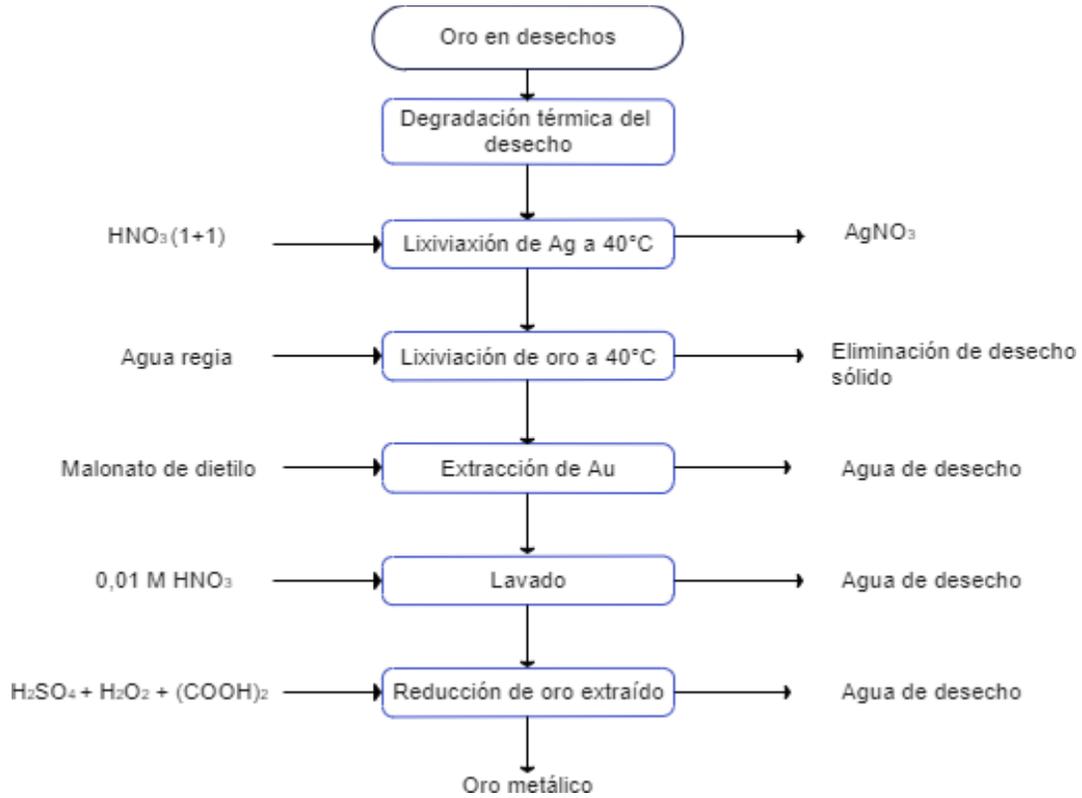
Diagrama de bloques para la recuperación de metales preciosos presentes en chatarra electrónica.



Nota. Metodología basada en hidrometalurgia, usando diferentes solventes y combinando las operaciones unitarias. Fuente: P. Quinet J. Proost, A. Van Lierde. "Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes, Miner. Metall. Process", 2005. [En línea]. Disponible en: [Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes | SpringerLink](#)

De la Figura 9, se puede evidenciar el proceso utilizando diferentes solventes y combinando operaciones unitarias, allí se describen las condiciones granulométricas que y los metales que se pueden recuperar, según las fuentes consultadas, los porcentajes de recuperación son bastante altos hablando específicamente de metales preciosos, se reportan los siguientes porcentajes, 93% de plata, 95% de oro y 99% de paladio [14].

Figura 10. Diagrama propuesto por el autor Chmielewski para la recuperación de oro a partir de RAEE.



Nota. Metodología para recuperar oro presente en desechos electrónicos. Tomado de: A.G. Chmielewski T.S, Urbanski W, Migdal “Separation Technologies For Metals Recovery From Industrial Wastes, Hydrometallurgy”, 1997. [En línea]. Disponible en: [Separation technologies for metals recovery from industrial wastes - ScienceDirect](#)

De las figuras anteriores se puede deducir una lógica general de la metodología que envuelven lastécnicas hidrometalurgia. En primer lugar, se prepara una solución con alguno de los solventes previamente seleccionados, y posteriormente se genera un lixiviado, después dependiendo de la técnica se reduce el tamaño molecular o se calienta con el fin de debilitar las interacciones de las moléculas que mantienen los metales en su posición y posteriormente su extracción con el solvente correcto para que sea de un alto rendimiento [15].

1.8.2 Técnicas pirometalúrgicas

Los procesos pirometalúrgicos son procesos que se basan en la implementación de fuentes de calor para lograr que los compuestos de interés se desprendan de su posición, esto significa que los procesos necesitan de hornos que logren temperaturas altas, eso se reduce a hornos que utilizan combustión para poder obtener la energía en forma de calor necesaria, adicional a esto, existen problemas como que los elementos metálicos como el aluminio y el hierro son arrastrados por las interacciones a los desechos de proceso. La primera técnica desarrollada fue la formación de dioxinas la cual está enfocada en la recuperación de los metales de mayor concentración dentro de los RAEE, como suele ser el cobre. Al ser la primera técnica es de esperarse que haya sido implementada en las industrias dedicadas al reciclaje de metales preciosos a partir de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos [14]. A continuación se describen algunas técnicas utilizadas para la obtención de metales a partir de RAEE pro medio de la pirometalurgia.

Figura 11.

Metodologías de pirometalurgia para la obtención de metales a partir de RAEE

Técnica	Metal Recuperado	Características del proceso	Resultados obtenidos
Proceso Noranda. Quebec, Cánada	Cu, Au, Ag, Pt, Pd, Se, Te, Ni.	Fundición de cobre y concentrado de cobre, convertidor, horno de fundición, electrorrefinación del metal.	Altas recuperaciones de cobre y metales preciosos.
Fundición Boliden. Suecia	Cu, Au, Ag, Pt, Pd, Zn, Pb, Ni	Reactor para concentrados, 100 mil toneladas por año, convertidor y refinación para cobre, refinación de metales	Altas recuperaciones de cobre y metales preciosos.
Umicore, Belgica	Metales preciosos, Se, Te, metales base.	Lixiviación de cobre, electrorrefinación de metales preciosos, 250 toneladas de chatarra electrónica/año, horno de fundición con control de emisiones de gases, plástico sustituto del coke.	Recuperación de metales preciosos, Sb, Bi, Se, Te.
Patentes Dunns para refinación de oro	Oro	Reacción de chatarra electrónica con cloro a temperatura 300-700°C, disolución de impurezas con HCl, disolución de plata con HNO ₃ y NH ₄ OH.	Recuperación de oro con 99,9% de pureza proveniente de la chatarra electrónica.
Patente Days para recuperar metales presentes en chatarra con ceramicos y refractarios	Metales preciosos, platino y paladio.	Chatarra cargada en horno plasma a temperatura cercana a 1400 °C, plata y cobre recuperados.	Recuperaciones de platino y paladio a partir de chatarra electrónica, en porcentajes de 80,3% y 94,2% respectivamente.
Patente Aleksandrovichis para recuperar metales del grupo platino y oro a partir de chatarra electrónica.	Grupo del platino y oro	Fundición de metales mediante la reducción con carbón.	Metales del grupo platino y oro recuperados.

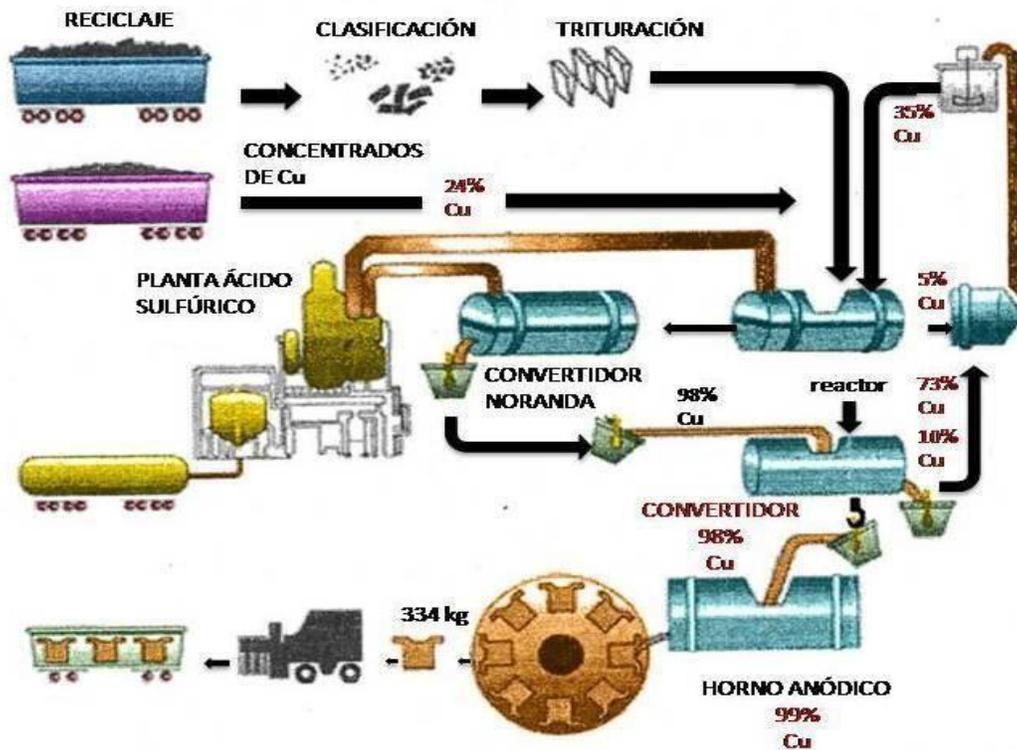
Nota. La tabla representa una recopilación de diferentes técnicas pirometalúrgicas para recuperar metales preciosos y otros metales presentes en los RAEE. Tomado de: “Metodología para recuperar metales preciosos: Oro, plata y grupo del platino, presentes en desechos electrónicos”. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8704>.

1.8.3 Métodos industriales

Existen varios métodos industriales, los cuales son utilizados por distintas empresas las cuales utilizan diferentes procesos químicos para hacer del proceso de reciclado de metales a partir de RAEE todo un éxito. A continuación, se mostraran los 2 procesos industriales más utilizados por las empresas para este tipo de operación.

Figura 12.

Diagrama de procesos de la empresa Noranda para la recuperación de metales.



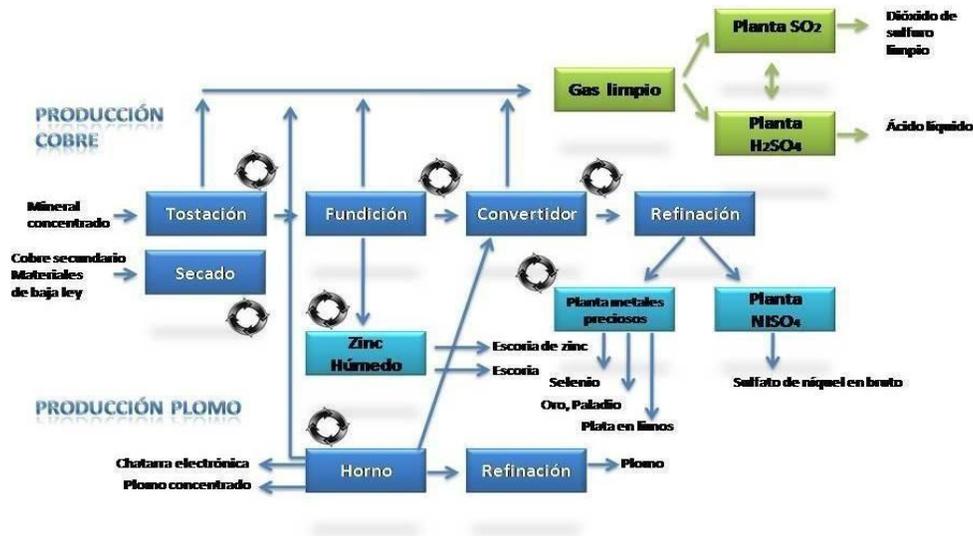
Nota. El diagrama representa el proceso implementado para la recuperación de metales, enfocado en el Cu a partir de RAEE. Fuente: “Metodología para recuperar metales preciosos: Oro, plata y grupo del platino, presentes en desechos electrónicos”. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8704>.

En este diagrama de proceso se puede identificar la implementación de la metodología general, como se ve en la parte de clasificación, y reducción granulométrica que corresponde a la tritución, así mismo el uso de horno de alta temperatura y la implementación de un solvente fuerte como lo es el ácido sulfúrico, es decir, en la aplicación de esta planta se implementan todas las técnicas antes descritas. A continuación, se presentara otro diagrama de la empresa

RONNSKAR de Suecia. [14].

Figura 13.

Diagrama de procesos de la empresa RONNSKAR.



Nota. El diagrama representa el proceso implementado por la empresa RONNSKAR para la obtención de metales a partir de RAEE. Fuente: “Metodología para recuperar metales preciosos: Oro, plata y grupo del platino, presentes en desechos electrónicos”. [En línea]. Disponible <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8704>.

Las figuras 12 y 13 muestran un proceso similar implementado por ambas empresas, lo que responde a las escasas de tecnologías nuevas, sin embargo cabe resaltar que la implementación de ácido sulfúrico y dióxido de azufre en sus procesos significan un gran control de emisiones ambientales, y esto se resalta en el diagrama de RONNSKAR puesto que la política ambiental y de emisiones en el 2009 era mucho más influyente que en 1994 año al que corresponde la figura 9.

1.8.4 Técnicas biotecnológicas

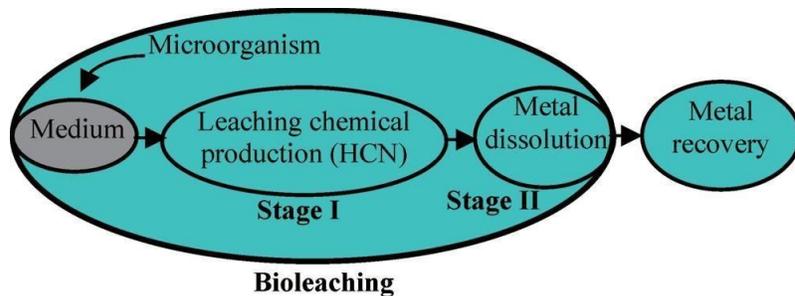
El cianuro es el solvente más utilizado para la extracción del oro, se le conoce también como “El compañero venenoso del oro” por sus propiedades altamente tóxicas. En las últimas décadas ha aumentado la cantidad de chatarra electrónica y por consiguiente, el reciclaje de los metales preciosos extraídos de estos RAEE [16]. Por esto último los científicos han buscado técnicas biotecnológicas para el proceso de recuperación de metales, específicamente del oro, a partir de la chatarra electrónica y con esto evitar la contaminación ambiental generada por el uso de cianuro en el proceso. Una de las primeras ideas biotecnológicas planteada en el año 2011 es:

« As an alternative using cyanide chemicals for gold extraction, the application of acyanogenic bacterium *viz. Chromobacterium violaceum* (*C. violaceum*) in YP medium has been investigated. The catalytic roles of metal ions such as Na^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+} , and Pb^{2+} , as well as the effect of Na_2HPO_4 nutrient addition on the cyanide generation efficiency of the bacterium in this medium have been elucidated. While MgSO_4 and FeSO_4 added to the medium were equally effective for cyanide generation, improved efficiency was obtained in the presence of Na_2HPO_4 and $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. In order to examine the effectiveness of *C. violaceum* cultured in YP medium for the generation of cyanide ions, the dissolution of gold and copper from waste mobile phone printed circuit boards (PCBs), a good source of gold and copper in alkaline conditions, was tested at 30°C , for various pH values and metal ion contents. Gold leaching was found to be 11% in 8 d at pH 11.0 in presence of 4.0×10^{-3} mol/L MgSO_4 , whereas; copper recovery was high (11.4%) at pH 10.0. Addition of 1.0×10^{-2} mol/L Na_2HPO_4 and 3.0×10^{-6} mol/L $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ to the YP medium increased copper leaching to 30.3% and 38.1%, respectively, at pH 10.0 in 8 d. However, this effect was not observed for gold leaching. » [17].

La extracción de oro utilizando *Chromobacterium violaceum*, para la lixiviación de una muestra de RAEE, donde el medio fue previamente preparado con sustrato y el catalizador más conveniente para estas cianobacterias, con el fin de evaluar la producción de cianuro por la bacteria como método de producción del solvente de manera sostenible y de bajo impacto ambiental ya que al ser una molécula construida por una bacteria será capaz de descomponerse, cumpliendo así un ciclo cerrado y no genera acumulación, causa de los grandes problemas con los desechos. A continuación, se presenta un esquema que permite entender la metodología del proceso y en que secuencia suceden los diferentes subprocesos:

Figura 14.

Esquema de cianuración de metales utilizando microorganismos



Nota. Proceso y secuenciación de cianuración utilizando microorganismos. Fuente: C. D. Tran, J.-C. Lee, B. D. Pandey, J. Jeong, K. Yoo y T. H. Huynh, "Bacterial cyanide generation in the presence of metal ions (na+, mg2+, fe2+, pb2+) and gold bioleaching from waste pcbs" [En línea]. Disponible: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcej/advpub/0/advpub_10we232/article/-char/en

Según la Figura 14, se observa que la recuperación de metales sucede después del bioproceso. La idea es que mediante la biolixiviación, el microorganismo genere el cianuro de acuerdo con las condiciones de pH del entorno y de su periodo de crecimiento, el cual varía entre 5 o 7 días, en este periodo de tiempo el microorganismo genera las máximas concentraciones de cianuro en su entorno. Luego de esta fase el cianuro empieza la extracción por su afinidad con el oro. De esta manera se implementa un método más óptimo para la producción de cianuro y el desarrollo de la extracción oro a partir de RAEE de una manera más sostenible, comparada con las técnicas clásicas de hidrometalurgia y pirometalurgia [17].

Sin embargo, que el cianuro tenga una toxicidad alta, ha causado que el que muchos investigadores busquen alternativas biotecnológicas, usando biolixiviación pero sin el uso del cianuro. La composición de los RAEE es heterogénea e incluye hierro, metales no ferrosos, plásticos, caucho, hormigón y cerámica. Por otra parte, los residuos eléctricos y electrónicos contienen un porcentaje de metales preciosos. La biolixiviación de los RAEE se ha explorado como alternativa a la lixiviación química [18]. No obstante, debido a la toxicidad del cianuro se debería explorar en biolixivantes más respetuosos con el medio ambiente.

Es necesario encontrar alternativas al cianuro para la recuperación de metales preciosos, y es de importancia que la fuente sea sostenible. Esto demuestra que la utilización de bioprocesos es lo que debe buscarse en la actualidad porque serán, definitivamente, los procesos industriales del

futuro, en el futuro cercano puede utilizarse el cianuro como forma de transición rápida a la biotecnología, pero el futuro es la sustitución de este solvente como herramienta para la extracción de metales en los desechos de los dispositivos electrónicos.

1.9 Marco Normativo

- **Ley No. 1672 de 19 de Julio del 2013.** *“Por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una Política Pública de Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) y se dictan otras disposiciones”*. Menciona que los RAEE son residuos de manejo diferenciado que deben gestionarse de acuerdo con las directrices que para el efecto establezca el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Prohíbe su disposición final en los rellenos sanitarios y restringe a rellenos de seguridad para que sean retomados por los productores de AEE, mediante sistemas de recolección y de gestión ambientalmente segura.
- **Resolución 0076 del 2019.** *“Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental- EIA, para el trámite de licencia ambiental de proyectos para la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, tratamiento, y/o aprovechamiento (recuperación/reciclado) de residuos de aparatos eléctricos o electrónicos (RAEE)”*
- **Decreto 285 del 2018.** *“Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Único Reglamento del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la Gestión Integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos- RAEE y se dictan otras disposiciones”*.

