Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Ciencias

La Economía Circular en la Industria Electrónica en México: Mapeo del Flujo de Materiales en Teléfonos Celulares

Disertación presentada por

María Daniela Córdova Pizarro

sometida a la

Escuela de Ingeniería y Ciencias

como un requisito parcial para obtener el grado académico de

Doctora

en

Ciencias de Ingeniería

con especialidad en Economía Circular

Monterrey Nuevo León, 13 de Mayo de 2019

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Ciencias

Los miembros del comité aquí citados certificamos que hemos leído la disertación doctoral presentada por María Daniela Córdova Pizarro, y consideramos que es adecuada en alcance y calidad como un requisito parcial para obtener el grado de doctor en Ciencias de Ingeniería, con especialidad en Economía Circular.

Dr. Ismael Aguilar Barajas
Tecnológico de Monterrey
Escuela de Ciencias Sociales y Gobierno
Director de Tesis

Dr. Ciro Ángel Rodríguez González
Tecnológico de Monterrey
Co-director de Tesis

Dr. David Carlos Romero Díaz
Tecnológico de Monterrey
Sinodal

Dr. Neal Ricardo Smith Cornejo
Tecnológico de Monterrey
Sinodal

Dr. Jose de Jesús Salazar Cantú
Tecnológico de Monterrey
Sinodal

Dr. Rubén Morales Menéndez
Director Nacional de Posgrado
Escuela de Ingeniería y Ciencias

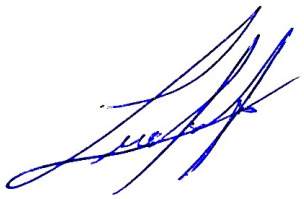
Tecnológico de Monterrey
20 MAY 2019
Dirección Nacional de Posgrado
Dr. Rubén Morales Menéndez

Monterrey Nuevo León, 13 de Mayo de 2019

Declaración de autoría

Yo, María Daniela Córdova Pizarro, declaro que esta disertación titulada, 'La Economía Circular en la Industria Electrónica en México: Mapeo del Flujo de Materiales en Teléfonos Celulares', y el trabajo que se presenta en ella es de mi autoría.
Adicionalmente, confirmo que:

- Realice este trabajo en su totalidad durante mi candidatura al grado de doctor en esta universidad.
- He dado crédito a cualquier parte de esta disertación que haya sido previamente sometida para obtener un grado académico o cualquier otro tipo de titulación en esta o cualquier otra universidad.
- He dado crédito a cualquier trabajo previamente publicado que se haya consultado en esta disertación.
- He citado el trabajo consultado de otros autores, y la fuente de donde los obtuve.
- He dado crédito a todas las fuentes de ayuda utilizadas.
- He dado crédito a las contribuciones de mis coautores, cuando los resultados corresponden a un trabajo colaborativo.
- Esta disertación es enteramente mía, con excepción de las citas indicadas.



_____
María Daniela Córdova Pizarro

Monterrey Nuevo León, 13 de Mayo de 2019

@2019 por María Daniela Córdova Pizarro
Todos los derechos reservados

Dedicatoria

A mis padres, Patricio y Ana Victoria, porque son una muestra de perseverancia y lucha. Por su apoyo incondicional, por su amor y por la fuerza que me dieron día tras día para que mis estudios en México sean una realidad. Sin su ejemplo no habría podido llegar a ser la mujer y profesional que soy ahora.

Reconocimientos

Al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey (ITESM) y al Proyecto en Economía Circular -América Latina- que financió mi investigación, colegiatura y manutención.

Al profesor Dr. Ismael Aguilar Barajas, pieza fundamental y mentor para mi desarrollo intelectual y académico, su apoyo y asesoría hicieron posible alcanzar con éxitos mi título y grado académico. Mi profunda admiración y gratitud a usted y su familia.

A los profesores Dr. Ciro Rodríguez González y Dr. David Romero, maestros y amigos, quienes fueron imprescindibles para solventar mis dudas y caminar con éxito durante mi proceso de Doctorado. Mi gratitud a ustedes.

Al Dr. Neale Ricardo Smith, por su apoyo y asesoría como sinodal y director del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.

Al profesor Dr. José de Jesús Salazar por sus aportaciones meticulosas que enriquecieron sustancialmente el trabajo de investigación.

A mi colega y amiga, Flora, candidata a doctorado en el proyecto de Economía Circular, con quien compartí mis dudas, logros y alegrías.

A la recicladora Proambi S.A.V. de C.V. en particular al gerente general Salvador Álvarez y la gerente de procesos Alma García, quienes me apoyaron y asesoraron en las pruebas técnicas de desensamblado.

De manera especial a Jenny Medina, Angélica Garza y Claudia González, colaboradoras del TEC y amigas, por haberme apoyado durante mi estancia en el país.

A Eduardo, Tatiana, Víctor, Isa, Irina, Frank, Rudolf por su apoyo y consejo.

A mi familia y amigos, en especial, a mis padres, hermanos, tíos y abuelos por haberme acompañado con su cariño y estímulo día a día; sin ustedes nada habría sido fácil.

La Economía Circular en la Industria Electrónica en México: Mapeo del Flujo de Materiales en Teléfonos Celulares

por

María Daniela Córdova Pizarro

Resumen

La industria electrónica en México tiene un gran potencial. Se estima que para el año 2020 la producción de equipos eléctricos y electrónicos en el país alcanzará los $USD76,540 millones de dólares americanos (INEGI, 2012). Sin embargo, no existe información actualizada sobre la situación de los residuos electrónicos, ni una ley específica para la gestión integral de los mismos. La industria de productos electrónicos es de las más complejas a nivel mundial por el contenido tan variado de materiales que componen sus productos, particularmente los teléfonos celulares. Es por este motivo, que la principal aportación de esta investigación se enfocó en analizar, de manera cualitativa y cuantitativa, la situación del subsistema productivo-económico de esta industria, por medio del mapeo de flujo de materiales en teléfonos celulares. Además de identificar los actores y procesos clave que influyen, de manera directa, en el tránsito hacia un modelo de economía circular. México al no tener de una ley de residuos electrónicos, permite que la industria informal abarque casi el 90% del mercado. Lo que ocasiona pérdidas para el país de entre USD$11.3-UDS$12.4 millones de dólares por carecer de tecnologías de recuperación de materiales (tarjetas de circuitos impresos de teléfonos celulares). Además de permitir el trabajo infantil en tiendas de reparación electrónica y recicladoras informales, exponiendo a menores de 15 años a posibles accidentes, contacto con sustancias peligrosas y afectaciones a la salud. Adicionalmente, la encuesta nacional al consumidor permitió determinar que este actor es pieza clave para que inicie la circularidad en este sector. Finalmente, se recomienda que el gobierno, la industria y la academia trabajen en sinergia para una adecuada gestión integral de los residuos electrónicos. Asimismo, diagnosticar y evaluar la situación de la industria electrónica y demás industrias en el país, identificando los actores clave, y los procesos y condiciones que permiten o inhabilitan la transición hacia una economía circular. También se recomienda generar, periódicamente, información actualizada sobre el subsistema productivo y económico del flujo de los materiales provenientes de residuos de todas las industrias.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Modelo de economía lineal ……..……..12
Figura 2.2: Esquemas de los modelos de economía lineal y circular ……18
Figura 3.1: Composición por peso de un teléfono celular (porcentaje) ……33
Figura 3.2: Estructura legislativa para el manejo integral de residuos electrónicos……..…48
Figura 3.3 Ciclo de vida de un equipo eléctrico y electrónico ……..……..67
Figura 5.1: Nivel socio-económico de los 1,000 encuestados en México (porcentaje)…...79
Figura 5.2: Rango de edades de los 1,000 encuestados en México (porcentaje) ……..…80
Figura 5.3: Preferencias tecnológicas de los 1,000 encuestados en México……..80
Figura 5.4: Nivel tecnológico entre hombres y mujeres en México (porcentaje) ……..…81
Figura 5.5: Equipos electrónicos con los que cuentan los entrevistados (porcentajes) ….81
Figura 5.6: Cómo adquirió el equipo electrónico el entrevistado (porcentajes) ……..….82
Figura 5.7: Tiempo de uso del equipo electrónico antes de deshacerse del mismo ……83
Figura 5.8: Razones para considerar que un electrónico ya no es funcional dependiendo su nivel socio-económico (porcentajes)……..…….84
Figura 5.9: Maneras en cómo las personas se deshacen de su equipo electrónico ……..85
Figura 5.10: Motivos que impiden dar los equipos electrónicos al fabricante para reciclarlos ……88
Figura 5.11: Motivos para devolver los e quipos electrónicos al fabricante para reciclarlos ……..…..88
Figura 5.12: Contribución ecológica para un reciclaje responsable (porcentajes) ..…..….89
Figura 5.13: Contribución ecológica para un reciclaje responsable con base al nivel socioeconómico de los entrevistados ……..…..89
Figura 5.14: Conformidad con un depósito ecológico para un reciclaje responsable ……90
Figura 5.15: Tipos de problemas que puede tener un celular durante su vida útil ……91
Figura 5.16: Principales servicios o accesorios que el consumidor adquiere para su celular ……...…92
Figura 5.17: Opciones para cambiar la batería de su celular (porcentajes) ……..……93
Figura 5.18: Alternativas de reparación de un celular durante su vida útil.……..……94
Figura 5.19: Opciones para mantener su celular más tiempo de lo esperado ……....95
Figura 5.20: Conocimiento sobre programas de trueque de celulares ……...……95

Figura 5.21: Porcentajes de generación de residuos electrónicos procesados por cada una de las empresas de reciclaje entrevistadas, 2015 ……..……..100
Figura 5.22: Nivel académico de los vendedores en tiendas formales de reparación de un total de 103 trabajadores, 2015 ……..……109
Figura 5.23: Nivel académico de los técnicos en tiendas formales de reparación de un total de 103 trabajadores, 2015 ……109
Figura 5.24: Requisitos de seguridad y salud en tiendas formales (en número y en porcentaje), 2015 ……..…110
Figura 5.25: Disposición final de los RAEE en tiendas formales, 2015 ……..…111
Figura 5.26: Distribución de los 56 empleados informales, 2015 ……112
Figura 5.27: Nivel académico de los 56 empleados en tiendas informales de reparación, 2015 ……..……..113
Figura 5.28: Nivel académico de los empleados informales clasificados por ciudades (total de 56 empleados), 2015 ……..113
Figura 5.29: Condiciones de seguridad y salud en tiendas informales, 2015 ……..…….114
Figura 5.30: Análisis por ciudad de implementos en primeros auxilios dentro de las tiendas informales, 2015 ……115
Figura 5.31: Análisis por ciudad del equipo de protección personal de empleados informales, 2015 ……..…..……115
Figura 5.32: Análisis por ciudad de extintor de incendio dentro de las tiendas informales, 2015 ……..……..116
Figura 5.33: Análisis por ciudad de detectores de humo dentro en las tiendas informales, 2015 ……..……..116
Figura 5.34: Análisis por ciudad de las señales de seguridad dentro en las tiendas informales, 2015 ……..…….117

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Teorías y modelos que han servido para el modelamiento de la economía circular ……..13
Tabla 2.2: Principios en los que se basa el Modelo de Economía Circular ……..19
Tabla 2.3. Análisis de los procesos por donde fluyen los residuos de teléfonos celulares, comparación de metodologías de reportes de campo y estudios internacionales ……24
Tabla 3.1: Definición de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos por diferentes autores y organismos internacionales …….28
Tabla 3.2: Categorización de los residuos electrónicos bajo lineamientos de la Unión Europea ……29
Tabla 3.3: Categorización de los residuos electrónicos bajo lineamientos de la Unión Europea, a partir del año 2018 ……30
Tabla 3.4: Concentración de oro, paladio y plata en un kilogramo de equipos electrónicos y en un kilogramo de mineral ……31
Tabla 3.5: Composición en gramos de residuos de los cinco equipos electrónicos seleccionados ……..34
Tabla 3.6: Efectos de los materiales presentes en residuos electrónicos ……37
Tabla 3.7. Iniciativas para la recolección de RAEE en Latinoamérica ……..46
Tabla 3.8 Esquema de planes de manejo para residuos según la LGPGIR ……50
Tabla 3.9: Generación de residuos eléctricos y electrónicos, por región, en el año 2016 ……..52
Tabla 3.10: Generación de residuos eléctricos y electrónicos, por categoría, en el año 2016 ……..53
Tabla 3.11: Segmentación de la Industria Electrónica en México ……54
Tabla 3.12: Proyección económica de la producción de electrónicos en México, 2011-2020 ……55
Tabla 3.13. Estudios realizados sobre generación y gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en México ……..57
Tabla 3.14: Conocimiento de los encuestados con respecto a la disposición final de los residuos electrónicos en México ……58

Tabla 3.15: Respuestas de las personas encuestadas sobre el tiempo de almacenamiento de un aparato electrónico ……59
Tabla 3.16: Alternativas de disposición final de un equipo electrónicos ……60
Tabla 3.17: Programas de reciclaje en México auspiciado por empresas privadas y gobierno ……61
Tabla 3.18 Oportunidades de recuperación de equipos eléctricos y electrónicos durante su ciclo de vida ……65
Tabla 3.19 Procesos de desensamblado de residuos electrónicos y recuperación de materiales ……68
Tabla 5.1: Niveles de confianza para el cálculo del tamaño de una muestra poblacional ……75
Tabla 5.2: Número de entrevistas por cada Estado mexicano ……75
Tabla 5.3: Relación entre el área de análisis y las preguntas del cuestionario ……76
Tabla 5.4: Nive socio-económico de los 1,000 encuestados en México (porcentaje) ……79
Tabla 5.5: Condición del equipo electrónico que recibió el entrevistado (porcentajes) ……82
Tabla 5.6: Tiempo que las personas almacenan su equipo electrónico obsoleto ……84
Tabla 5.7: Conocimiento sobre el destino final de un electrónico según (edad y género)……86
Tabla 5.8: Opciones que un electrónico tiene al final de su vida útil (edad y género) ……86
Tabla 5.9: Opciones que un electrónico tiene al final de su vida útil (nivel de escolaridad) ……87
Tabla 5.10: Depósito ecológico para un reciclaje con base al nivel de escolaridad ……90
Tabla 5.11: Características generales de las empresas recicladoras de RAEE ……98
Tabla 5.12: Toneladas y porcentajes de generación de residuos electrónicos procesados por cada una de las empresas de reciclaje entrevistada……99
Tabla 5.13: Procesos de reciclaje de las empresas recicladoras de RAEE ……101
Tabla 5.14: Tipos de certificaciones que cuentan las empresas de residuos electrónicos ……102

Tabla 5.15 Relación entre el producto interno bruto (PIB) y la generación de residuos de teléfonos celulares en China y México en el año 2015…….……106
Tabla 5.16. Peso y eficiencia de los componentes de un teléfono celular obtenidos a partir del desensamblado manual …….……120
Tabla 5.17: Peso estimado de los materiales que componen los residuos celulares en México ……..……..……122
Tabla 5.18. Porcentaje de materiales que componen la tarjeta de circuitos impresos (PCB) de los teléfonos celulares ……..……..124
Tabla 5.19. Valor económico de los materiales que componen las tarjetas de circuitos impresos de teléfonos celulares en México en 2015 ……..……125

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 La economía circular de la industria electrónica ……..……..5
1.2 Definición de la problemática en México ..…….....6
1.3 Pregunta de investigación …….……...7
1.4 Objetivos (objetivo general y objetivos específicos) …….……8
1.5 Estructura de la tesis ……..……..9
1.6 Alcance y limitaciones de la investigación ……..…..…11

CAPÍTULO 2

La Economía Circular en la Industria Electrónica y el Caso de los Teléfonos Celulares

2.1 Fundamentos de la economía circular en el mundo ……..……..……12
2.2 Definición de la EC y principales características ……..……..……18
2.3 Economía Circular en los productos electrónicos ……..……..……21
2.4 Mapeo de flujo de materiales en teléfonos celulares ……..……..…..23
2.5 Conclusiones ……..……..……..……..26

CAPÍTULO 3

Residuos de Teléfonos Celulares

3.1 Definición de residuos eléctricos y electrónicos (RAEE) ……28
3.2 Políticas y tratados internacionales relacionados con los RAEE ……..……40
3.3 Situación y gestión integral de los RAEE ……..……..……..……..52
3.4 Herramientas para la gestión de los RAEE ……..……..……..……64
3.5 Conclusiones ……..……..……..……..……..……...70

CAPÍTULO 4

Marco Metodológico

4.1 Método exploratorio ……..……..……73
4.2 Método descriptivo ……..……..……74

CAPÍTULO 5

Análisis de Actores y Mapeo de Flujo de Materiales en Teléfonos Celulares en México

5.1 Comportamiento del consumidor de productos electrónicos

5.1.1 Metodología ……79

5.1.2. Resultados ……..83

5.2 Reciclaje de residuos electrónicos

5.2.1 Metodología ……..103

5.2.2 Resultados ……..104

5.3 Cálculo de generación de residuos de teléfonos celulares

5.3.1 Metodología ……110

5.3.2 Resultados ……111

5.4 Reparación de electrónicos

5.4.1 Metodología ……112

5.4.2 Resultados ……114

5.5 Análisis de flujo de materiales de residuos de teléfonos celulares

5.5.1 Metodología ……124

5.5.2 Resultados ……..126

5.6 Impacto económico de los materiales de tarjetas de circuitos impresos de teléfonos celulares

5.6.1 Metodología ……130

5.6.2 Resultados ……130

5.7 Conclusiones ……132

CAPÍTULO 6

Discusión

6.1 Comportamiento del consumidor de productos electrónicos ……....133

6.2 Reciclaje de residuos electrónicos ……....141

6.3 Cálculo de generación de residuos de teléfonos celulares ……....142

6.4 Reparación de electrónicos ……....143

6.5 Análisis de flujo de materiales de residuos de teléfonos celulares .....…144

6.6 Impacto económico de los materiales de tarjetas de circuitos impresos de teléfonos celulares 145

6.7 Conclusiones 146

CAPÍTULO 7

Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones 149

7.2 Recomendaciones y Trabajos Futuros 159

BIBLIOGRAFÍA 163

ANEXOS

Anexo A 179

Anexo B 182

Anexo C 183

Anexo D 184

CAPÍTULO 1

Introducción

México es un país con gran riqueza cultural y biodiversidad de recursos, sus industrias pueden potencializarse hacia modelos de economía circular y para esto, el trabajo conjunto entre el gobierno, sociedad, industria y academia es fundamental. La importancia de generar datos e información actualizada sobre la situación actual de las industrias mexicanas, es la pieza clave para iniciar o continuar los procesos de modelamiento circular. En los últimos años, la importancia de la Economía Circular (EC) a nivel mundial ha ido incrementándose tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo. El principal objetivo de estas naciones se enfoca en superar los modelos lineales de producción, consumo y disposición final, para caminar hacia modelos circulares que optimicen el uso y reúso de los materiales, evitando la explotación de recursos no renovables. Los países en vías de desarrollo han tomado de ejemplo modelos de economía circular de Japón, China y la Unión Europea y los han adoptado a sus actuales legislaciones de residuos. Es decir, han analizado la factibilidad de implementar modelos de economía desde las políticas de gestión integral de sus residuos. Este trabajo analiza de manera cualitativa y cuantitativa la situación de la economía circular en la industria electrónica en México, enfocándose particularmente en teléfonos celulares. En este sentido, la aportación de esta investigación se centra en describir el subsistema productivo-económico de esta industria y de esta categoría, por medio del mapeo de flujo de materiales, ante la inexistencia de información actualizada y leyes específicas que contribuyan a una gestión integral de residuos electrónicos en el país, y que caminen hacia un modelo de EC. Cabe resaltar que el alcance de este estudio se limitó al aspecto productivo y económico, más no al panorama ambiental ni social de esta industria.

1.1 La economía circular de la industria electrónica

La economía circular (EC) es un concepto que se ha desarrollado desde hace más de dos décadas y actualmente tiene más de 250 definiciones. Algunos investigadores afirman que la EC debe apuntar a las siguientes dimensiones de impacto: ambiental, económico y social (Korhonen *et al.,* 2018). Otros investigadores enfatizan la necesidad de nuevos modelos de negocios que faciliten la transición de sistemas de producción abiertos a sistemas cerrados que reutilicen recursos y reduzcan el consumo de energía (Urbinati *et al*., 2017).

Una definición generalmente aceptada de EC sigue siendo difícil de alcanzar, lo que motiva a la investigación académica a analizar una amplia gama de conceptos y métodos relacionados con el fin de contar con una definición que pueda relacionar los modelos circulares con los pilares de la sostenibilidad (Homrich *et al.,* 2018). A efecto de tener un marco de referencia en la definición de economía circular, esta investigación se apoya en Kirchherr *et al.* quienes establecen que "la economía circular describe un sistema que se basa en modelos industriales que reemplazan el concepto de *final de vida útil* con la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales en los procesos de producción / distribución y consumo, operando así a un nivel micro (productos, empresas, consumidores), nivel meso (parques ecoindustriales) y nivel macro (ciudad, región, nación y más), con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible, lo que implica crear calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social, en beneficio de las generaciones actuales y futuras" (Kirchherr *et al.*, Pp. 224-225; 2017).

La Fundación Ellen MacArthur ha trabajado incesantemente en buscar mecanismos de acción para que las industrias transformen sus modelos de economía lineal en sistemas circulares (EMF, 2015). Según lo declarado por esta Fundación, la economía circular se basa en tres principios: a) diseñar los productos / servicios fuera de la generación de residuos y contaminación, b) mantener los productos y materiales en uso, y c) regenerar los sistemas naturales (EMF, 2015). En el contexto de los equipos eléctricos y electrónicos (EEE), si los dispositivos terminan en manos de especialistas, estas personas restaurarán o re-acondicionarán los EEE, reutilizarán sus componentes o re-manufacturarán un nuevo equipo a partir de los componentes valiosos y los materiales que no sean usados, irán a reciclaje (EMF, 2017). De esta manera, se asegura que los productos puedan ser diseñados para evitar que al final de su vida útil se conviertan en residuos y sigan circulando en el sistema como materia prima para otros productos.

Para el caso de América Latina, particularmente en México, la definición de economía circular es relativamente nueva, más aún en el sector de los electrónicos y residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Actualmente la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) han juntado esfuerzos para generar información necesaria conocer la situación de la industria de RAEE en el país y la gestión de los mismos (SEMARNAT, 2016, 2017). Ambos organismos tienen clara la necesidad de generar datos, que permitan elaborar leyes y políticas públicas enfocadas en modelos de economía circular. Estas instituciones expresan que les es prioritario implementar sistemas circulares que permitan alcanzar modelos de desarrollo económico y aporten beneficios ambientales y sociales, así como un mejor uso de los recursos. En la industria electrónica, la filosofía de EC se centra en el eco-diseño, la reparación, restauración, reacondicionamiento, re-manufactura y el reciclaje de un producto para aumentar su tiempo de vida útil (Urbinati *et al*., 2017; Homrich *et al.,* 2018; Kirchherr *et al.*, 2017).

1.2 Definición de la problemática en México

Los modelos de economía circular en México están en proceso de análisis y descubrimiento. La mayoría las industrias mexicanas cuentan con procesos lineales que extraen recursos no renovables y generan residuos sin la capacidad de volver a reutilizarlos. El gobierno y empresas no tienen clara la definición de EC, por lo cual se necesita conocer y analizar todos los actores y procesos que forman parte de la generación de un producto o servicio. Tanto el gobierno como la academia y sociedad civil han unido esfuerzos para trabajar bajo una misma definición y parámetros de análisis. En este caso, la información generada por Fundación Ellen MacArthur ha servido como base para poder analizar los actuales procesos lineales y desarrollar nuevas propuestas de sistemas circulares para caracterizar la industria mexicana, particularmente en el sector de la industria de productos electrónicos en México.

Esta industria tiene un gran potencial en el país. Se estima que para el año 2020 la proyección económica de la producción de equipos eléctricos y electrónicos (EEE) en México alcanzará los 76,540 millones de dólares americanos (INEGI, 2012). Esta gran producción de equipos electrónicos conlleva a una gran generación de residuos eléctricos y electrónicos (RAEE) en el país. Es por este motivo, que la investigación se enfocó en buscar los mecanismos para analizar y evaluar a esta industria electrónica. La industria de productos electrónicos es de

las más complejas a nivel mundial y nacional por el contenido tan variado de materiales que componen los EEE, particularmente de teléfonos celulares. Además de la desactualizada o inexistente información y legislación sobre esta industria y sus residuos, sus procesos de reparación, reciclaje y recuperación de materiales (Directiva Europea WEEE, 2012; Namias, 2013; Navazo *et* al, 2013; Desjardis, 2014 y Baldé *et al.,* 2017).