1.10 Marco de Políticas

La Política nacional para la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) ha generado políticas ambientales las cuales se evidencian en la Figura 15.

Figura 15.

Marco de Referencia de políticas considerado en la formulación de la Política RAEE



Nota. La figura representa las políticas consideradas den la política para RAEE. Tomada de: Política Nacional: Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2017 [En línea]. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica_RAEE.pdf

1. **La política de residuos o desechos peligrosos:** Relacionada con su orientación hacia la prevención y manejo ambientalmente sostenible de los residuos, así como la promoción de su uso y reciclaje. [3].
2. **Política de producción y consumo sostenible:** en sus objetivos está impulsar el cambio hacia la producción y el consumo de manera sostenible, a través de estrategias como el diseño ambiental y la contratación pública sostenible, mejorar la competitividad de la empresa. [3].
3. **Política para la gestión ambiental urbana:** mejorar la coordinación y fortalecimiento institucional entre entidades regionales y reguladores ambientales, aumentar la participación ciudadana en cuanto a cultura y conciencia ambiental. Abordar los problemas ambientales urbanos y regionales. [3].
4. **Política nacional de educación ambiental:** es el instrumento del Sistema Nacional Ambiental (SINA). [3].

5. **Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos CONPES 3874 de 2016:** su enfoque es en la gestión de residuos no peligrosos y la gestión integral de residuos sólidos. [3].

2. METODOLOGÍA

En el presente proyecto de investigación se tienen 3 objetivos específicos con el fin de cumplir con el objetivo general, en el siguiente capítulo se describen las técnicas y los métodos aplicados para obtener los resultados de la composición física así como las unidades de operación para la extracción química de los residuos eléctricos y electrónicos, anión del oro como metal precioso y las condiciones de viabilidad económica.

Como primer objetivo específico se tiene, “determinar la composición química de las tarjetas madre de teléfonos móviles”, obtenidas a partir de desechos electrónicos, debido a la dificultad de acceso a laboratorios y/o cualquier complicación por las actuales condiciones de salud pública, causada por la pandemia del virus SARS-CoV-2, se planeó llevar a cabo un enfoque teórico para el desarrollo de este proyecto, en este caso se realizó una revisión bibliométrica como herramienta para la adquisición de bibliografía, mediante el uso de bases de datos como Google académico, Virtual Pro, Acces Engineering, Knovel, Dialnet, Sciene direct, Scopus y latindex, haciendo uso de palabras claves tales como, “composición química, teléfonos móviles, extracción de oro, tarjetas madre, recuperación de metales”, e implementando operadores lógicos entre las palabras clave tales como “AND” y “OR” y teniendo en cuenta un intervalo de 0-10 años, de esta manera se desarrollaron ecuaciones de búsqueda.

Se realizó un análisis de información respecto de la composición química, mediante la herramienta estadística de análisis de frecuencias, sin embargo, antes de ejecutar el análisis estadístico fue necesario aplicar una normalización de los datos extraídos; para esto fueron programadas las unidades de conversión necesarias para su homogeneización, como herramienta de cálculo se usó el software de Excel.

A fin de cumplir con el segundo objetivo “diseñar una propuesta de proceso industrial, para el reciclaje del oro en los desechos electrónicos de teléfonos móviles”, se tuvo en cuenta la información consultada para el primer objetivo y un análisis cualitativo teniendo en cuenta la situación actual para los proyectos de investigación con el aporte de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Adicionalmente, considerando que el contexto de la recuperación de metales de los RAEE es clásicamente un proceso inorgánico, se decidió realizar la propuesta desde una perspectiva incluyente con las tecnologías clásicas de procesos que están en operación y los estudios en fases avanzadas, así como propuestas biotecnológicas, para aportar a este proceso una

manera de hacerlo auto sostenible. Con este enfoque se decidió consultar las propuestas e investigaciones biotecnológicas al respecto del reciclado de metales con microorganismos; las posibilidades de formación de solventes con el uso de bacterias y hongos. Posteriormente se definió una secuencia basada en la técnica más común entre las industria que es la lixiviación de cianuro, como método de extracción para el oro en este tipo de desperdicios electrónicos y se optó por la alternativa de biolixiviación para la formación de cianuro apoyados de los documentos consultados anteriormente. Se procedió a desarrollar la propuesta de proceso industrial, con la característica cualitativa, debido a la dificultad de simular un bioproceso en los simuladores actuales, y como parte de la propuesta, se definió el mercado objetivo del oro, el diagrama de bloques, de flujo de proceso y el P&ID.

Para el tercer objetivo “realizar un análisis financiero de la viabilidad del proyecto, dirigido como una posible opción de emprendimiento en la ciudad de Bogotá”, se aplicó el indicador financiero conocido como tasa interna de retorno (TIR) calculada de forma programada en el software Excel de office. Esta técnica incluye la aplicación de la ecuación:

Ecuación 1. *Valor actual neto.*

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} - I_o$$

Donde el VAN se conoce como el valor actual neto, F_t los flujos de dinero en cada periodo t , I_o la inversión inicial.

Para obtener la inversión inicial se aplica la suma del costo de las unidades de operación de ingeniería y el sueldo de los primeros 3 meses del personal necesario, además de los gastos energéticos por operación, se comparó la TIR con una Tasa interna de oportunidad (TIO) previamente fijada del 20% , con el fin de argumentar la viabilidad del proyecto. La aplicación del costo beneficio se obtuvo mediante la ecuación:

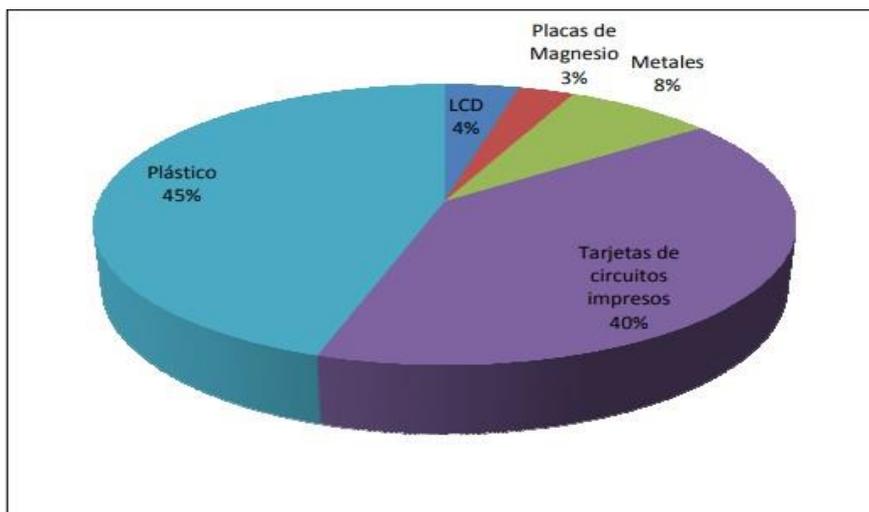
Ecuación 2. *Relación Costo Beneficio*

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + Tio)^t}}{Inversion}$$

3. DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS TARJETAS MADRE

Después de realizada la investigación bibliométrica en cuanto documentos, artículos, noticias, revistas estadísticas y demás información sobre el tema de la composición química de los teléfonos inteligentes y cuáles de estos fueron escogidos para este tipo de estudio. Se sabe que a medida que la industria electrónica fue evolucionando en cuanto a la producción de estos aparatos, los compuestos que conforman estos dispositivos son de naturaleza compleja, es decir, que los componentes están formados por elementos simples de la tabla periódica organizados en formas de materiales. Lo anterior, dificulta profundamente el desarrollo de los análisis de composición en términos de elementos simples, como muestra el autor Vicente Sebastián Espinoza Echeverría en sus tesis de grado titulada “Recuperación de metales de las tarjetas de circuito de celulares descartados” citando la gráfica realizada por el autor Cempre en 2010 en la siguiente representación gráfica presentada en la Figura 16 [19].

Figura 16. Representación gráfica de la composición de un teléfono celular sin batería.



Nota. Figura de la composición de un teléfono inteligente, sin batería, y con los compuestos generales, es decir no en términos de elementos de la tabla periódica. Tomado de: Repositorio Digital - EPN: “Recuperación de metales de tarjetas de circuito impreso de celulares descartados” [11] ,[en línea]. Disponible en <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2485/1/CD-3188.pdf>

De la Figura 16, se entiende que en los tableros de circuito de los teléfonos móviles, la composición generalmente está dominada por plásticos y estructuras complejas, además se hizo

evidente que la proporción de metales presentes es baja, lo cual es lógico, debió a los altos costos de estos metales. Adicionalmente la siguiente tabla también recuperada de la tesis del señor Vicente Sebastián Espinoza Echeverría, que fue citada por el mencionando a su creador original Quiminet, en el 2009, describe la composición de una tarjeta de circuito impresa.

Tabla 1. *Composición de una tarjeta madre*

Material	Porcentaje
Fibra de vidrio	55%
Resina epóxica	30%
Cobre	15%
Metales preciosos (Ag, Au, Pd)	< 0,1%

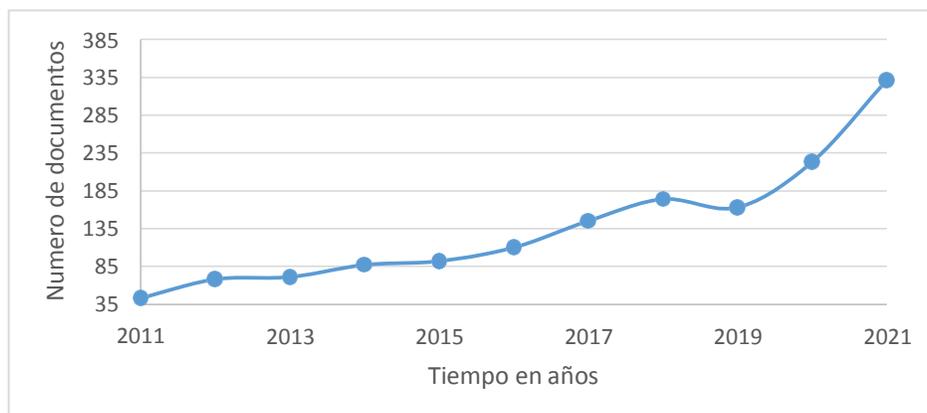
Nota. La tabla describe los compuestos de manera resumida que contiene un tablero de circuito impreso, Tomado de: Repositorio Digital - EPN: “Recuperación de metales de tarjetas de circuito impreso de celulares descartados” [11]. [En línea]. Disponible en <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2485/1/CD-3188.pdf>

A partir de esta información, se puede generar un panorama general de la distribución compleja de los compuestos presentes en los PCB de los teléfonos modernos.

Como primera medida del análisis bibliométrico, se realizó la búsqueda de información en bases de datos teniendo en cuenta un rango de 10 años en el tiempo, desde el 2011 hasta el 2021, además de esto, como parámetros de búsqueda se implementaron frases puntuales y el uso de palabras clave con conectores en el idioma de inglés lo que facilitó la recopilación de los documentos bibliográficos. Gracias a la Biblioteca de la Universidad y las colecciones digitales, donde se puede acceder a diferentes bases de datos, entre ellas ScienceDirect donde se reporta cuantos artículos se publicaron en su base de datos por años respecto a las palabras clave consultadas, se graficó el avance del tiempo en términos de años con el número de artículos por cada periodo, de esta manera se evidenció el aumento de publicaciones respecto al tema de la recuperación de metales a partir de desechos RAEE. De acuerdo con lo anterior, se presenta la siguiente figura:

Figura 17.

Aumento de los artículos respecto a "Composición química del oro en los teléfonos móviles"

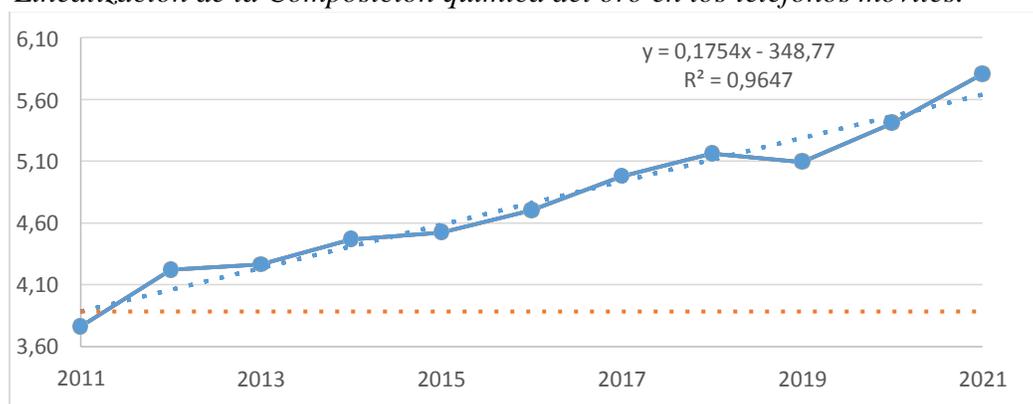


Nota. En la figura 17, los puntos azules representan el número de documentos cargados a la base de datos ScienceDirect, en el intervalo de tiempo, del 2011 al 2021, y la curva continua representa el aumento variable de estos documentos en el tiempo.

La linealización de los datos de la figura 17, presentada en la figura 18, representa la tendencia creciente del aumento de documentos bibliográficos respecto a la composición del oro en teléfonos inteligentes, cuantificada por el valor de la pendiente de la recta de 0,1754 como se muestra en la ecuación de la recta.

Figura 18.

Linealización de la Composición química del oro en los teléfonos móviles.

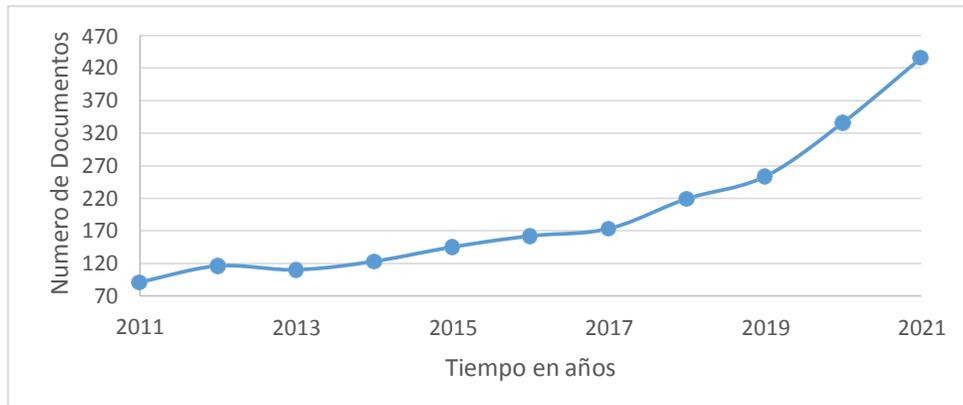


Nota. La gráfica del ejercicio de linealización de la figura 17 con la respectiva ecuación y su valor de R cuadrado.

A continuación, se encuentra la representación gráfica del número de documentos encontrados en la base de ScienceDirect, consultada con la frase “*Recuperación de oro de los teléfonos celulares*” en idioma inglés y con un rango de tiempo desde 2011 hasta el 2021.

Figura 19.

Aumento de los documentos respecto a "Recuperación de oro de los teléfonos celulares".

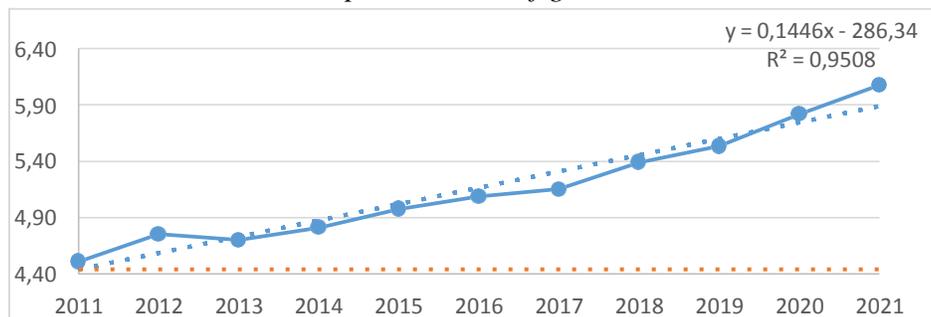


Nota. En la figura 19 los puntos azules representan el número de documentos cargados a la base de datos ScienceDirect, en el intervalo de tiempo, del 2011 al 2021, y la curva continua representael aumento variable de estos documentos en el tiempo. Fuente: Elaboración propia.

La linealización de los datos de la Figura 19, presentada en la Figura 20, representa la tendencia creciente del aumento de documentos bibliográficos respecto a la composición del oro en teléfonos inteligentes, cuantificada por el valor de la pendiente de la recta de 0,1446 como se muestra en la ecuación de la recta.

Figura 20.

Linealización de la curva presente en la figura 19



Nota. Gráfica del ejercicio de linealización de la figura 19 con la respectiva ecuación y su valor de R cuadrado.

Representación gráfica del número de documentos encontrados en la base de datos ScienceDirect, consultada con la frase “Extracción química del oro de residuos PCB”, en el idioma inglés y con un rango de tiempo desde 2011 hasta el 2021.

Figura 21.

Aumento de los documentos respecto a "Extracción química del oro de residuos de PCB"

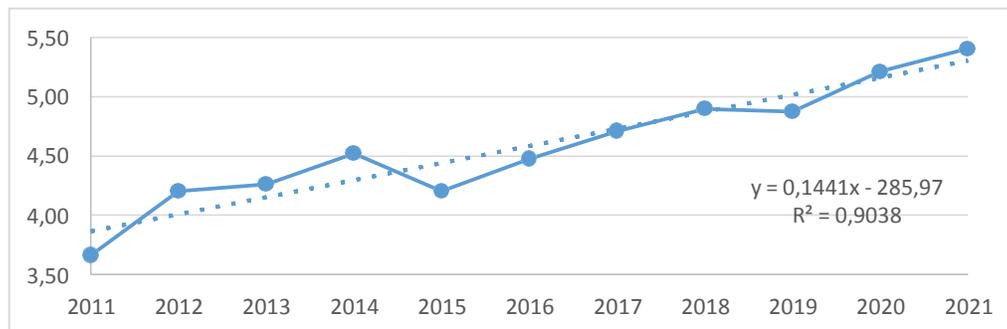


Nota. En la gráfica 6, los puntos azules representan el número de documentos cargados a la base de datos ScienceDirect, en el intervalo de tiempo, del 2011 al 2021, y la curva continua representa el aumento variable de estos documentos en el tiempo.

La linealización de los datos de la figura 21, presentada en la figura 22, representa la tendencia creciente del aumento de documentos bibliográficos respecto a la composición del oro en teléfonos inteligentes, cuantificada por el valor de la pendiente de la recta de 0,1441 como se muestra en la ecuación de la recta.

Figura 22.

Linealización de la curva presente en la figura 21.



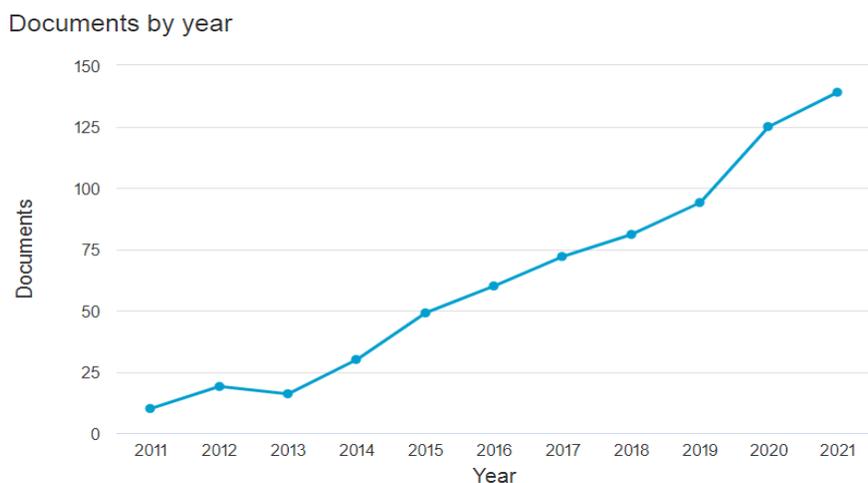
Nota. Gráfica del ejercicio de linealización de la gráfica 6 con la respectiva ecuación y su valor de R cuadrado.

Adicionalmente en la base de datos Scopus, se replicó este procedimiento pero con la ventaja de que el sistema de esta herramienta lo hace automáticamente, y adicionalmente se usaron las gráficas de torta que son una representación de como las diferente áreas del conocimiento humano pueden hacer publicaciones referentes a este tema.

En la figura 23, presentada a continuación, se representa el número de documentos encontrados en la base de datos Scopus generada por su propio sistema, consultada con la frase “Composición química del oro en los teléfonos móviles”, en el idioma ingles y con un rango de tiempo desde 2011 hasta el 2021.

Figura23.

Representación gráfica, "Composición química del oro en los teléfonos móviles"



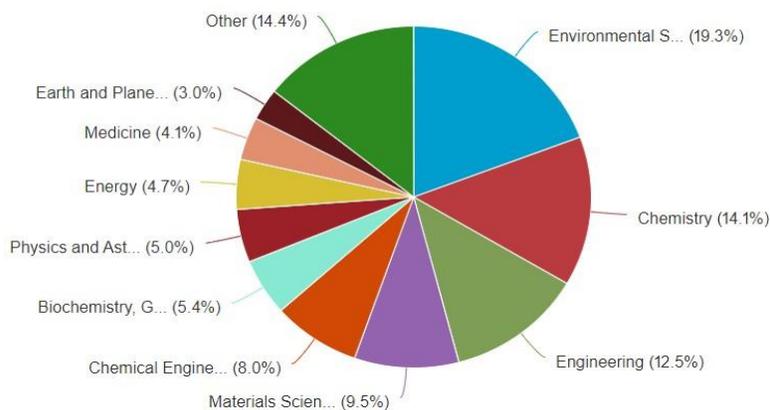
Nota. Gráfica extraída de la herramienta de Scopus al consultar “Chemical Composition of goldin mobile phones” Fuente <https://www.scopus.com/home.uri>

La siguiente figura representa las diferentes ciencias que han investigado sobre el tema de esta investigación:

Figura 24.

Representación gráfica de torta de las sub-áreas correspondientes al tema, "Composición química de oro en los teléfonos móviles"

Documents by subject area

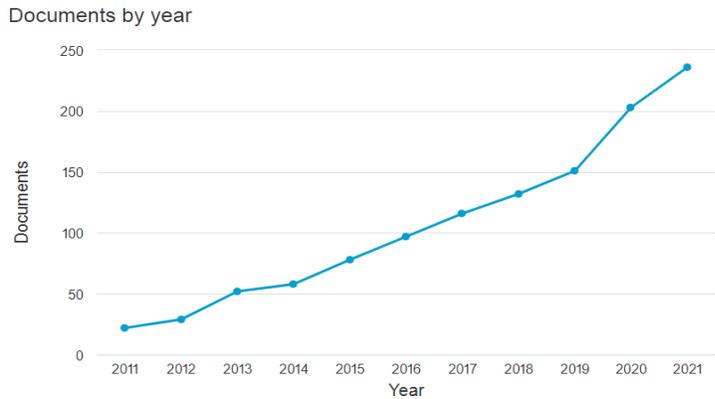


Nota. Representación gráfica en forma de torta proporcionada por la herramienta Scopus al consultar "composición química de oro en los teléfonos móviles" la gráfica representa el enfoque de las áreas del conocimiento que han publicado artículos sobre el tema consultado. Fuente <https://www.scopus.com/home.uri>

En la figura 24 se demuestra que los documentos de ingeniería aportan un 12,5% del proceso de la composición química del oro en teléfonos móviles, además produciendo los documentos respecto a los procesos de la recuperación de oro de los residuos RAEE

En la figura 25 se representa el número de documentos encontrados en la base de datos Scopus generada por su propio sistema, consultada con la frase "Recuperación del oro en los teléfonos inteligentes", en el idioma inglés y con un rango de tiempo desde 2011 hasta el 2021.

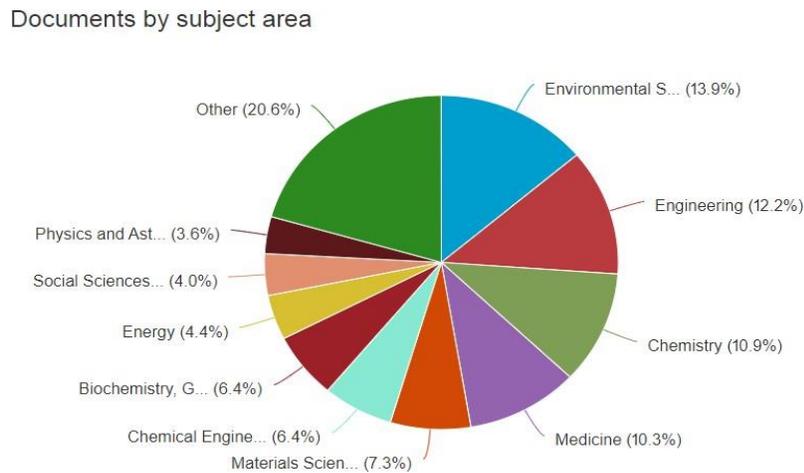
Figura 25.
 Representación gráfica, “Recuperación del oro de teléfonos celulares”



Nota. Gráfica extraída de la herramienta de scopus al consultar “Gold recovery from cell phones” Fuente <https://www.scopus.com/home.uri>

La siguiente figura representa las diferentes ciencias que han investigado sobre el tema de esta investigación:

Figura26.
 Representación gráfica en forma de torta de las sub áreas correspondientes al tema, “Gold recovery from cell phones”



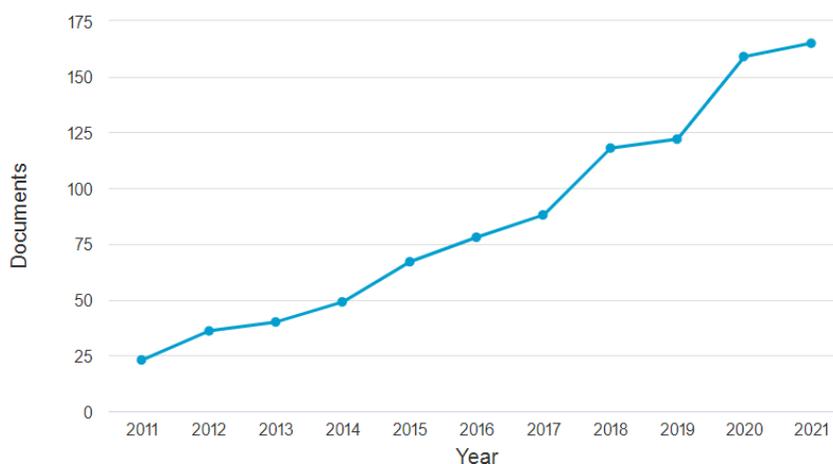
Nota. Representación gráfica en forma de torta proporcionada por la herramienta Scopus al consultar “Gold recovery from cell phones” la gráfica representa el enfoque de las áreas del conocimiento que han publicado artículos sobre el tema consultado. Fuente <https://www.scopus.com/home.uri>

En la Gráfica 11, se muestra el número de documentos encontrados en la base de datos Scopus generada por su propio sistema, consultada con la frase “Extracción química del oro de los desechos PCB”, en el idioma inglés y con un rango de tiempo desde 2011 hasta el 2021, donde se indica que la ingeniería aporta un 10.8% de los documentos sobre la extracción química del oro de los desechos PCB. Esto evidencia el importante papel de la ingeniería a lo largo del tiempo, debido al desarrollo de procesos industriales que han transformado los minerales en compuestos electrónicos, así como los procesos de devolverles a la vida útil los desechos RAEE.

Figura 27.

Representación gráfica, “Extracción química del oro de los desechos PCB”

Documents by year



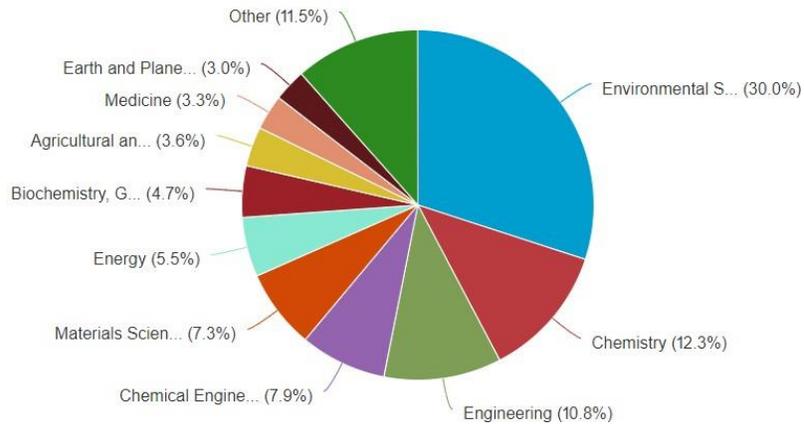
Nota. Gráfica extraída de la herramienta de scopus al consultar “Chemical extraction of gold from PCB waste” Fuente <https://www.scopus.com/home.uri>

La siguiente gráfica representa las diferentes ciencias que han investigado sobre el tema de esta investigación:

Figura28.

Representación gráfica en forma de torta de las sub áreas correspondientes al tema, “Extracción química del oro de los desechos PCB”

Documents by subject area



Nota. Representación gráfica en forma de torta proporcionada por la herramienta scopus al consultar “Chemical extracción of gold from PCB waste” la gráfica representa el enfoque de las áreas del conocimiento que han publicado artículos sobre el tema consultado. Fuente <https://www.scopus.com/home.uri>

De acuerdo con las figuras 26, 27 y 28, se puede visualizar el papel de la ingeniería en el tema general de la recuperación de metales de los RAEE, importante para generar procesos industriales rentables. Esto significa que se está trabajando en soluciones óptimas para la contaminación formada por grandes toneladas de estos desechos.

En la Tabla 2, se puede encontrar documentos de las consultas realizadas, artículos, publicaciones de revistas, tesis de grado y demás documentos bibliográficos con las frases clave para extraer la información necesaria.

Tabla 2.

Resumen de la cantidad de artículos en cada base de datos, con la frase de búsqueda.

Base de datos	Uso de frase	Cantidad	Intervalo de tiempo
Access Engineering	Chemical composition of gold in mobile phones	42	2011-2021
	Gold recovery from cell phones	42	
	Gold removal from cell phone circuit board	47	
Google académico	Chemical composition of gold in mobile phones	17.100	
	Gold recovery from cell phones	18.200	
	Gold removal from cell phone circuit board	17.600	
ScienceDirect	Chemical composition of gold in mobile phones	1.486	
	Gold recovery from cell phones	2.142	
	Gold removal from cell phone circuit board	359	

Nota La tabla muestra el resultado de obtenido al consultar cada frase en la respectivas bases de datos.

En la siguiente tabla se encuentra el resumen de los documentos encontrados usando palabras clave y operadores lógicos como entrada de búsqueda.

Tabla 3.

Resumen de la cantidad de documentos encontrados con palabras clave.

Base de datos	Uso de frase	Cantidad	Intervalo de tiempo
Access Engineering	Gold concentration and call phone and circuit board	17.000	2011-2021
	Gold recovery from cell phones	18.200	
	Extracción de oro de la placa de circuito de los teléfonos celulares	17.600	
Google académico	Gold concentration and call phone and circuit board	17.000	
	Gold recovery from cell phones	18.200	
	Extracción de oro de la placa de circuito de los teléfonos celulares	17.600	
ScienceDirect	Gold concentration and call phone and circuit board	3.729	
	Gold recovery from cell phones	439	
	Extracción de oro de la placa de circuito de los teléfonos celulares	1.681	

Nota. La tabla muestra el resultado de obtenido al consultar cada frase en la respectivas bases dedatos usando uno de los operadores lógicos facilitadores para la consulta de artículos. Fuente elaboración propia.

Tabla 4.*Resumen de los artículos consultados.*

Composición o concentración de oro en los tableros de circuito de los celulares				
Nombre del artículo	Página	Dato	Unidades	Porcentaje
Bacterial Cyanide Generation in the presence of metal ions and Gold bioleaching from waste PCBs	2	0,025	wt%	0,025
Bioleaching of Gold from Sulfidic Gold Ore	5	1030,00	ppm	0,103
Bioleaching of gold, copper and nickel from wastecellular phone PCBs and computer goldfinger motherboards by two <i>Aspergillus niger</i> strains	5	0,0038	% W/W	0,0038
Recuperacion de metales de las tarjetas de circuito de celulares descartados	31	0,1	%	0,1
Cesaro2018 Article Adevice specificPrioritization	4	1067	mg/kg	0,1067
Determination of Metal Content of Waste Mobile	11	1.4 ± 0.75	g/kg	0,14
Effective Metal Recovery in the Mobile Phone Waste by Chemical and Biological Treatments	3	20,9	mg/L	0,00209
Efficient separation of precious metals from computer waste printedcircuit boards by hydrocyclone and dilution-gravity methods	2	224,8	ppm	0,02248
Techniques to separate metal from waste printed circuit boards from discarded personal computers	3	205	ppm	0,0205
Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery	3	238	ppm	0,0238
Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery	2	130,25	ppm	0,013025
Copper recovery and gold enrichment from waste printed circuit boards by mediated electrochemicaloxidation	2	110	ppm	0,011
Recycling of waste electrical and electronic equipment	2	100	ppm	0,01

Nota. Tabla resultados de composición obtenidos de los documentos bibliográficos, esta tabla

contiene los datos normalizados de unidades. Fuente: Tabla construida a partir de los datos reportados por los autores en los 24 documentos seleccionados.

Continuación Tabla 4.

Composición o concentración de oro en los tableros de circuito de los celulares				
Nombre del artículo	Página	Dato	Unidades	Porcentaje
Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review	3	350	ppm	0,035
Gold Bioleaching from Printed Circuit Boards of Mobile Phones by Aspergillus niger in a Culture without Agitation and with Glucose as a Carbon Source	1	0,05	%	0,05
Metal Recovery from the Mobile Phone Waste by chemical	4	20,9	mg/L	0,00209
Metals Recovery from Printed Circuit Boards The Pursuit of Environmental and Economic Sustainability	2	21,2-3,270	mg/Kg	0,0012235
Recycling of Precious Metals from E-scrap	4	0,005	%	0,005
Study of multi-sep Hydrometallurgical methods to extract the valuable content of gold, silver and copper from waste printed circuit boards	1	150-300	ppm	0,023
The Future Of Electronic Waste Recycling in the United States	11	340	ppm	0,034
The importance of recovering precious metals from waste electrical and electronic equipment	4	20-1000	ppm	0,051
Procesamiento de las tarjetas de circuito impreso de computadoras descartadas, para la obtención de Oro mediante cianuración	23	0.00024	%	0.00024

Nota. Tabla resultados de composición obtenidos de los documentos bibliográficos, esta tabla contiene los datos normalizados de unidades. Fuente: Tabla construida a partir de los datos reportados por los autores en los 24 documentos seleccionados.

A continuación, se presenta el resumen del análisis estadístico realizado de acuerdo a la Tabla 4.

Tabla 5.

Resumen estadístico según tabla 4.

Promedio Au (%)	Desviación estándar (s)	% mín.	%máx.
0,033950979	0,03984435	0,08558206	0,153484

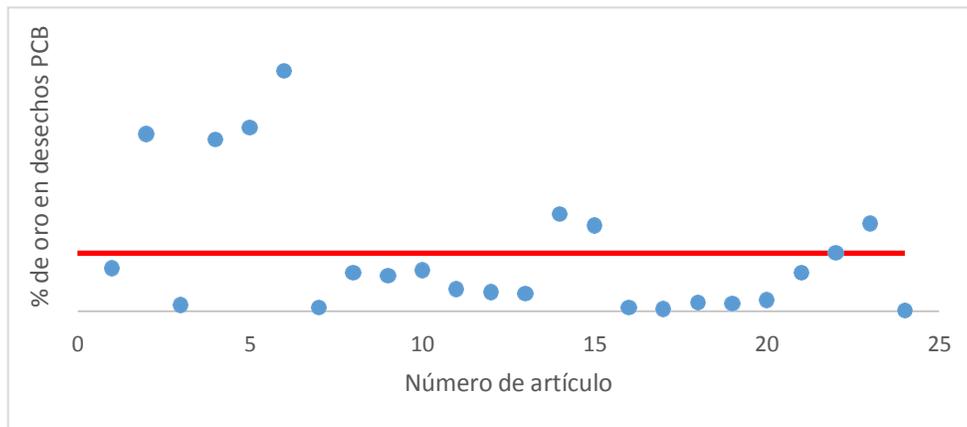
Nota. Resumen estadístico para el oro según la tabla 4.

En la Tabla 5, se evidencia el resumen estadístico donde se puede encontrar el intervalo de la composición de oro la cual es de [0,08558206 – 0,153484]., calculado a partir de los datos presentados en la Tabla 5, así como el promedio de los datos y su desviación estándar, esta última representa de manera cuantificada la dispersión de los datos encontrados. Los resultados presentados en la Tabla 5 son consistentes con los datos reportados por los autores en sus investigaciones ya que en general, la composición de metales preciosos presentes en RAEE es de menos del 0,1%

Figura

29.

Representación gráfica de la dispersión de la composición del oro



Nota. Representación gráfica de la composición del oro en los desecho RAEE.

En la figura 29 se puede observar la dispersión de los datos respecto a la composición del oro en los desechos de tableros de circuito impreso, esta gráfica se implementó numerando los datos en el mismo orden que se presenta la Tabla 4, los números correspondientes a los artículos se colocaron en el eje inferior, y el porcentaje se añadió en el eje vertical, de esta manera se obtuvo la gráfica y se observó que tan dispersos se encuentran los valores. Esta dispersión representa la no consistencia en los valores reportados por diferentes autores, que pueden ser explicadas por la marca, modelo y referencia de los desechos que fueron analizados por cada autor.

Con los documentos consultados se extrajeron los datos de los demás metales relevantes que se encuentran presentes en los tableros de circuito impreso implementados en los teléfonos móviles, se añadieron los datos y en una tabla en el software Excel y se procedió a realizar una normalización de las unidades, como se especificó en la metodología necesaria por la variabilidad de forma en que los autores reportaron la composición o concentración de las sustancias.

Tabla 6.

Resultados obtenidos de los documentos bibliográficos para el resto de metales.