En el año 2015 se inició esta investigación en el país, se encontró que no existía información actualizada sobre la situación de los aparatos eléctricos y electrónicos, ni de la generación de sus residuos. En el año 2006, el Instituto Nacional de Ecología de México (INE) publicó un manual nacional de gestión de desechos electrónicos, que se ha actualizado hasta el 2010 a través de estudios regionales (INE, 2007; INECC, 2012). Posteriormente se publicaron varios estudios sobre residuos electrónicos entre los años 2012 y 2014, basados en guías de gestión integral y programas de reciclaje (INE, 2007; INECC, 2012; Alcántara *et al*., 2016; Cruz *et al.*, 2017). A partir del año 2016, la SEMARNAT, en cooperación con el PNUD, ha realiza estudios sobre la gestión integral de desechos electrónicos. En el año 2017, SEMARNAT-PNUD publicaron un inventario de residuos electrónicos, cuyo año base fue el 2015 (SEMARNAT, 2017).

La falta de información en el sector de los productos electrónicos en México ha sido el motivo para que esta investigación se enfoque en generar datos, analizar y evaluar a esta industria. Con esta información se puede visibilizar la situación del país y determinar si existe o no un modelo de economía circular en este sector industrial, y establecer las pautas para caminar hacia un modelo más completo e integrado de EC. Es deseable que los resultados de esta investigación incidan en un mayor uso de la economía circular en el sector de productos electrónicos en México. Se espera que la nueva ley de residuos electrónicos incluya este nuevo modelo económico circular.

1.3 Pregunta de investigación

En el país existe limitada información referente a la economía circular, además de la inexistencia de datos sobre generación y manejo de residuos electrónicos. Bajo este antecedente, se formuló la siguiente pregunta de investigación. ¿Tiene México el potencial para moverse hacia un modelo de economía circular en el ámbito de la industria electrónica, ejemplificado con el caso de los teléfonos celulares? Más específicamente, ¿cuál es el estado actual de este tema en el

país, cuáles son los procesos, actores y condiciones? Para responder la pregunta de investigación, el estudio incluyó el análisis de los actores y procesos que limitan o influyen en este modelo en México. Primero se realizó una amplia investigación de la literatura sobre aspectos referentes a economía circular, residuos electrónicos, comportamiento del consumidor, reparación y reciclaje. A través de este estudio exploratorio de revisión del estado del arte, se desarrollaron las encuestas que permitieron evaluar al consumidor de productos electrónicos en todo el país. Posteriormente, se caracterizó y evaluó las condiciones y los actores involucrados en los procesos de reparación y reciclaje, y se analizó el destino de cada componente proveniente de teléfonos celulares. Para esto se realizó un estudio descriptivo a través de encuestas a los encargados de los procesos de reparación y reciclaje. Finalmente, para evaluar el potencial que tiene México para moverse hacia un modelo de EC en la industria electrónica, se realizó un análisis de flujo de materiales, junto con procesos de desensamblado cuantitativo, al igual que un análisis del impacto económico en el país.

1.4 Objetivos

Objetivo General

Construir y analizar, desde una perspectiva de Economía Circular, el mapeo de flujo de materiales en teléfonos celulares.

Objetivos Específicos

a) Analizar el comportamiento del consumidor de productos electrónicos en México.
b) Caracterizar y evaluar la infraestructura, capital humano, procesos tecnológicos y maquinaria técnica de las recicladoras de electrónicos en el país.
c) Caracterizar y evaluar los procesos técnicos y capital humano de las tiendas formales e informales de reparación de electrónicos en el país.
d) Calcular la generación de residuos electrónicos en México.
e) Realizar un mapeo de flujo de materiales de residuos de teléfonos celulares y evaluar económicamente dichas corrientes.

1.5 Estructura de la tesis

La tesis se estructura en siete capítulos. El primer capítulo presenta la introducción sobre economía circular (EC) en la industria electrónica y las diferentes posturas y definiciones a nivel mundial, regional y local. Posteriormente se define la problemática que motivó a realizar este estudio, junto con la pregunta de investigación y objetivos generales y específicos, que permitan determinar el potencial que tiene México para moverse hacia un modelo de economía circular en el caso de la industria electrónica (teléfonos celulares).

El segundo capítulo trata el estado del arte de la economía circular en la industria de la electrónica. La investigación se enfoca de manera particular en los residuos de teléfonos celulares, ya que por tiempo y presupuesto de debió centrar el estudio en un residuo de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Dentro de esta sección se encontrará de manera más detallada y fundamentada las bases de la economía circular a nivel mundial, así como la definición y principales características de este modelo. Además, se presentarán las herramientas para determinar los modelos circulares por medio del mapeo de flujo de materiales en teléfonos celulares.

El tercer capítulo se enfoca en el estado del arte, específicamente sobre residuos de teléfonos celulares. Se muestra el marco general sobre dichos residuos a nivel mundial, junto con su definición, composición e impactos socio-ambientales. Posteriormente, se presentan las políticas y tratados internacionales relacionados con los RAEE y la legislación de los mismos en países desarrollados y de economías emergentes. Finalmente, se indica el marco regulatorio de los RAEE en México, la situación de la industria electrónica, generación de RAEE, comportamiento del consumidor y reciclaje en el país. Es importante contextualizar las leyes sobre residuos electrónicos, ya que en México no existe una ley específica sobre los RAEE ni tampoco una legislación que lleve a las industrias hacia un modelo de economía circular.

El cuarto capítulo muestra el marco metodológico que se usó para el desarrollo y análisis de las cinco investigaciones del estudio. Ante la inexistencia o desactualizada información acerca de la economía circular en la industria electrónica en México, se presenta un método científico enfocado en el análisis exploratorio del estado del arte orientado hacia la economía circular, la industria electrónica y el subsistema productivo-económico sobre el mapeo de flujo de materiales de teléfonos celulares. A partir de esta información se desarrolló un estudio descriptivo a través de encuestas nacionales y locales, en las ciudades de Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey y Querétaro. El objetivo fue analizar y describir, por medio de encuestas,

el comportamiento del consumidor, tiendas de reparación y recicladoras en el país. Finalmente, con los resultados obtenidos del estudio descriptivo se analizaron las características cualitativas de cada uno de los actores y proceso involucrados en la industria para posteriormente realizar un análisis cuantitativo del proceso de desensamblado de teléfonos celulares y un análisis económico de los componentes de las tarjetas de circuitos impresos de estos dispositivos.

El capítulo quinto presenta los resultados de las cinco investigaciones realizadas en este estudio. Primero se muestra el comportamiento del consumidor, por medio de encuestas a 1,000 personas a nivel nacional. La segunda investigación trata sobre los resultados obtenidos en los estudios de campo y entrevistas realizadas en las metrópolis más importantes y tecnológicas del país, estas ciudades son Monterrey, Guadalajara, Ciudad de México y Querétaro. En ellas se entrevistaron a los encargados y empleados de las recicladoras y tiendas de reparación formal e informal. La tercera investigación que se enfoca en el cálculo de la generación de los RAEE en México a partir del producto interno bruto (PIB) del país. El penúltimo estudio se basa en evaluar la situación de las tiendas de reparación formal/informal de electrónicos en el país. Finalmente, el análisis de flujo de materiales de residuos celulares y sus impactos económicos en México conforma el último estudio presentado en el capítulo cuatro.

El sexto capítulo se centra en discutir los resultados obtenidos en el capítulo cinco con autores a nivel internacional, regional y local. Dicho análisis se enfocará en comparar al consumidor de electrónicos mexicano con países como Taiwán, China, EE.UU., Nigeria entre otros. Inicialmente, en este capítulo se discute la situación del reciclaje en México con países desarrollados y de economías emergentes. Posteriormente se confirmará la directa relación que existe entre PIB de cada país con la generación de residuos electrónicos. Se comparará además la situación de reparación de electrónicos a nivel mundial y la nueva ola sobre temas de reparación que está surgiendo en Europa. Finalmente, se cotejará el flujo de materiales de los residuos celulares en México con estudios realizados en Asia, Europa y América Latina.

El séptimo y último capítulo presenta las conclusiones de los cinco estudios. En este capítulo se plasmarán las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas de los resultados y el análisis de discusión. En consecuencia, se responderá la pregunta de investigación para determinar el potencial que tiene México para moverse hacia un modelo de EC en el ámbito de la industria electrónica con enfoque en teléfonos celulares. Junto con recomendaciones y futuras líneas de investigación que permitan a la industria de productos electrónicos en el país generar modelos circulares.

1.6 Alcances y limitaciones

Este estudio parte de un método de investigación científica enfocado en una exhaustiva búsqueda exploratoria sobre literatura a nivel mundial. La bibliografía analizada se centró en el estado del arte sobre economía circular, sostenibilidad, industria electrónica, residuos electrónicos, comportamiento del consumidor, reparación y reciclaje. A través de esta revisión exploratoria se pudo determinar el panorama sobre la problemática en México y la situación del país en temas enfocados hacia la cuantificación productivo-económica de la industria electrónica. Posterior a la investigación exploratoria y con la bibliografía analizada, la investigación continuó hacia el estudio descriptivo, con el objetivo de describir la realidad de la situación en México y cómo los actores se interrelacionan en los diferentes procesos productivos. Estos dos métodos científicos permitieron establecer las bases para generar las encuestas a los diferentes actores, y evaluar y caracterizar los procesos de reparación y reciclaje de residuos electrónicos (teléfonos celulares). Es importante resaltar que el alcance de este estudio se limitó al aspecto productivo y económico, más no al panorama ambiental ni social de esta industria.

Este estudio aportó con datos duros e información actualizada sobre la generación de los RAEE en México, y sobre los actores y procesos involucrados en dicha generación. En este sentido, la contribución se centra en describir el subsistema productivo-económico de esta industria y de esta categoría, por medio del mapeo de flujo de materiales en residuos de teléfonos celulares, y así determinar el potencial de este sector para moverse hacia modelos de economía circular.

El estudio no está exento de limitaciones. Las encuestas se limitaron a las ciudades de México, Guadalajara, Querétaro y Monterrey, por lo que no se puede pensar en la generalización de los resultados. Se puede presentar un grado de inexactitud en los estudios de campo y encuestas obtenidas, debido a la subjetividad de los entrevistados. Los encuestados, como personas que son, no siempre recordarán datos con precisión, como por ejemplo el tiempo de uso de cada electrónico, costos de reparación, alternativas de reciclaje, entre otros. En el caso de las recicladoras y tiendas de reparación, todas las encuestas fueron confidenciales, algunas brindarán datos certeros con estadísticas, otras probablemente información estimada. Durante los estudios de campo se previó un cierto grado de inseguridad para el investigador, principalmente en las entrevistas en tiendas informales de reparación, debido a que se encuentran en lugares o zonas de contrabando y compra/venta de equipos robados.

Capítulo 2

La economía circular en la industria electrónica y el caso de los teléfonos celulares

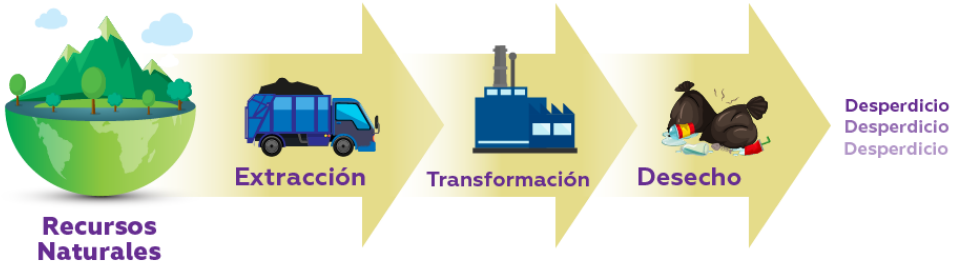
La economía circular es un modelo económico que enfoca los procesos industriales hacia la generación de cero residuos y recuperación de materiales, disminuyendo los impactos en el ámbito social, ambiental y económico. En este capítulo se hablará acerca de los fundamentos de la economía circular y a partir de qué teorías surge este nuevo modelo, además de establecer su definición y principales características. Posteriormente, se analizará a la economía circular dentro de la industria electrónica, particularmente en teléfonos celulares y cómo los materiales de dichos dispositivos pueden ser monitoreados bajo diferentes flujos y procesos.

2.1 Fundamentos de la economía circular en el mundo

En los últimos años el modelo de Economía Circular (EC) ha recibido una gran atención internacional. Países como China, Japón, Estados Unidos, Australia, Alemania, Reino Unido, Chile, Colombia, Brasil, entre otros, se han involucrado en trabajar con modelos de EC (Parajuly, 2017). Gobiernos y empresas están más conscientes acerca de los beneficios de este modelo circular, que ayuda a mitigar los impactos ambientales y sociales que generan las operaciones industriales, así como, el procesamiento y manufactura de los productos. Es por ello, que junto con el surgimiento de indicadores de sostenibilidad y la creación sistemas de ciclo cerrado (*closing loops*, por su definición en inglés), la economía circular permite tener un mayor control, periódico, de las variables ambientales, sociales y económicas, para un adecuado aprovechamiento de recursos (Andersen, 2007). Atlason *et al.* (2017) y Homrich *et al.* (2018) vieron la importancia de combinar conceptos industriales y ambientales, que permita transformar los procesos lineales en modelos circulares, que no generen desechos y todos los residuos sean aprovechados como materia prima para otras industrias.

Los modelos de economía lineal o llamados también *de la cuna a la tumba* requieren cada vez más de la extracción de recursos no renovables y energía. Estos modelos generan muchos desechos, los cuales, al no ser aprovechados, son desechados al ambiente, enterrados o incinerados (Pauli, 2013). Según EMF (2017) entre las últimas dos décadas los procesos lineales han generado más de 65 mil millones de toneladas de materia prima proveniente de recursos no renovables, los cuales han ingresado a sistemas de economía lineal; se espera que para el año 2020 este fenómeno haya crecido hasta alrededor de 82 mil millones de toneladas. En la Figura 2.1, se puede apreciar un modelo de economía lineal el cual se centra en procesos de extracción, manufactura y disposición final de los desechos. Sus investigaciones demostraron que las industrias extraen la materia prima de recursos no renovables, usan estos materiales para manufacturar sus productos, los mismos que son vendidos al consumidor y, posteriormente, el usuario lo convierte en desecho cuando su uso ya no cumpla con sus necesidades.

Figura 2.1: Modelo de economía lineal



Fuente: Elaboración propia

El concepto de economía circular es un tema abordado por diferentes investigadores desde diversos enfoques y perspectivas. Existe un gran número de académicos, escuelas y organismos internacionales que han analizado y modelado sistemas biológicos para implementarlos en los procesos industriales (Urbinati *et al*, 2017). La Tabla 2.1 resume las teorías y modelos más relevantes. Posteriormente se detallan las contribuciones más importantes.

Tabla 2.1. Teorías y modelos que han servido para el modelamiento de la economía circular

Autor/Escuela	Año	Descripción de su aportación	Referencia
Ludwig Von Bertalanffy	1952	Biólogo que creó un modelo sistémico a partir de las áreas de psicología, sociología, biología y filosofía, con el objetivo de beneficiar a la sociedad y al medio ambiente dentro de la industria.	Laszlo, E. 1972
Kenneth Boulding	1966	Economista que introdujo a la economía como un sistema circular y prerrequisito para el mantenimiento de la sostenibilidad humana en la tierra.	Boulding, 1980
Raymond Vernon	1967	La teoría del ciclo de vida del producto muestra la relación que existe entre los avances tecnológicos y la industria.	Gits, 1992
John Lyle	1978	La teoría de diseño regenerativo se basa en sistemas que podrían organizarse para generar fuentes de materia y energía, que a su vez pueden ser auto-consumibles o aprovechados por otros sistemas.	Daly, 2007
Informe Brundtland,	1982	El desarrollo sostenible, se define en satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades.	Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo (Ayres, 1989)
Walter Stahel	1986	El modelo de la economía del rendimiento, se basa en la importancia de vender servicios en lugar de productos.	Stahel, 2013
Pearce y Turner	1989	Economistas ambientales que explican sobre el cambio del sistema económico tradicional (lineal) hacia un modelo de economía circular, como consecuencia de la ley de la termodinámica.	Ghisellini, 2015
Smith, Meadows, Goldsmith, Birat, Owens, Catellani *et al.*	1991-presente	El análisis de ciclo de vida permite recolectar datos e información de todas las entradas y salidas de los procesos para la fabricación de productos, de esta manera, ofrece información referente a los impactos ambientales que pueden generar dichos procesos.	Birat, 2015; Castellani *et al.*, 2015.
Graedel y Allenby	1995 - presente	La ecología industrial se define como “el medio por el cual la humanidad puede abordar y mantener deliberadamente la sostenibilidad, dada la continua evolución económica, cultural y tecnológica.”	Graedel y Allenby, 1995
Braungart y McDonough	2002 - presente	El modelo de la cuna a la cuna, se basa en considerar a los materiales de entrada a los sistemas como nutrientes biológicos, que son aprovechados para manufacturar bienes y los residuos generados servirán como materia prima para otros procesos.	Braungart y McDonough, 2002
Gunter Pauli	2010 - presente	El modelo de economía azul, se centra en utilizar los recursos disponibles en el sistema a manera de cascada, si se genera un residuo, éste alimentará un nuevo sistema.	Pauli, 2013

Fuente: Elaboración propia

- **Ludwig Von Bertalanffy (1952)**. Este autor, biólogo, investigó acerca del pensamiento sistémico en las áreas del conocimiento como la psicología, la sociología, la biología y la filosofía. Juntó estas disciplinas para crear un modelo sistémico que beneficie a la sociedad y el medio ambiente dentro de los modelos industriales (Laszlo, 1972).

- **Kenneth Boulding (1966).** En los años 60, este economista tomó las investigaciones de Von Bertalanffy y las relacionó con el desarrollo económico y la evolución biológica. Fue uno de los primeros autores que introdujo a la economía como un sistema circular y prerrequisito para el mantenimiento de la sostenibilidad humana en la tierra (Boulding, 1980).

- **Teoría del ciclo de vida del producto (1967).** Esta teoría económica fue desarrollada por Raymond Vernon. Su objetivo fue mostrar la relación que existe entre los avances tecnológicos y la industria. En esta teoría, el ciclo de vida de un producto se compone de dos fases y una etapa de transición. La primera fase se caracteriza por la variedad tecnológica del producto, sus características específicas e innovadoras que cumplirán con las necesidades que exige el cliente. En esta fase inicial, la producción se lleva a cabo en el mismo lugar donde fue inventado el producto y se exporta a países con tecnología, demanda y nivel de desarrollo similar. La fase de transición está compuesta por las diferentes fuerzas de mercado que copian el producto original. Por último, en la fase final el mercado deja de crecer y solamente queda las industrias capaces de fabricar el producto al menor costo. En esta última fase se selecciona un producto y diseño dominante.

- **Teoría de Diseño Regenerativo (1978).** A fines de los años 70, John Lyle desarrolló un concepto en el cual todos los sistemas podrían organizarse de forma regenerativa, tal y como ocurre en la naturaleza. Dándose así procesos que podrían renovarse o generar fuentes de materia y energía, que a su vez pueden ser auto-consumibles o aprovechados por otros sistemas (Daly, 2007).

- **Desarrollo Sostenible (1982).** Un estudio realizado por investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT, *por sus siglas en inglés*), Meadows y colaboradores, en el año de 1972, sobre *Los Límites del Crecimiento*, desencadenó una gran polémica a nivel mundial. Este libro sostiene que la naturaleza es limitada, tanto en recursos disponibles como en su capacidad por amortiguar los impactos ambientales. En el año de 1982, la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, de la Organización de las Naciones

Unidas (ONU), elaboró un documento titulado *Nuestro Futuro Común*. Este informe se lo conoce también como Informe Brundtland. Este documento proporciona una visión crítica del modelo de desarrollo económico adoptado por los países industrializados y emergentes, y destaca la incompatibilidad entre los modelos de producción, consumo y el uso de los recursos naturales. Con base a ello se determinó, por primera vez, el término *Desarrollo Sostenible*, su definición se basa en satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades (Ayres, 1989; Lehtoranta *et al.*, 2011).

- **Modelo de la Economía del Rendimiento (1986).** Walter Stahel a lo largo de su trabajo en el Instituto Product-Life en Suiza, enfatizó la importancia de vender servicios en lugar de productos. Sus investigaciones se centraron en cuatro objetivos: a) entender la vida útil de los productos, b) alargar la vida útil de un servicio, c) actividades de re-acondicionamiento, y c) prevención de generación de residuos. Este modelo de economía de rendimiento lleva hacia a los principios de la economía circular, donde ya no se compran bienes sino simplemente servicios (Stahel, 2013).

- **Pearce y Turner (1989).** Estos economistas ambientales continuaron con los estudios de Boulting. En sus investigaciones, explican el cambio del sistema económico tradicional (lineal) hacia un modelo de economía circular, como consecuencia de la ley de la termodinámica que dictamina la transformación de la materia y la energía. Según estos investigadores, el entorno y los sistemas económicos de las industrias pueden ser identificados bajo estas tres funciones: a) provisión de recursos o materia prima; b) sistemas de soporte y mantenimiento; y c) generación residuos (sólidos, líquidos y emisiones) (Ghisellini, 2015).

- **Análisis de Ciclo de Vida -ACV- (LCA, por sus siglas en inglés) (1991).** Este análisis permite recolectar datos e información de todas las entradas y salidas de los procesos para la fabricación de productos, de esta manera, ofrece información referente a los impactos ambientales que pueden generar dichos procesos (Birat, 2015). A través de este análisis se pueden diseñar ecológicamente los productos (eco-diseño) integrando todas sus características ambientales provenientes de las etapas iniciales, de desarrollo y fabricación. Las propiedades de un producto, su costo, funcionalidad, rendimiento y su fiabilidad deben considerarse simultáneamente en el proceso de eco-diseño (Castellani *et al.*, 2015).

- **Modelo de la Cuna a la Cuna (2002).** El químico Michael Braungart y el arquitecto Bill McDonough desarrollaron este modelo para ser implementado en procesos industriales y comerciales (Braungart y McDonough, 2002). Los materiales de entrada a los sistemas deben de considerarse como nutrientes biológicos o técnicos, los cuales son aprovechados para manufacturar bienes, sin generar residuos, ya que estos últimos van a servir como materia prima para otros procesos. Es así como surge el término reciclaje que previene y evita la perdida de materia, y reduce el consumo de energía y recursos, lo que produce impactos positivos en el medio ambiente y los seres humanos. Esta filosofía ha permitido crear herramientas de diseño que vayan hacia modelos de economía circular (McDonough, 2003).

- **Modelo de Economía Azul (2010).** Diseñado por el empresario belga Gunter Pauli, este modelo se centra en utilizar todos los recursos disponibles en el sistema a manera de cascada. Si se genera algún residuo, este último se convierte en material que alimente un nuevo sistema o flujo de caja (Pauli, 2013).

- **Ecología industrial (1995 - presente)**. Los investigadores Graedel y Allenby definieron a la ecología industrial (EI) como *el medio por el cual la humanidad puede abordar y mantener deliberadamente la sostenibilidad, dada la continua evolución económica, cultural y tecnológica*. Este modelo requiere que un sistema industrial no sea visto de manera aislada de otros sistemas que lo rodean, sino en sinergia con ellos (Ej. medio ambiente). Según Erkman (1997) la EI introdujo una perspectiva diferente al analizar los sistemas industriales y su medio ambiente como un ecosistema en conjunto, caracterizado por flujos de materiales, energía e información, así como por la provisión de recursos y servicios de la Biosfera. La ecología industrial consta de tres pilares: a) analítico, b) metodológico y c) proactivo. Los dos primeros tienen por objetivo captar información sobre el sistema industrial y sus interacciones entre y con otros sistemas (materia y energía), y el último proactivo, ya que puede ser utilizado por las empresas, organismos internacionales y gobiernos para mejorar su desempeño y resultados y, a través de ellos, generar políticas públicas que permitan generar leyes y regulaciones hacia un desarrollo sostenible (Erkman, 1997, Graedel y Allenby, 1995; Chiu y Geng, 2004).

  La ecología industrial tiene completa relación con la economía circular ya que ambos modelos se enfocan en una mutua retro-alimentación de sistemas, promoviendo la transición

de procesos de ciclos abiertos a cerrados (*closing-loop*s, por sus siglas en inglés) (Chiu y Geng, 2004; Andersen, 2007). La economía circular se basa en los conceptos de EI para el análisis de la operación de sistemas industriales (metabolismo industrial) y la optimización de dichos sistemas. Sin embargo, la EC establece también un nuevo modelo de desarrollo económico, producción, distribución y recuperación de productos (Charonis, 2012). En la EC, los productos y procesos se rediseñan para maximizar el valor de los recursos a través de la economía con la ambición de desacoplar el crecimiento económico del uso de los recursos (UTS, 2015). Zhu y Wu (2007) señalan que la EC debe estar integrada en un marco de economía de estado estable. Finalmente, la Fundación Ellen MacArthur (2013) consideró todo el andamiaje anterior para desarrollar su propia definición, asunto que se ve posteriormente.