Composición o concentración de los tableros de circuito							
Nombre del artículo	Cu	Fe	Al	Sn	Ni	Zn	Pb
Bacterial Cyanide Generation in the presence of metal ions and Gold bioleaching from waste PCBs	34,5	-	-	-	-	-	-
Bioleaching of Gold from Sulfidic Gold Ore	19,0 2	1,01	2,4	3,69	0,546	0,0456	0,17 6
Bioleaching of gold, copper and nickel from waste cellular phone PCBs and computer goldfinger motherboards by two Aspergillus nigerstrains	21,4	-	-	-	0,51	-	-
Recuperacion de metales de lastarjetas de circuito de celulares descartados	15	-	-	-	-	-	-
Cesaro2018 Article Adevice specificPrioritization	42,3 875	1,6325	0,0133	3,6925	1,0533	0,4825	1,21 63
Determination of Metal Content of Waste Mobile	34,6 1	2,115	1,78	2,04	1,755	1,625	0,87 5
Effective Metal Recovery in the Mobile Phone Waste by Chemical and Biological Treatments	2,36	2,22	-	-	0,412	0,28	-
Techniques to separate metal fromwaste printed circuit boards from discarded personal computers	14.6	4.79		5.62	1.65	-	2.96
Efficient separation of precious metals from computer waste printedcircuit boards by hydrocyclone and dilution-gravity methods	20.2	4.8		4.1	1.0	1.3	2.5

Tabla 6.
Continuación

Composición o concentración de los tableros de circuito							
Nombre del artículo	Cu	Fe	Al	Sn	Ni	Zn	Pb
Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery	30.6	15.21		7.36	1.58	1.86	6.7
Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery	19.2	1.13		0.69	0.17	0.84	0.39
Copper recovery and gold enrichment from waste printed circuit boards by mediated electrochemical oxidation	18	3		4	1.11	1.71	2.31
Recycling of waste electrical and electronic equipment	20.1 2	8.11		4	2	1	2
Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review	14.3	4.5		-	1.1	-	2.2
Gold Bioleaching from Printed Circuit Boards of Mobile Phones by <i>Aspergillus niger</i> in a Culture without Agitation and with Glucose as a Carbon Source	16	4	-	-	3	-	0,03
Metal Recovery from the Mobile Phone Waste by chemical	41	38	-	-	7	5	-
Recycling of Precious Metals from E-scrap	17	5	0,2	5		8	0,8
Hydrometallurgical processing of Waste printed circuits boards	40,8	0,29	-	1,6	0,39	0,41	1.36
Study of multi-sep Hydrometallurgical methods to extract the valuable content of gold, silver and copper from waste printed circuits boards	16	2			1	1	
Study of multi-sep Hydrometallurgical methods to extract the valuable content of gold, silver and copper from waste printed circuits boards (Max)	20	3			2	3	
The future of electronic waste recycling in the United States	13	-	-	-	-	-	-
The importance of recovering precious metals from waste electrical and electronic equipment (min)	69	1,4	2	1	0,28	0,16	1,35

The importance of recovering precious metals from waste electrical and electronic equipment (max)	22	20,5	14,2	4	2	2,2	6,3
---	----	------	------	---	---	-----	-----

Nota. La tabla representa los datos obtenidos de los diferentes autores de los artículos consultados.

De acuerdo a la Tabla 6, se realizó una tabla resumen la cual muestra presenta en porcentaje la concentración de diferentes metales presentes en los tableros de circuito de los RAEE, así como su desviación estándar y otros factores que se muestran a continuación:

Tabla 7.
Resumen composición de metales.

Tabla resumen de la composición de metales en tableros de circuito							
	Cu %	Fe %	Al %	Sn %	Ni %	Zn %	Pb %
Promedio (m)	22,37	6,46	3,72	3,79	1,64	1,98	2,16
Desviación estándar (s)	10,44	9,35	5,95	1,88	1,63	2,26	2,22
% min	8,94	21,60	14,12	1,84	3,25	4,79	4,51
% máx.	53,68	34,52	21,56	9,42	6,52	8,75	8,84

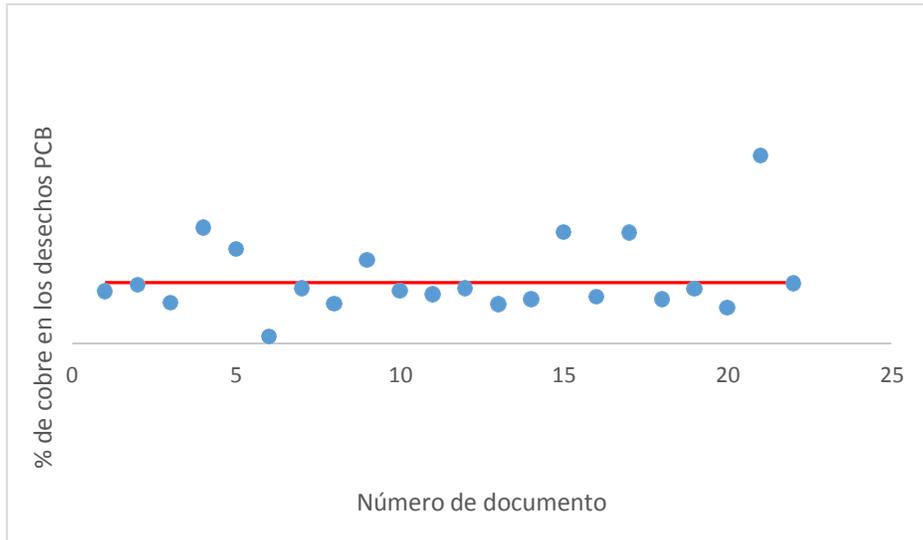
Nota. La tabla representa en porcentaje la concentración de diferentes metales presentes en los tableros de circuito.

En la Tabla 7, se evidencia el resumen estadístico de la composición de los demás metales encontrados en los tableros de circuito impreso, dando como resultado para el Cu [8,94 – 53,68].%, Fe [21,60 – 34,52].%, Al [14,12- 21,56].%, Sn [1,84 – 9,42].%, Ni [3,25 -6,52].%, Zn [4,79 – 8,75].%, Pb [4,51 – 8,84].% , calculado a partir de los datos presentados en la Tabla 8, así como el promedio de los datos y su desviación estándar, esta última representa de manera cuantificada la dispersión de los datos encontrados.

En las Gráficas 15, 16 y 17, se puede observar la dispersión de los datos respecto a la composición del Cobre, Hierro y Aluminio, respectivamente, en los desechos de tableros de circuito impreso. Estas gráficas se obtuvieron a partir de la numeración los datos en el mismo orden que presenta la Tabla 8, los números correspondientes a los artículos se colocaron en el eje inferior, y el porcentaje se añadió en el eje vertical, de esta manera se obtuvo la gráfica y se observó que tan dispersos se encuentran los valores.

Figura30.

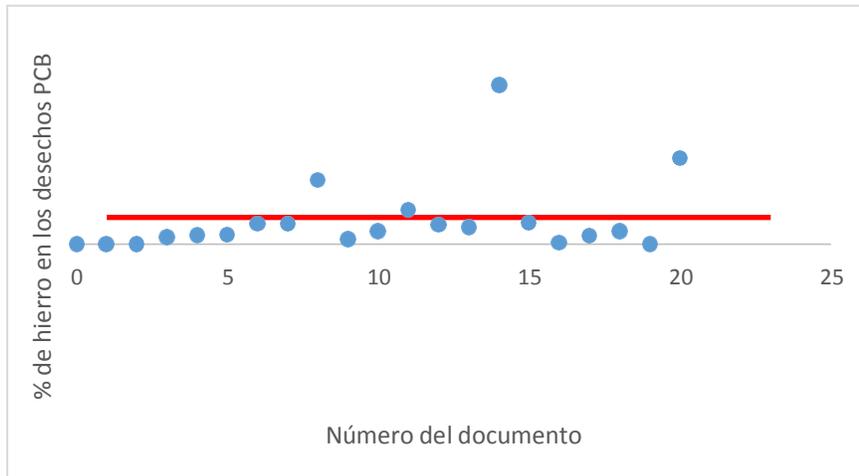
Representación gráfica de la dispersión de la composición del cobre



Nota. Representación gráfica de la composición del cobre en los desecho RAEE.

Figura31.

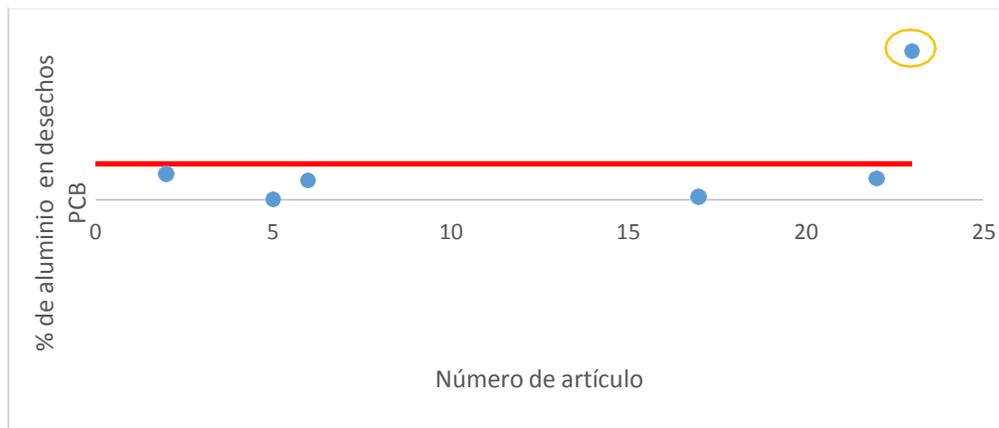
Representación gráfica de la dispersión de la composición del hierro.



Nota. Representación gráfica de la composición del hierro en los desecho RAEE.

Figura 32.

Representación gráfica de la dispersión de la composición del Aluminio



Nota. Representación gráfica de la composición del aluminio en los desecho RAEE.

3.1 Análisis Determinación de la Composición Química de las Tarjetas Madre

En la primera parte el desarrollo del proyecto de investigación, a través de la consulta de bases de datos, se obtuvo una perspectiva del estado general del tema en un intervalo de tiempo de 10 años como se expresa en la parte superior del presente capítulo.

Para las figura 17,18 y 19 se puede evidenciar el número de documentos por año encontrados en la base de datos ScienceDirect dependiendo de la frase consultada. El comportamiento de las curvas que se forman es de carácter polinómico, sin embargo, con la intención de cuantificar la tendencia creciente del aumento de documentos producidos, se realizó una linealización logarítmica de estos datos, presentada en las gráficas 3,5 y 7 con sus respectivas ecuaciones de la recta, las cuales permiten identificar una pendiente positiva indicando el comportamiento creciente sobre el tema central de esta investigación.

Adicionalmente fue mediante el uso de la herramienta Scopus que se evidencia el papel de la ingeniería en el desarrollo del recurso bibliográfico en las gráficas 9, 11 y 13. Además fue posible inferir que existían los suficientes documentos para el desarrollo de este proyecto de investigación.

Se hizo una lectura y selección de documentos con mayor información relevante para el desarrollo del proyecto, lo anterior a criterio propio. La lectura de los artículos consultados se realizó de manera manual, esto fue necesario debido a que, como lo representan las gráficas 9, 11 y 13 correspondientes a los diagramas de torta, existen múltiples áreas de conocimiento que publican

información bibliométrica, sobre los temas consultados y es común encontrar documentos que son poco concluyentes en las bases de datos, esto hace necesario una revisión manual de los mismos, sin embargo, fueron pre filtrados leyendo las introducciones de estos mismos.

Se extrajeron un número de 24 de artículos, tesis y documentos que fueron de relevancia para la actividad de investigación desarrollada. De estos documentos se hizo una lectura total, donde se logró extraer los datos de las concentraciones, en su mayoría del oro, en los tableros de circuito desechados de teléfonos móviles.

Posteriormente se realizó una tabla de resumen donde se almacenaron los datos que aportaba cada autor, sin embargo, existen diferencias en las unidades en que los autores reportan los datos y también en la magnitud de los mismos. Debido a esto, fue necesario realizar una normalización de datos, lo que significó dejar todos los datos en unidades consistentes. Los datos con concentración en unidades como ppm, g/kg entre otras, como se muestra en la tabla 5, 7 y 8 se utilizó una base de cálculo de 10.000 ppm, con el objetivo de dejar los datos en la unidad de porcentaje en peso. Lo anterior para determinar la composición química de los metales más relevantes, dando como resultado: Cu [8,94 – 53,68]. %, Fe [21,60 – 34,52]. %, Al [14,12- 21,56] %, Sn [1,84 – 9,42]. %, Ni [3,25 -6,52]. %, Zn [4,79 – 8,75]. %, Pb [4,51 – 8,84]. % y para el oro un intervalo de [0,08558206 – 0,13484]. %.

Finalmente se graficaron los datos de composición del oro, cobre, hierro y aluminio con el fin de analizar la dispersión de los datos respecto al promedio. Se observó que los datos contenían algunos valores atípicos los cuales se muestran en las gráficas con círculos amarillos y fueron rechazados para los cálculos posteriores de promedio y desviación estándar.

De acuerdo a la lectura de los artículos, los valores atípicos obtenidos por los autores se deben a la marca modelo año de fabricación y gama del teléfono, diferencia en tamaños, muestras y marcas de teléfonos y desechos PCB, lo que significa una mayor complejidad a la hora de desarrollar una aproximación de alta precisión para obtener la composición de estos desechos desde una forma teórica.

En la Figura 15, presentada a continuación se puede observar la concentración de diferentes metales y su variación según el modelo y marca de cada aparato telefónico.

Figura 33.

Concentración de metales en los tableros de circuito impreso de teléfonos móviles

Table 6. Mean concentrations of metals in the PCBs of mobile phone samples.

Element (g/kg Sample)	Asus Pegasus (SN #: 10)	GeneralMobile (SN #: 11)	NG 870 (SN #: 12)	Nokia C5 (SN #: 13)	Nokia 6110 (SN #: 5)	Nokia 3210 (SN #: 3)	Nokia 3310 (SN #: 1)	Nokia 6210 (SN #: 2)	Nokia 3410 (SN #: 6)	Siemens C5 (SN #: 4)	BB Smart ** (SN #: 7)	Mix 1 (SN #: 8)	Mix 2 (SN #: 9)
Basic Metals													
Cu	324.7	370.4	227.5	378.0	404.0	206.0	287.5	305.2	451.4	313.1	397.7	282.4	409.8
Fe	23.6	20.4	37.2	33.9	48.4	10.0	5.0	14.8	6.4	11.9	46.3	10.1	34.2
Al	8.9	13.2	10.4	11.5	12.9	10.7	11.8	14.9	16.6	16.3	20.1	15.9	19.7
Sn	62.7	34.3	51.8	28.3	26.2	29.6	35.5	29.7	25.3	13.0	33.0	27.1	13.7
Ni	32.3	13.6	23.8	21.0	37.7	11.0	15.8	31.9	59.3	27.0	17.0	15.0	20.1
Zn	28.1	8.2	21.2	2.3	17.8	3.5	7.2	30.2	67.0	5.1	26.9	13.6	18.9
Cr	0.19	0.11	3.9	0.33	0.51	0.13	0.29	0.46	0.17	0.44	0.44	0.14	15.0
Pb	1.6	1.0	7.3	2.6	16.7	16.3	17.9	14.6	23.3	10.0	27.3	15.6	1.9
Co	0.14	0.05	0.27	0.11	0.19	0.11	0.12	0.37	0.23	0.70	0.05	0.30	0.10
Precious Metals													
Ag	2.5	1.7	2.0	2.0	4.7	8.3	5.1	3.7	3.2	3.9	2.6	5.9	1.7
Au	2.4	0.65	2.9	1.4	1.3	1.8	1.6	1.5	0.82	1.1	0.53	1.6	0.17
Pd	0.01	<DL ***	0.04	0.26	0.22	0.36	0.40	0.82	0.12	0.47	<DL ***	0.39	0.14
Pt	0.032	0.022	0.026	0.028	0.050	0.033	0.019	0.007	0.012	0.015	0.026	0.036	0.026

* SN: Sample No (indicated in Table 2), **BB Smart: Blackberry Smart Phone, *** < DL: Below detection limit.

Nota. En esta tabla se muestra los valores de concentración de los metales en desechos decircuito impreso, para diferentes referencias de celulares de la marca Nokia. Tomada de: M. Sahan, M. Kucuker, B. Demirel y K. Kuchta, «Determination of Metal Contentof Waste Mobile Phones and Estimation of Their Recovery Potential in Turkey,» Enviromental Research and Public Health, 11 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/1660-4601/16/5/887>. [Último acceso: 13 Octubre 2021].

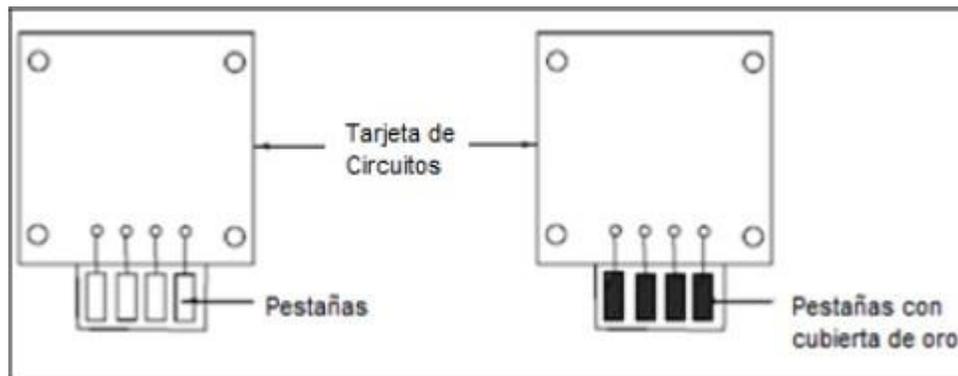
Además de la variabilidad que puede presentarse por las diferentes marcas, modelos y años de fabricación, también es necesario tener en cuenta la influencia de cada uno de los países donde los autores publicaron sus investigaciones, puesto que dependiendo el nivel económico promedio del país, se puede obtener más desechos de cierto tipo de marcas y modelos de teléfonos inteligentes con tableros de circuito impreso con más o menos cantidad de metales preciosos.

4. DISEÑO DE PROPUESTA DE PROCESO INDUSTRIAL PARA EL RECICLAJE DEL ORO EN LOS DESECHOS ELECTRÓNICOS DE TELÉFONOS MÓVILES

La complejidad de la extracción del oro de los desechos RAEE incide la baja cantidad de oro utilizada y las regiones en donde se encuentra dentro de las tarjetas de circuito impreso, puesto que en la general se utiliza el oro en los conectores, de los circuitos electrónicos donde el papel del oro resalta por sus propiedades electicas de alto interés para esta actividad porque facilita el flujo de electrones en las conexiones de los módulos de circuito impreso, esto a nivel del teléfono móvil es importante, debido a que a través de estas corrientes eléctricas viaja la información necesaria para que el dispositivo funcione correctamente es decir el oro se utiliza dentro de los tablero de circuito impreso como un acelerador de comunicación de información entre módulos de circuito impreso y módulos del dispositivo como lo son el, el procesador y la memoria RAM, como lo representa la figura citada por el autor Vicente [19] y desarrollada por Khandpur en el 2006.

Figura 34.

Ubicación del oro en los tableros de circuito impreso.