2.2 Definición de Economía Circular y principales características

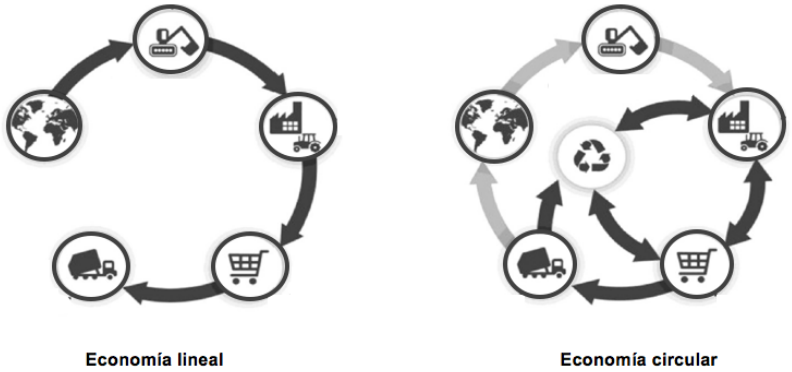
La economía circular es un sistema industrial de ciclos cerrados, donde se analizan los procesos para la fabricación de productos, monitoreo de entradas y salidas de materiales, con el fin de que el sistema no arroje ningún residuo, y en caso de que se generen residuos, éstos sirvan para retroalimentar otras etapas de producción. Por medio de los ciclos cerrados se genera un modelo de desarrollo económico con beneficios ambientales, sociales y un total aprovechamiento de recursos (Su *et al.*, 2013).

Una de las principales características de la EC se basa en optimizar los sistemas económicos de las industrias. Es así como pasan de sistemas lineales a operar de acuerdo a principios cíclicos de materiales, agua y energía; tal y como suceden en los sistemas de la naturaleza (Tukker, 2015). Charonis (2012) mostró que la economía circular trata de superar actuales modelos lineales de producción y consumo, los cuales están basados en modelos económicos que se centran en la explotación y extracción de recursos naturales, sin promover alternativas ambientalmente más favorables para la sociedad.

En la Figura 2.2 se muestra como la economía lineal ignora los impactos ambientales que conlleva el consumo de recursos y la eliminación de residuos, dando como resultado una extracción desmesurada de materiales, contaminación y desechos eliminados en el medio ambiente. Por el contrario, la economía circular tiene en cuenta el impacto del consumo de recursos y los residuos en el medio ambiente. Este modelo circular crea circuitos alternativos

cerrados donde los recursos están en movimientos circulares dentro de un sistema de producción y consumo. Todo esto con el fin de optimizar el uso de recursos vírgenes, reducir la contaminación y reusar los materiales provenientes de los residuos para que reingresen al sistema o sirvan como materia prima para otras industrias (Ghisellini *et al.*, 2015).

Figura 2.2: Esquemas de los modelos de economía lineal y circular



Fuente: elaboración propia a partir de Ghisellini *et al.* (2015)

Una definición generalmente aceptada de EC sigue siendo difícil de alcanzar, lo que motiva a la investigación académica a analizar una amplia gama de conceptos y métodos relacionados para contar con una definición que pueda relacionar los modelos circulares con los pilares de la sostenibilidad (Homrich *et al.,* 2018). Con el fin de tener un marco de referencia en la definición de economía circular, esta investigación se apoya en Kirchherr *et al.* quienes presentan una definición que se adapta a la industria de la electrónica y se enfoca hacia los diferentes niveles o subsistemas productivos-económicos de este sector. Estos autores establecen que la EC describe un sistema que se basa en modelos económicos-industriales que reemplazan el concepto de *final de vida útil* con la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales en los procesos de producción / distribución y consumo, operando así a un nivel micro (productos, empresas, consumidores), nivel meso (parques eco-industriales) y nivel macro (ciudad, región, nación y más), con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible (Kirchherr *et al.*, 2017).

Este estudio también se apoya en investigaciones realizadas por la Fundación Ellen MacArthur (EMF). Este organismo enfoca el concepto de EC como un modelo económico que es restaurativo y regenerativo por diseño, manteniendo los productos, componentes y

materiales con el mayor valor y utilidad en todo momento, diferenciando entre ciclos técnicos y biológicos (EMF, 2013). Las características fundamentales que describen un proceso de economía circular se basan en: a) los residuos no existen y están diseñados por intención; b) la diversidad construye fuerzas y es la clave de la versatilidad y la capacidad de recuperación; c) las fuentes de energía renovables impulsan la economía; d) el pensamiento sistémico se aplica ampliamente; e) los precios deben reflejar los costos totales para que sean efectivos (Song *et al.,* 2012; Urbinati *et al.,* 2017; EMF, 2015).

La economía circular se centra en tres principios (Tabla 2.2), asociados con las características previamente mencionadas y establecidas por EMF. El principio 1 se enfoca en preservar y mejorar el capital natural por medio de la selección de tecnologías y procesos óptimos utilicen recursos renovables. El principio 2 trata de optimizar con la mayor utilidad los recursos, y mantener los componentes técnicos y materiales en circulación dentro de los sistemas para que contribuyan a la economía. Finalmente, el principio 3 se centra en reducir el daño en los sistemas, a través del manejo y diseño eficiente de las externalidades (EMF, 2015).

Tabla 2.2: Principios en los que se basa el Modelo de Economía Circular

Principios	Descripción
Principio 1 Preservar y mejorar el capital natural por medio del control de los recursos finitos y el equilibrio del flujo de los recursos renovables.	La selección de los recursos necesarios debe elegirse en función de tecnologías y procesos óptimos que utilizan recursos renovables o de mejor rendimiento.
Principio 2 Optimizar en todo momento y con la mayor utilidad de rendimiento de los recursos por medio de la circulación de productos, componentes y materiales, tanto en ciclos técnicos como biológicos.	El diseño para la re-manufactura, restauración y reciclaje debe enfocarse en mantener los componentes técnicos y los materiales en circulación para que contribuyan a la economía.
Principio 3 Fomentar la efectividad del sistema al descubrir y diseñar externalidades negativas.	Este principio se enfoca en reducir el daño en los sistemas y áreas como alimentos, movilidad, vivienda, educación, salud y entretenimiento. Además del manejo de externalidades, como el uso de la tierra, aire, agua, contaminación acústica y la liberación de sustancias tóxicas.

Fuente: elaboración propia basada EMF (2015)

Los modelos de economía circular han sido adoptados y están siendo implementados en diferentes tipos de empresas e industrias, dónde han demostrado que la transición hacia este modelo debe trabajarse de manera conjunta entre todos los actores tales como el gobierno, organismos no gubernamentales, la academia, recicladoras y, principalmente, el consumidor. Los casos de éxito también señalan la necesidad de un retorno económico de la inversión, con el fin de motivar a las empresas y a los inversionistas. Debe existir un equilibrio sustentable para que el gobierno y las industrias inviertan en modelos circulares que disminuyan los impactos ambientales y generen equidad social (Directiva Europea, 2012).

2.3 Economía Circular en el sector de los productos electrónicos

Si la industria electrónica se mueve hacia un modelo de economía circular, es necesario un replanteamiento del diseño, uso y gestión del producto. Con un adecuado reciclaje de residuos electrónicos las oportunidades económicas, basadas en la recuperación de materiales, podrían valer hasta USD 11.5 mil millones de dólares, considerando que cada año se envía un promedio de 1.500 millones de teléfonos celulares a nivel mundial (Techwalls, 2017). Además, es de gran importancia contar con datos e información certera sobre la generación y manejo de residuos electrónicos en cada país, a fin de analizar todos los escenarios y procesos que involucra la implementación de la EC en el sector de los productos electrónicos.

La Fundación Ellen McArthur declaró la importancia de repensar el diseño de los productos electrónicos para permitir la reutilización económica de sus componentes y materiales. Sin embargo, si los consumidores continúan enviando a basureros/rellenos sanitarios o almacenando sus equipos electrónicos obsoletos, el impacto de un mejor diseño y recuperación de los materiales es limitado. Si se adoptan nuevos modelos de negocio basados en ciclos circulares, se podrá lograr una mayor circularidad del producto y un mejor cálculo y aprovechamiento económico de sus residuos (EMF, 2017).

En las últimas dos décadas, la generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) ha aumentado exponencialmente en todo el mundo. El último informe mundial sobre residuos electrónicos de la Universidad de las Naciones Unidas estimó que en 2016 se generaron 44,7 millones de toneladas de RAEE a nivel mundial, y las pérdidas económicas de materia prima no recuperada ascienden a USD $ 55 mil millones de dólares

(Accenture, 2018). De los 44,7 millones de toneladas de RAEE, 435 mil toneladas correspondieron a teléfonos móviles.

Solo el 20% de los residuos electrónicos se recolectan y reciclan en condiciones adecuadas, mientras que los RAEE restantes se tiran a la corriente de desechos residuales o se descargan, comercializan o tratan sin condiciones estandarizadas ni seguras (Baldé *et al.,* 2017). La mala calidad en la gestión y el reciclaje de los residuos electrónicos puede exponer a las personas y al medio ambiente a productos químicos tóxicos cuando estos productos no son procesados en instalaciones de reciclaje formal (Perkins *et al.*, 2014). Con un adecuado manejo y gestión de residuos electrónicos, se podría generar un modelo económico circular que aporte beneficios ambientales y sociales, así como un mejor aprovechamiento de los recursos.

En la industria electrónica, la filosofía de la EC se centra en el eco-diseño, reúso, reparación, reacondicionamiento, re-manufactura y reciclaje de un producto para aumentar su tiempo de vida útil (Urbinati *et al*., 2017; Homrich *et al.,* 2018; Kirchherr *et al.*, 2017). Esta industria está desarrollando estrategias para la reutilización de componentes a partir de RAEE, hay compañías que están abriendo la puerta a procesos de valor basados en el cierre de bucles (*closing loops*, término en inglés) y la reutilización de materiales EEE como una cascada para múltiples aplicaciones y fabricación de nuevos productos. Baldé *et al.* (2017) determinó que el reciclaje sigue siendo parte esencial del modelo de EC y es imperativo que los componentes de los residuos electrónicos se separen y se recuperen sus materiales.

En el contexto de la CE en productos electrónicos, los consumidores son uno de los principales actores que deciden el destino final de un equipo eléctrico y electrónico (EEE). Por ejemplo, si un usuario decide cambiar su dispositivo por un nuevo modelo, él o ella decidirá venderlo o regalarlo o entregarlo a un reciclador, de esta manera, los materiales volverán a ingresar al sistema circular. Sin embargo, si el usuario decide tirar a la basura o almacenar, los materiales se perderán y saldrán del sistema. Además, si los equipos electrónicos terminan en manos de recicladoras, se encargarán de reparar, re-acondicionar o separar los componentes valiosos para volverlos a usar en la fabricación de otros productos (Korhonen *et al.*, 2018).

A partir del año 2016 la Secretaría Federal de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT), en cooperación con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), están analizando a los actores involucrados en la generación y gestión de residuos electrónicos en México. Esta alianza se originó ante la importancia de generar datos e información actualizada para poder generar leyes y políticas públicas para una adecuada

gestión de los RAEE, además de determinar si es factible la EC en el sector de electrónicos en México (INE, 2007; INECC, 2012; Alcántara *et al*., 2016; Cruz *et al*., 2017).

2.4 El caso de los teléfonos celulares: mapeo de flujo de materiales en teléfonos celulares

Los modelos de economía circular para productos electrónicos proporcionan mecanismos para extender la vida útil del equipo y recuperar sus materiales para que ingresen nuevamente en el sistema (Korhonen *et al.* 2018; Cruz *et al.*, 2017). Para que este modelo sea viable se necesita conocer los escenarios y procesos por donde fluyen los EEE, particularmente los teléfonos celulares. Se han desarrollado varias herramientas para identificar, analizar y evaluar estos flujos de materiales en un sistema. Una de estas herramientas es el mapeo de flujo de materiales que proporciona información útil para poder conocer y extender el tiempo de vida útil de un celular (Badiru *et al*., 2013; Parajuly, 2017).

El análisis de flujo de materiales (AFM) es una herramienta que permite evaluar las corrientes por donde fluye un producto. Diferentes investigadores como Korhonen *et al.* (2018), Yu *et al.* (2010), Turner *et al.* (2016) y Kiddee *et al.* (2013) indican que el AFM es una herramienta de toma de decisiones que permite evaluar y determinar una adecuada gestión ambiental de productos y residuos. Se utiliza para estudiar la ruta de los componentes / materiales que fluyen a través de diferentes procesos (reparación, reacondicionamiento, re-manufatura, reciclaje) hasta sus destinos finales, como la recuperación de materiales, vertederos, incineración, entre otros. El AFM se aplica a la gestión de los residuos electrónicos para caracterizar las etapas de los productos electrónicos y para desarrollar una gestión adecuada de sus residuos electrónicos, teniendo en cuenta indicadores ambientales, económicos y sociales (Zeng *et al.*, 2014; Guilherme *et al.*, 2018).

Los teléfonos celulares están compuestos por una combinación de materiales peligrosos y no peligrosos. Por medio del AFM se podrán estudiar las rutas de los materiales y mejorar los escenarios para respaldar el desarrollo de un sistema adecuado de manejo y gestión de los RAEE (Urbinati *et al.*, 2017; Cruz *et al.*, 2017). La Tabla 2.2 presenta un análisis comparativo de diferentes metodologías utilizadas para obtener datos e información de mapeo de flujo de materiales. Esta investigación tomó como base estudios realizados por Yu *et al*. (2017), Ghosh *et al*. (2015), Baldé *et al*. (2015), y Kumar *et al*. (2010), quienes evaluaron los procesos por

donde circulan los RAEE, desde su manejo (uso por parte del consumidor), generación de residuos, reparación, reciclaje y flujo de materiales de los residuos con su cálculo económico de ganancias o pérdidas de acuerdo al mercado internacional.

La generación de residuos electrónicos está directamente relacionada con el producto interno bruto (PIB) de un país. Estudios de Yu *et al*. (2017), Baldé *et al*. (2015) y Kumar *et al*. (2010), demostraron que el consumo de teléfonos celulares está entre 1 y 1.1 teléfonos por persona. A medida que aumenta el PIB de un país la generación de dichos residuos aumenta a una tasa similar. De igual manera, Baldé *et al*. (2015), correlacionaron el total de residuos electrónicos generados en 50 países con sus PIB y el tamaño de sus poblaciones y confirmaron que estos tres factores están correlacionados.

Los modelos de economía circular en el sector de productos electrónicos analizan también los escenarios de reparación y reciclaje de residuos. La Tabla 2.2 muestra cómo diferentes autores han evaluado dichos para determinar la viabilidad de migrar hacia un modelo CE (Yu *et al*., 2010; Baldé *et al*., 2015; Ghosh *et al*., 2015). El análisis de los procesos de reparación, gestión y reciclaje de equipos electrónicos permite determinar la tecnología disponible en un país en particular. Por lo tanto, un análisis de flujo de materiales facilita la determinación y análisis de las múltiples entradas y salidas de materiales en un sistema determinado.

La mayoría de países de economías emergentes tienen procesos básicos de reciclaje, como separación manual de componentes, junto con trituradoras, separadores de metales y compactadores, y muy pocos recicladores recuperan algunos materiales como oro, cobre, cobalto y estaño. Baldé *et al.* (2015) y Ghosh *et al*. (2015) analizaron la industria del reciclaje electrónico y sus procesos finales de recuperación de materiales a través de separación física, química y/o biológica (Tabla 2.3). Con el fin de determinar el nivel de reciclaje tecnológico que puede tener un país y analizar la factibilidad para recuperar materiales localmente mediante dichos procesos. Estos estudios demostraron que los países emergentes no tienen tecnologías de procesamiento final para recuperar todos los materiales, principalmente la tarjeta de circuitos impresos (PCB), componente con mayor importancia económica en un teléfono celular.

Tabla 2.3. Análisis de los procesos por donde fluyen los residuos de teléfonos celulares, comparación de metodologías de reportes de campo y estudios internacionales.

Procesos	Metodología	Estudio actual	Yu *et al.* 2010*	Ghosh *et al.* 2015*	Baldé *et al.* 2015*	Kumar *et al.* 2017*
Generación	Análisis del producto interno bruto para el cálculo de generación de residuos celulares.	✓	✓		✓	✓
Reparación	Revisión de literatura y análisis de bases de datos.	✓	✓		✓	✓
	Investigaciones de campo y entrevistas a empleados.	✓				
	Análisis de instalaciones, equipos y herramientas.	✓				
	Análisis del nivel académico de los empleados	✓				
	Análisis de procedimientos ambientales y condiciones de seguridad y salud.	✓				
Reciclaje	Revisión de literatura y análisis de bases de datos.	✓	✓	✓	✓	✓
	Investigaciones de campo (entrevistas)	✓				
	Análisis de instalaciones, equipos y herramientas	✓				
	Evaluación técnica de los empleados	✓				
	Determinación de la composición de los residuos electrónicos.	✓	✓	✓	✓	✓
	Análisis de procesos de separación manual y mecánica	✓		✓	✓	
	Análisis de tecnologías de procesamiento final: separación física, química y / o biológica.			✓	✓	
Análisis de flujo de materiales	Pruebas de desensamblado manual	✓				
	Balance de masa	✓	✓			✓
	Análisis económico	✓	✓		✓	✓

* Estudios internacionales.

Fuente: preparado por la autora con base a los resultados de campo y revisión de literatura (Yu *et al*., 2010; Baldé *et al*., 2015; Ghosh *et al*., 2015; Kumar *et al*., 2017)

2.5 Conclusiones

- El creciente interés internacional en modelos de economía circular ha permitido que grupos interdisciplinarios, tanto de la academia como de la sociedad civil y gobierno, desarrollen estrategias para diagnosticar y evaluar el estado de las industrias, y cómo potenciarlas para moverse hacia modelos circulares. Por consiguiente, es importante establecer una adecuada definición de EC, así también determinar los actores, condiciones y procesos para analizar los productos o servicios desde la *cuna a la tumba* y moverse hacia modelos de la *cuna a la cuna.*
- La mutua cooperación entre los gobiernos, empresas, sociedad civil y la academia han podido comprobar que la EC genera grandes oportunidades de progreso y crecimiento económico, por medio de un adecuado aprovechamiento de recursos y un mayor control, periódico, de las variables ambientales, sociales y económicas.

- En América Latina, particularmente en México, el concepto de economía circular es nuevo, su desarrollo e investigación ha iniciado tanto en la academia como en el gobierno e industria. El estudio de este modelo en el sector industrial debe partir de información actualizada de procesos y análisis de los actores que están involucrados en la fabricación, manejo y reciclaje de un producto. En el caso de los productos electrónicos en el país, el consumo, manejo y disposición final de sus residuos carecen de datos relevantes y actualizados. Por este motivo, la investigación se centró en analizar los materiales que contiene un equipo eléctrico y electrónico (específicamente teléfonos celulares) y la manera cómo dichos elementos circulan dentro de un sistema.

- La industria electrónica puede girar bajo modelos circulares, siempre y cuando se piense primero en el eco-diseño de un producto. Al pensar y evaluar los materiales que van a componer un equipo electrónico directamente se podrán determinar los residuos que ese producto va a generar. Lo que a su vez conlleva a analizar los procesos por los que fluye un EEE obsoleto, para extender su tiempo de vida útil o recuperar sus materiales para reingresar en el sistema industrial.

- La economía circular presenta grandes beneficios y oportunidades de progreso a nivel social, ambiental y económico. Por ejemplo, A nivel social se podrá estimular la industria local y el reciclaje formal, generando más oportunidades de trabajo en condiciones de seguridad y salud adecuadas. En el caso ambiental, los países podrán recuperar materiales a partir de productos obsoletos y residuos, disminuyendo la explotación de fuentes no renovables. Finalmente, el ámbito económico habrá más inversiones, la recuperación de materiales traerá ganancias de miles de millones de dólares, además que las industrias podrán adquirir incentivos económicos y tecnológicos.

Capítulo 3

Mapeo de flujo de materiales en residuos de teléfonos celulares

Este capítulo tiene como objetivo brindar al lector una visión de la situación actual de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). A continuación se presentan las leyes y reglamentos que están sujetos los fabricantes, importadores, exportadores y distribuidores de equipos electrónicos. También indica la situación actual sobre la gestión de los electrónicos, junto con diferentes estudios realizados por organismos nacionales, como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), los cuales realizaron un inventario de generación aparatos electrónicos México y sus proyecciones para los siguientes años. Finalmente, se presentan los resultados del comportamiento del consumidor mexicano, y la situación del reciclaje en el país en un estudio realizado por el INECC en los años 2009 y 2012.

3.1 Definición de residuos electrónicos, composición e impactos socio-ambientales

A lo largo de las dos últimas décadas, la generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) ha ido incrementando exponencialmente a nivel mundial. Esto se debe al enorme aumento de consumidores y, a su vez, a un mal manejo de gestión integral de dichos residuos (Veit, 2014; Miller *et al.,* 2016). Es innegable que estos equipos tecnológicos han permitido la integración y bienestar de las personas, sin embargo, su gran demanda ha generado un enorme crecimiento de sus residuos. Por este motivo, se requiere en manejo integral adecuado por parte de diferentes actores, como son la industria, consumidores,

empresas recicladoras, organismos no gubernamentales (ONG) y gobierno (Singh, 2016; Kumar *et al.,* 2017).

Para una adecuada gestión de los residuos electrónicos, primero se requiere conocer y entender su concepto; sin embargo, su definición dependerá del país de procedencia, autor e incluso organismo internacional. En el año 2014, el Consejo de las Naciones Unidas desarrolló una iniciativa internacional para desarrollar soluciones con el objetivo de resolver problemas relacionados con los RAEE, esta iniciativa se llama Step (*Solving the e-waste problem*s, por sus siglas en inglés). Este consejo estableció que el residuo electrónico es un término usado para cubrir todos los artículos de equipos eléctricos y electrónicos, y todas sus partes que han sido descartadas por su propietario, como desechos sin la intención de volver a usarlos. Los RAEE incluyen una amplia gama de productos, casi cualquier equipo con circuitos de componentes eléctricos con batería o energía (Iniciativa Step, 2014; Kumar *et al*., 2017). A continuación se presenta la Tabla 3.1 en la que muestran a renombrados autores, organismos internacionales y gobiernos a nivel mundial que definen el concepto de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Tabla 3.1: Definición de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos por diferentes autores y organismos internacionales

Autor/ Organización / País	Definición
Puckett y Smith (2002)	Los residuos electrónicos abarcan una amplia y creciente gama de equipos electrónicos, que van desde grandes aparatos domésticos como refrigeradores, estufas, aires acondicionados, a medianos y pequeños equipos como computadores, impresoras, teléfonos celulares, equipos de música personal y, en general, productos electrónicos de consumo que han sido descartados por sus usuarios.
Pongrácz *et al.* (2008)	Los equipos electrónicos se convierten en residuos, en el momento y el lugar, cuando su estructura y estado ya no son capaces de proporcionar el rendimiento esperado, con respecto a la finalidad asignada por sus propietarios.
Morselli (2009)	Dispositivo electrónico que por razones funcionales dependa de las corrientes eléctricas y los campos electromagnéticos para funcionar correctamente. Este aparato se convierte en residuo electrónico cuando su propietario lo descarta.
Directiva Europea de RAEE (2012)	Todos los equipos eléctricos y electrónicos obsoletos, que dependen de corriente eléctrica o campos electromagnéticos, para funcionar correctamente y, equipos para la generación, transferencia y medición de tales corrientes y campos.
SEMARNAT (2013)	Aquellos que provienen de residuos tecnológicos de la industria de la información y la comunicación, fabricantes de productos electrónicos o vehículos de motor y otros que, por sus características, requieren una gestión específica.
OCDE (2014)	Cualquier equipo que usa energía eléctrica como fuente de alimentación y haya llegado al final de su vida útil.

Tabla 3.1: (Con't)

Iniciativa Step (2014)	Todos los artículos de equipos eléctricos y electrónicos y todas sus piezas, que su propietario haya desechado como residuo sin la intención de volver a usarlos. Los residuos electrónicos incluyen una amplia gama de productos, cualquier equipo con circuitos de componentes eléctricos provistos con baterías o energía.

Fuente: Elaboración propia a partir de Kumar *et al.* (2017, pp. 12); Pongrácz *et al*. (2008); SEMARNAT (2013, pp. 4); OECD (2014); Iniciativa Step (2014).

Cada residuo electrónico tiene sus propias características basadas en su funcionalidad, peso, tamaño y material. Por lo tanto, sus características al final de su vida útil, determinarán la categoría a la que cada RAEE será manejado y tratado, evitando de esta manera posibles impactos ambientales y daños en la salud (Gartner, 2014). Con base a las características de los equipos eléctricos y electrónicos, el Consejo Europeo de RAEE determinó diez categorías de desechos electrónicos, que están reconocidos en todo el mundo, los cuales se describen en las reglamentaciones de la Unión Europea, y se ilustran a continuación en la Tabla 3.2. Estas diez categorías se clasifican con base al tamaño del equipo (grande o pequeño), uso (consumo, ocio) o funcionalidad (iluminación, salud, monitoreo y control).

Tabla 3.2: Categorización de los residuos electrónicos bajo lineamientos de la Unión Europea

Categorías	Ejemplos
1) *Electrodomésticos grandes*	Frigoríficos, cocinas, microondas, lavadoras y lavavajillas
2) *Electrodomésticos pequeños*	Aspiradoras, planchas, tostadoras y relojes
3) *Equipos de telecomunicaciones e IT*	Computadoras personales, equipos de copiado, teléfonos y calculadoras de bolsillo
4) *Equipo de consumo*	Radios, televisores, equipos de alta definición (*hi-fi*, por sus siglas en inglés), videocámaras e instrumentos musicales
5) *Equipo de iluminación*	Tubos fluorescentes rectos y compactos, y lámparas de descarga de alta intensidad
6) *Herramientas eléctricas y electrónicas, excepto herramientas industriales estacionarias de gran escala*	Taladros, sierras y máquinas de coser, cortadoras de césped eléctricas.
7) *Juguetes, ocio y equipamiento deportivo*	Trenes eléctricos, consolas de juegos y máquinas de correr.
8) *Dispositivos médicos, además de todos los productos implantados e infectados*	Máquinas de diálisis, analizadores, congeladores médicos y equipos de cardiología
9) *Monitoreo y control*	Detectores de humo, termostatos y reguladores de calefacción.
10) *Dispensadores automáticos*	Dispensadores de bebidas calientes y dispensadores de dinero.

Fuente: Widmer *et al*. (2005); Gaidajis *et al.* (2010); Directiva Europea WEEE (2012)

A partir del año 2018, la Directiva Europea actualizó esta categorización y estableció que todos los RAEE deben unificarse en seis categorías, que se muestran en la Tabla 3.3. Dichas categorías engloban a los equipos eléctricos y electrónicos con base a su tamaño (equipos grandes y pequeños), características (lámparas) y funcionalidad (intercambio de temperatura) (Baldé, 2015). Esta nueva categorización ha sido aceptada y actualizada por varios gobiernos, y reconocida por la Universidad de las Naciones Unidas para uso internacional.

Tabla 3.3: Categorización de los residuos electrónicos bajo lineamientos de la Unión Europea, a partir del año 2018

Categorías	Ejemplos
1) *Equipo de intercambio de temperatura*	Equipo para enfriar y congelar, como refrigeradores, congeladores, aires acondicionados, bombas de calor
2) *Pantallas, monitores*	Televisores, monitores, computadoras portátiles, computadoras portátiles y tabletas
3) *Lámparas*	Lámparas fluorescentes rectas, lámparas fluorescentes compactas, lámparas fluorescentes, lámparas de descarga de alta intensidad y lámparas LED
4) *Equipos grandes*	Lavadoras, secadoras de ropa, lavadoras de platos, estufas eléctricas, impresoras grandes, equipos de copiado y paneles fotovoltaicos
5) *Equipos pequeños*	Aspiradoras, microondas, equipos de ventilación, tostadoras, hervidores eléctricos, máquinas de afeitar eléctricas, balanzas, calculadoras, aparatos de radio, cámaras de video, juguetes eléctricos y electrónicos, pequeñas herramientas eléctricas y electrónicas, pequeños dispositivos médicos, pequeños instrumentos de monitoreo y control.
6) *Equipos pequeños de TI y telecomunicaciones*	Teléfonos móviles, GPS, calculadoras de bolsillo, enrutadores, computadoras personales, impresoras, teléfonos.

Fuente: Elaboración propia a partir de Baldé (2015, pp. 11-15, 24); Directiva Europea WEEE (2012)

Composición de los residuos eléctricos y electrónicos (RAEE)

La industria del reciclaje puede recuperar materiales contenidos en los residuos electrónicos, reusarlos o venderlos como materia prima secundaria para otras industrias. Sin embargo, todo esto dependerá de la composición de materiales de dichos residuos (Cucchiella *et al.*, 2015). Los RAEE contienen más de 60 metales diferentes, incluidos metales preciosos como cobre, oro, plata, paladio, aluminio y hierro (Namias, 2013). De acuerdo con Jirang & Roven, 2011; Xu *et al.,* 2012 y, Reck y Graedel, 2012; la composición química de los desechos electrónicos varía

según la edad y el tipo del producto descartado. En la Tabla 3.4 se presenta la concentración en miligramos de oro, paladio y plata presentes en un kilogramo de equipos eléctrico, tales como televisores, teclados, celulares, etc. y un kilogramo de mineral extraído de la mina sin ser aún purificado. Por ejemplo, un kilogramo de material extraído de una mina contiene 1.01 mg de oro, 2.7 mg de paladio y 215.5 mg de plata; mientras que de un kilo de celulares se puede extraer 340 mg de oro, 130 mg de paladio y 3500 mg de plata. Para el caso del oro entre la roca minera y el celular es de 1 en 340.

Tabla 3.4: Concentración de oro, paladio y plata en un kilogramo de equipos electrónicos y en un kilogramo de mineral

Producto	Oro (mg/kg)	Paladio (mg/kg)	Plata (mg/kg)
Tablero de TV	20	10	280
Panel de computadora	250	110	1000
Celular	340	130	3500
Residuos de audios portátiles	10	4	150
Residuos de DVD	15	4	115
Electrónicos promedio	127	51.6	1009
Mineral/mina	1.01	2.7	215.5

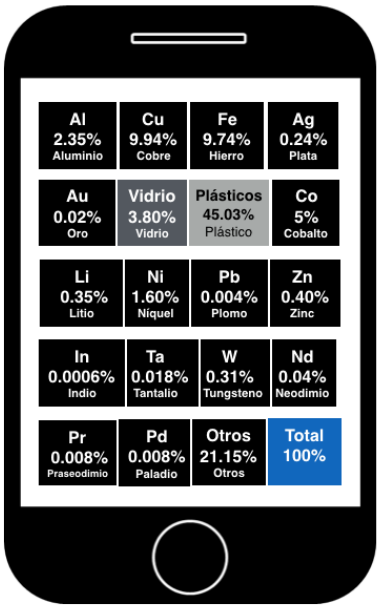
Fuente: Elaboración propia a partir de Desjardins (2014, Tabla 7-9, pp. 36); Investing News Network (2016); McLeod (2014); Vincic (2015)

Estudios realizados por Cucchiella *et al.* (2015) y Namias (2013), muestran cinco categorías de materiales que componen los residuos electrónicos: metales ferrosos, metales no ferrosos, vidrio, plásticos, tierras raras y otros materiales. La mayoría de los RAEE se componen de una mezcla de dichos metales, particularmente cobre, aluminio y hierro, que se adhieren o se cubren con una mezcla de diferentes tipos de cerámicas y plásticos. Investigaciones realizadas por Vincic (2015) confirman que algunos metales de alta tecnología son ampliamente utilizados en una variedad de productos electrónicos, como antimonio, cobalto, litio, tántalo, tungsteno y molibdeno, los cuales, son esenciales para las tecnologías modernas de comunicación y teléfonos móviles. Otra categoría de materiales son las tierras raras como cerio (Ce), neodimio (Nd), lantano (La), las cuales tienen diferentes funcionalidades y sirven, por ejemplo, como imanes, aleaciones de batería, aditivos de vidrio, cerámica, entre otros (Luidold y Antrekowitsch, 2012).

Las categorías de metales ferrosos y no ferrosos se pueden encontrar en mayor proporción en las tarjetas madre o tarjetas de circuitos impresos (*printed circuit boards* -PCB- por sus siglas en inglés). Este componente es una de las partes más valiosa de los residuos electrónicos, ya que contiene un porcentaje significativo de metales preciosos, como oro, plata, platino y paladio. Sin embargo, estudios realizados por Alonso *et al.* (2012) y Tanaka *et al.* (2013) muestran que la tendencia de los nuevos productos electrónicos se basa en disminuir los metales y reemplazarlos con tierras raras. Estos últimos elementos se encuentran en mayor porcentaje en la naturaleza y su extracción causa menores impactos socio-ambientales y económicos, haciendo que sean cada vez más importantes en la transición a una economía verde y baja en carbono.

A través de la Figura 3.1 se puede apreciar la composición simplificada, en peso, de un celular. Uno de los principales materiales que conforma un celular es el plástico con un porcentaje del 45%. En segundo lugar se encuentra el cobre con casi 10%; el hierro que se halla en un 9.74%. A estos materiales le sigue el cobalto con un 5%, acompañado del vidrio y aluminio con porcentajes de 3.80 y 2.35, respectivamente. Para el caso de los metales se puede ver que su porcentaje es menor del 2%, como el caso del oro (0.02%), plata (0.24%), níquel (1.60%), zinc (0.40%). Por último, se encuentran las tierras raras como el neodimio (0.04%) y el praseodimio (0.008%) (Navazo *et al.*, 2013).

Figura 3.1: Composición por peso de un teléfono celular (porcentaje)



Fuente: Elaboración propia a partir de Navazo *et al.* (2013); Baldé *et al.* (2015)

Investigaciones realizadas por Cucchiella *et al.* (2015) muestran una recopilación bibliográfica referente a la composición de residuos electrónicos en China, Europa y Estados Unidos. Estos autores se enfocaron en analizar la composición, por gramo de material, de cinco equipos electrónicos, tales como laptop, televisor, computadora, celular y tableta. En la Tabla 3.5 se encuentran 41 materiales que componen los diferentes residuos de equipos electrónicos, donde se pueden destacar aluminio, metales preciosos, metales ferrosos, metales no ferrosos, vidrio, acero y tierras raras. No todos los materiales se pueden encontrar en los mismos equipos. Por este motivo se indica con las letras NA los materiales que no aplican en cada producto. Para el caso de los celulares, que es donde se va a centrar esta investigación, se puede mencionar que sus principales materiales son: aluminio, cadmio, cobre, galio, vidrio, indio, molibdeno, plástico, selenio, silicio, telurio, estaño y zinc.

Tabla 3.5: Composición en gramos de residuos de los cinco equipos electrónicos seleccionados

Materiales	Laptop	Televisor LCD	Computadora	Celular	Tableta
Aluminio	NA	NA	130	1370	NA
Antimonio	0.77	0.71	NA	NA	0.154
Arsénico	0.01	NA	NA	NA	0.002
Bario	2.5	NA	NA	NA	0.49
Cadmio	NA	NA	NA	0.407	NA
Cerio	0.001	0.005	0.001	NA	0.001
Cromo	0.07	NA	NA	NA	0.014
Cobalto	0.065	NA	NA	NA	0.013
Cobre	135	824	NA	78	27
Disprosio	0.06	NA	NA	NA	0.012
Galio	0.0016	NA	0.003	0.119	NA
Vidrio	NA	162	590	6915	NA
Oro	0.22	0.11	0.2	NA	0.044
Indio	0.04	0.003	0.079	0.119	0.008
Lantano	0.001	0.007	0.001	NA	0.001
Plomo	5.3	NA	16	NA	1.1
Mercurio	0.001	NA	0.001	NA	0.001
Molibdeno	0.04	NA	0.633	0.295	0.008
Neodimio	2.1	NA	NA	NA	0.427
Níquel	3.6	NA	NA	NA	0.722
Paladio	0.04	0.044	0.04	NA	0.008
Plástico	NA	612	1780	1172	NA
Platino	0.004	NA	NA	NA	NA
Praseodimio	0.274	0.001	0.001	NA	0.055
Selenio	NA	NA	NA	0.119	NA
Silicio	NA	NA	NA	226	NA

Tabla 3.5: (Con't)

Plata	0.25	0.45	0.52	NA	0.05
Acero	0	NA	2530	NA	NA
Tantalio	1.7	NA	NA	NA	NA
Telurio	NA	NA	NA	0.406	NA
Estaño	NA	18	24	0.116	NA
Terbio	0.001	0.002	0.001	NA	0.001
Titanio	NA	NA	0.633	NA	NA
Tungsteno	NA	NA	NA	NA	NA
Itrio	0.002	NA	0.016	NA	0.001
Zinc	0.004	NA	NA	0.4	0.001

Fuente: Elaboración propia a partir de Cucchiella *et al.* (2015, Tabla1, pp. 4-5); Navazo *et al.* (2013); Baldé *et al.* (2015 y 2017); GSMA (2015).

Impactos económicos, sociales y ambientales de los residuos electrónicos

Los posibles impactos de los residuos electrónicos han sido investigados y documentados por varios autores, a nivel mundial, tales como Heacock *et al*. (2015), Velis y Mavropoulos (2016), Garlapati (2016) y Scruggs *et al.* (2016). La Unión Europea ha tratado de desarrollar bases sólidas para un adecuado manejo de RAEE, ya que estos residuos deben ser considerados como recursos y ser usados de una manera eficiente y sostenible (Comisión Europea, 2014). Los residuos electrónicos requieren de procesos integrales de reciclaje, para evitar, por un lado, problemas ambientales, sociales y sanitarios y, por otro lado, pérdidas económicas para gobiernos, fabricantes y recicladoras, al no contar con la tecnología necesaria de recuperación de materiales (Cucchiella *et al.,* 2014).

La industria del reciclaje puede ser considerada como un mercado clave que permita cerrar ciclos para recuperación de materiales. Los impactos económicos que los RAEE traen consigo, abren la posibilidad de crear nuevos productos, a partir de materia prima secundaria recuperada del reciclaje. Desde una perspectiva económica, los procesos de reciclaje de electrónicos pueden ser divididos en tres etapas (recolección, pre-tratamiento y recuperación de materiales valiosos), donde cada una de ellas, requiere de un adecuado manejo integral, con el propósito de alcanzar óptimos resultados económicos (Cucchiella *et al.,* 2015).

Un equipo electrónico que ya no tiene un uso para el primer comprador, puede ser reutilizado, re-acondicionado o reciclado. Cada uno de estos escenarios traen consigo impactos económicos, ambientales y sociales. A través de la reutilización, el dueño del equipo puede

regalarlo o venderlo, generando un beneficio social y/o un ingreso económico. De igual manera, se presenta una extensión de vida útil del equipo, ocasionando un apoyo al medioambiente. Sin embargo, un estudio realizado en el 2014 por Bustamante y Gaustad, demostraron que existen casos donde países desarrollados, envían sus equipos electrónicos obsoletos como donativos hacia países emergentes. Organismos inescrupulosos que organizan estas donaciones y exportaciones, rellenan hasta un 75% los contenedores con residuos electrónicos obsoletos e irreparables.

Por medio del reciclaje se puede recuperar el 95% de los materiales útiles de una computadora y el 45% de materiales de monitores de tubos de rayos catódicos (Baldé *et al.,* 2015). En países como Japón que cuentan con operaciones de reciclaje de alta tecnología, pueden recuperar entre 90%-95% materiales provenientes de residuos electrónicos (CEC, 2016). El primer paso del reciclaje de electrónicos, es la separación mecánica de componentes. Los cuales pueden separarse en partes o componentes para ser reutilizados para la fabricación de otros productos o entrar a procesos físico-químicos de recuperación de materiales. La separación manual puede ser automatizada o trabajada a mano. En los países emergentes el 100% de sus operaciones son manuales y los procesos deben tener estándares de seguridad y salud para el trabajador. Ya que, al no contar con equipos de protección personal, pueden exponerse a contaminantes volátiles y tóxicos para su salud (Ely, 2014).

Desde una perspectiva económica-ambiental y social-económica, estudios realizados por Grossman (2016), Garlapati (2016) y Golev *et al.* (2016) indican que todas las regiones del mundo están contribuyendo al agotamiento de los recursos naturales en diversos grados. Para los países desarrollados, la tasa en la que se descartan los equipos electrónicos es un factor clave para el agotamiento de los recursos, ya que se requiere de una mayor cantidad de materia prima virgen. Adicionalmente, se ha visto que el comportamiento del consumidor en estos países tiende a almacenar sus equipos obsoletos, impidiendo la recuperación de materia prima secundaria y el reingreso de estos materiales a la industria para la producción de nuevos productos.

Los RAEE generalmente se consideran un problema estatal o nacional, los cuales pueden causar impactos ambientales y afectaciones severas a la salud humana si no se gestionan y reciclan adecuadamente (Scruggs *et al.*, 2016). Investigaciones realizadas por Velis y Mavropoulos (2016), muestran que los residuos electrónicos contienen más de 1000 sustancias diferentes, muchas de las cuales son tóxicas, como plomo, mercurio, arsénico, cadmio, selenio, cromo hexavalente y retardantes de llama que crean emisiones de dioxinas

cuando se queman. Baldé *et al.* (2015) encuentran que los materiales peligrosos de los residuos electrónicos pueden causar retraso mental, daño renal y hepático, y liberar al aire carcinógenos que causan daño a los pulmones.

Los empleados que trabajan con residuos electrónicos tienen una exposición directa de estos materiales si no usan los equipos de protección correctos de salud y seguridad; los efectos alterarán su bienestar a corto o largo plazo (Heacock *et al*., 2015). Velis y Mavropoulos (2016) muestran que los recicladores informales queman cables de residuos electrónico para recuperar cobre, y que los procesos de lixiviación ácida para obtener metales preciosos a partir de placas de circuitos impresos, pueden causar daños respiratorios, alergias en la piel, lesiones dérmicas y, a largo plazo, cáncer de pulmón. En países emergentes el reciclaje informal puede manejar entre un 80%-90% del mercado de los RAEE y contratar a menores de edad para procesos de reparación o desensamblado de estos productos (Cucchiella, 2015).

La eliminación de metales en vertederos o la incineración de los RAEE, produce efectos perjudiciales para el medio ambiente y la vida humana, ya que se exponen a productos químicos a través del agua, aire, suelo, polvo o alimentos (Heacock *et al.,* 2015; Robinson, 2009). Por ejemplo, la cantidad de cadmio presente en la batería de un teléfono celular puede contaminar 600 metros cúbicos de agua (Garlapati, 2016). Scruggs *et al*. (2016) demuestra que los consumidores pueden estar expuestos a químicos peligrosos mientras usan productos electrónicos. La Tabla 3.6 indica un resumen de los efectos que diferentes materiales o sustancias presentes en los residuos electrónicos pueden afectar la salud humana, animales y el medio ambiente. Por ejemplo, los Bifenilos policlorados, que se encuentran en condensadores, pueden afectar al hígado y causar afectaciones pulmonares. Otro ejemplo son los metales pesados que se pueden hallar en baterías o en tubos de rayos catódicos de televisores, los cuales pueden ocasionar problemas en la piel, asma, mareos, problemas gastrointestinales e incluso cáncer pulmonar (Baldé *et al.,* 2015; Garlapati, 2016; Scruggs *et al.*, 2016, Kumar *et al.,* 2017).

Tabla 3.6: Efectos de los materiales presentes en residuos electrónicos

Componente	Sustancia	Presencia en residuos electrónicos	Efectos
Halogenados	Bifenilos policlorados (PCBs por sus siglas en inglés)	Condensadores, transformadores, retardantes de flama en plásticos.	Daño hepático, lesiones dérmicas y problemas respiratorios.

Tabla 3.6: (Con't)

Compuestos	Éter difenílico policlorado (PCDE)	Retardantes de flama en plástico	Afecciones sanguíneas, alteración a la tiroides.
	Clorofluorocarbono (CFC)	Unidades de enfriamiento, espumas aislantes.	Asma, inflamación en las vías respiratorias, enfermedades pulmonares y tumores cancerosos.
	Cloruro de polivinilo (PVC)	Plásticos aislantes de cable	Daño hepático, cáncer
Sustancias radioactivas	Américo	Equipo médico, detectores de incendios, elemento sensor activo en detectores de humo	Alteraciones genéticas y cáncer de hueso Daño en órganos, como pulmones, hígado, riñones y tiroides.
Metales	Arsénico	Luz emitida por diodos	Problemas severos de la piel y otros efectos a la salud
	Bario	Tubos de rayos catódicos en televisores (*CRT,* por sus siglas en inglés)	Arritmias cardíacas, disfunción gastrointestinal, daño renal, insuficiencia respiratoria, enfermedades neurodegenerativas, incluida la esclerosis múltiple.
	Berilio	Las cajas de suministro de energía contienen rectificadores controlados de silicio y lentes de rayos X.	Falta de aire, dolores en el pecho, sudores nocturnos y fatiga. Reacción alérgica / dermatitis
	Cadmio	Baterías recargables que contienen Ni-Cd, capa fluorescente en pantallas CRT, tintas y toners de impresora.	Daño a los riñones y a la estructura ósea.
	Cromo IV	Cintas de datos, disquetes.	Asma, bronquitis crónica, faringitis, rinitis, daño de la piel y cáncer de pulmón.
	Plomo	Pantallas CRT, baterías, placas de circuitos impresos.	Efectos irreversibles en el sistema nervioso, especialmente en los niños, se acumulan en el cuerpo a lo largo del tiempo.
	Litio	Baterías de litio	Somnolencia, temblores en las manos, boca seca, náuseas, vómitos, pérdida de apetito, dolor de estómago, cambios en la piel o el cabello.
	Mercurio	Lámparas fluorescentes y pilas alcalinas	Altamente tóxico, daño al sistema nervioso central y los riñones, se convierte a la forma orgánica metilada que es altamente bio-acumulativa.
	Níquel	Baterías recargables que contienen Ni-Cd, televisores de tubos de rayos catódicos (CRT).	Alergias en la piel, erupción cutánea, dermatitis, ataques de asma, cáncer de pulmón y del seno nasal.

Fuente: Elaboración propia a partir de Baldé *et al*. (2015, pp. 51), Kumar *et al.* (2017, Tabla 10-11, pp. 37)

3.2 Políticas y tratados internacionales relacionados con residuos electrónicos

A nivel internacional existen diversas regulaciones para la gestión y manejo integral de los residuos electrónicos. Entre ellas se tienen el Convenio de Basilea, Convenio de Estocolmo y la Directiva Europea de RAEE, junto con la Restricción de la Directiva de Sustancias Peligrosas. Numerosos países emergentes se han adherido a dichos convenios y han tomado como base de sus legislaciones, leyes de países desarrollados, particularmente de la directiva de la Unión Europea. Sin embargo, la realidad de estos países es cada vez más compleja, ya que no existe una adecuada educación ambiental, la gestión de los residuos es ineficiente, además que cada año aumenta el consumo y generación de residuos electrónicos, principalmente, un manejo informal e ilegal en el reciclaje de sus RAEE.

Desde los años 70, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha tomado el mayor protagonismo en el debate internacional a favor de la protección del medio ambiente. En 1972, la ONU llevó a cabo la primera cumbre llamada “Declaración de Estocolmo”, en la cual se fijaron los principios ambientales básicos, y se acordó implementar un Plan de Acción que condujo a la creación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Más tarde en Brasil, año 1992, Naciones Unidas realizó uno de los avances más importantes en el desarrollo del derecho ambiental: la Conferencia de Río. En ella participaron 176 naciones y más de 1200 organizaciones gubernamentales y no gubernamentales (ONG). Entre los logros más importantes de esta conferencia se encuentran el desarrollo de dos convenciones internacionales: cambio climático y biodiversidad, así como el Programa de Acción (Agenda 21) y la Declaración de Río, que estableció las regulaciones normativas para la protección del medio ambiente (UNSD, 2013).

Dentro del derecho internacional se aplican diferentes principios para el manejo de los residuos. Estos principios se relacionan con los residuos electrónicos y el ciclo de vida del producto, los cuales son: el principio de reducción en origen, proximidad, ciclo de vida integrado y responsabilidad extendida del productor –REP- (Miller *et al*., 2016). Con base al derecho internacional y a los convenios internacionales, los países desarrollados han creado sistemas de alto costo para recolectar y tratar sus residuos electrónicos, permitiendo un reciclado apropiado a favor del medio ambiente.

Bajo el esquema del derecho ambiental, la implementación de REP en los países desarrollados ha generado una mayor recolección de RAEE. Esto se debe a que el fabricante no solo respeta los estándares de calidad establecidos para la generación de sus productos,

sino que también asume la responsabilidad del impacto producido al final de la vida útil de su producto (Kumar *et al*., 2017). Internacionalmente existen numerosas iniciativas y normativas para promover el reciclaje y recuperación de materiales a partir de RAEE, bajo estándares aprobados por Naciones Unidas y de derecho ambiental, los cuales se mencionan a continuación.

Regulaciones internacionales de residuos eléctricos y electrónicos

a) *Convenio de Basilea:* fue creado en el año 1992 bajo el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Actualmente 186 países han firmado este acuerdo; sin embargo, los Estados Unidos de América y Haití no ratificaron esta regulación internacional. El Convenio de Basilea es una regulación internacional basada en el control del flujo transfronterizo de desechos peligrosos y su eliminación. La intención del acuerdo es la de mantener los residuos peligrosos en países capaces de manejarlos. Evitar la exportación de estos materiales inseguros a países de economías emergentes, excepto cuando se haya obtenido el "*consentimiento informado previo*" por escrito de la nación que acepta. Es por este motivo que el término responsabilidad extendida del productor (EPR) es un concepto central del Convenio de Basilea (Convenio Basilea, 2014).