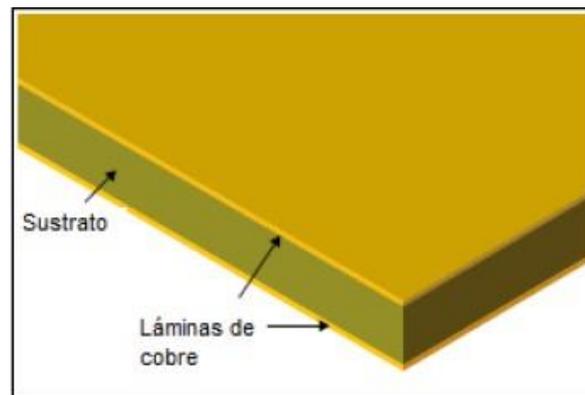


Nota. representación del oro dentro del blindaje de conexión de los módulos de tarjetas de circuito impreso. Tomado de: V. S. Espinoza Echeverría, «Recuperación de metales de las tarjetas de circuito de celulares descartados» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010 [En línea]. Disponible en: [CD-3188 \(epn.edu.ec\)](http://CD-3188(epn.edu.ec))

Como lo representa la figura anterior de muestra que el oro se encuentra presente en los pines de conexión de los módulos de tarjetas de circuito impreso, y como lo explica el autor Vicente [19]. Dentro de blindajes de soldadura, con el propósito de mantenerlos fijos en su posición generando el mínimo desgaste posible.

Las tarjetas de circuito impreso están formadas por láminas, donde se imprime el circuito, existen diferentes tipos de formación de láminas y diferentes configuraciones de estas láminas y sus sustratos como lo explica el autor Vicente Sebastián Espinoza [19]. Citando a autores como Mitzner y Khandpur que fueron los que esquematizando las estructuras de los diferentes tipos de tarjetas de circuito impreso en figuras y tablas, como se muestra en continuación.

Figura35.
Estructura de una tarjeta de circuito impreso



Nota. La figura representa la estructura de una tarjeta de circuito impreso. Tomada de: V. S. Espinoza Echeverría, «Recuperación de metales de las tarjetas de circuito de celulares descartados» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010 [En línea]. Disponible en: [CD-3188 \(epn.edu.ec\)](http://CD-3188(epn.edu.ec))

La figura 35 representa la estructura de una tarjeta de circuito impreso y como se distribuye por la superficie el sustrato y el cobre, y como es que las tecnologías imprimen circuitos en estas tarjetas, adicional a esto el autor referencia la tabla 12 también realizada por Khandpur, donde nos resume los diferentes tipos de sustratos y la composición general de estos.

Figura 36.

Los tipos de sustratos implementados en los tipos de tarjeta de circuito impreso.

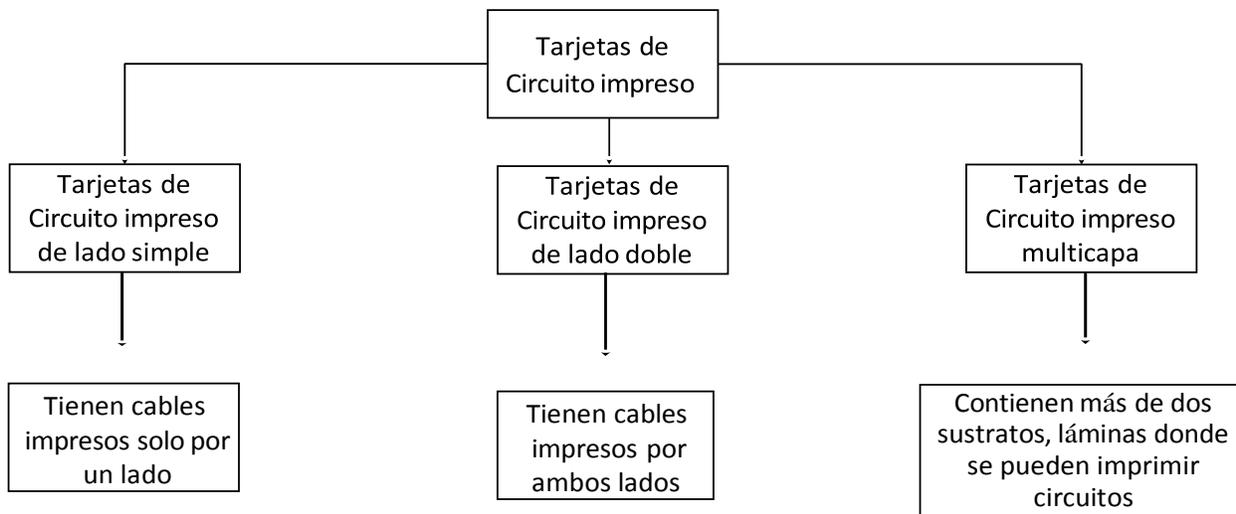
Tipo	Composición
XXXPC	Papel /fenol
FR – 3	Papel / epoxy
FR – 4	Fibra de vidrio / epoxy
G – 3	Fibra de vidrio / fenol
G – 9	Fibra de vidrio / melamina

Nota. Dependiendo del tipo de aplicación que se le va a dar a la tarjeta de circuito impreso cambia el tipo de sustrato. Tomada de: V. S. Espinoza Echeverría, «Recuperación de metales de las tarjetas de circuito de celulares descartados» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010 [En línea]. Disponible en: [CD-3188 \(epn.edu.ec\)](http://CD-3188(epn.edu.ec))

Aparte de la clasificación de tipo de sustrato que se implementa en la fabricación de la tarjeta de circuito impreso, también existe otro tipo de clasificación que corresponde a la cantidad de láminas que contiene la tarjeta y por donde son impresos los circuitos. A continuación, se presenta la figura 37 que muestra la clasificación de acuerdo con las láminas y el las caras por donde se imprime el circuito.

Figura 37.

Clasificación de las tarjetas de circuito impreso

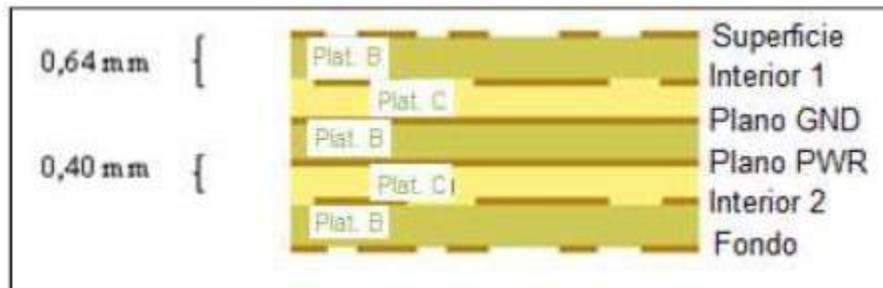


Nota. la figura 17 representa los tipos de tarjetas madre de acuerdo con la cantidad de láminas a las que se le pueden imprimir circuitos. Modificado de: V. S. Espinoza Echeverría, «Recuperación de metales de las tarjetas de circuito de celulares descartados.» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010.

La cantidad de oro varía dependiendo de la cantidad de conexiones de módulos de la tarjeta de circuito impreso y del tipo de tarjeta que se implemente, para el caso puntual de los teléfonos inteligentes el tipo de tarjetas de circuito impreso que más se utilizan son las de multicapa, que están representadas en la figura 16, donde el autor Espinoza [19]. Muestra como es la representación de una tarjeta multicapa implementada en los teléfonos inteligentes.

Figura 38.

Estructura de modelo de las tarjetas de circuito impreso para teléfonos móviles.



Nota. Esquema representativo de la estructura de la tarjeta de circuito impreso de un teléfono móvil, en multicapa. Tomada de: V. S. Espinoza Echeverría, «Recuperación de metales de las tarjetas de circuito de celulares descartados» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010 [En línea]. Disponible en: [CD-3188 \(epn.edu.ec\)](http://CD-3188(epn.edu.ec))

A lo largo de la historia, el papel de la ingeniería química ha sido el de tomar materias que se encuentran en el planeta y convertirlas en productos de valor agregado a través del uso y estudio de las reacciones químicas así como las operaciones de separación. Por décadas se pensó que las materias primas del planeta eran infinitas, pero en el siglo XXI se encuentra un contexto totalmente diferente ya que la tecnología ha permitido visualizar los resultados de un agotamiento de múltiples materias, pero con mayor enfoque en los metales extraídos de minerales. [5].

Lo anterior trae como consecuencia un cambio en la perspectiva ingenieril, ya que el objetivo actual es dar valor agregado a desechos de cualquier tipo, sin embargo, existen diferentes formas de dar valor agregado a los residuos. Un ejemplo es recuperar una sustancia de múltiples aplicaciones, purificarla y darle valor en otro mercado. Algunas de las materias de mayor interés para su recuperación son los metales, por su baja concentración en la corteza terrestre, los metales tienen aplicaciones en una infinidad de industrias por eso su precio comercial y el valor que puede ofrecer es alto. [10].

Los desechos RAEE han crecido con los avances tecnológicos y de esta manera su acumulación, los RAEE tienen una múltiple cantidad de metales, por tanto, los hace una materia

importante de recuperación pero de una manera industrial y a nivel de un proceso químico con algo innovador. Debido a que no se debe permitir la continuación del reciclado artesanal de estos RAEE y tampoco se deben dejar como desechos inútiles, que también es algo común para las personas pues no es desconocimiento popular el debido proceso de deshacerse de estos elementos después de que su vida útil ha pasado, sin embargo, la ingeniera química ha provisionado de soluciones el mercado desde hace décadas, pero en su mayoría son técnicas poco sostenibles por la cantidad de sustancias inorgánicas que se utilizan en los procesos hidrometalúrgicos y los combinados, principalmente el origen de las materias necesarias para estos procesos son de fuentes no renovables, y el contexto actual de la tercera de cada que inicio es el de cumplir con todos los ODS. [10].

Debido a este nuevo argumento, se debe tener en cuenta el contexto desde una perspectiva integral, esto hace referencia a tener en cuenta que debe hacerse una transición de las tecnologías inorgánicas a las biotecnologías, sin embargo, para que las industrias realicen una transición la propuesta debía contar con las características de conectar las tecnologías usadas hasta los días actuales con las biotecnologías, con el fin de no generar las pérdidas para las industrias en las tecnologías que se desarrollaron hace años pero que ya están totalmente estudiadas y estandarizadas además en operación. [14].

En vista de lo anteriormente mencionado se tomó la decisión de buscar dentro de las técnicas basadas en el uso de microorganismos, una que cumpliera con el uso de cianuro que es el agente extractor por defecto en las técnicas inorgánicas, de esta manera se puede integrar un proceso explotado comúnmente con una solución biotecnológica funciona como conector en pro de contar con múltiples beneficios. [17].

4.1 Diseño de proceso

Para el desarrollo de la secuencia lógica de operaciones, se implementó el método de descomposición de jerarquías de Douglas, basado en el documento [21]. donde todo inicia en la definición del problema principal.

El problema principal, radica en la extracción de oro de manera responsable y en una concentración de por lo menos 14 quilates, de una mezcla de metales incrustados dentro de las tarjetas de circuito impreso, que se encuentran en aleaciones con níquel en blindajes principalmente en los conectores de los módulos de estas tarjetas, donde para llevar a cabo este procedimiento se suele utilizar cianuro de producción sintética, que representa un alto impacto

ambiental si no se realiza un tratamiento de tratado, sin embargo la cianuración es la técnica más estudiada e implementada por su alta eficiencia a la hora de disolver el oro en complejos iónicos, adicionalmente el cianuro también genera estos complejos con metales no ferrosos como el cobre, lo que minimiza la cantidad de cianuro disponible para la extracción de oro [21].

- Primer nivel: corresponde al conocer si el proceso es continuo o discontinuo, para el caso de esta propuesta donde se pone como meta de producción obtener 1 kg de oro al mes, lo que implicaría procesar un promedio de 4,5 toneladas de residuos de tarjetas de circuito impreso. El proceso no es rentable al mantener las unidades operando todo el tiempo, es decir, que permite deducir que el proceso es Batch. Además al tratarse de una biolixiviación, se hace necesario el uso de pausa en el proceso para llevar a cabo los procesos de separación y limpieza.
- Segundo y tercer nivel el análisis de las corrientes de entrada y salida así como los recirculados dentro del proceso: se encuentran como fuentes de alimentación, tarjetas de circuito impreso, la corriente de alimentación de solución acuosa de NaCN, y las salidas de proceso son de metales ferrosos, metales no ferrosos, una corriente con oro, una corriente con trazas e iones metálicos de trazas como subproductos en mezcla con cianuro y sodio, cuenta con dos corrientes de recirculado que depende de la molienda y del sistema de separación propuesto más adelante
- Nivel cuatro hace referencia a las secuencias de separación: existen varias secuencias, el primero es el sistema de separación magnética y electrostática, seleccionados para minimizar las mezclas de iones entre otros metales como el cobre, que al reaccionar con el cianuro, disminuye la cantidad de solvente disponible para el oro y afecta el rendimiento de extracción de oro de los desechos RAEE, el sistema de separación después del equipo de lixiviación, corresponde a una torre empacada de carbón activado en el cual se absorbe el ion de cianuro y deja el oro en fase sólida
- Sub nivel 4A, recuperación de vapor, dentro del proceso no se implementa el uso de vapor
- Sub nivel 5B, sistema de recuperación de líquidos se implementa: para la recuperación del cianuro de las corrientes de iones metálicos provenientes de la operación de lixiviación, y de la torre empacada de carbón activado

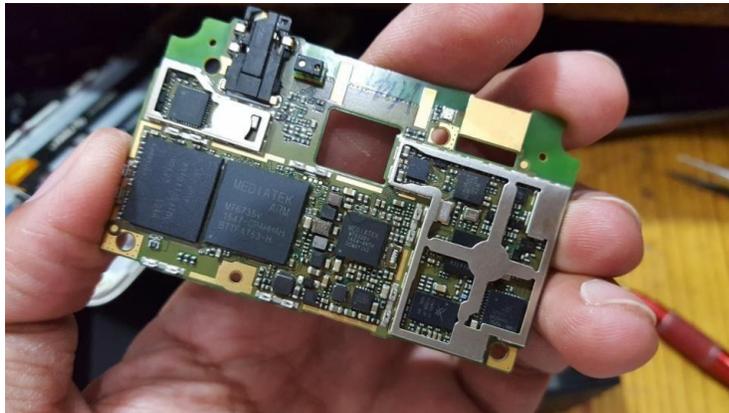
La secuencia de operaciones propuesta para esta investigación se muestra en el siguiente diagrama de bloques.

4.2 Desarmado de teléfonos

Es de común conocimiento el estado y forma de un teléfono móvil por la mayoría de personas porque el esfuerzo de la industria tecnología ha popularizado totalmente el uso de estos dispositivos, al punto de ser considerados como una necesidad [10].

Los materiales complejos de estos elementos son en su mayoría plásticos o de cristal dependiendo del tipo de dispositivo móvil, sin embargo, para el inicio del proceso de separación es necesario el uso de mano de obra para descomponer los dispositivos hasta obtener las tarjetas de circuito impreso [22]. El tiempo de desensamblaje es variado por las múltiples distribuciones de los teléfonos móviles a través del tiempo. Las figuras 39 y 40 permiten reconocer las principales diferencias cualitativas de los tableros de circuito de teléfonos modernos y teléfonos antiguos.

Figura 40.
Tarjeta madre de un teléfono inteligente moderno.



Nota. La imagen muestra la tarjeta madre de un teléfono inteligente moderno. Obtenido de: «Pxhere,» [En línea]. Available: https://pxhere.com/es/photo/1183813?__cf_chl_f_tk=_3y.9xI3Htu.y5KxBdvPI4ELPZ93d74D4ZPrG0jMF64-1642337927-0-gaNycGzNBxE. [Último acceso: 20 01 2022].

Figura 41.
Tarjeta madre de un teléfono móvil Nokia X2



Nota. Esta imagen muestra la tarjeta madre de los teléfonos móviles antiguos, precisamente de un modelo Nokia X2-02, anunciado por Nokia en el 2011. Obtenido de: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a0/Nokia_X2-02 - printed circuit board-1141.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a0/Nokia_X2-02_-_printed_circuit_board-1141.jpg)

Esto representa que son múltiples las formas de desarmar los dispositivos móviles, esto con el principal objetivo de separar los compuestos plásticos, la batería, dispositivos de pantalla, cristales, para poder cumplir con el objetivo de llegar a la obtención de las tarjetas o las tarjetas de circuito impreso, puesto que es común en los teléfonos más recientes la implantación de PCB múltiples en formas modulares, como lo representa la Figura 41.

Figura42.

Piezas que conforman un teléfono Samsung Galaxy S7



Nota. En la imagen se muestra como los teléfonos inteligentes más modernos, implementan más de un módulo de circuito impreso, obtenido de: <https://guide-images.cdn.ifixit.com/igi/eVwVQojWEP5whU62.huge>

En la figura 41, el primer objeto a la derecha corresponde a materiales plásticos, se muestra la batería y demás piezas diferentes a los tableros de circuito impreso. Esto demuestra la dificultad a la hora de descomponer en partes los teléfonos inteligentes la cual es más compleja y puede tener una alta variación.

También es posible que se consigan desechos de circuitos impresos de celulares de centros de recolección de estos materiales donde posiblemente se encuentren los PCB libres, o mezclados. Por todo eso, el papel de la mano de obra humana en la primera etapa de este proceso debe ser implementado. [19].

4.2.1 Molienda

La trituración es operación unitaria que se refiere a la reducción del tamaño de partícula de materiales grandes, altamente implementada en la operación con sólidos ya que al reducir el tamaño de partícula es más fácil separar el producto de interés. Dentro del balance de una operación de trituración se considera que toda la cantidad de materia que entra es igual a la que sale como producto, las pérdidas no se reflejan en las corrientes de alimentación, sino en la energía utilizada, puesto que mediante la desintegración mecánica no toda la energía del triturador es transmitida al material que se está triturando, esto significa que la eficiencia de la operación es baja, pero es la más rápida para el proceso de reducción de tamaño de partícula, como lo representa la ecuación Kick. [23].

Ecuación 3. Ecuación de kick

$$\frac{P}{\dot{m}} = K_k \ln \left(\frac{D_{SA}}{D_{SP}} \right)$$

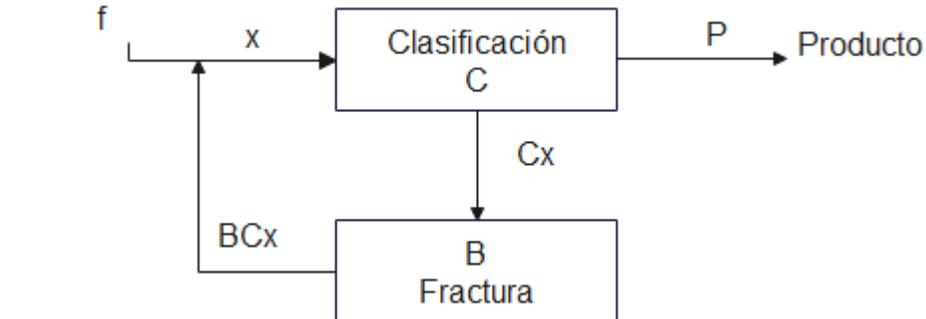
$P = \text{potencia en Kw}$ $\dot{m} = \text{Flujo en } \frac{\text{Ton}}{\text{h}}$ $K_k = \text{constante de Kick en } \frac{\text{Kw} * \text{h}}{\text{ton}}$

$D_s = \text{diametros de alimento y producto en mm}$

Ecuación de Kick, es una ecuación empírica esto significa que los parámetros deben colocarse justo en la unidades que se muestran, la cual permite calcular la energía de un proceso de trituración en términos de kw, usando como variables de ingreso, el flujo de la corriente (\dot{m}) y los diámetros medios de superficie de alimentación y de producto, D_{SA} y D_{SP} respectivamente, y el uso de la constante de Kick (K_n) [23].

Para el cálculo de la potencia requerida por el molino de bolas es necesario usar un tamaño base, de acuerdo con, el autor el Vicente [19]. en la página 48 describe uso un tamaño de 12cm de alto, 4,2 cm de ancho y 1,2 cm de espesor. Por esta razón, es necesario implementar un primer equipo que reduzca el tamaño de matrícula mediante una trituración de doble eje, que puede reducir el tamaño a un diámetro de 10mm y posteriormente el molino de que sea capaz de reducir el diámetro de 10mm a 1mm mediante un molino de bolas, para calcular esto es necesario la potencia de cada una de las operaciones y después sumarlas, o se puede usar el valor de potencia que provee el fabricante.