   El convenio de Basilea auspicia la Iniciativa de Asociación sobre Teléfonos Móviles (*Mobile Phone Partnership Initiative* por sus siglas en inglés). Quince fabricantes de teléfonos móviles forman una alianza sostenible con el Convenio y con otros actores interesadas en desarrollar y promover la gestión racional de estos equipos al final de su vida útil. Las actividades principales de esta asociación son la identificación de las mejores prácticas ambientales, la recuperación y reciclaje al final de su vida útil, y la información sobre los avances en el eco-diseño de productos electrónicos bajo el contexto de responsabilidad extendida del productor.

b) *Convenio de Estocolmo:* fue adoptado en Suecia en el año 2001 y entró en vigor en mayo de 2004; México lo ratificó en febrero 2003. Este convenio es un tratado internacional cuyo principal objetivo es eliminar o restringir la producción y el uso de contaminantes orgánicos persistentes (COP). Unas amplias variedades de compuestos bromados se han utilizado como aditivos en carcasas, tarjetas de circuitos impresos, entre otros

componentes de equipos eléctricos y electrónicos. Por lo tanto, su adecuado manejo y reciclaje al final de su vida útil representa un gran reto para los gobiernos (UNEP, 2014).

c) *Directiva Europea sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos RAEE:* Fue creada en 2002 y promulgada en 2003, diseñada para gestionar la electrónica de fin de vida en la Unión Europea, mejorar la recopilación y la eficiencia del reciclaje de la cadena de residuos electrónicos. La Directiva RAEE cubre diez categorías de equipo eléctrico y electrónico, y obliga a los Estados de la Unión Europea a recolectar y tratar por separado estos residuos. Tiene como principal objetivo prevenir la generación de RAEE, y promover la reutilización, el reciclado y otras formas de tratamiento, con el fin de recuperar materias (Directiva Europea, 2012). La Directiva RAEE es una norma mínima para cada país, por lo que cada nación miembro de la Unión Europea puede establecer otras normas nacionales más estrictas.

d) *Directiva de Sustancias Peligrosas* (*RoHS* por sus siglas en inglés): Fue instaurada para restringir el uso de ciertas sustancias peligrosas en equipos eléctricos y electrónicos y contribuir con la valorización y eliminación correcta de estos residuos. La Directiva prohíbe la distribución en el mercado europeo de nuevos EEE que contengan niveles superiores a los permitidos de seis materiales específicos: plomo, mercurio, cadmio, cromo hexavalente y dos retardantes de llama añadidos a los plásticos (bifenilo polibromado y éter difenílico polibromado) (Directiva Europea, 2012). En 2016 estas regulaciones establecieron que el objetivo de recolección era el 45% de la cantidad de EEE comercializada. Sin embargo en 2019, este objetivo aumentará al 65% de AEE o al 85% de los desechos electrónicos (Van Eygen *et al.,* 2016).

e) *Directiva en el uso de energía (Energy Using Products Directive (*EuP), por sus siglas en inglés*):* La Directiva se creó en el año 2005 con el fin de establecer un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico de productos que utilizan energía. El objetivo principal de este organismo es garantizar la libre circulación de productos dentro del mercado europeo (Sthiannopkao & Wong, 2013). Esta directiva proporciona los requisitos de energía específicos que un producto debe cumplir para su comercialización o puesta en servicio. Estos requisitos contribuyen al desarrollo sostenible, a través del aumento de la eficiencia energética y el nivel de protección del medio ambiente (Directiva Europea, 2012).

f) *Iniciativa Reduce, reúsa y recicla (3Rs):* Esta iniciativa fue diseñada en el año 2004 por Japón durante la cumbre G8 de Naciones Unidas. Este país promovió 3R dentro de su legislación y en el escenario internacional. La prioridad de esta iniciativa es prevenir la generación de residuos (reducir). Además de promover tecnologías de reutilización y reciclaje, a través de programas de cooperación internacional y eliminar las barreras al movimiento internacional de materiales para reciclado y remanufactura (UNEP, 2014).

g) *Solución de problemas de residuos electrónicos* (*StEP* por sus siglas en inglés): Esta iniciativa fue creada por Naciones Unidas en el año 2004. Su principal objetivo es mejorar y coordinar los diferentes esfuerzos mundiales en la cadena de logística inversa y la reutilización de materiales reciclados. Esta iniciativa tiene cinco categorías para trabajar: políticas, rediseño de productos, reutilización, reciclaje y desarrollo de capacidades (Iniciativa StEP, 2014).

Legislación de residuos electrónicos en países desarrollados y de economía emergentes

La Unión Europea y Japón han sido líderes en el desarrollo y la implementación de regulaciones para la gestión de residuos electrónicos. Japón en el año 2001 lanzó la Ley de Reciclaje de Electrodomésticos y la Ley de Reciclaje de Pequeños Electrodomésticos. El objetivo principal fue aumentar la cuota de reciclaje debido a la escasez de masa de tierra para la eliminación de desechos sólidos (OCDE, 2014). Además, este país utiliza el sistema 3Rs (reutilización, reciclaje y recuperación) para promover la devolución por parte de los fabricantes, y también utilizan el pago directo del costo de reciclaje por parte de los consumidores japoneses. Europa y Australia utilizan el principio de responsabilidad extendida del productor (REP) como regla principal de sus RAEE, que responsabiliza a los productores por la devolución de los desechos electrónicos. Australia aprobó la Política Nacional de Residuos (2009) y el Plan Nacional de Reciclaje de Televisión y Computadoras (2011) para elevar la tasa de reciclaje; sin embargo, la gestión de desechos electrónicos no se implementa correctamente (Gough, 2016).

Estudios realizados por Sthiannopkao & Wong (2013) muestran que las regulaciones sobre RAEE en los países desarrollados se basan en registro nacional, sistema de recolección y logística. El registro nacional es una lista de productores y sus objetivos de recolección. El sistema de recolección está conformado por organizaciones sin fines de lucro y no

gubernamentales que se concentran en una categoría de producto específica y encuentran mercados para su reutilización. El gobierno asigna la cuota de recolección y monitoreo, proporciona el registro nacional y establece puntos de recolección de residuos. La logística de la recolección de residuos electrónicos generalmente abarca tres canales: sitios de recolección municipales, sistemas de devolución que tienen lugar en las tiendas y devolución directa del productor que es más común para los clientes comerciales (Belboom *et al.*, 2011).

China, uno de los países que ratificó el Convenio de Basilea en el año 1992, estableció una ley para prohibir las importaciones de residuos peligrosos en 2002 (PNUMA, 2014). En 2005 este país estableció una nueva ley, similar a RoSH de la Directiva de la UE, sobre la medida de gestión para la prevención de la contaminación por productos electrónicos. En 2009 China determinó los objetivos de los residuos electrónicos, mediante la financiación de instalaciones de reciclaje electrónico seguras, a través de la ley de regulación de la Administración de Recuperación y Eliminación de Productos Eléctricos y Electrónicos. Esta última regulación obliga a los fabricantes, minoristas y empresas de reciclaje a ser responsables de recolectar y manejar los desechos electrónicos de una manera segura, y los recicladores deben tener licencia de trabajo (Zeng *et al.*, 2016). Para el año 2018 el país añadió una enmienda a la Ley sobre la Prevención y Control de Contaminación de Residuos Sólidos, la cual prohíbe importaciones de 32 tipos de residuos sólidos e incluye residuos plásticos provenientes de RAEE (Zeng *et al.*, 2016).

Algunos países asiáticos como India, Indonesia, Filipinas y Tailandia cuentan con algunos procedimientos para el manejo de los RAEE; sin embargo, no tienen una legislación o política oficial para una correcta gestión. En 2008 el gobierno de la India elaboró directrices para la gestión y manejo de residuos electrónicos, con el fin de clasificarlos de acuerdo con su composición y componentes. Estas pautas se desarrollaron en 2011 para la recolección y el reciclaje de los RAEE. En Indonesia no existe una regulación específica sobre la gestión de desechos electrónicos, pero está regulada como un residuo peligroso y tóxico. Indonesia y Filipinas están en proceso de finalizar su legislación sobre residuos electrónicos (Yoshida *et al.,* 2016). Tailandia no es un país de la OCDE, pero sigue las directrices del REP de los países de la OCDE y se esfuerza por desarrollar una política. En el año 2011 Manomaivibool y Vassanadumrongdee proporcionaron el contexto del principio de REP para la propuesta de política de residuos electrónicos en Tailandia. Descubrieron que la responsabilidad extendida del productor es uno de los objetivos de la estrategia nacional integrada para la gestión de RAEE.

Garlapati (2016) determinó que más del 50% de los RAEE recolectados en países desarrollados se envían para procesamiento o eliminación a países del Asia y África. China, India, Pakistán y Nigeria se han convertido en los principales destinos. Aunque estos cuatro países firmaron y ratificaron el Convenio de Basilea y tienen otras políticas reglamentarias, es posible la importación de desechos peligrosos y barcos que contengan residuos electrónicos, si están etiquetados para otros usos, como bienes usados (no prohibidos por Convenio de Basilea) o si declaran que los RAEE son para reexportación.

En América del Norte, países como los Estados Unidos de América y Canadá no cuentan con una regulación federal adecuada para gestionar los residuos electrónicos, y solo confían en las políticas impuestas por los gobiernos estatales o municipales. Al igual que en la Unión Europea, el principio de REP y la tarifa ecológica son herramientas para mejorar la recolección y el reciclaje de desechos electrónicos en esta parte del continente americano (OCDE, 2014).

En el año 2015, Naciones Unidas, en colaboración con representantes gubernamentales de América Latina (LATAM), desarrollaron una visión general de las regulaciones para la gestión de residuos electrónicos en esta región (Baldé, 2015). En su análisis, encontraron que sus principios generales de gestión de residuos están en línea con los Convenios de Basilea y tienen una legislación general de gestión de residuos. Solo unos pocos países tienen regulaciones específicas sobre los residuos electrónicos.

Brasil es el primer país de América Latina que desarrolló iniciativas de recuperación y reciclaje. Seguido por diferentes series de programas obligatorios de residuos electrónicos colectivos. En el año 2010 se creó la Ley Nacional de Política de Residuos Sólidos (Nº12.305) para preservar el principio REP en forma de logística inversa, obligando a los fabricantes y distribuidores a recolectar y administrar sus productos al final de su ciclo de vida (*EoL* por sus siglas en inglés) incluidos los equipos eléctricos y electrónicos y sus componentes (FAO, 2017).

Tanto Argentina, Chile y Bolivia están desarrollando legislaciones para la gestión de residuos electrónicos. En el caso de Argentina, una regulación nacional ha sido discutida desde el 2010 y algunas provincias como Buenos Aires (2011) tienen legislaciones específicas sobre residuos electrónicos. Por otra parte, Bolivia está desarrollando una legislación de RAEE con estándares técnicos para su gestión integral. Representantes de los sectores público y privado están en coordinación con los ministerios gubernamentales. Chile está desarrollando una legislación sobre RAEE; sin embargo, actualmente los residuos electrónicos se tratan como desechos peligrosos (Magalini *et al.*, 2015).

Paraguay, Uruguay y Venezuela no cuentan con una regulación específica sobre residuos electrónicos, pero su ley general de gestión de residuos ayuda a recolectar los RAEE y enviarlos a vertederos. El gobierno de Uruguay y las instituciones públicas han estado analizando las regulaciones que ayudarán a manejar y gestionar adecuadamente los RAEE, basadas en el principio EPR con el apoyo de expertos internacionales. En Venezuela las autoridades gubernamentales no establecen regulaciones exactas de los residuos electrónicos. Sin embargo, las normas generales sobre protección ambiental y gestión de residuos municipales han ayudado a la recolección y disposición final de los RAEE (Baldé *et al.,* 2015).

Colombia y Perú cuentan con una ley específica de gestión de residuos electrónicos. Colombia, en el año 2013 resolvió la ley "Política nacional sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos" (No.1672). Esta ley establece directrices para la gestión de los residuos electrónicos y se basa en la responsabilidad extendida del productor (REP). Se están estableciendo esquemas de cumplimiento para la gestión de ciertos flujos de desechos electrónicos, como computadoras y periféricos, lámparas y baterías, para garantizar la gestión nacional de desechos electrónicos (Iniciativa StEP, 2014). Por su parte, Perú tiene una ley de residuos electrónicos que establece las responsabilidades legales de los diversos actores involucrados en la gestión de RAEE. Varias iniciativas, relacionadas con partes interesadas internacionales, se están desarrollando bajo el principio REP (Baldé *et al.,* 2017).

Ecuador cuenta con una regulación nacional para residuos peligrosos, basada en la responsabilidad del titular, que proporciona una guía legal para la gestión de residuos electrónicos. En la actualidad se está analizando una ley específica sobre gestión de RAEE, los cuales no serán considerados como residuos peligrosos sino de manejo especial, además esta ley estará basada en el principio responsabilidad extendida del productor junto con metas de recolección por parte del fabricante o distribuidor. El borrador final está a punto de finalizar y se espera que para el 2019 sea promulgado por el Ministerio de Ambiente (MAE, 2017).

México ha suscrito varios convenios internacionales, incluido el Convenio de Basilea sobre los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, y el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (PNUMA, 2014). Los residuos de equipos eléctricos y electrónicos se definen en la ley general de residuos sólidos como residuos de manejo especial. La Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, establece los criterios para clasificar los residuos de gestión especiales y determinar cuáles están sujetos a un plan de gestión, además regula el procedimiento de inclusión o exclusión a

esta lista, así como los elementos y procedimientos para la formulación de planes de gestión (DOF, 2013).

A continuación se presenta la Tabla 3.7, con los programas e iniciativas en América latina para concientizar a la población y recolectar residuos electrónicos. Argentina y su programa Renóvate, permite al consumidor entregar sus RAEE a tiendas minoristas para posteriormente envíen estos residuos a un reciclaje adecuado. Bolivia, Chile, Ecuador, Perú, Uruguay y Venezuela cuentan con campañas en distintas ciudades del país para crear conciencia en el consumidor sobre una adecuada disposición de sus RAEE, la participación voluntaria para recolectar estos residuos, cursos en línea y programas de educación ambiental. El gobierno brasileño emite diferentes incentivos fiscales para fabricantes, importadores y comerciantes, además de campañas y otro tipo de incentivos para la recolección de RAEE. En México, el gobierno, en cooperación con los fabricantes, distribuidores y recicladores han establecido programas nacionales de recolección de RAEE, sin costo para el consumidor.

Tabla 3.7. Iniciativas para la recolección de RAEE en Latinoamérica

País	Regulación RAEE	Iniciativas o programas de recolección RAEE
Argentina	En desarrollo	• Programa Renóvate: le garantiza al consumidor el no costo al entregar sus RAEE al comerciante minorista y envía los RAEE para un reciclaje adecuado (descontaminación, desensamble y recuperación de materiales). • Campañas y seminarios del gobierno nacional para difundir el conocimiento sobre la renovación de computadoras para su uso en escuelas públicas. • Las fundaciones ofrecen programas de capacitación para recicladores urbanos.
Bolivia	En desarrollo	Campañas de reciclaje para crear conciencia sobre la gestión de residuos electrónicos.
Brasil	Sí	El gobierno brasileño emite diferentes tipos de incentivos y campañas para reducir o gestionar los residuos electrónicos. También desarrollaron esquemas de devolución a través de crédito o reducción de impuestos para fabricantes, importadores y comerciantes.
Chile	En desarrollo	El gobierno chileno ha llevado a cabo diversas iniciativas, campañas de sensibilización y planes piloto, incluida la participación voluntaria de algunos productores de AEE.
Colombia	Sí	• El gobierno ha llevado a cabo diversas campañas e iniciativas de sensibilización sobre reciclaje de RAEE. • Promover la adopción de estándares internacionales como el “Cargador Universal”. • La campaña "Recicla tu móvil y comunícate con la tierra" es una iniciativa privada con la cooperación de empresas de Telecomunicaciones y Electrónica en Colombia.

Tabla 3.7: (Con't)

Ecuador	En desarrollo	Desde 2008, el gobierno en cooperación con la industria privada, la academia y las organizaciones no gubernamentales trabajan juntos en programas de concientización sobre educación y campañas de recolección de residuos electrónicos.
México	En desarrollo	El gobierno en la cooperación con empresas de electrónicos e instalaciones de reciclaje, establecieron programas nacionales de recolección de RAEE, sin costo para el consumidor (Reciclaton, Punto Verde, Green Day, We Recycle, Ecoreciklaton, entre otros).
Perú	Sí	Durante casi una década, se han desarrollado campañas públicas para aumentar la conciencia y estimular la recolección de residuos electrónicos en algunas de las principales ciudades del Perú (Lima, Callao, Huancayo, Trujillo y Arequipa).
Uruguay	En desarrollo	Se han llevado a cabo programas voluntarios (empresas privadas y fundaciones) para la gestión de residuos electrónicos (teléfonos móviles y PC).
Venezuela	En desarrollo	Se han implementado diferentes campañas para capacitación en gestión de residuos electrónicos. Cursos en línea y campañas de sensibilización.

Fuente: Elaboración propia a partir de Baldé *et al.* (2015); GSMA (2015); Baldé *et al.* (2017)

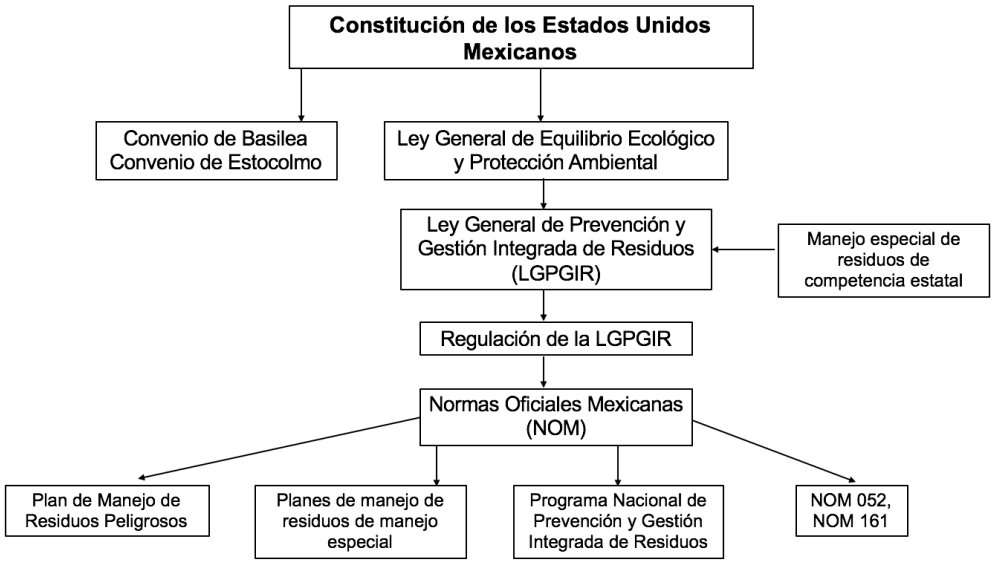
Adicional a estas iniciativas, se espera que en Latinoamérica se inicie un proyecto llamado "Unido" con la cooperación de la mayoría de los países de la región. Su objetivo principal es proporcionar orientación técnica sobre políticas, operaciones, leyes, tecnología y conocimiento de basura electrónica. A través de *Unido*, los países de la región reforzarán sus políticas en la gestión correcta de sus RAEE y desarrollarán información y conciencia para todos los actores involucrados en la generación de residuos electrónicos (Baldé *et al*., 2017).

Siguiendo con las regulaciones de los residuos electrónicos, la tesis se enfoca en México y las leyes que permiten una adecuada gestión de residuos electrónicos en este país. A continuación se presentan los reglamentos y normas a los que están sujetos los fabricantes, importadores, exportadores y distribuidores de equipos electrónicos; y se detallan algunas campañas de reciclaje realizadas en el país. Esta información permite al lector tener una visión general de la situación normativa que envuelve a la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) en México.

Marco regulativo de los residuos electrónicos en México

México cuenta con convenios internacionales y un marco jurídico que busca asegurar el manejo integral de residuos y su prevención. Existen diferentes instrumentos que permiten cumplir este objetivo, comenzando por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. De esta se derivan la Ley General para el Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), los reglamentos correspondientes a cada ley, así como las Normas Oficiales Mexicanas que se aplican para todo el país (SEMARNAT, 2011). México ha suscrito una serie de convenios internacionales entre los que se encuentran el Convenio de Basilea sobre movimientos transfronterizos de residuos peligrosos y su eliminación, y el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (UNEP, 2011). A partir de dichos convenios se desprenden una serie de obligaciones relacionadas directa o indirectamente con la gestión y manejo de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) (Figura 3.2).

Figura 3.2: Estructura legislativa para el manejo integral de residuos electrónicos



Fuente: Elaboración propia, a partir de DOF (2010); INECC (2017); SEMARNAT (2013); SEMARNAT (2017)

La Constitución Política, la LGEEPA y la LGPGIR tienen como objetivo fundamental garantizar el derecho de toda persona a tener un medio ambiente adecuado, propiciar el

desarrollo sostenible, definir los principios para la política ambiental y los instrumentos para su aplicación (SEMARNAT, 2017). Particularmente, la LGPGIR establece y determina los principios que favorecen la prevención de la generación, valorización y gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; así como la prevención de la contaminación de sitios con estos residuos y finalmente la disposición final o remediación. Además, la ley determina las bases para aplicar los principios de valorización, responsabilidad compartida y manejo integral de residuos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, los cuales deben de considerarse en el diseño de instrumentos, programas y planes de política ambiental para la gestión de residuos (INECC, 2017).

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) están definidos por la LGPGIR como de manejo especial de acuerdo al *artículo 19 sección VIII*, definidos como: *"residuos tecnológicos provenientes de las industrias de la informática, de los fabricantes de productos electrónicos y de otros que al transcurrir su vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico"* (DOF, 2007). La Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, es la normativa que establece: a) criterios para clasificar residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo de residuos (PMR); b) listado de los residuos de manejo espceial; c) procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; y d) los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo (SEMARNAT, 2013).

El artículo 11 del reglamento de la LGPGIR establece que la clasificación de los residuos de manejo especial, sujetos a planes de manejo, se deben establecer en normas oficiales mexicanas cuya emisión está a cargo de SEMARNAT. Esta secretaría está a cargo de enlistar los residuos electrónicos que deben tener su plan de manejo especial. Las especificaciones legales y técnicas sobre los planes de manejo de residuos electrónicos se describen en la LGPGIR, en el capítulo sobre Planes de Manejo de Residuos Electrónicos y en la NOM-161-SEMARNAT-2011. Los PMR deben ser presentados en la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y cumplir con los criterios que establezcen las normas oficiales mexicanas. De acuerdo con el artículo 28 de la Ley, los planes de manejo deberán ser formulados y ejecutados por:

- Productores, importadores, exportadores y distribuidores de productos que al desecharse se conviertan en residuos peligrosos;
- Generadores de residuos peligrosos;

- Grandes generadores y productores, importadores, exportadores y distribuidores de productos que al desecharse se conviertan en residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial.

Los planes de manejo de residuos peligrosos y los residuos de manejo especial son de competencia Federal y los de residuos sólidos urbanos de los municipios del país (Tabla 3.8). Para registrar los planes de manejo de residuos de manejo especial, se tiene a las entidades federativas como los responsables para hacerlo. También tienen la autoridad para realizar programas para la instalación de sistemas destinados a su recolección, acopio, almacenamiento, transporte, tratamiento, valorización y eliminación final de acuerdo a la ley o a normas oficiales mexicanas en el ámbito de su competencia (SEMARNAT, 2013).

Tabla 3.8 Esquema de los planes de manejo para residuos de acuerdo a la LGPGIR

Planes de Manejo	Autoridad
Los productos que se descartan se convierten en residuos peligrosos	SEMARNAT
Planes de manejo de residuos peligrosos	SEMARNAT
Planes de gestión de residuos especiales	SEMARNAT
Planes de gestión de residuos municipales	SEMARNAT

Fuente: elaboración propia a partir de la LGPGIR, Diario Oficial de la Federación (SEMARNAT, 2013)

Los estados y municipios desempeñan un papel fundamental en el manejo de residuos electrónicos. Estas entidades enfrentan directactamente esta problemática por lo que se ha establecido dentro de la LGPGIR que estos organismos deben promover la reducción de la generación, valorización y gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial (residuos electrónicos). Con el fin de proteger la salud, prevenir y controlar la contaminación ambiental producida por su manejo, debiendo llevar a cabo las siguientes acciones (SEMARNAT, 2013):

- Controlar y vigilar el manejo integral de residuos electrónicos.
- Diseñar e instrumentar programas de reducción y manejo integral que incentive a los grandes generadores.
- Promover la suscripción de convenios con los grandes generadores.
- Incentivar la formulación e instrumentación de planes de manejo de residuos.

- Integrar un registro de los grandes generadores y empresas prestadoras de servicios con información sobre tipo, volumen y forma de manejo de los residuos.
- Integrar la información relativa al Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales (SNIARN).
- Elaborar, actualizar y difundir un diagnóstico básico para la gestión integral de residuos de manejo especial.
- Coordinar con las autoridades federales, otras entidades federativas o municipios, según proceda, y concertar con representantes de organismos privados y sociales, para alcanzar las finalidades a que se refiere esta Ley y para la instrumentación de planes de manejo de los distintos residuos que sean de su competencia.

3.3 Situación y manejo integral de los residuos electrónicos

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) tienen una vida corta, esto se debe a que cada año la innovación trae nuevas generaciones de productos en ciclos más pequeños con una gran variedad de precios y diseños (Cucchiella *et al.,* 2015). Los fabricantes de electrónicos producen continuamente equipos más sofisticados, con una amplia gama de materiales, que se fabrican con métodos que hacen que sea más difícil repararlos y separarlos (Miller *et al.,* 2016). Por estos motivos, los gobiernos del mundo tienen grandes desafíos para administrar y legislar esta nueva corriente de EEE y su flujo descontrolado de manejo y disposición final, ya que no existe con exactitud una trazabilidad de materiales de cada producto electrónicos (Singh *et al.,* 2016).

Si los RAEE no son gestionados y manejados adecuadamente, sus impactos socio-ambientales son de alto alcance. Estudios realizados por Garlapati (2016) muestran que si los residuos electrónicos no se administran correctamente y no son tratados con tecnologías de reciclaje adecuadas, afectará a las condiciones de salud y seguridad de los trabajadores y su entorno. Además, los RAEE recorren distancias considerables desde países desarrollados hacia aquellos en vías de desarrollo, donde utilizan técnicas rudimentarias y de alto riesgo para la salud al momento de extraer materiales de los residuos electrónicos (Vincic, 2015).

El volumen de generación de residuos electrónicos en el mundo crece entre un 450% a un 500% para el año 2025. Baldé *et al.* (2017) estima que el total de residuos electrónicos

producidos en todo el mundo fue de 44.7 millones de toneladas en 2016 y se espera que aumente a aproximadamente 52.2 millones de toneladas en 2021. La tasa de crecimiento anual aproximada para el flujo de RAEE es del 4 al 5%, este porcentaje es aproximadamente tres veces más rápido que el flujo de otros residuos (Singh *et al.,* 2016). En 2016 la mayor parte de los RAEE se generaron en Asia (18.2Mt), la segunda región de alta generación de RAEE fue el continente europeo 12.3 Mt, el continente americano con 11.3Mt, África 2.2 Mt y Oceanía 0.7 Mt. Con respecto al contienen americano, el principal productor de residuos electrónicos fue Estados Unidos de América, con 6.3 Mt. El segundo mayor productor fue Brasil con 1.5 Mt, y el tercero fue México con 1 Mt (Tabla 3.9).

Tabla 3.9: Generación de residuos eléctricos y electrónicos, por región, en el año 2016

Región	Generación RAEE (Mt)
Asia	18.2
Europa	12.3
América	11.3
África	2.2
Oceanía	0.7
Total	44.7

Fuente: elaboración propia a partir de Balde *et al.* (2017, pp. 44 – 53)

Aunque los países generen altos volúmenes de residuos electrónicos, la generación por habitante dependerá del tamaño de país y número de habitantes. Por ejemplo, a pesar de que Oceanía es el continente con menor generación de RAEE fue el generador más alto de residuos electrónicos por habitante (17.3 kg / hab.), seguido por Europa que fue el segundo mayor generador con un promedio de 16.6 kg / hab. Para el 2016 las Américas generaron 11.6 kg / hab. De este dato se deriva América Latina que generó 4,2 Mt de RAEE, con un promedio de 7,1 kg / hab. Los países latinoamericanos con la mayor generación de residuos electrónicos son: Brasil 1.5 Mt, México 1 Mt y Argentina 0.4 Mt. En el contienen asiático se generó menos residuos electrónicos por habitante (4,2 kg / hab.) y finalmente África generó solo 1.9 kg / hab. (Baldé *et al.* 2017).

Con base a la clasificación de Naciones Unidas, los residuos electrónicos se clasifican de acuerdo a los mismos parámetros que los equipos eléctricos y electrónicos. La Tabla 3.10 muestra la cantidad global de residuos electrónicos en 2016. La cual se compone principalmente

de equipos pequeños (16.8 Mt), equipos grandes (9.1 Mt), equipos de intercambio de temperatura (7.6 Mt) y pantallas (6.6 Mt). Las lámparas y los equipos pequeños de telecomunicaciones representan la parte más pequeña de la cantidad global de residuos electrónicos generados en 2016, 0.7 Mt y 3.9 Mt respectivamente (Baldé *et al.* 2017).

Tabla 3.10: Generación de residuos eléctricos y electrónicos, por categoría, en el año 2016

Región	**Generación RAEE (Mt)**
Equipos pequeños	16.8
Equipos grandes	9.1
Equipos de intercambio de temperatura	7.6
Pantallas	6.6
Equipos pequeños de telecomunicaciones	3.9
Lámparas	0.7
Total	44.7

Fuente: elaboración propia a partir de Balde *et al.*, 2017 (Pp. 40 – 42)

No existen estadísticas claras de cuánto se recolecta formalmente de RAEE en los países de norte américa y Sudamérica. En el caso de EEUU en el 2016 se recolectaron aproximadamente 1,4 Mt de desechos electrónicos, lo que representa el 22% de los residuos electrónicos generados (Baldé *et al*., 2017). Para el caso de México, la SEMARNAT calculó que solo el 10% de los RAEE que terminaron su tiempo de vida útil en el año 2015, llegaron a manos de recicladoras formales para su adecuado tratamiento (SEMARNAT, 2017). En general, el paradero del resto de los residuos electrónicos es en gran parte desconocido en el continente americano (GSMA, 2017). La mayoría de los residuos electrónicos más grandes, especialmente televisores y monitores, se exportaron por tierra o por mar a destinos como México, Venezuela, Paraguay y China, mientras que las computadoras usadas, especialmente las computadoras portátiles, fueron más probablemente enviadas a países asiáticos. Los principales destinos para teléfonos móviles fueron Hong Kong (China), América Latina y el Caribe (Baldé *et al*., 2015; Baldé *et al*., 2017).

La industria electrónica en México se encuentra segmentada en cinco categorías las cuales han sido establecidas por la Cámara Nacional de la Industria Electrónica, de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información (CANIETI). La Tabla 3.11 indica los tipos de segmentaciones. La primera conformada por computadoras y sus complementos como impresoras, unidades de memoria, entre otros. La segunda categoría son telecomunicaciones como teléfonos, radio, TV cable. La tercera es electrónica de consumo estéreos, videocámaras, video juegos. La penúltima conformada por la electrónica industrial (medidores de presión, de temperatura, rayos X, radares). Finalmente, la quinta categoria con componentes eléctricos como monitores a B/N transitores, diodos, plasmas.

Tabla 3.11: Segmentación de la Industria Electrónica en México

1) Computadoras y oficina	**Ejemplos**
Computadoras	Escritorio y Portátil, servidores
Impresoras	Tinta, láser, matricial.
Unidades de Memoria	Disco duro, CD-RW, procesadores.
Otros	Teclados, Mouse, cámaras, escáner.
2) Telecomunicaciones	
Teléfonos	Fijos, celulares, contestadoras.
Radio	Transmisores y receptores
TV Cable	Transmisores y receptores
Redes	Tarjetas de red, modem, router, etc.
Otros	FAX, radares, instrumentos de medición.
3) Electrónica de Consumo	
Video	TV, VCR, DVD, proyector, videocámara
Hogar y portátiles	Estéreo, auto estéreos, Walkman
Otros	Video juegos, sistemas de seguridad
4) Electrónica Industrial	
Control y proceso	Medidores de temperatura, presión, humedad
Medición	Multímetro, osciloscopio
Automatización	Mecatrónica, robots
Electromédico	Ultrasonido, rayos X, Láser, etc.
Automotriz	Sistemas automotrices
Aeroespacial	Radar, audio, comunicación
Otros	Equipo Ultrasónico y Láser
5) Componentes Electrónicos	
Cinescopio y monitores	Color B/N, LCD, Plasma
Estado Sólido	Transistores, diodos, integrados
Pasivos	Resistencias, capacitores, bobinas

Fuente: elaboración propia a partir de INECC (2012)

La tasa de crecimiento anual de la producción del sector electrónico en México va a ser de 4.1% entre el período 2012-2020. Con base a la segmentación previamente indicada, la unidad de Inteligencia de Negocios de la Secretaria de Economía y el Instituto de Estadística de México realizaron en el 2012 un estudio sobre la producción del sector electrónico en México. La Tabla 3.12 muestra la Tasa Media de Crecimiento Anual (TMCA) para el período 2012-2020, tomando como datos exactos los años 2011 y 2012. Para los siguientes años se realizó un pronóstico de este crecimiento, considerando un incremento de 4.1% por año, alcanzando proyeciones económicas de entre 72,602 – 75,540 millones de dólares americanos.

Tabla 3.12: Proyección económica de la producción de electrónicos en México, 2011-2020

Año	Millones dólares americanos
2011	59,098
2012	55,703
2013*	57,803
2014*	61,812
2015*	66,420
2016*	68,276
2017*	70,556
2018*	72,602
2019*	74,527
2020*	76,540

*Proyecciones

Fuente: Elaboración propia a partir de información proporcionada por INEGI (2012)

Generación de Residuos Electrónicos en México

Desde la última década el número de consumidores de equipos eléctricos y electrónicos (EEE) en México ha ido aumentando año tras año, debido al rápido desarrollo de las tecnologías. Los EEE de mayor venta y uso a nivel nacional incluyen principalmente electrodomésticos, televisores, computadoras, impresoras, teléfonos celulares, fotocopiadoras y equipos de iluminación (UNEP, 2014). Sin embargo, el creciente consumo de dichos equipos, junto con la corta vida útil de estos productos -debido al imparable desarrollo tecnológico- ha generado un crecimiento exponencial de los residuos de equipos eléctricos y electrónicos (RAEE),

ocasionando una gran preocupación al gobierno, organismos no gubernamentales y la sociedad.

Actualmente, en México existe poca literatura disponible sobre generación y gestión de residuos de aparatos electrónicos y electrónicos. En la Tabla 3.13 se muestran los estudios más recientes, realizados por organismos gubernamentales como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INEEC), algunos de estos estudios en cooperación con la academia. En el año 2006 el INECC desarrolló el primer diagnóstico nacional de la generación de residuos electrónicos, el cual se ha ido actualizando hasta el 2010 a través de estudios regionales. Con base en este estudio, se estimó que en el año 2010 México generó 307,000 toneladas de RAEE y ese número aumentará aproximadamente en 12,800 toneladas por año.

Durante el período 2007-2011 el INECC y el INEGI (2011) realizaron proyectos regionales en el norte y centro del país. En el año 2007 se realizó un diagnóstico regional sobre la generación de RAEE en el noroeste de México (INE, 2007). En el 2009 se realizó el mismo estudio para las ciudades de Tijuana y Ciudad Juárez. Por último, en el año 2010 se hizo un diagnóstico de RAEE en la zona metropolitana del Valle de México (INECC, 2012). En el año 2011 el INEGI llevó a cabo un estudio estadístico sobre la disponibilidad y uso de la tecnología de información en hogares. En ese mismo año el INECC en cooperación con la Universidad Autónoma de Baja California, realizaron un plan de manejo de RAEE en Ensenada (INECC, 2012).

Los últimos estudios sobre residuos electrónicos realizados por entidades gubernamentales datan entre los años 2012 y 2014. En el año 2012 el INEGI analizó cada entidad federativa, la cantidad de materiales valorizables que se obtenían en los centros de acopio. En ese mismo año el Colegio de la Frontera Norte en conjunto con el INECC, realizaron la primera guía municipal de gestión integral de RAEE para el noreste de México. Finalmente, en el año 2014 el INECC realizó una investigación sobre los programas de reciclaje de residuos electrónicos que se llevaron a cabo en el país. A partir del año 2016, la SEMARNAT en cooperación con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), han realizado estudios en conjunto sobre manejo y gestión integral de los RAEE en México. Un primer estudio se presentó en el año 2017 sobre la caracterización de la industria del reciclaje de RAEE y un primer resumen ejecutivo fue publicado el mismo año y se basa en un inventario de generación de

residuos electrónicos. En el año 2018 se publicaron las guías sobre las buenas prácticas del manejo integral y ambientalmente de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Tabla 3.13. Estudios realizados sobre generación y gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en México

Entidad Gubernamental	Nombre del estudio	Año	Referencia
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	Primer diagnóstico nacional de la generación de residuos electrónicos.	2006	INE, 2007
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	Diagnóstico regional sobre la generación de residuos electrónicos al final de su vida útil en la región noroeste de México.	2007	INE, 2007
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	Diagnóstico regional de residuos electrónicos en dos ciudades de la frontera norte de México: Tijuana y Ciudad Juárez.	2009	INECC, 2012
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	Diagnóstico de la generación de residuos electrónicos en la Zona Metropolitana del Valle de México.	2010	INECC, 2012
Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía	Estadísticas sobre disponibilidad y uso de tecnología de información y comunicaciones en los hogares, 2010.	2011	INEGI, 2011
Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía	Cantidad de materiales valorizables recolectados en centro de acopio según tipo de material por entidad federativa.	2012	SEMARNAT, 2015
Colegio de la Frontera Norte-Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	Guía municipal de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos para el noreste de México.	2012	SEMARNAT, 2015
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	Programas de reciclaje de residuos electrónicos en México. En: Los residuos electrónicos en México y el mundo	2014	SEMARNAT, 2015
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales	Inventario de generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)	2017	SEMARNAT, 2017
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales	Caracterización de la industria del reciclaje de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)	2017	SEMARNAT, 2017
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales	Buenas prácticas del manejo integral y ambientalmente adecuado de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)	2018	SEMARNAT, 2018

Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias mencionadas en la Tabla.

Después de 11 años, la SEMARNAT en el año 2017 presentó las primeras estimaciones de generación de residuos electrónicos a nivel nacional. Se estimó que en 2015 se generaron un total de 1,103.57 kt de RAEE, de los cuales, 117.55 kt corresponden a la Ciudad de México, Jalisco (82.07 kt) y Baja California (58.6 kt). Del total nacional, solamente el 10.8% se recicla formalmente y los equipos de regulación de temperatura es la categoría con mayor representación dentro del total de los residuos electrónicos generados (43.8%) con 480.81 kt. En segundo lugar se encuentra la categoría de pantallas con 389.66 kt (35.5%). De este dato estimado a nivel nacional, 65.1% es material con potencial económico, mientras que el 5.9% debe ser separado y manejado adecuadamente como un residuo peligroso debido a los componentes tóxicos que contiene. Finalmente, el 28.9% restante se refiere a materiales que actualmente no son aprovechados, tales como: cerámicos, fibras y otros tipos de plásticos no valorizables. Utilizando como base el promedio de generación a nivel nacional, se estima una generación de 1,211.58 kt para 2021, mientras que en 2026 de 1,353.71 kt.

Comportamiento del consumidor en México

En los años 2009 y 2010 el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático realizó una encuesta sobre el comportamiento del consumidor de equipos electrónicos en la zona de la frontera norte, junto con las ciudades fronterizas de Tijuana y Ciudad Juárez; y la Zona Metropolitana del Valle de México. Los temas analizados englobabaron aspectos de carácter social, ambiental y económico como por ejemplo el tiempo de vida útil promedio del electrónico, el destino final de los aparatos electrónicos que desechan y los riesgos para el ambiente y la salud humana. El 42% de los encuestados mencionaron que tiran al camión de la basura los residuos electrónicos, el 30% los regala, el 17% los vende (si tiene algún daño o desperfecto, lo reparan antes); y el 11% de los encuestados los almacena.

Esta encuesta pudo determinar el conocimiento que los encuestados tienen respecto a lo que sucede con sus residuos electrónicos. La Tabla 3.14 indica que el 71% de la población no tiene conocimiento del destino final de sus RAEE, del 29% restante considera que los residuos van a tiraderos de basura (56%), son reusados o van a un centro de acopio (15%), van a un relleno sanitario (13%), confinamiento (10%) o no tienen un conocimiento preciso del destino final (6%). Adicionalmente, el 53% de los encuestados declararon que almacenan sus

aparatos electrónicos (Tabla 3.15). De ese 53%, el 48% lo almacenan por más de 12 meses, el 25% entre 6-12 meses y, por un mes, el 17%.

Tabla 3.14: Conocimiento de los encuestados con respecto a la disposición final de los residuos electrónicos en México.

Población Encuestada (porcentaje)	Observación
56	Tiraderos
15	Reúso o Centro de acopio
13	Relleno Sanitario
10	Confinamiento
6	No tiene conocimiento precis0

Fuente: Elaboración propia a partir de las encuestas INEGI (2011); INECC (2012)

Tabla 3.15: Respuestas de las personas encuestadas sobre el tiempo de almacenamiento de un aparato electrónico

Personas encuestadas (porcentaje)	Tiempo de almacenamiento (meses)
48	Más de 12 meses
35	6-12 meses
17	1 mes

Fuente: Elaboración propia a partir de las encuestas INEGI (2011); INECC (2012)

Existe un gran desconocimiento por parte de los consumidores sobre las alternativas donde dejar su equipo electrónicos al final de la vida útil. El 91% mencionó no conocer a alguna persona o empresa dedicada al reciclaje de aparatos electrónicos, mientras que el 9% restante respondió lo contrario. De éste 9%, en la Tabla 3.16 se puede observar que las empresas privadas tienen una mayor mención como alternativa para recolectar los RAEE (66%), seguido de las empresas telefónicas como Telcel, Movistar y Iusacell con 14%. Los gobiernos federal, estatal y municipal a través de sus campañas de recolección con el 13% y, finalmente, las instituciones educativas y otras empresas de diversos sectores dedicadas al reciclaje de aparatos electrónicos con el 7%.

Tabla 3.16: Alternativas de disposición final de un equipo electrónicos

Personas encuestadas	Tipo de alternativas
66%	Empresas privadas
14%	Empresas de telefónicas
13%	Gobierno
7%	Otras

Fuente: Elaboración propia a partir de las encuestas INEGI (2011); INECC (2012)

Reciclaje de RAEE en México

Existen un amplio y variado mercado de reciclaje de equipos electrónicos en México, desde grandes empresas nacionales que maximizan la recuperación de los materiales hasta pequeños locales (muchos de ellos informales) que solo recuperan los componentes que les pueden servir para su venta. Los gobiernos de diferrentes estados del país apoyan a las recicladoras privadas en la organización y promoción de eventos de recolección de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Además, políticas empresariales de diferentes empresas de tecnología tienen campañas para recuperar y recolectar sus productos electrónicos como por ejemplo, HP, Dell, Sony, Apple, entre otros (SEMARNAT, 2015; SEMARNAT, 2017). A continuación se presentan diferentes modelos de recolección de residuos electrónicos:

- *Empresas formales:* Estas empresas están dedicadas a la recuperación y valorización de materiales a partir de productos electrónicos. Generalmente manejan grandes volúmenes de residuos provenientes de bajas fiscales de negocios o instituciones. Además forman parte de programas dirigidos al público en general (SEMARNAT, 2015). A continuación se mencionan algunos ejemplos de los programas existentes en la Tabla 3.17. El apagón analógico fue una campaña realizada por el gobierno hasta finales del año 2015, en donde los televisores analógicos del país fueron cambiados por TV digitales. Reciclatones organizados por empresas privadas de reciclaje tales como Reciclón, Punto Verde, Reciclotón, Ecoreciklatón, Reciclones. Finalmente, programas de reciclaje de empresas privadas que realizan programas para recuperar sus productos, entre ellas se pueden mencionar a Apple, HP, Dell, Sony, Motorolla, entre otros.

Tabla 3.17: Programas de reciclaje en México auspiciado por empresas privadas y gobierno

Programas de Reciclaje	Descripción
Apagón Analógico	Este programa tuvo por objetivo recuperar todos los televisores analógicos en el país y cambiarlos por una nueva TV plasma digital. El gobierno mexicano donó 13.8 millones de TV digitales hasta el 31 de diciembre del 2015.
Reciclón	Es un sistema para recibir residuos electrónicos sin costo para el usuario que opera durante uno o dos días de manera anual en espacios públicos de distintas ciudades.
Punto Verde	Es un centro de acopio permanente que complementa al *Reciclón* y opera en conjunto con las autoridades municipales. Existen 30 sedes permanentes de *Punto Verde* en 12 estados del país. A través de ambos programas (Reciclón y Pto. Verde) se recibe una gran variedad de aparatos electrónicos incluyendo reproductores de video y música, computadoras y periféricos, equipos de telecomunicación, teléfonos celulares y otros, así como algunos electrodomésticos como hornos microondas, planchas y licuadoras.
Reciclotón	Es un programa de reciclaje y eliminación de aparatos electrónicos sin costo para los usuarios operado por la empresa PROAMBI en colaboración con la iniciativa Televisa Verde y diversos gobiernos estatales.
Green Day	PROAMBI colabora con la empresa Apple en el "día verde" (*Apple Green Day*), un programa en el cual los usuarios entregan para su reciclaje dispositivos electrónicos como computadoras y reproductores de audio usados a cambio de tarjetas de regalo para adquirir equipos nuevos.
Reciclotón (Distrito Federal)	Recurre a diversos incentivos para la participación de los consumidores, como entregar bolsas para hacer composta.
Ecoreciklatón	La empresa Ecorecikla (Chihuahua) opera este programa para recolectar residuos electrónicos en colaboración con autoridades estatales y municipales, instituciones educativas y tiendas de autoservicio.
Reciclones	Programa a cargo de la empresa de reciclaje electrónico *In Cycle Electronics Mexico,* ofrece servicios integrales para la eliminación de residuos electrónicos en diversas ciudades del país.
Six Flags - Movistar & TBS Industries	La empresa *TBS Industries* ha organizado diversas iniciativas para recopilar y reciclar equipos electrónicos. Colaboró con el parque de diversiones *Six Flags*, y *Telefónica Movistar* en un programa de 30 días en los que se recopilaron más de 5,000 teléfonos celulares (los residuos recopilados en las diversas iniciativas de *TBS Industries* son compactados y triturados en México para después ser llevados al extranjero para su fundición o tratamiento).

Tabla 3.17: (Con't)

Glezco Monterrey	Auspicia programas de acopio masivo de electrónicos al final de su vida útil, y programas de información y difusión del tema en colaboración con gobiernos locales y asociaciones civiles.
Planet Partners – Hewlett Packard	Este programa se basa en la recolección y eliminación adecuada de cartuchos para impresora usados. La recolección es a domicilio y sin costo y requiere que se entreguen por lo menos cinco cartuchos adecuadamente empaquetados y etiquetados. Los cartuchos se llevan a una planta de reciclaje para reutilizar los componentes.
Dell México	Es un programa de reciclado gratuito para usuarios de hogares o pequeños negocios. Se aceptan únicamente computadoras y periféricos de esta marca tiene el objetivo de recuperar el valor remanente en los equipos desechados, ya sea por venta a terceros o donaciones. Los equipos recolectados deben estar empacados de acuerdo a las normas de la empresa y deben pesar 30 kilos o menos.
Motorola	Es un sistema de acopio y eliminación final de equipos de telecomunicaciones que acepta aparatos de todas las marcas. Son depositados por los usuarios en contenedores especiales.
Compañías de telefonía cellular Telcel, Movistar, Iusacell	Operan programas permanentes de acopio en sus centros de atención al cliente.
We: Recycle Nokia	Promueve que los usuarios desechen teléfonos celulares y accesorios en centros de acopio autorizados.
D'evolution Sony	Es un programa que recibe en sus tiendas y centros de servicio cámaras y audífonos de todas las marcas a cambio de descuentos en la compra de productos nuevos.
Ayuntamiento de Xalapa (2011) *Gobierno de Lerdo, Durango*	En coordinación con el gobierno del estado, realizó un *Reciclotón* de aparatos eléctricos y electrodomésticos Las autoridades ambientales han emprendido una campaña de recolección de residuos de manejo especial, incluyendo equipos electrónicos, juguetes de baterías y llantas usadas para evitar que lleguen a rellenos sanitarios.
Dirección de Control y Protección Ambiental de Nuevo León	Opera un programa permanente de recolección y reciclaje de residuos electrónicos en colaboración con la Secretaría de Servicios Públicos Municipales, la Dirección de Protección Civil y la empresa *Home Depot.*
Secretaría del Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable (SEMADES) Jalisco	Realizó un programa con las empresas Nokia, Telefónica Movistar, Belmont y WRS para recibir computadoras en más de 80 tiendas de la cadena Oxxo y en plazas comerciales de la zona metropolitana de Guadalajara.

Fuente: Elaboración propia a partir de SEMARNAT (2015), SEMARNAT (2017)

- *Medianas y pequeñas empresas:* estas compañías están dedicadas a la recuperación de componentes electrónicos como los cables y las tarjetas impresas. En los diagnósticos realizados por el SEMARNAT (2015) se identificaron cerca de 100 pequeños negocios de este tipo. Cabe señalar que las empresas incluidas en este grupo surgen y desaparecen en periodos cortos de tiempo y encuentran principalmente en los estados: Querétaro, Aguascalientes, Guanajuato, Distrito Federal, Estado de México, Michoacán, Jalisco, Morelos, Hidalgo, Coahuila, Veracruz y Zacatecas.

- *Personas informales:* este grupo está confirmado por chatarreros, pepenadores y acopiadores de residuos, lo cuales, de acuerdo a la demanda del mercado, recuperan diversos aparatos electrónicos como computadoras, televisores y celulares de forma temporal (SEMARNAT, 2015).