Figura 43.
Diagrama de balance triturador



Nota. La figura representa las entradas y salidas del triturador.

De acuerdo a la Figura 43, se pueden obtener las ecuaciones de balance presentadas a continuación:

Ecuación 4. Balance general

$$F = P$$

Ecuación 5. Ecuación de balance para oro sustancia de interés

$$F * x_{Au} = P * x_{Au}$$

Según los artículos, tesis consultadas y demás infografía las regiones donde se encuentra el oro en los AEE son específicas dentro de piezas y partes de las tarjetas de circuito, esto representa un problema para llevar la separación acabo sin antes pasar por un proceso de reducción del tamaño de partícula, lo que generalmente en ingeniería química se conoce como trituración, los tableros que se extrajeron y seleccionaron del proceso anterior deben someterse a una molienda o el objetivo de llevar las piezas a un tamaño de entre 0,3mm y 1mm [14].

Figura 44.
Molino de RAEE.



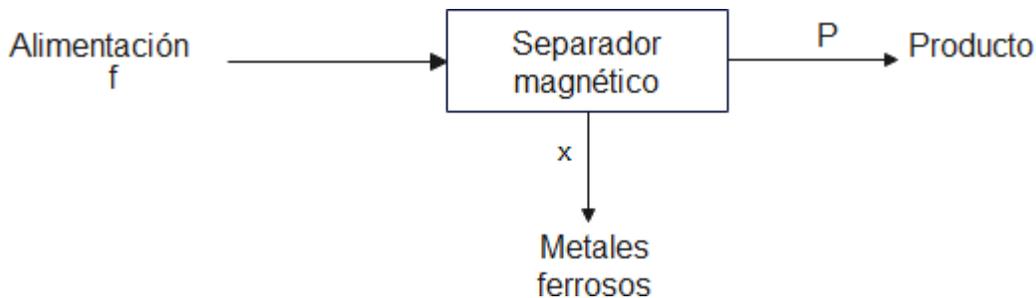
Nota. En la imagen se muestra el equipo utilizado en la trituración de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Fuente: Coparm, «Coparm,» Coparm Srl - all rights reserved, [En línea]. Available: http://coparm.es/trituradora_de_raee.htm. [Último acceso: 01 2022].

4.2.2 Separación magnética

La separación magnética es un proceso que aprovecha la propiedad que tienen la mayoría de metales al ser atraídos o repelidos por las fuerzas causadas por las interacciones entre las cargas de los materiales y las cargas del campo magnético, es utilizada para separar metales ferrosos y de interacción magnética, de metales con propiedades específicas, como el cobre, la plata y el oro entre otros, que no se encuentran afectados por las fuerzas electromagnéticas, debido a la secuencia de operación y a la sustancia de interés, en este caso el oro la implementación de esta técnica de separación tiene una gran relevancia para el proceso de esta investigación. [22].

Figura 45.

Diagrama separador magnético.



Nota. La figura representa entradas y salidas del separador magnético.

De acuerdo a la Figura 44, se pueden obtener las ecuaciones de balance presentadas a continuación:

Ecuación 6. Balance general separador magnético

$$F = P + X$$

Ecuación 7. Balance para oro en el separador magnético.

$$F * x_{Au} = P * x_{Au} + X * x_{Au}$$

En la ecuación de balance de esta operación la corriente de ingreso, es igual a dos corrientes de salida, una corriente enriquecida en metales ferrosos, y la corriente enriquecida en la sustancia de interés.

Figura 46.
Separación Magnética

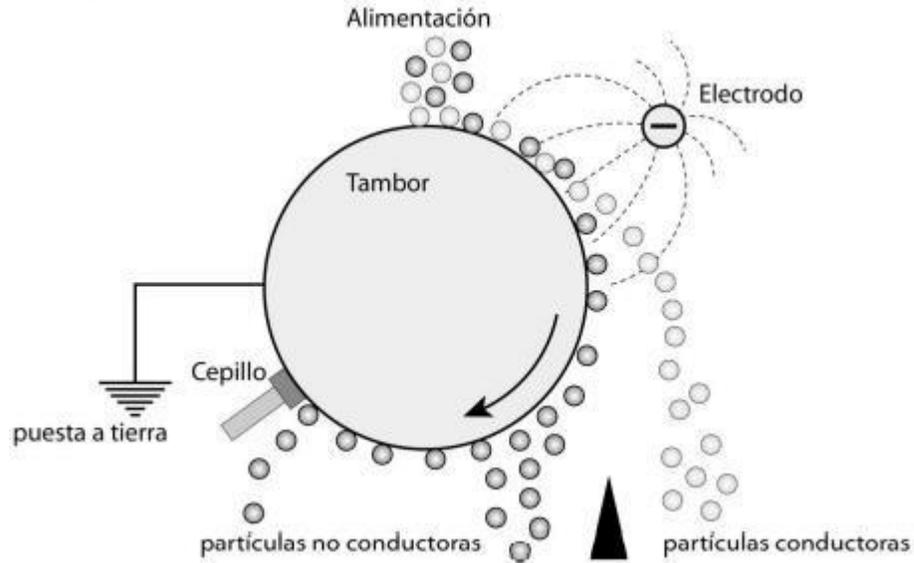


Nota. La imagen representa un separador magnético utilizado en la industria.
Fuente: «Separación magnética,» Steinert, [En línea]. Available:
<https://steinertglobal.com/es/separadores-imanes-sensores/separacion-magnetica/>. [Último acceso: 20 01 2022].

4.2.3 Separación electrostática

Esta técnica de separación se enfoca en la separación de metales y sustancias que no se vean afectadas por la interacciones electromagnéticas, pero que mediante el aprovechamiento de las propiedades eléctricas puede separar mezclas de compuestos metálicos preciosos. Debido a la corriente de salida de la separación magnética, la corriente enriquecida en la sustancia de interés, también se encontraba en una mezcla sólida entre cobre en su mayoría, plata y oro, entre otras algunas trazas de metales, con el fin de poder separar estas mezclas se implementan unidades basadas en la tecnología electrostática. [22].

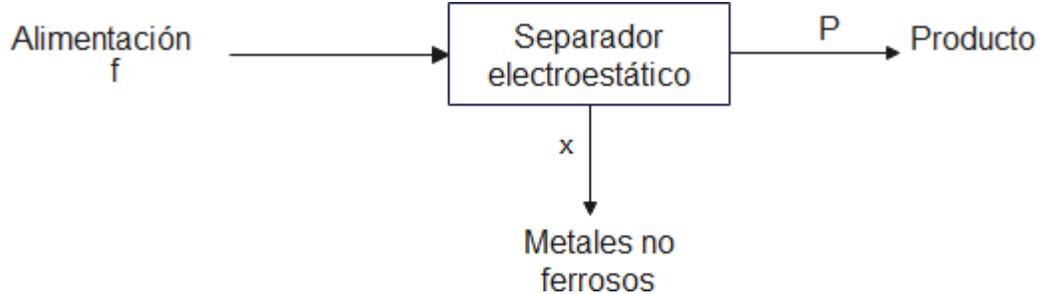
Figura 47.
Principio de operación de un separador electrostático.



Nota. La figura muestra el principio de una separación electrostática. Tomada de: Separación magnética y electrostática. [En línea]. Disponible en: [El método magnético y el método electrostático2.pdf \(upct.es\)](#)

En la ecuación de balance de esta operación la corriente de ingreso, es igual a dos corrientes de salida, una corriente carente de sustancia de interés, y la corriente enriquecida en la sustancia de interés.

Figura 48.
Diagrama separación electrostática.



Nota. La figura representa entradas y salidas del separador electrostático.

De acuerdo a la Figura 48, se pueden obtener las ecuaciones de balance presentadas a continuación:

$$F = P + X \text{ (Ec.) balance general}$$

$$F * x_{Au} = P * x_{Au} + X * x_{Au} \text{ (Ec.) ecuación de balance para oro sustancia de interes}$$

4.2.4 Análisis de selección

La técnica y el microorganismo seleccionado fue el que utiliza la bacteria *Chromobacterium violaceum*, usando como criterio que es la técnica que continua con el uso de cianuro como agente extractor, pues la técnica de la cianuración es la técnica que se ha usado históricamente lo que la hace una operación estandarizada y estable para su operación por el desarrollo intelectual de esta misma, además de esta forma es posible integrar la biotecnología con las técnicas de extracción de oro clásicas, cumpliendo con el criterio de ser una técnica que acerca la biotecnología a un proceso netamente inorgánico.

Figura 49.

Microorganismos estudiados para la extracción de oro.

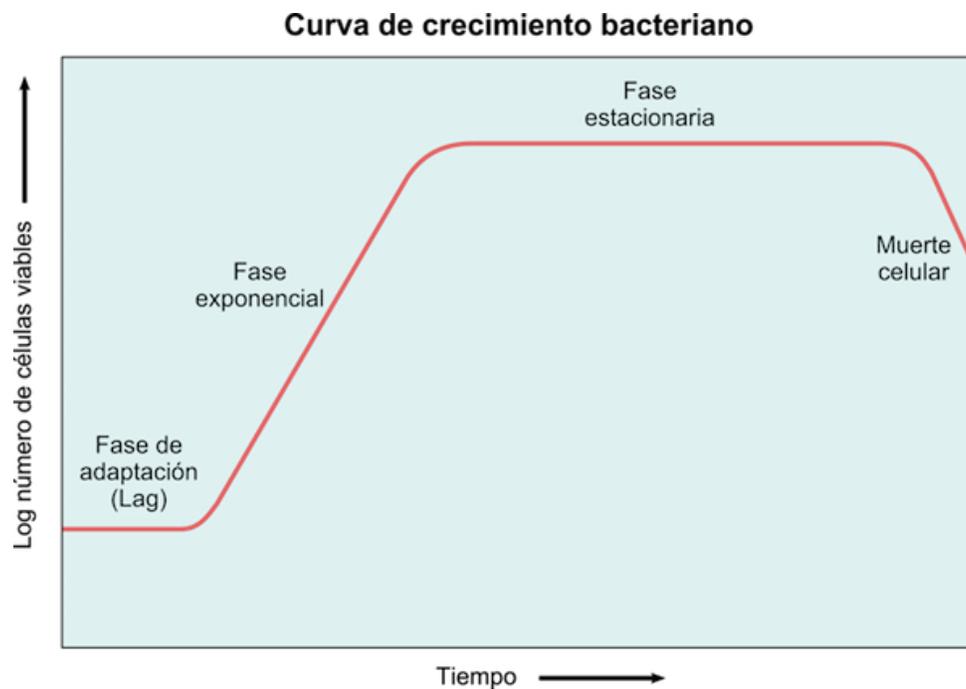
Documento	Mircoorganismo
Generación de cianuro bacteriano en presencia de iones metálicos y biolixiviación del oro a partir de residuos de PCB	<i>Chormobacterium violaceum</i>
Biolixiviación de oro a partir de mineral de oro sulfidico concentrados y residuos electrónicos por <i>Roseovarius tolerans</i> y <i>Roseovarius mucoso</i>	Bacterias oxidantes de yoduro
Biolixiviación de oro, cobre y níquel a partir de residuos de PCB de teléfonos móviles y placas base de computadora por dos cepas de <i>Aspergillus niger</i>	<i>Aspergillus niger</i>
Biolixiviación de oro a partir de circuitos impresos de teléfonos móviles por <i>Aspergillus niger</i> en una técnica sin agitación y con glucosa como fuente de carbono	<i>Aspergillus niger</i>

Nota. Documentos, consultados con opciones de biolixiviación de oro en desechos PCB.

4.2.5 Biolixiviación

Es una operación unitaria de extracción sólido - líquido, la cual consiste en dejar un soluto en mezcla con una sustancia de interés por un tiempo determinado y de carácter Bio. En esta propuesta se implementaran microorganismos que sean capaces de producir el MSA, en este tipo de biolixiviación el tiempo de retención dentro del tanque de lixiviación es mayor a causa de los microorganismos que les toma más tiempo cumplir las fases de su crecimiento: adaptación, exponencial, estacionaria y finalmente muerte como se muestra en la Figura 49. [17].

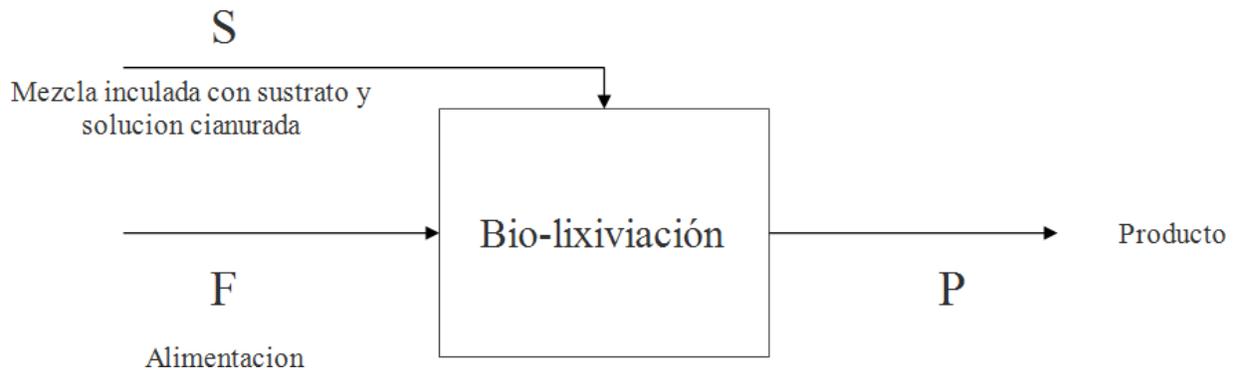
Figura 50.
Crecimiento bacteriano.



Nota. Curva de crecimiento bacteriano: curva, fases. Tomada de: Lifeder, Parada. R. [En línea]. Disponible en: [Crecimiento bacteriano: curva, fases, factores \(lifereder.com\)](http://lifereder.com)

En la fase exponencial los microorganismos se reproducen mientras hacen la formación del agente de extracción, además, en este tiempo es necesario dejar la mezcla en un tanque agitado para favorecer el contacto íntimo entre las fases del solvente y la fase sólida que contiene la sustancia de interés, en el caso de este proyecto se trata del oro. [24]

Figura 51.
Diagrama de balance Biolixiviación.



Nota. La figura representa entradas y salidas del reactor de biolixiviación.

El balance de materia para esta operación unitaria cuenta con dos entrada y dos corrientes de salida, una corriente enriquecida en solvente conocido como extracto y la de refinado, rica en portador, es decir, sustancia de interés.

Ecuación 8. Balance general Bio-lixiviación

$$P = S + F$$

Ecuación 9. Balance para oro en la Bio-lixiviación

$$P * X_{Au} = S * X_{Au} + F * X_{Au}$$

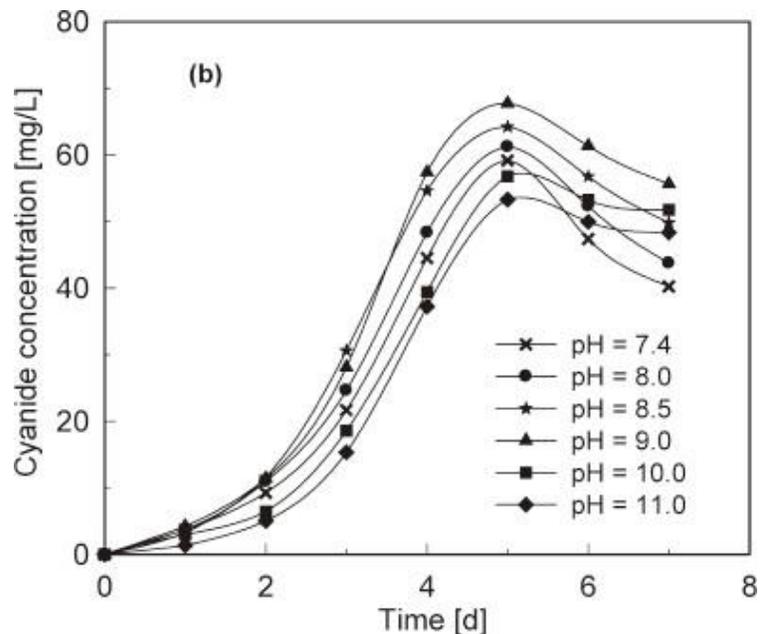
4.2.6 Mecanismo de separación

El papel de los microorganismos dentro de la biolixiviación es el papel de producir biológicamente el cianuro, a partir de sustrato de alimentación que de acuerdo con lo propuesto por los autores de [17], un medio denominado YP en presencia de solución acuosa de poli peptona en una concentración de 10g/L, y glicina 5g/L, a partir de esto y pasado 2 días comienza el proceso de formación del cianuro como lo representa las siguientes gráficas, de crecimiento y así determinando las condiciones óptimas de operación.

Figura

52.

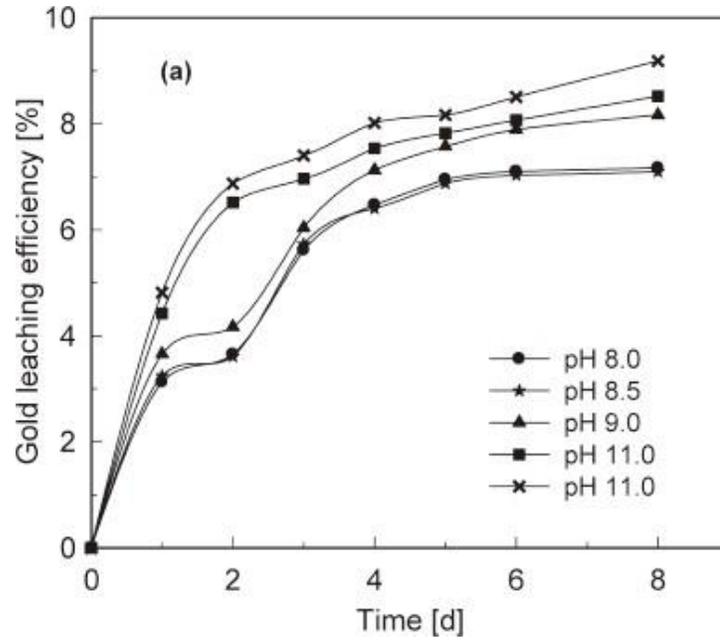
Producción bacteriana de cianuro en función del tiempo y haciendo variar el pH.



Nota. Grafica de crecimiento bacteriano, que representa la producción de cianuro por parte de la bacteria *Chormobacterium violaceum*, Tomada de: C. D. Tran, J.-C. Lee, B. D. Pandey, J. Jeong, K. Yoo y T. H. Huynh, «Bacterial Cyanide Generation in the Presence of Metal Ions (Na⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Pb²⁺) and Gold Bioleaching from Waste PCBs,» *Journal of chemical engineering of Japan*, vol. 44, pp. 692-700, 2011. [En línea] Disponible en: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcej/44/10/44_10we232/article

Figura 53.