3.4 Herramientas para la gestión de RAEE

Durante la última década se han realizado estudios sobre la gestión integral de los residuos electrónicos, con el objetivo de mitigar los problemas sociales, ambientales y económicos que se derivan de este manejo. La academia ha desarrollado varias herramientas para una adecuada gestión de los RAEE, dónde se puedan analizar y evaluar los potenciales impactos socio-ambientales. A continuación se presentan dichas herramientas para la toma de decisiones tales como: análisis de ciclo de vida (ACV), análisis de criterios múltiples (MCA, por sus siglas en inglés), análisis de flujo de materiales (MFA, por sus siglas en inglés) y la responsabilidad extendida del productor (REP):

a) *Análisis de ciclo de vida (ACV):* Es una herramienta de toma de decisiones ampliamente utilizada para evaluar aspectos económicos, en el diseño y desarrollo de un producto, así como los impactos ambientales, tales como: cambio climático, capa de ozono, eco-toxicidad, carcinógenos, acidificación, eutrofización y uso de tierra. Desde el año 2010 se ha utilizado esta herramienta para determinar los impactos y una correcta gestión de residuos electrónicos. Los resultados muestran no solo los potenciales ambientales sino también los beneficios económicos como una mayor recuperación de vidrio, hierro, cobre, aluminio y plástico (Navazo *et la*, 2014)

b) *Análisis de flujo de materiales (AFM):* Es una herramienta de apoyo y toma de decisiones para un adecuado manejo ambiental de los residuos. Se utiliza para estudiar la ruta de los componentes que fluyen por los diferentes procesos de reciclaje (reparación, re-acondicionamiento, desensamblado, separación física/química) hasta sus destinos finales, tales como: recuperación de materiales, rellenos sanitarios, incineración, entre otros. El AFM se puede aplicar para desarrollar una gestión adecuada de residuos electrónicos, considerando indicadores ambientales, económicos y sociales (Zeng et al., 2016). Shinkuma y Nguyen (2009) utilizaron esta herramienta para investigar el flujo de los RAEE en Asia. Descubrieron que los dispositivos electrónicos de segunda mano de Japón son revendidos y reutilizados en el sudeste asiático, y la mayoría de los residuos electrónicos se reciclan en China, con métodos de reciclaje inadecuados.

c) *Análisis multi-criterio (AMC):* Es una herramienta de decisión estratégica, que ayuda a resolver complejos esquemas de múltiples criterios, los cuales incluyen variables cualitativas y cuantitativas del problema a analizar (Garfi *et al.,* 2009). Los modelos de esta herramienta se han aplicado a escenarios de gestión ambiental, como el desarrollo de estrategias de manejo de residuos electrónicos, los cuales han brindado una positiva respuesta socio-ambiental a la gestión de los RAEE (Scruggs *et al.,* 2016).

d) *Responsabilidad extendida del productor (REP):* es una herramienta ambiental que atribuye responsabilidad a los fabricantes. Dicha responsabilidad se extiende hasta la recolección del producto al final de su vida útil y se basa en los principios de “quien contamina paga” (PNUMA, 2014). Se define como un enfoque de política ambiental, que incluye la responsabilidad material y financiera del fabricante sobre el producto. Esta política tiene dos características fundamentales: a) transferir la responsabilidad al productor (recolección, tratamiento, reutilización y reciclaje) y b) proporcionar incentivos a los productores para incorporar diseños ambientales en los productos (OCDE, 2014).

Oportunidades de recuperación de equipos eléctricos y electrónicos

Los equipos eléctricos y electrónicos (EEE) están conformados por una combinación compleja de materiales peligrosos y no peligrosos, que requieren procesos especializados de separación. Dependiendo del propósito del reciclador, el final de su vida útil puede dividirse en recuperación de materiales (reparación, re-acondicionamiento, desensamblado) o generación de energía (incineración). Romero y Molina (2013), al igual que Miller *et al.* (2016), presentan ocho tipos de oportunidades de recuperación de aparatos eléctricos y electrónicos durante el ciclo de vida.

Existen ocho procesos de recuperación de un aparato electrónico y electrónico. En la Tabla 3.18 se muestra que un AEE se puede extender el tiempo de vida útil por medio de su reúso, a través de reparaciones, actualizaciones del sistema operativo o reemplazando alguna de sus piezas (reacondicionamiento). También, se recuperan un producto por medio de re-manufactura, mediante la inspección, reparación, reemplazo de piezas y/o actualización del sistema, para llegar a un estado de calidad funcional. En caso de que el equipo ya no funcione, el reciclador optará por el desensamblado y aprovechará los componentes buenos para que estos sean usados en los procesos previamente mencionados (reparación, re-acondicionamiento, re-manufactura). Con respecto al reciclaje, las empresas usan casi todas las partes y materiales de los residuos electrónicos, para poder venderlos en mercados locales o en el extranjero como materia prima. En caso de que los materiales no puedan ser aprovechados, las legislaciones de cada país determinarán los destinos finales de los materiales que no pueden ser aprovechados. Por ejemplo, se puede pasar a la etapa de destrucción, ya sea por medio de incineración para generar energía o hacia disposición final segura, a través de procesos químicos de almacenamiento controlado.

Tabla 3.18 Oportunidades de recuperación de equipos eléctricos y electrónicos durante su ciclo de vida

Tipo de recuperación de producto	Definición
Reúso	Cuando un producto original puede usarse como de segunda mano para el propósito original que fue diseñado o uno diferente, sin entrar en una operación de recuperación de materiales.
Reparación	Cuando se repara un producto, al cual pueden reemplazan algunas de sus partes, con el fin de devolverlo a una condición funcional.
Reacondicionamiento	Cuando todas o alguna de las partes críticas de un producto son inspeccionadas, reparadas, reemplazadas y / o mejoradas para reacondicionar el producto a un nivel de calidad específico o estado funcional.

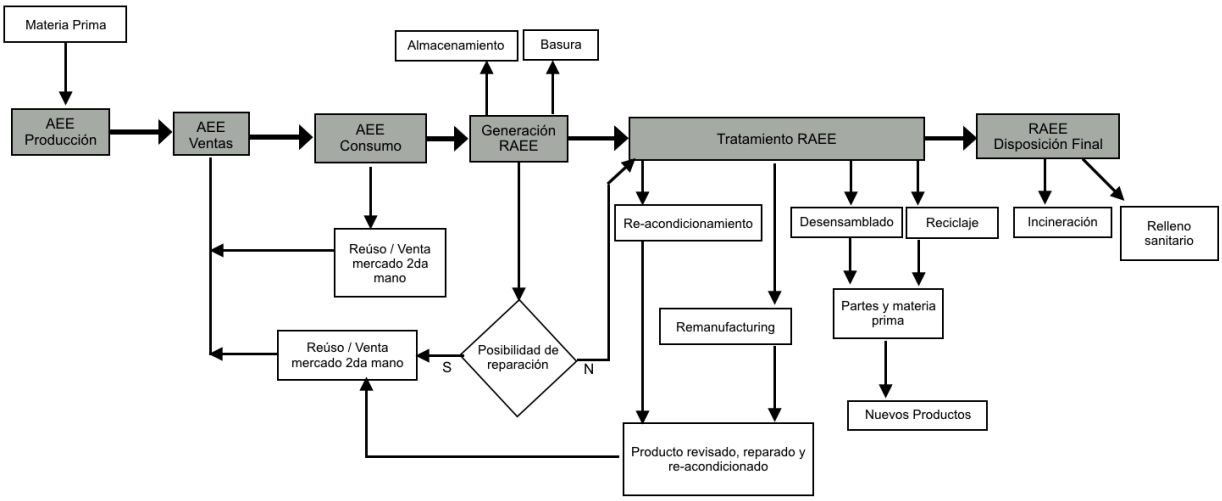
Tabla 3.18: (Con't)

Re-manufactura	Cuando todas las partes de un producto (usado y nuevo) son inspeccionadas, reparadas, reemplazadas, potencialmente actualizadas y probadas para llevar el producto al nivel de calidad "como nuevo".
Desensamblado selectivo	Algunas partes de un producto son recuperadas para su uso en procesos de reparación, reacondicionamiento y / o re-manufactura y otras partes son recicladas y / o desechadas (por ejemplo, un depósito de máquinas como fuente de repuesto inventario de partes).
Reciclaje	En este proceso la identidad y funcionalidad original de un producto se perderán, sus partes se procesarán y se recuperarán materiales para que estos sean usados como materias primas en nuevos productos (por ejemplo, vidrio, papel, metal, plástico, etc.)
Incineración	Es un método de eliminación de un producto, basado en la combustión o el tratamiento térmico para convertirlo en calor, gas, vapor o ceniza.
Disposición final segura	Es el método de eliminación menos deseado. Aquí el material se neutraliza con diferentes productos químicos, para reducir y eliminar sus efectos peligrosos, y luego se colocará en una caja segura que evita su lixiviación y se entierra bajo tierra.

Fuente: Elaboración propia a partir de Romero y Molina (2013, pp. 8-10), Miller *et al.* (2016)

El proceso de gestión integral de residuos electrónicos en México está generado y dictaminado por distintos actores tales como: fabricante, consumidor, tiendas de reparación, recicladoras, entre otros. Es por este motivo que se debe conocer el ciclo de vida de los equipos eléctricos y electrónicos. La Figura 3.3 que describe el ciclo general de un equipo electrónico, desde su producción, venta y uso por parte del consumidor, hasta que este último actor lo convierta en residuo. Como residuo electrónico, el equipo puede ser almacenado por el usuario o tirado a la basura. Sin embargo, el proceso adecuado con menores impactos socio-ambientales es por ejemplo la reparación o pasar a un proceso de diagnóstico, análisis y evaluación, para ser re-acondicionado/re-manufacturado y entrar nuevamente al mercado. Por otro lado, si el funcionamiento y condiciones del equipo no pueden ser recuperadas, se aprovechan sus componentes y materiales para fabricar nuevos productos o van a incineración o a disposición final (Urbinati *et al.*, 2017; Cruz *et al.*, 2017; Parajuly y Wenzel, 2017; Navazo *et al.* 2014).

Figura 3.3 Ciclo de vida de un equipo eléctrico y electrónico



Fuente: Elaboración propia a partir de INECC (2011, Pp. 108-111); SEMARNAT (2017, Pp. 15-18); Urbinati *et al.* (2017); Cruz *et al.* (2017); Parajuly y Wenzel (2017); Navazo *et al* (2014).

Procesos para la recuperación de materiales provenientes de RAEE

Los procesos de reciclaje de residuos electrónicos se enfocan en dos etapas generales para desensamblar y recuperar los materiales. La Tabla 3.19 indica las dos etapas de procesamiento de los RAEE: a) Pre-procesamiento (separación manual, desensamblado, trituración y separación mecánica), y b) Tecnología de procesamiento final (piro-metalurgia, hidro-metalurgia y bio-metalurgia) (Namias, 2013). Se inicia el pre-procesamiento con la etapa de separación manual en la cual se realiza el desmontaje de los componentes, para pasar luego a la fase de trituración, con el fin de reducir el tamaño de las partes y, finalmente, al proceso de separación mecánica donde se separan los materiales de acuerdo a sus propiedades físicas. El procesamiento final se enfoca en obtener materiales tales como metales preciosos, metales ferrosos, no ferrosos, tierras raras, entre otros. Esta etapa se realiza en pocos países, ya que implica el uso de tecnologías de procesamiento final muy costosas, entre las cuales se tienen piro-metalurgia usa altas temperaturas, hidro-metalurgia utiliza sustancias químicas y/o bio-metalurgia emplea microorganismos (bacterias y hongos).

Tabla 3.19 Procesos de desensamblado de residuos electrónicos y recuperación de materiales

Etapa de separación	Tipo de separación	Definición	Referencia
Pre-procesamiento (Es una etapa de fácil separación, realizada por empleados y con equipos no sofisticados)	Separación manual	Se basa en el desmontaje de los equipos electrónicos, separación de los principales componentes para su reutilización en otros equipos o para ser vendidos en diferentes industrias locales, como plástico, acero, aluminio, vidrio.	Namias, 2013
	Trituración	Es un proceso donde el tamaño de un componente se reduce mediante el uso de trituradoras de metal, molinos de martillos o molinos de cuchillas.	Khaliq *et al.,* 2014
	Separación mecánica	Proceso que usa la fuerza centrífuga y magnética para la separación de materiales ferromagnéticos como hierro, acero y metales de tierras raras. También se usan diferentes sensores para separar diversas corrientes entre sí, por ejemplo, los sensores infrarrojos separan diferentes plásticos del vidrio.	Namias, 2013 Veit *et al*., 2014
Tecnología de procesamiento final (Es una etapa costosa que requiere equipos de alta tecnología y se lleva a cabo en pocos países como: Bélgica, Canadá, Japón)	Piro-metalurgia	Es un proceso que incluye la fusión de materiales a altas temperaturas, para obtener una mezcla de los metales deseados para purificar. La eficacia de este proceso depende de la inversión. Esta técnica generalmente se usa para recuperar oro, plata, cobre y paladio	Namias, 2013
	Hidro-metalurgia	Este proceso involucra la lixiviación del concentrado que proviene del proceso piro-metalúrgico, desde el pretratamiento y la disolución. Para la recuperación de los metales se utiliza ácidos, cianuro, haluros, tioúrea o tiosulfato.	Veit *et al*., 2014
	Bio-metalurgia	Es un proceso donde se utilizan microorganismos, como bacterias y hongos, para lixiviar metales del concentrado de residuos electrónicos. Por ejemplo, se usan Desulfovibrio desulfuricans para recuperar oro, platino y cobre.	Khaliq *et al*., 2014; Van Eygen *et al*., 2016

Fuente: Elaboración propia con base en las referencias indicadas en la Tabla.

En el caso de México, el estudio más reciente realizado por el INECC sobre planes de gestión integral de RAEE data del año 2011. En esta investigación se determinó que uno de los principales elementos en la gestión es el sistema de recolección y almacenamiento de los residuos. Para el sistema de recolección, se planteó que el usuario final sea el encargado de trasladar sus RAEE desde su casa/instalación hasta el centro de acopio. Para el caso de la logística de transporte, el reciclador sería el encargado de llevar los residuos desde los sitios de acopio hasta los centros de reciclado, reúso, re-manufactura y disposición final. El reúso de los

equipos electrónicos irá como donativo para escuelas en zonas de bajos recursos o para centros comunitarios. Los materiales provenientes de los RAEE serán reciclados a través de operaciones de desensamblado, desmantelamiento y separación de partes. Adicionalmente, se vio la necesidad de explorar la recuperación de materiales metálicos con ayuda tecnológica de los fabricantes o refinadoras de metales. Y finalmente, los materiales que no puedan ser recuperados, deberán ser neutralizados y eliminar su toxicidad para ser enterrados en vertederos seguros (INECC, 2011).

Con respecto a los aspectos económicos, el estudio del INECC (2011) se propuso evaluar de manera detallada el valor de los residuos electrónicos y su costo de operación, además de los procesos de acopio y reciclado. Esta planificación debía incluir un análisis técnico-económico de todas las etapas del reciclaje, desde la logística de recolección, costos de mano de obra, costos de recuperación de materiales y administración del sistema. Se propuso constituir una alianza entre el sector privado y el gobierno para promover el manejo eficiente de recursos y apoyo técnico para la comercialización de los materiales obtenidos. Sin embargo, no existen documentos de seguimiento de estas propuestas. Es por este motivo que uno de los objetivos de este artículo es hacer un análisis técnico-económico del flujo de materiales de residuos electrónicos (teléfonos celulares) en México y evaluar los procesos de reparación y reciclaje en este país.

3.5 Conclusiones

- La generación de RAEE a nivel mundial tiene una tendencia de crecimiento exponencial, debido a la aparición de nuevas tecnologías y productos electrónicos asequibles. Es por este motivo, que se ha visto la necesidad de generar datos e información actualizada con el fin de planificar y desarrollar planes de manejo integral de los residuos y reutilización de sus materiales en la industria local. Los residuos electrónicos requieren de procesos integrales de reciclaje, para evitar por un lado problemas ambientales, sociales y sanitarios, y, por otro lado, pérdidas económicas para gobiernos, fabricantes y recicladoras, al no contar con la tecnología necesaria de recuperación de materiales.

- Internacionalmente existen numerosos convenios y normativas para promover el reciclaje y recuperación de materiales a partir de RAEE, bajo estándares aprobados por Naciones

Unidas y de derecho ambiental. Países de economías emergentes se han adherido a dichos convenios y han tomado como base de sus legislaciones leyes que provienen de países desarrollados, particularmente de la directiva de la Unión Europea. No obstante, la realidad de estos países es cada vez más compleja, ya que no existe una adecuada educación ambiental, la gestión integral de los residuos es ineficiente y existe un gran manejo informal e ilegal en el reciclaje de sus RAEE.

- México cuenta con convenios internacionales y un marco jurídico que busca asegurar el manejo integral de residuos y su prevención. Existen diferentes instrumentos que permiten cumplir este objetivo, comenzando por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la LGEEPA, la LGPGIR y los reglamentos y normas oficiales mexicnas. A pesar de que el país no cuenta con una ley específica de residuos electrónicos, los convenios y leyes mencionadas facilitan la gestión de RAEE. Sin embargo, es importante caminar hacia la promulgación de una ley específa de residuos electrónicos que asegure una adecuada gestión integral de los residuos, controle el reciclaje informal y genere incentivos para los fabricantes y consumidores, para que se responsabilicen del final de la vida útil de sus electrónicos.

- La mayoría de los residuos de equipos eléctricos y electrónicos se reutilizan o reciclan a través de programas formales / informales, dependiendo del país donde se generan. Si estos RAEE se administran de manera adecuada y los materiales se pueden recuperar, y crear nuevas oportunidades de negocio. Los gobiernos, las organizaciones no gubernamentales (ONG) y la industria electrónica deben considerar que una adecuada gestión de los residuos electrónicos es una herramienta para el desarrollo sostenible y, por lo tanto, hacia la economía circular. A nivel mundial, los procesos de análisis y promulgación de leyes para una gestión adecuada de los RAEE están avanzando lentamente, principalmente en países en vías de desarrollo donde algunos de ellos ni siquiera tienen proyectos de elaboración de la ley.

- Durante la última década se han realizado estudios sobre la gestión integral de los residuos electrónicos, con el objetivo de mitigar los problemas sociales, ambientales y económicos que se derivan de este manejo. La academia ha desarrollado varias herramientas para una adecuada gestión de los RAEE, dónde se puedan analizar y evaluar los potenciales impactos socio-ambientales. Una de estas herramientas es el análisis de flujo de materiales que

permite conocer cómo los materiales fluyen a través de los diferentes actores y procesos de reparación, reciclaje y disposición final de los RAEE.

- México cuenta con poca literatura disponible sobre generación y gestión integral de residuos de aparatos electrónicos y electrónicos. A partir del año 2016 se ha visto una mejora en la investigación gubernamental sobre este tema y se espera que los nuevos estudios y análisis permitan generar mejores políticas públicas que incentiven la recolección formal de los RAEE además de inversión para tecnologías de recuperación de materiales. El hecho de que el mercado informal de electrónicos en el país tenga una representación del 89.2% muestra la importancia de crear alianzas entre el gobierno, empresas, recicladoras y sociedad civil para parar estas mafias que empobrecen a la sociedad, además de generar graves impactos de salud en sus trabajadores por las precarias condiciones laborales.

CAPÍTULO 4

Marco Metodológico

Este capítulo presenta el marco metodológico que se utilizó para responder la pregunta de investigación. Con base en la problemática presentada en este estudio, se estableció la pregunta de investigación enfocada en determinar el potencial que tiene México para moverse hacia un modelo de economía circular en el ámbito de la industria electrónica, ejemplificado con el caso de los teléfonos celulares. Se seleccionó la industria electrónica con el objetivo de desafiar al investigador ante un escenario complejo, con información desactualizada, sin legislación ni datos duros, pero con alto potencial de crecimiento e ingresos económicos para el país - USD76,540 millones de dólares para el año 2020- (INEGI, 2012). De esta manera, el marco metodológico se dividió en dos. Primero, se realizó un estudio exploratorio que analizó el estado del arte y referencias a nivel local, regional y mundial. Con el fin de buscar información que muestre el panorama sobre los posibles actores, procesos y condiciones que se llevan a cabo en la industria de los productos electrónicos en el país. Segundo, con base al estudio exploratorio, se plantearon encuestas y preguntas cuyas respuestas llevaron una metodología descriptiva que permitió determinar y caracterizar al consumidor de la industria de electrónicos, tiendas de reparación, recicladoras y el subsistema productivo-económico de teléfonos celulares.

4.1 Método exploratorio

El método o estudio exploratorio aborda temas poco conocidos donde la problemática de la investigación necesita ser aclarada y delimitada (Pérez, 2013). Esta investigación realizó un año de revisión de literatura y consultas con especialistas en el tema sobre economía circular, industria electrónica, residuos electrónicos, reparación y reciclaje. De este estudio exploratorio surgieron las preguntas para trabajar en las encuestas que se utilizaron en tres de las cinco

investigaciones (comportamiento del consumidor, recicladoras, tiendas de reparación), con el objetivo de conocer la situación del país sobre los temas previamente mencionados.

Para las empresas formales de reciclaje y tiendas de reparación, se buscó información y datos de contacto a través de la Cámara Nacional de la Industria Electrónica de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información (CANIETI). Se contactó a 21 empresas de reciclaje formal en el país, sin embargo, solamente 12 empresas aceptaron ser entrevistadas de manera personal y confidencial. Estas 12 empresas se encuentran en las ciudades de Ciudad de México, Guadalajara y Querétaro. Para el caso de las tiendas de reparación y, con el objetivo de optimizar recursos económicos del proyecto, se aprovecharon las mismas ciudades para analizar la industria de la reparación de electrónicos.

La investigación exploratoria sobre generación de RAEE en el país y el cálculo económico de las PCB, permitió clarificar el panorama de los residuos en el país y conocer el contenido de materiales en los teléfonos celulares. Además, el estudio exploratorio arrojó ecuaciones generales y relaciones entre el producto interno bruto, producción de electrónicos y generación de residuos. Junto con ecuaciones para calcular el subsistema productivo-económico para el cálculo de eficiencias de desensamblado y costo económico de pérdidas debido a la falta de tecnologías de procesamiento final de materiales.

4.2 Método descriptivo

El estudio descriptivo se sitúa sobre la información y la literatura obtenida previamente durante el método exploratorio. Se obtiene un marco de referencia más real y una situación más clara para poder responder la pregunta de investigación (Pérez, 2013). A partir del estudio exploratorio se pudieron plantear las encuestas y determinar preguntas específicas alineadas en responder la pregunta de investigación.

Análisis del consumidor

La revisión de la literatura permitió generar un análisis descriptivo sobre el comportamiento del consumidor de electrónicos en el país. Las preguntas fueron de carácter cualitativo y se originaron a partir de estudios realizados previamente en México por el Instituto Nacional de

Ecología en el año 2010 (INEGI, 2010) e investigaciones desarrolladas en España (Cruz-Sotelo *et al.* 2013), Brasil (Schäfer *et al*., 2011), Taiwan (Tu *et al*., 2018), Vietnam (Nguyen *et al*., 2018), Nigeria (Chibuike *et al.,* 2017), entre otros países. De un total de 50 preguntas desarrolladas por el autor, la encuesta final terminó con 33, las cuales fueron previamente discutidas y analizadas por los coautores. Las preguntas cualitativas de la encuesta se clasificaron por temas: a. Comportamiento en el uso de equipos electrónicos (4 preguntas); b. Comportamiento al finalizar el tiempo de uso del equipo electrónico (3 preguntas); c. Destino final del equipo electrónico (2 preguntas); d. Reciclaje (4 preguntas); e. Reparación (6 preguntas) y f. Características socio-económicas (14 preguntas). La encuesta nacional fue llevada a cabo por la empresa Berumen S.A. de C.V., una de las mejores empresas de estudios de mercado y socio-económicos en el país. En el Anexo A se pueden encontrar las preguntas formuladas a los encuestados.

Reciclaje de electrónicos: teléfonos celulares en México

A diferencia del estudio sobre el comportamiento del consumidor, este estudio se llevó a cabo en las ciudades de Monterrey, Guadalajara y Ciudad de México, donde se analizaron a doce empresas de reciclaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), entre finales del año 2015 y primer semestre del 2016. Con base a la información obtenida del estudio exploratorio, la revisión bibliográfica permitió generar encuestas cualitativas para conocer y evaluar el nivel tecnológico de la industria del reciclaje de electrónicos en el país, con el fin de generar una línea base para conocer los actores y procesos que permitan determinar la factibilidad de implementar un modelo de economía circular en la industria electrónica en el país. En el Anexo B se podrán encontrar las preguntas formuladas a los encargados de las empresas de reciclaje. Los temas de análisis en las recicladoras fueron: perfil tecnológico de la empresa, tipo de electrónicos que reciclan, marcas de los EEE, áreas de procesamiento y desensamblado de equipos, y certificaciones.