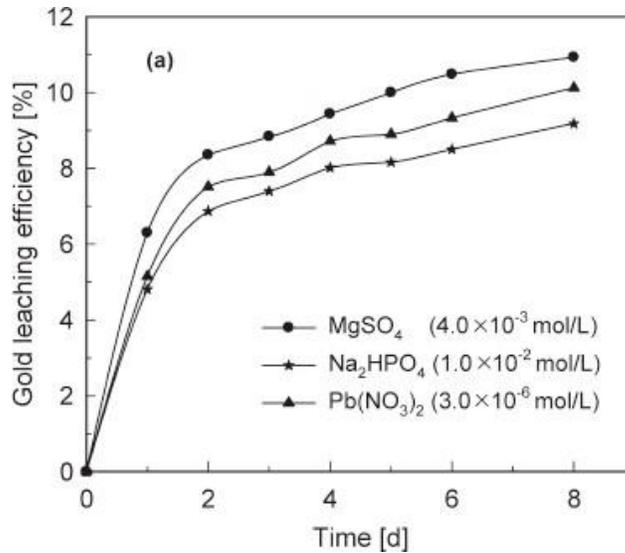
Eficiencia en términos de porcentaje de extracción de oro en el tiempo



Nota. Representación porcentual de la eficiencia de recuperación de oro presente en labiolixiviación. Tomada de: C. D. Tran, J.-C. Lee, B. D. Pandey, J. Jeong , K. Yoo y T. H. Huynh, «Bacterial Cyanide Generation in the Presence of Metal Ions (Na⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Pb²⁺) and Gold Bioleaching from Waste PCBs,» *Journal of chemical engineering of Japan*, vol. 44, pp. 692-700, 2011. [En línea] Disponible en: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcej/44/10/44_10we232/article

Figura54.

Eficiencia en términos de porcentaje de extracción de oro en el tiempo analizando los diferentes tipos de medios ácidos



Nota. Representación porcentual de la eficiencia de recuperación de oro presente en labiolixiviación en variación de medio ácido Tomada de: C. D. Tran, J.-C. Lee, B. D. Pandey, J. Jeong , K. Yoo y T. H. Huynh, «Bacterial Cyanide Generation in the Presence of Metal Ions (Na⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Pb²⁺) and Gold Bioleaching from Waste PCBs,» *Journal of chemical engineering of Japan*, vol. 44, pp. 692-700, 2011. [En línea] Disponible en: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcej/44/10/44_10we232/article

A partir de la lectura de interpretación de las gráficas obtenidas de manera experimental por los autores en [17]. se extraen las condiciones de operación necesarias para operación, de las cuales se necesitan controlar a lo largo del tiempo de operación. Un factor de mayor incidencia dentro de la operación es el tiempo de retención, para lograr la máxima extracción de oro es de 8 días lo que significa solo poder tener 4 operaciones en el mes, lo que significa un costo de operación muy alto de esta forma, por esta razón, para un proyecto de emprendimiento es más recomendable la implementación de lixiviación con cianuro de origen biotecnológico. De esta manera, se puede minimizar el tiempo de retención y disminuye en la unidad de lixiviación de 8 días a 24 horas, como lo explican los autores [25]. donde obtienen los resultados de recuperación presentados en

la tabla 8, para la cianuración de oro con cianuro sódico.

Tabla 8.

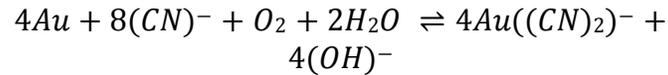
Porcentaje de recuperación de Oro y plata en función de la concentración de cianuro sódico

Concentración de NaCN [g/L]	Recuperación [%]	
	Au	Ag
0,5	30,20	26,77
1,0	54,73	42,52
1,5	69,91	57,97
2,0	82,92	68,73
3,0	88,44	78,42
4,0	95,11	81,90
8,0	96,02	83,52

Nota. Resultados obtenidos por los autores analizando el comportamiento de la recuperación de oro en solución cianurada a diferentes concentraciones. Tomada de: A. G. y. S. E. Ernesto de la Torre, «bibdigital,» 2009. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5535/1/Ernesto-de-la-Torre.pdf>. [Último acceso: 10 Febrero 2022].

Como lo Representa la Tabla 8 la relación entre el porcentaje de recuperación es directamente proporcional a la concentración de cianuro sódico, sin embargo, cuando el valor de la concentración se aproxima a 4,0 g/L se deduce que lograr un porcentaje de recuperación mayor a 95%, la concentración de la solución cianurada empieza a tender a infinito. Lo anterior, se ve en el paso de concentración de 4,0 g/L a 8 g/L, donde el porcentaje solo aumenta un 1%, por esta razón los autores concluyen que no es justificable este exceso de cianuro, esto también se justifica porque de acuerdo con el autor Elsner, citado en [26]. propone que la reacción que representa el fenómeno de cianuración del oro es

Ecuación 10 *Reacción anódica del proceso*



La ecuación 10, representa la reacción redox favorecida hacia los productos mientras la concentración de CN sea menor a 8 g/L . La reacción disuelve el oro en fase sólida en forma iónica formando el complejo $Au((CN)_2)^-$, el proceso puede contar con otras reacciones, pero este es el esquema base propuesta por [26].

4.6 Filtración

Después del proceso de lixiviación, es necesario hacer una filtración para separar a través de una malla con carbón activado, con el fin de separar el soluto sólido de la solución líquida, existen distintas formas de llevar a cabo el proceso de basado en el uso de carbón activado para la absorción, o con Zinc como agente de absorción. [23]

Figura 55.
Filtro de carbón activado.



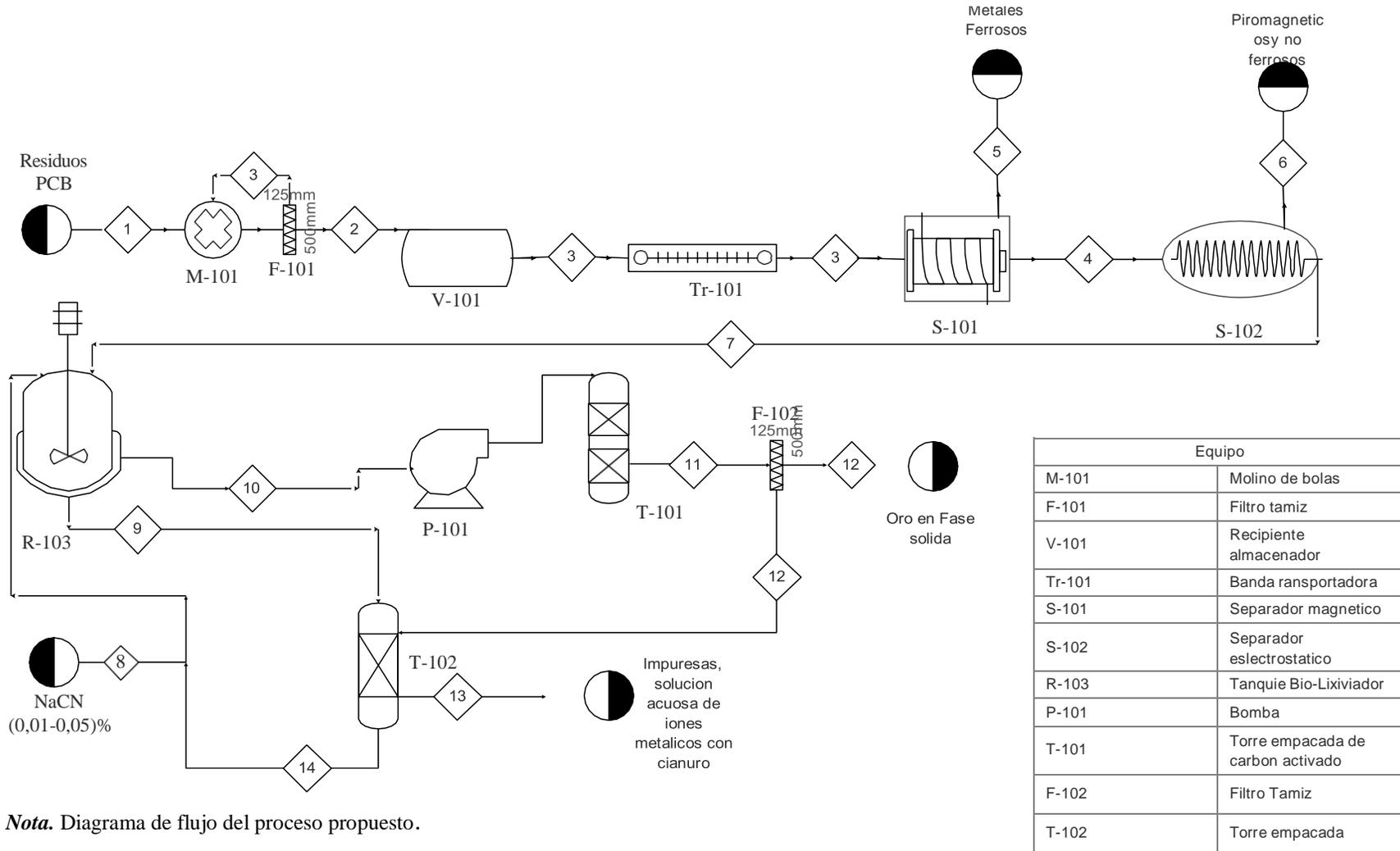
Nota. La imagen representa un filtro con mallas de carbón activado.

Tomado de: Filtomat [Enlínea]. Disponible en: [Filtro de Carbón Activado - Multimedia para Agua \(f-w-s.com\)](http://Filtro de Carbón Activado - Multimedia para Agua (f-w-s.com))

Para la separación del complejo $\text{Au}(\text{CN})_2$, se hace mediante el mecanismo de absorción de CN en el carbón activado, posteriormente el carbón activado es pasado por un filtro y a una torre de tratamiento para su recirculación. Las corrientes de salida son desechos iónicos cianurados, lo que se propone es contratar una empresa de residuos inorgánicos para su disposición final.

A continuación, se presenta el diagrama PFD propuesto para el proceso de extracción de oro a partir de RAE

Figura 56.
Diagrama de Flujo de Proceso (PFD)



Nota. Diagrama de flujo del proceso propuesto.

Tabla 9.*Balance de materia para las corrientes representadas en el PFD.*

Residuos PCB (kg)	1260	Corriente s						
Sustancia	Cantidad (kg)	1 (kg)	2(kg)	3(kg)	4(Kg)	5(kg)	6(kg)	7(kg)
NaCN	0	0	0	0	0	0	0	0
Au	1,071	1,071	0,9103 5	0,1606 5	0,16065	0	0	0,16065
Cu	504	504	352,8	151,2	151,2	0	136,08	15,12
Fe	378	378	264,6	113,4	0,1134	113,286 6	0,1134	0
Al	189	189	132,3	56,7	56,7	0	56,7	0
Sn	12,6	12,6	8,82	3,78	3,78	0	3,024	0,756
Ni	40,95	40,95	28,665	12,285	0,12285	12,1621 5	0,1228 5	3,60822E- 16
Zn	63	63	44,1	18,9	18,9	0	17,01	1,89
Pb	12,6	12,6	8,82	3,78	3,78	0	3,402	0,378
Mg	59,22	59,22	41,454	17,766	17,766	0	15,989 4	1,7766
Ion CN	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota. Balance de materia para las corrientes representadas en el PFD de 1 – 7.

Tabla 10.*Balance de materia para las corrientes representadas en el PFD.*

Residuos PCB (kg)	1260	Corrientes					
Sustancia	8(kg)	9(kg)	10(kg)	11(kg)	12(kg)	13(kg)	14(kg)
NaCN	0,3213	0,03213	0,28917	0	0	0,03213	0,028917
Au	0	0,0080325	0,1526175	0,1526175	0	0,0080325	0
Cu	0	15,12	0	0	0	15,12	0
Fe	0	0	0	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	0	0	0
Sn	0	0,756	0	0	0	0,756	0
Ni	0	3,60822E-16	0	0	0	3,6082E-16	0
Zn	0	1,89	0	0	0	1,89	0
Pb	0	0,378	0	0	0	0,378	0
Mg	0	1,7766	0	0	0	1,7766	0
Ion CN	0	0	0	0	0,28917	0	0

Nota. Balance de materia para las corrientes representadas en el PFD de 8-14.

La secuencia lógica de procesos que se implementó en el desarrollo del esquema de valorización se extrajo de las figuras 6, 7 y 8 las cuales expresan en síntesis las operaciones que son necesarias para la recuperación del oro ya que fue la sustancia de interés y de enfoque para la elaboración de la propuesta. Además de toda la infografía consultada y revisada mediante lectura, sin embargo, como criterio se tuvieron en cuenta los ODS que son primordiales para todos los proyectos, como se describe en el capítulo 2. Las propuestas actuales se deben componer de dos partes, una propuesta transitoria que permita aportar una solución que conecte las tecnologías clásicas con las tecnologías nuevas, porque el costo de una inversión en tecnología totalmente nueva es elevado, por esta razón se optó por una, propuesta integrativa entre la forma clásica de extracción de oro a través de lixiviación cianurada con la implementación de una *Chromobacterium Violaceum*, capaz de formar el cianuro, el solvente de mayor extracción para el oro en este tipo de separación líquido - sólido, de esta forma una propuesta de cambio lento puede ser más fácil de ser implementado para las industrias que operan en la actualidad, por esta razón se decidió el generar una propuesta con esta posibilidad.

En la Figura 55 se presenta el diagrama de flujo de proceso de la propuesta de valorización para los desechos RAEE, donde se presentan las corrientes de entrada y de salida del proceso con las respectivas unidades a utilizar para el desarrollo del proceso.

Además del uso de la biolixiviación como forma de innovación dentro del proceso clásico de recuperación de metales preciosos por técnicas hidrometalurgias o mixtas, se optó por el uso de separadores que utilizan como fuerza de interacción para la separación las fuerza causadas por fenómenos electromagnéticos y electrostáticos. De esta manera también se puede aportar a la minimización de solventes inorgánicos que son de carácter contaminante y de alto tratamiento post proceso.

Esta propuesta se diseñó bajo la perspectiva de una planta piloto fácil de implementar, por esta razón se representó las operaciones y procesos de las forman más entendibles posibles, mediante el uso de figura 39 y 55 esta es una de las posibilidades de recuperar una sustancia de alto valor comercial e industrial por sus propiedades, buscando dar valor agregado a un desecho que se deja en acumulación, reimplantando esta materia pero a un nuevo campo de interés se elimina presión a sector minero que necesita de menos demanda por parte de la industria y de los sectores comerciales.

5. ANALISIS FINANCIERO VIABILIDAD DEL PROYECTO

En este capítulo se plantea un análisis de costos para la puesta en marcha de una planta piloto del proceso anteriormente mencionado. El análisis cuenta con: la inversión inicial la cual será netamente de los equipos necesarios para el proceso de extracción de oro.

En primera medida, se calculó el costo de la inversión en maquinaria para la implementación de la planta, las unidades se consultaron a través de las páginas de proveedores de unidades de ingeniería provenientes de china, donde se encontraron opciones de múltiples variaciones de precio, sin embargo, lo que se seleccionó por su costo se encuentra en la tabla 15.

Figura 57.

Equipos necesarios para el proceso

Elemento	Descripción	Unidad	Valor (usd)
Trituradora doble eje	Trituradora de metal, material de alta calidad incorpora dos ejes trituradores de acero inoxidable	1	7.860
Separador Magnético	imán de alta calidad que está colocado o suspendido de un techo o dispositivo	1	4.000
Separador electrostático	Equipo de separación electrostática de alta tensión para laboratorio, separador electrostático de tamaño pequeño, planta de fabricación	1	4.500
Bio-lixiviador	Chaqueta Química Industrial, Reactor de tanque agitado continuo, 5000L, S304	1	8.000

Nota. La figura presenta los equipos necesarios para la viabilidad del proyecto.

El oro recuperado al final del proyecto será para joyería, de acuerdo con consultas realizadas el oro para la estas aplicaciones la concentraciones necesarias para el oro es de entre 14k y 18k, y el valor por gramo para el de 14 quilates se encuentra en los 34 dólares, y para el de 18k en 43 dólares [27].

5.1 Cálculo del producto

Para el cálculo de cuanto producto se puede obtener de una tonelada de desechos RAEE totalmente procesada, primero se tuvieron en cuenta las condiciones críticas de la minina composición de oro en los desechos de circuito impreso, y la concentración de oro obtenible como de 14 quilates (k) y el precio de esta concentración para conocer los beneficios, el precio se consultó y obtuvo que se encuentra en los 34 dólares por gramo, representado en la siguiente tabla

Tabla 11.
Datos necesarios para los cálculos de los beneficios.

kg (PCB)	kg Au (min)	kg(Max)
1000	1,2235	151,71056
Oro para Joyería		
18K	14K	
USD / gramo	USD / gramo	
43	34	
USD / Kg	USD / Kg	
43000	34000	
MUB	0,3	

Nota. La tabla contiene la cantidad de oro que se espera obtener en una tonelada de desechos procesados y el precio por gramo del oro en dólares.

Para obtener el resultado de la cantidad mínima de oro, se realizó multiplicando el valor mínimo de la composición por la base de cálculo de una tonelada que es lo que se espera procesar por mes, los valores de los ingresos por un kilogramo de oro son de 34 000 dólares y al multiplicar esto por 12 obtienen los ingreso en un año.

5.2 Cálculo de los costos

Para el cálculo de los gastos se tuvo en cuenta el pago de nómina a 5 operarios teniendo en cuenta los aportes a salud, pensión y ARL necesarios para los empleados y el salario base aproximado de 300 dólares, todo calculado en dólares, para que las unidades fueran consistentes, además de los gastos de arriendo por bodega a las afueras de la ciudad de Bogotá entiendo encuesta averiguaciones locales, de esta forma que se aproximó por un valor de 1990 dólares mensuales, adicionalmente los gastos por servicios ser aproximaron de forma cualitativa en 2978 dólares mensuales y dentro de otros gastos se dejó 5 400 dólares por tratarse de un análisis aproximado sin tener valores reales de operación, estos gastos se tabularon y sumaron en siguiente tabla.

Tabla 12.
Datos necesarios el cálculo de los flujos de caja

Gastos	USD
Nomina	2590,5
Arriendo	1990
Servicios	2978
otros gastos	5400
Total	12958,5

Nota. La tabla contiene una aproximación de los costos del proceso.

5.3 Cálculo de los gastos

Para los gastos del proceso se tuvieron encuesta la maquinaria para llevar a cabo el proceso con sus respectivos aranceles de importación, una cantidad de muebles, computadores y un vehículo para el trasporte y recolección de la materia prima y del producto, adicionalmente se lescalculó la depreciación 10 años exceptuando a los computadores que se calcularon a 5 años, todose calculó y digito en la siguiente tabla:

Tabla 13.

Datos necesarios el cálculo de los flujos de caja

INVERSION	VALOR	Depreciación	Depreciación
Maquinaria	31668	10	3166,8
Muebles	5900	10	590
Computadores	2480	5	496
Vehículo	15000	10	1500
Total depreciación			5752,8
Total P.P.E	55.048		

Nota. La tabla representa los costos que son de bajo impacto pues no se reflejan en los movimientos de caja, sino en los estados financieros

. Adicional a esto se calcularon los gastos para el capital de trabajo necesario para iniciar el proyecto teniendo en cuenta el periodo pre operativo, los valores de meses de requerimiento fueron aproximados de manera cualitativa en la siguiente tabla.

Tabla 14.

Datos necesarios el cálculo de los flujos de caja.

Capital de trabajo	Meses de Requerimiento	Valor
Inventario de producto	2	20 400
Inventario de materia prima	2	6 120
Insumos	6	10 800
Periodo Pre operativo	6	3 118,55
Capital de trabajo		40 438,55
	Inversión	95 487

Nota. La tabla representa lo que se necesita para arrancar el proyecto, antes de poder tener ingresos por utilidades. Por insumos se refiere a: Solución acuosa CN, carbón activado, agua, energía eléctrica.

5.4 Cálculo de los flujos de caja

Para el cálculo de los flujos de caja se utilizaron los datos de todas las tablas anteriores, para los beneficios se tuvo en cuenta un crecimiento anual del 5 % como meta, para los costos se calcularon como el producto entre el margen de utilidad bruta (MUB) y los ingresos, el valor de la utilidad bruta se calculó como la resta de los ingresos menos los gastos, para los gastos se multiplicó el valor total de los gastos mensuales por 12 para obtener los anuales. La depreciación se utilizó la previamente calculada, para el cálculo de la utilidad operacional al valor de la utilidad

bruta se le resta la suma de los gastos y la depreciación, para la utilidad antes de impuestos de resta el valor de la utilidad operacional de los gastos financieros. Sin embargo, para este proyecto se asumió que el capital de inversión es privado y no se tienen gastos financieros, para el cálculo de los impuestos se calcula como el 30% de la utilidad antes de impuestos y la utilidad neta se resta los impuestos a la utilidad antes de impuestos, y el flujo de caja se obtiene como el resultado de la

Tabla 15.

Flujos de caja aproximados para el proyecto

resta entre la utilidad neta y la depreciación.

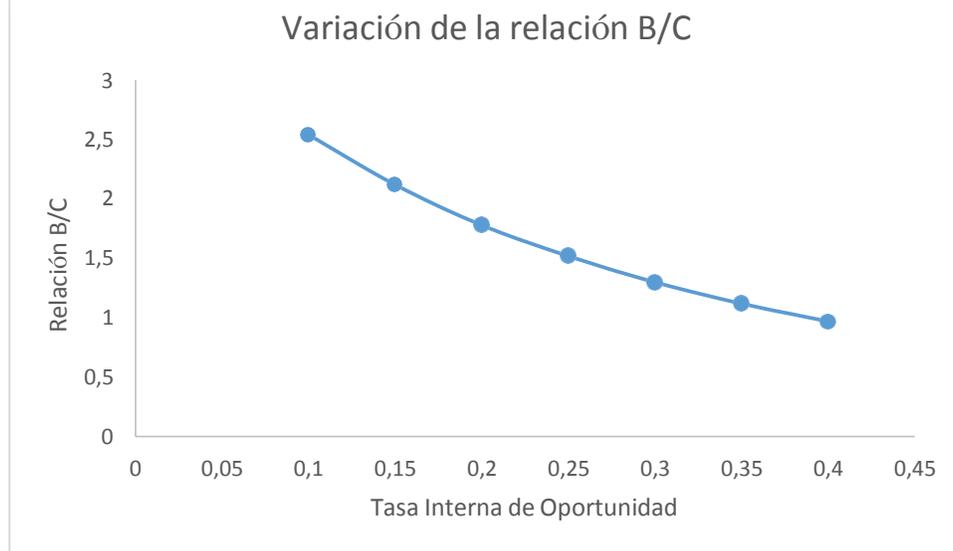
Concepto	pre operativo	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
ingresos	0	408000	428400	449820	472311	495926,55
Costos	0	122400	128520	134946	141693,3	148777,97
utilidad bruta	0	285600	299880	314874	330617,7	347148,59
Gastos	25.917,00	155.502	171.052	188.157	206.973	227.670
Depreciación	5752,8	5.753	5.753	5.753	5.753	5.753
utilidad operacional	- 31.670	124.345	123.075	120.964	117.892	113.725
Gastos financieros	-	-	-	-	-	-
utilidad antes de impuestos	- 31.670	124.345	123.075	120.964	117.892	113.725
impuestos		37.304	36.923	36.289	35.368	34.118
utilidad neta		87.042	86.153	84.675	82.524	79.608
Depreciación		5.753	5.753	5.753	5.753	5.753
Flujo de caja operativo	- 31.670	81.289	80.400	78.922	76.771	73.855

Nota. La tabla representa el resumen del cálculo de los flujos de caja aproximados a través del tiempo, no cuenta con gastos financieros.

5.5 Cálculo de la relación costo beneficio.

Para el cálculo de la relación costo beneficio, se tomaron los resultados de los flujos de caja y se le calcularon los beneficios, mediante la función de Excel de valor actual neto y se dividió entre la inversión, sin embargo, el cálculo del valor actual neto requiere el parámetro de la tasa interna de oportunidad, para esto se calculó la variación de la relación en función de la tasa interna de oportunidad, y se graficó en la siguiente figura:.

Figura 58.
Comportamiento de la relación B/C con la Tio



Nota. La figura representa el comportamiento de la relación costo beneficios en función de la tasa interna de oportunidad como se observa la relación entre ellas dos en inversamente proporcional.

En el análisis financiero fue necesario, tomar en cuenta varias suposiciones por lo que los datos reales de los flujos de caja de deben tomar de un proyecto ya en operación, sin embargo, en este no contamos con los datos reales para el cálculo de los flujos de caja, una de las primeras suposiciones que se tomo fue el de celular el valor mínimo de porcentaje de oro los desechos RAEE, pues el valor mínimo se tomó como el valor menor de la tabla 5 y 6, esto fue necesario porque el análisis de estadística, que hace referencia a que el valor mínimo seria el promedio menos 3 desviaciones estándar, da como resultado un valor negativo, lo que físicamente representa que no habría oro en la muestra, pero matemáticamente no puede ser usado para el cálculo de los indicadores financieros, el máximo se calculó como el promedio de los valores de la tabla 5 y 6, más 3 desviaciones, sin embargo para el análisis financiero no se tuvo en cuenta, la siguiente otra consideración fue el de procesar una tonelada de desechos por mes, porque los equipos consultados son de capacidades grandes como es el caso de triturados, que puedes ser alimentado con un flujo de 300-500 Kg/h, adicionalmente en la ciudad de Bogotá chatarra electrónica cuenta con múltiples toneladas, que puedes ser procesadas, como representan los informes sobre estos desperdicios.

El valor numérico de la relación costo beneficio es alto ya que, el valor de un kilogramo de oro es más grande que el costo de la maquinaria, lo que hace que los beneficios sean elevados, los cuales superan por mucho los costos, sin embargo es necesario tener en cuenta que los costos son una aproximación que no representan la realidad, pero aun aumentado los costos 20 veces con lo calculado, el valor de la relación costo beneficio es aproximadamente 4,6, lo que significa que los beneficios siguen sobre pasando por mucho a los costos.

6. CONCLUSIONES

Para la caracterización de los tableros de circuito impreso se determinó que las concentraciones de metales dentro de los tableros de circuito impreso se deben dar en términos de intervalos y corresponden a oro [0.0085% - 0.15%], del cobre [8.94%-53.68%], del hierro [21%-34%], del aluminio [14,12%-21,56%], del estaño [1,84%-9,42%], níquel [3,25%-6,52%], zinc [4.79% - 8,75%], plomo [4,51%-8,84%], estas composiciones se refieren a la fracción metálica de los tableros de circuito impreso.

Se determinó que la variabilidad en los datos reportados entre los autores radica en el hecho de que las investigaciones realizadas no se realizaron con las mismas muestras de estudio ni en los mismos años. Esto es importante porque los tableros que procesaron pertenecen a diferentes marcas de diferentes fabricantes de diferentes referencias de teléfonos móviles.

Se propuso un proceso que cuenta con la particularidad de conectar el uso de tecnologías biotecnológicas con las técnicas clásicas de cianuración utilizando la capacidad de bacterias para producir cianuro, teniendo en cuenta la implementación de separadores magnéticos y electrostáticos con el fin de minimizar las interacciones del cobre con el cianuro, adicionalmente la propuesta se esquematizó en el diagrama PDF con la identificación de unidades y el balance de materia.

La viabilidad del proyecto depende directamente de la tasa interna de oportunidad, para los valores de una tasa de oportunidad de entre 10 y 35 % se mantiene como un proyecto rentable, sin embargo, es necesario tener en cuenta que los indicadores financieros están basados en los datos del funcionamiento real de una empresa, por esta razón se asumieron muchas aproximaciones que puedes alejar el cálculo de la relación B/C, sin embargo, el aumentar la rentabilidad es posible solo aumentando la cantidad de oro al mes, ya que implementando cianuro de origen microbiológico, se reduce el tiempo de retención logrando procesar una mayor cantidad de material.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. R. Fernández, «Statista,» 27 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/521667/numero-de-smartphones-vendidos-en-el-mundo-al-usuario-final/>. [Último acceso: 10 Febrero 2022].
- [2]. V. Forti, C. P. Baldé, R. Kuehr y B. Garam, «Observatorio Mundial de los Residuos Electrónicos - 2020: Cantidades, flujos y potencial de la economía circular.,» Universidad de las Naciones Unidas/ Instituto de las Naciones Unidas para Formación Profesional e Investigaciones- coorganizadores del programa SCYCLE, Unión Internacional de Telecomunicaciones y Asociación Internacional de Residuos Sólidos, Bonn/ Ginebra/ Rotterdam, 2020.
- [3]. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Política Nacional: Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.,» Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017.
- [4]. I. Birloaga y V. Francesco, «Hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards.,» de *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling*, Elsevier, 2018, pp. 96-113.
- [5]. A. López Fernández, «Metales preciosos: El oro,» Cordoba, Universidad de Córdoba, pp. 345-353.
- [6]. Ministerio de Minas y Energía / Oficina de las Naciones Unidas contra la droga y el delito (UNODC), «Explotación de oro de aluvión. Evidencias a partir de percepción remota 2020.,» UNODC, Bogotá, 2021.
- [7]. M. C. Huaco Condori, «Evaluación del porcentaje de disolución de oro en lixiviación con Sandioss mediante diseños industriales.,» 2017. [En línea]. Available: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/2676/IMhucomc.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 10 02 2022].
- [8]. K. Timberlake y W. Timberlake, Química, México: Pearson, 2008.

- [9]. W. McCabe, J. Smith y P. Harriot, Operaciones unitarias en ingeniería química, México: McGraw-Hill, 2007.
- [10]. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación., «Gestión integral de RAEE. Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, una fuente de trabajo decente para avanzar hacia la economía circular.,» Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2020.
- [11]. National Geographic, «National Geographic en Español,» Televisa S.A, 09 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.ngenespanol.com/el-mundo/agbogloboshie-basurero-tecnologico-mas-grande-ghana/>. [Último acceso: 12 02 2022].
- [12]. France 24, «France 24,» 23 06 2019. [En línea]. Available: <https://www.france24.com/es/20190623-reporteros-ghana-agbogloboshie-contaminacion-electronica>. [Último acceso: 12 02 2022].
- [13]. HOY, «HOY,» Corporación de Medios de Extremadura S.A, 28 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.hoy.es/tecnologia/primer-mundo-exporta-basura-tecnologica-20191128111117-ntrc.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.hoy.es%2Ftecnologia%2Fprimer-mundo-exporta-basura-tecnologica-20191128111117-ntrc.html>. [Último acceso: 13 02 2022].
- [14]. H. Oliveros Gómez, «Metodología para recuperar metales preciosos: Oro, plata y grupo del platino, presentes en desechos electrónicos,» Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellin, 2011.
- [15]. M. Reza Bilesan, I. Makarova, B. Wickman y E. Repo, «Efficient separation of precious metals from computer waste printed circuit boards by hydrocyclone and dilution-gravity methods,» ELSEVIER, 5 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620355517?via%3Dihub>. [Último acceso: 21 Octubre 2021].

- [16]. R. Argumedo Delira, M. Gómez Martínez y B. Joan Soto , «Gold Bioleaching from Printed Circuit Boards of Mobile Phones by *Aspergillus niger* in a Culture without Agitation and with Glucose as a Carbon Source,» *Metals*, 7 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/5/521>. [Último acceso: 14 Octubre 2021].
- [17]. C. D. Tran, J.-C. Lee, B. D. Pandey, J. Jeong , K. Yoo y T. H. Huynh, «Bacterial Cyanide Generation in the Presence of Metal Ions (Na⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Pb²⁺) and Gold Bioleaching from Waste PCBs,» *Journal of chemical engineering of Japan*, vol. 44, pp. 692-700, 2011.
- [18]. K. Kudpeng, T. Bohu, C. Morris, P. Thiravetyan y A. Kaksonen, «Bioleaching of Gold from Sulfidic Gold Ore Concentrate and Electronic Waste by *Roseovarius tolerans* and *Roseovarius mucosus*,» *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, vol. 8, n° 1783, 2020.
- [19]. V. S. Espinoza Echeverría, «Recuperación de metales de las tarjetas de circuito de celulares descartados.,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010.
- [20]. M. Sahan, M. Kucuker, B. Demirel y K. Kuchta, «Determination of Metal Content of Waste Mobile Phones and Estimation of Their Recovery Potential in Turkey,» *Environmental Research and Public Health*, 11 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/1660-4601/16/5/887>. [Último acceso: 13 Octubre 2021].
- [21]. J. F. D. L. C. M. SAMUEL KAZES GÓMEZ, «Scielo,» 29 Noviembre 2008. [En línea]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n158/a15v76n158.pdf>. [Último acceso: 8 febrero 2022].
- [22]. H.-Y. Kang y J. Schoenung, «Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options,» *ELSEVIER*, 14 Julio 2005. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344905000777>. [Último acceso: 21 Octubre 2021].
- [23]. R. Perry, *Manual del Ingeniero Químico*, Ciudad de México: McGraw Hill, 1997.

- [24] P. Doran, Principios de ingeniería de los bioprocesos., Zaragoza: Acribia S.A, 1998.
- [25] A. G. y. S. E. Ernesto de la Torre, «bibdigital,» 2009. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5535/1/Ernesto-de-la-Torre.pdf>. [Último acceso: 10 Febrero 2022].
- [26] J. E. Valdez Alcivar , «Dspace,» 12 Mayo 2020. [En línea]. Available: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/22015/1/T-UCE-0012-FIG-235.pdf>. [Último acceso: 7 Febrero 2022].
- [27] CotizacionRealOro, «Cotización Real Oro,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.cotizacionrealoro.com/precio-oro-colombia>. [Último acceso: 18 01 2022].
- [28] N. M. Ippolito, I. Birloaga, F. Ferella, M. Centofanti y F. Veglió , «Preliminary Study on Gold Recovery from High Grade E-Waste by Thiourea Leaching and Electrowinning,» Minerals, 02 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/3/235>. [Último acceso: 20 Octubre 2021].
- [29] A. Cesaro, V. Belgiorno, M. Vaccari, A. Jandric, T. D. Ching, M. I. Dias, A. Hursthouse y S. Salhofer, «A device-specific prioritization strategy based on the potential for harm to human health in informal WEEE recycling,» CrossMark, 20 Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-017-0390-7>. [Último acceso: 20 Octubre 2021].
- [30] Y. Kim, H. Seo y Y. Roh, «Metal Recovery from the Mobile Phone Waste by Chemical and Biological Treatments,» Minerals, 2 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-163X/8/1/8>. [Último acceso: 20 Octubre 2021].
- [31] R. Charles, P. Douglas , M. Dwling, G. Liversage y M. Davies, «Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE—evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes,» ELSEVIER, 28 Junio 2020. [En línea]. Available:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134492030241X?via%3Di>
hub. [Último acceso: 21 Octubre 2021].
- [32] R. G. Charles , P. Douglas, I. L. Hallin, I. Matthews y G. Liversage, «An investigation of trends in precious metal and copper content of RAM modules in WEEE: Implications for long term recycling potential,» ELSEVIER, 24 Noviembre2016. [En línea]. Available:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16306778?via%3Di>
hub. [Último acceso: 23 Octubre 2021].
- [33] J. E. Madrigal-Arias, R. Argumedo Delita, A. Alarcón, M. R. Mendoza López, O. García Barradas, J. S. Cruz Sánchez, R. Ferrera Cerrato y M. Jiménez Fernández , «Bioleaching of gold, copper and nickel from waste cellular phone PCBs and computer goldfinger motherboards by two *Aspergillus niger* strains,» SciELO, Julio2015. [En línea]. Available:
<https://www.scielo.br/j/bjm/a/QzCvtNwZpxmmVfBDR4FTPkq/?lang=en>.
[Último acceso: 21 Octubre 2021].
- [34] R. Cayumil, R. Khanna, R. Rajarao, P. Mukherjee y V. Sahajwalla, «Concentration of precious metals during their recovery from electronic waste,» ELSEVIER, 23 Diciembre 2015. [En línea]. Available:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X15302385?via%3Di>hub. [Último acceso: 24 Octubre 2021].
- [35] M. Ardelean, R. Ardelean, G. Mihut y O. Gaianu, «The importance of recovering precious metals from waste electrical and electronic equipment,» IOP Science, 2021. [En línea]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1781/1/012049>. [Último acceso: 22 Octubre 2021].
- [36] Y. Kim y Y. Roh, «Effective Metal Recovery in the Mobile Phone Waste by Chemical and Biological Treatments,» Minerals, 2 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-163X/8/1/8>. [Último acceso: 22 Octubre 2021].
- [37] F. N. Pinheiro Nicolai y S. L. Bragança Lana, «Urban Mining: A Process Designed to Recover Au from E-waste,» SienciePG, 1 JuLio 2019. [En línea]. Available:

- <https://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=381&doi=10.11648/j.ijsdr.20190502.11>. [Último acceso: 20 Octubre 2021].
- [38] K. Kudpeng, T. Bohu, C. Morris, P. Thiravetyan y A. Kaksonen, «Bioleaching of Gold from Sulfidic Gold Ore Concentrate and Electronic Waste by *Roseovarius tolerans* and *Roseovarius mucosus*,» *Microorganisms*, 14 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-2607/8/11/1783>. [Último acceso: 20 Octubre 2021].
- [39] L. Pietrelli, I. Francolini, A. Piozzi y M. Vocciante, «Metals Recovery from Printed Circuit Boards: The Pursuit of Environmental and Economic Sustainability,» *Chemical Engineering Transactions*, 2018. [En línea]. Available: [327474321_Metals_Recovery_from_Printed_Circuit_Boards_The_Pursuit_of_Environmental_and_Economic_Sustainability](https://www.mdpi.com/2076-2607/8/11/1783). [Último acceso: 22 Octubre 2021].
- [40] J. Namias, «the future of electronic waste recycling in the united states: Obstacles and Domestic Solutions,» *Earth Engineering Center*, Julio 2013. [En línea]. Available: <https://gwcouncil.org/m-s-thesis-the-future-of-electronic-waste-recycling-in-the-united-states-obstacles-and-domestic-solutions/>. [Último acceso: 21 Octubre 2021].
- [41]. J. M. RAMÍREZ PELCASTRE, «RECUPERACIÓN DE ORO A PARTIR DE CHATARRA ELECTRÓNICA,» UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO, HIDALGO, 2008.

ANEXO

RECOMENDACIONES

1. Como primera recomendación en caso de ser desarrollado el proyecto, después del proceso de trituración, sería necesario tomar una muestra representativa, dependiendo del tamaño del lote llevar esa muestra al laboratorio y analizarla con el fin de conocer la composición real del lote, y hacer un análisis estadístico, para conocer la concentración de entrada y predecir la concentración de salida del lote.
2. Es necesario desarrollar las pruebas de un reactor tipo piloto en el laboratorio, como primera medida del bioproceso, conocer la efectividad de las bacterias, y analizar las variables que mantienen el bioproceso en las condiciones más óptimas por el máximo tiempo necesario, y las demás variables, adicionalmente determinar experimentalmente el comportamiento de los microorganismos con los sustratos más investigados por los autores.
3. Los ingenieros debemos estar perceptivos al cambio y a cómo las herramientas de la tecnología nos pueden ayudar a crear cosas que no conocíamos, es deber del ingeniero que se capacite por su cuenta en el campo de la programación cuántica para no quedar atrás como profesional de la ingeniería química sino que a través de estas herramientas pueda dar solución a los procesos del futuro.