Cálculo de generación de residuos de teléfonos celulares

Por medio del estudio exploratorio se pudo determinar que la generación de residuos electrónicos de un país tiene relación directa con su producto interno bruto (PIB). Los estudios que más sobresalen a nivel mundial provienen de China, por ejemplo, Yu *et al.* (2010) y Kumar

et al. (2017) comparan el PIB de China y la directa relación que tiene con la generación de RAEE en el país. De igual manera, Baldé *et al.* (2015) toma de referencia al PIB de China y su generación de residuos electrónicos para compararlo con el PIB y la generación de RAEE en más de 50 países. Por este motivo, la investigación relacionó al PIB de México con el de China para el cálculo de generación de residuos celulares.

Reparación de electrónicos en el país

El tercer estudio sobre tiendas de reparación, se basó en bibliografía analizada a través del estudio exploratorio y los resultados descriptivos-cualitativos de las empresas de reciclaje. Como se mencionó previamente, con el objetivo de optimizar tiempo y recursos económicos, las ciudades donde se investigaron las tiendas de reparación fueron las mismas que las recicladoras y se añadió la ciudad de Querétaro aprovechando la cercanía a la Ciudad de México. El estudio determinó como tienda formal, a aquellos locales que entregan facturas, caso contrario fue considerada como informal. Las preguntas realizadas en las 66 tiendas de reparación provienen de un análisis exploratorio de 15 preguntas generales, las cuales fueron condensadas en cinco temas de características cualitativas y clasificadas por: aspectos generales, nivel académico, características de las instalaciones, seguridad y salud, y manejo de RAEE. Uno de los aspectos que más llamó la atención fue la presencia de trabajo infantil en los locales informales. Se trató de explorar las edades de los empleados menores de edad, preguntándoles directamente a los encargados, sin embargo, la mayoría lo negaron e indicaron que están haciendo tareas o jugando, otros confirmaron que sus hijos están aprendiendo “el oficio de vender y reparar” (se confirmó que todos tenían menos de 15 años).

Análisis de Flujo de Materiales de Residuos de Teléfonos Celulares

El análisis de flujo de materiales (AFM) es una herramienta de toma de decisiones para una adecuada gestión y manejo de residuos Yu *et al.* (2010) y Badiru *et al.* (2013). A través del estudio exploratorio se pudo clarificar el método descriptivo para determinar cómo los materiales de los teléfonos celulares fluyen a través de los diferentes procesos de desensamblado (Cruz *et al.*, 2017; Badiru *et al.*, 2013; Navazo *et al.*, 2014). De esta manera, se establecieron las ecuaciones de eficiencias de desensamblado y balance de materiales:

$$\Delta M = \Sigma f_{\text{in}} - \Sigma f_{\text{out}}$$ (Ecuación de Balance de Materiales) (4.5)*

$$Em = \left[\left(\frac{\Sigma f_{\text{out}}}{\Sigma f_{\text{in}}}\right)\right] * 100$$ (Ecuación de Eficiencia de Desensamblado) (4.6)**

*La variación en el material durante el proceso de desmontaje manual (ΔM) se determinó calculando la diferencia entre el peso inicial del teléfono celular (Σf_{in}) y la suma del peso de todos los componentes que abandonaron el proceso (Σf_{out}) (Ecuación 4.5).

**El calculó la variación porcentual del material durante el desensamblado (*Em*) para determinar la eficiencia del proceso y el porcentaje de pérdidas de material (Ecuación 4.6).

Impacto Económico de los materiales de Tarjetas de Circuitos Impresos de Teléfonos Celulares

Esta investigación abarcó una gran revisión de literatura, ya que recopiló el contenido general de los materiales que conforman los teléfonos celulares y la concenrtación -en peso- de los materiales provenientes de las tarjetas de circuitos impresos (Yu *et a.l*, 2010; Badiru *et al.*, 2013; Navazo *et al.*, 2014; Alcántara *et al.* 2016; Baldé *et al*., 2015; Ghosh *et al*., 2015; Kumar *et al.,* 2017; Cruz *et al.*, 2017). Por medio del estudio exploratorio se pudo confirmar que la tarjeta madre o tarjeta de circuitos impresos es el componente de mayor importancia y valor económico-comercial que posee un teléfono celular (Yamane *et al.* 2011, Holgersson *et al.* 2018). A través de un análisis descriptivo cuantitativo se obtuvo el cálculo económico de las PCB provenientes de teléfonos celulares. Para esto se realacionó el precio comercial de cada material con el porcentaje que se encuentra en la PCB.

Capítulo 5

Resultados: Industria electrónica y mapeo de flujo de materiales en teléfonos celulares en México

Con base en la información brindada por las instituciones mexicanas y las organizaciones de electrónicos, la tesis doctoral se centró en buscar y generar datos necesarios para determinar si en México se puede avanzar hacia un modelo de economía circular en el sector de electrónicos, particularmente en teléfonos celulares. De esta manera, se generaron estudios base para la recolección de datos e información, más actualizada, referente al sector de los residuos electrónicos: generación de RAEE, reparación, reciclaje y flujo de materiales en teléfonos celulares. Cabe mencionar que, para optimizar recursos de la investigación, las ciudades donde se realizaron los estudios fueron seleccionadas con base a las empresas recicladoras que aceptaron las entrevistas. Por este motivo, las ciudades de Monterrey, Guadalajara, Ciudad de México y Querétaro fueron los lugares seleccionados para los estudios de campo en tiendas de reparación y reciclaje de electrónicos.

Los materiales y métodos utilizados en esta investigación se derivan de las definiciones generalmente más aceptadas sobre Economía Circular. Urbinati *et al.* indican que los sistemas de ciclos cerrados que reutilizan recursos y reducen el consumo de energía son elementos fundamentales en la EC. Kirchherr *et al*. y Homrich *et al*. son enfáticos al considerar la calidad del medio ambiente, la prosperidad económica y la equidad social como los objetivos finales de este modelo circular. En este contexto, los materiales y métodos propuestos en esta investigación tienen como objetivo caracterizar la madurez de los sistemas circulares con respecto a la reutilización, re-manufacturación (reparación) y reciclaje. Además, la evaluación económica de los residuos electrónicos de los teléfonos celulares proporciona una indicación del impacto ambiental, económico y social actual de estos productos.

5.1 Comportamiento del consumidor de electrónicos

La revisión de la literatura muestra la falta de información en profundidad sobre el comportamiento del consumidor de productos electrónicos en México. El objetivo de esta investigación se centró en generar datos e información sobre el comportamiento del consumidor de productos electrónicos en temas relacionados con el medio ambiente, hábitos de consumo y la forma en que las personas manejan sus productos electrónicos al final de su vida útil. La encuesta fue implementada a nivel nacional con entrevistas personales a 1,000 personas, realizadas a hombres y mujeres mayores a 18 años de edad.

5.1.1 Metodología

Esta sección describe los materiales y métodos utilizados para la recopilación de datos e información necesaria para conocer y comprender el comportamiento del consumidor de electrónicos en el país. El desarrollo del cuestionario, su aplicación, pruebas piloto, encuesta nacional, procesamiento de datos y análisis tuvieron la duración de seis (6) meses, a partir de julio 2017 hasta enero de 2018.

Desarrollo del cuestionario

Las preguntas del cuestionario se generaron a partir de revisión bibliográfica y análisis de estudios sobre comportamiento del consumidor de electrónicos realizados en México por el Instituto Nacional de Ecología en el año 2010 (INEGI, 2010) e investigaciones desarrolladas en España (Cruz-Sotelo *et al.* 2013), Brasil (Schäfer *et al*., 2011), Taiwan (Tu *et al.*, 2018), Vietnam (Nguyen *et al*., 2018), Nigeria (Chibuike *et al.,* 2017), entre otros países. Estas preguntas fueron desarrolladas por el autor, y discutidas y analizadas por los coautores. La encuesta nacional fue llevada a cabo por la empresa Berumen S.A. de C.V., una de las mejores empresas de estudios de mercado y socio-económicos en el país. En el Anexo A se pueden encontrar las preguntas formuladas a los encuestados.

Tamaño de la muestra poblacional

La encuesta se llevó a cabo en México, a nivel nacional, en los 31 estados del país. Con base al último censo realizado por el INEGI en el año 2015, se determinó que el tamaño de la población nacional fue de 119'938,473 personas y ese dato se consideró para el cálculo de la muestra poblacional a aplicar en la encuesta nacional (INEGI, 2015). En general, el tamaño de la muestra se determina a partir de parámetros a estimar en una investigación socioeconómica, con distintos porcentajes y proporciones de variables referidas a un conjunto de personas/hogares. Para determinar un tamaño de muestra para este estudio, se utilizó el método de Bartlett *et al.* (2001) de acuerdo a la ecuación 1 y se partió de un muestreo aleatorio simple, con las exigencias de precisión y confianza requeridas para la investigación (Fox *et al.,* 2009; Bennett *et al.,* 2011).

$$n = k^2 * \frac{P*(1-p)}{d^2}$$ (Ecuación tamaño de la muestra) (4.1)

A partir de esta ecuación el tamaño de muestra requerido en la población total mexicana de 119'938,473 (INEGI, 2015), con un nivel de confianza del 95% (k), junto con un margen de error máximo de 0.03 (d) fue de 1,067 personas (~ 1,000) a encuestar tal y como se ilustran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Niveles de confianza para el cálculo del tamaño de una muestra poblacional

	Confianza 95% (k=1.96)				
Precisión d	**P= 0.05**	**P= 0.10**	**P= 0.25**	**P= 0.40**	**P= 0.50**
0.01	1,825	3,457	7,203	9,220	9,604
0.02	456	864	1,801	2,305	2,401
0.03	203	384	800	1,024	1,067
0.04	114	216	450	576	600
0.05	73	138	288	369	384

Fuente: Realizado por el autor a partir de Fox *et al.* (2009); Bennett *et al.* (2011)

Diseño de la muestra

A través del tamaño de la muestra, se seleccionaron los estados del país donde se aplicaron las entrevistas. En México las áreas geográficas con fines censales de llaman AGEBS (INEGI,

2012), las cuales son de menor dimensión tanto territorial como poblacional respecto al municipio, y se forman a partir de las localidades. El marco muestral fue conformado por la totalidad de las AGEBS del país. Se seleccionaron de manera aleatoria 100 AGEBS, cuya probabilidad de ser elegidas es proporcional al tamaño poblacional. Dentro de cada AGEB en muestra se tomaron de manera aleatoria 2 manzanas. Y dentro de cada manzana en muestra -igualmente de manera aleatoria- se escogerán 5 viviendas particulares ocupadas. Finalmente, en la última etapa muestral se seleccionaron los individuos dentro de cada vivienda para la entrevista, con las características de ser mayores de edad (18 años). Con lo previamente mencionado, la distribución de la muestra a nivel nacional se indica en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Número de entrevistas por cada Estado mexicano

No.	Estado	Número de entrevistas
1	México	130
2	Distrito Federal	100
3	Jalisco	80
4	Veracruz	60
5	Nuevo León	50
6	Puebla	50
7	Baja California	40
8	Chihuahua	40
9	Guanajuato	40
10	Michoacán de Ocampo	40
11	Tamaulipas	40
12	Coahuila de Zaragoza	30
13	Guerrero	30
14	Sonora	30
15	Chiapas	20
16	Morelos	20
17	Oaxaca	20
18	Querétaro	20
19	San Luis Potosí	20
20	Sinaloa	20
21	Yucatán	20
22	Aguascalientes	10
23	Campeche	10
24	Colima	10
25	Durango	10
26	Hidalgo	10
27	Nayarit	10
28	Quintana Roo	10
29	Tabasco	10
30	Tlaxcala	10
31	Zacatecas	10
Total	Total	1000

Fuente: Elaboración propia a partir de Berumen (2018)

Elaboración del cuestionario

A partir de la muestra poblacional de 1,000 personas, se elaboró el cuestionario para ser aplicado a nivel nacional. La encuesta constó de 19 preguntas referentes al comportamiento del consumidor de electrónicos y se clasificaron en cinco áreas (Tabla 5.3): a. Comportamiento en el uso de equipos electrónicos (4 preguntas); b. Comportamiento al finalizar el tiempo de uso del equipo electrónico (3 preguntas); c. Destino final del equipo electrónico (2 preguntas); d. Reciclaje (4 preguntas); y, e. Reparación (6 preguntas).

Para determinar las características socio-económicas de cada entrevistado, se elaboraron 14 preguntas adicionales enfocadas en la edad, género, nivel académico, tipo de trabajo, número de miembros en el hogar y características de la vivienda. Cada entrevista tuvo la duración de entre 15-20 minutos, ya que los expertos recomendaron que era un tiempo máximo para captar el interés y la atención de los encuestados. El cuestionario se enfocó en los cinco aparatos electrónicos de mayor consumo en México: televisores, computadoras de escritorio, computadores portátiles, tabletas y teléfonos celulares (SEMARNAT, 2014).

Tabla 5.3: Relación entre el área de análisis y las preguntas del cuestionario

Área de análisis	Resumen de preguntas
1. Comportamiento en el uso de equipos electrónicos	**Q1** ¿Cuáles equipos electrónicos tiene?
	Q2 ¿Cómo adquirió el equipo electrónico el entrevistado?
	Q3 ¿En qué condición los recibió?
	Q4 Tiempo de uso de su equipo
2. Comportamiento al finalizar el tiempo de uso del equipo electrónico	**Q5** Razones por las que un equipo ya no es funcional.
	Q6 Tiempo de almacenamiento del equipo.
	Q7 Maneras de deshacerse del equipo.
3. Destino final del equipo electrónico	**Q8** Conocimiento sobre el destino final del equipo.
	Q9 Opciones de destino al finalizar su vida útil.
4. Reciclaje	**Q10**Motivos para no entregar el equipo al reciclador.
	Q11 Razones para entregar el equipo al fabricante.
	Q12 Contribución ecológica para un reciclaje responsable.
	Q13 Depósito ecológico para un reciclaje responsable.
5. Reparación	**Q14** Problemas que puede tener el equipo en su vida útil.
	Q15 Alternativas de reparación.
	Q16 Servicios o accesorios extras de protección.
	Q17 Opciones de cambio de batería.
	Q18 Opciones para usar el equipo más tiempo de lo esperado.
	Q19 Programas de trueque o intercambio (*trade-in*).

Tabla 5.3: (Con't)

6. Características socio-económicas	Edad, género, nivel socio-económico, nivel de educación, nivel conocimiento tecnológico, tipo de trabajo, tipo de vivienda, número de miembros del hogar, tipo de piso, número de focos, número de baños, número de baños con regadera, número de automóviles, estufa a gas o eléctrica.

Fuente: Elaboración propia partir de referencias de Cruz-Sotelo *et al.* (2013); Schäfer *et al*. (2011), Tu *et al.* (2018), Nguyen *et al*. (2018), Chibuike *et al.* (2017)

Prueba piloto y procesamiento de información

Una vez determinadas las preguntas de la encuesta, se realizó una prueba piloto para corregir y ajustar el cuestionario con base al tiempo recomendado por los expertos. Se verificó si las preguntas eran claras y fáciles de comprender. Así también tener un primer acercamiento sobre el comportamiento del consumidor en temas ambientales, hábitos de consumo, formas como las personas manejan sus productos electrónicos al final de su vida útil, reparación y reciclaje. La prueba piloto tuvo duración de 4 días, por medio de entrevistas cara a cara. La captura de la información se realizó mediante un sistema inteligente que reduce considerablemente el error humano, denominado *Census Pro*. El análisis de información se lleva a cabo utilizando otro paquete estadístico, especializado en estudios de mercado y de comportamiento social llamado *SPSS* (Statistical Package for Social Sciences, por sus siglas en inglés).

5.1.2 Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la encuesta nacional del comportamiento del consumidor de electrónicos en México. Los resultados de las entrevistas a 1,000 personas llevadas a cabo en los 31 estados de la república mexicana. Dichos resultados se clasificaron de acuerdo a cinco áreas enfocadas en el uso de los equipos, comportamiento al finalizar el uso del equipo, destino final, reciclaje y reparación.

Prueba piloto

La prueba piloto permitió realizar mejoras y adecuaciones al contenido de las preguntas y el tiempo de la entrevista por persona. La muestra de esta prueba piloto fue de 120 personas y se verificó que los entrevistados tuvieron un buen entendimiento y comprensión del contenido de las preguntas. Adicionalmente, se capacitó con mayor facilidad al resto de encuestadores y se les brindó tarjetas de ayuda con definiciones y ejemplos para explicar de mejor manera cada inciso, en caso de que algún entrevistado no comprenda bien la pregunta.

Encuesta nacional

El perfil del consumidor de la encuesta nacional realizada a las 1,000 personas mostró que las entrevistas fueron 50/50 entre hombres y mujeres, la mayoría de entrevistados pertenecieron a un nivel socio-económico medio y sus edades fluctuaron entre 24-50 años. El género femenino representó un 50.2% y el resto fue masculino. Con respecto al nivel socio-económico, en la Tabla 5.4 se pueden apreciar los porcentajes que pertenecen los encuestados.

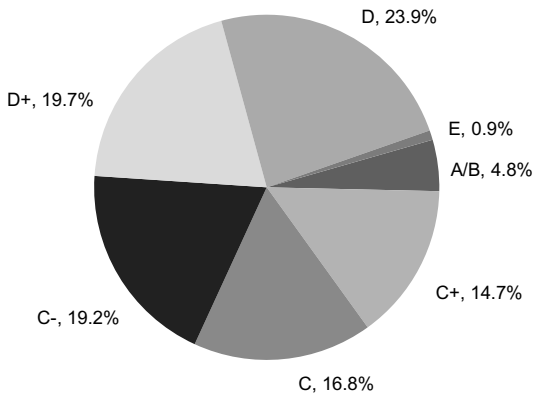
El nivel socio-económico en México presenta diferentes estratos con base a sus ingresos mensuales. La Tabla 5.4 y Figura 5.1 muestran que el 4.8% de la muestra pertenece al nivel A/B (estrato con el más alto nivel de vida e ingresos), el 70% de los entrevistados provienen de un nivel socio-económico medio entre alto C+ (similar al nivel A/B, es un nivel social alto de vida pero con limitantes para ahorrar y realizar gastos mayores o excesivos), medio C y C- (nivel social medio, por encima del promedio de bienestar poblacional) y medio bajo D+ (segmento más grande de la población mexicana, tiene cubierta la mínima infraestructura sanitaria de su hogar). Finalmente, el 23.9% perteneció a la categoría socio-económica baja (es el segmento pobre, carece de todos los servicio y bienes satisfactores) y el 0.9% pertenece a la pobreza extrema.

Tabla 5.4: Nivel socio-económico de los 1,000 encuestados en México (porcentaje)

Nivel socio-económico	**A/B**	**C+**	**C**	**C-**	**D+**	**D**	**E**
Porcentajes	4.8	14.7	16.8	19.2	19.7	23.9	0.9
Explicación de niveles según INEGI	Mayor proporción de gasto: educación, entretenimiento, comunicación, ahorro y adquisición de vehículos.						
	Igual proporción de gasto: mantenimiento y reparación de la vivienda, enseres domésticos, limpieza y cuidado de la casa, vestido y calzado, conservación de la salud.						
					Mayor proporción de gasto: alimentos y bebidas, transporte y cuidado personal.		

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional e información obtenida del INEGI (2012)

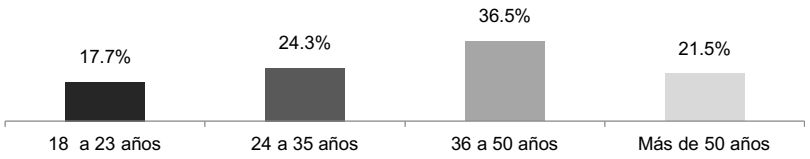
Figura 5.1: Nivel socio-económico de los 1,000 encuestados en México (porcentaje)



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

La media de la edad en esta encuesta perteneció a la población entre los 36-50 años de edad. La Figura %.2 presenta los rangos de edades de los 1,000 encuestados, siendo la de menor proporción los jóvenes de entre 18-23 años con un 17.7%, seguido de las personas mayores de 50 años (21.5%).

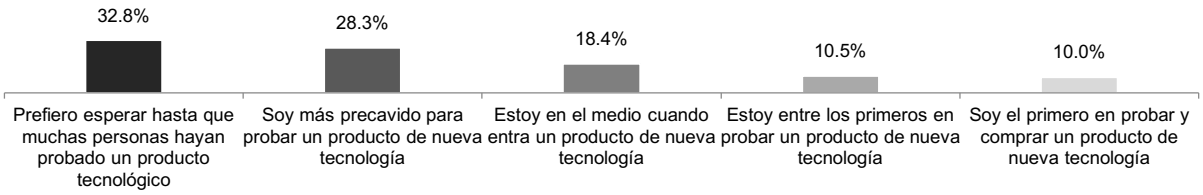
Figura 5.2: Rango de edades de los 1,000 encuestados en México (porcentaje)



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Se obtuvo que el 61.1% prefieren esperar que otras personas prueben un producto tecnológico o son más precavidas en probar un nuevo producto. La Figura 5.3 muestra que el 32.8% de los entrevistados prefieren esperar que otras personas prueben un equipo tecnológico, al igual que un 28.3% son más lentas en probar nueva tecnología. En porcentajes menores del 20% se presentan personas que están pendientes de nuevas tecnologías (18.4%) o están entre los primeros para probarlas y comprarlas (10.5%), y finalmente están los primeros en probar nuevos equipos tecnológicos (10%).

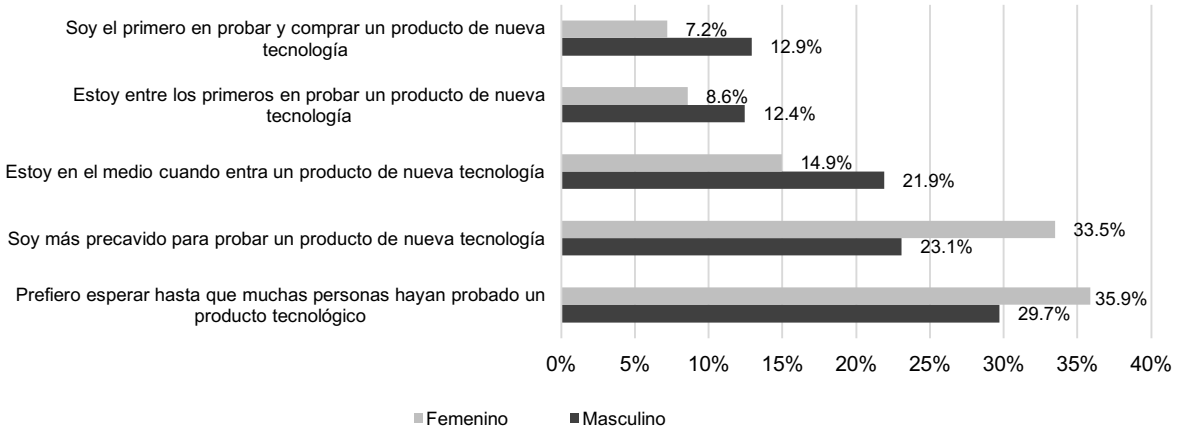
Figura 5.3: Preferencias tecnológicas de los 1,000 encuestados en México (porcentaje)



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Las mujeres son más reservadas al momento de probar o adquirir un nuevo equipo electrónico. La Figura 5.4 muestra que casi el 70% de las entrevistadas prefieren esperar que otras personas prueben nuevos productos tecnológicos y son más precavidas al momento de tomar una decisión para adquirir o no una nueva tecnología. En comparación con los hombres que están más al tanto de lo que sucede en este sector y un 26% están entre los primeros en probar un nuevo producto y comprarlo.

Figura 5.4: Nivel tecnológico entre hombres y mujeres en México (porcentaje)

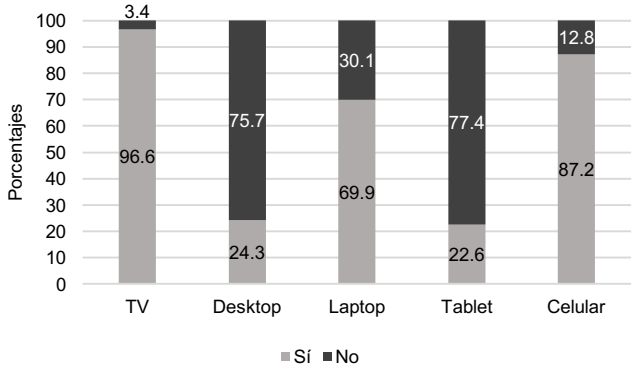


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Comportamiento en el uso de equipos electrónicos

En esta sección se muestran los resultados del comportamiento social de consumo en la población analizada, y como la edad, género y/o nivel socio-económico pueden influir en el uso y manejo del equipo electrónico. Los equipos electrónicos con los que más cuenta los entrevistados son televisores (96.6%) y celular (87.2%). En menor proporción se encuentran las laptop o computadoras portátiles con un 69.9%. Las computadoras de escritorio y tabletas están en menor porcentaje, con un 24.3% y 22.6%, respectivamente (Figura 5.5). En esta pregunta también se preguntó si los usuarios que tienen celular tienen un modelo de teléfono inteligente. Del 87.2% que cuenta con celular, el 48.9% posee un teléfono inteligente.

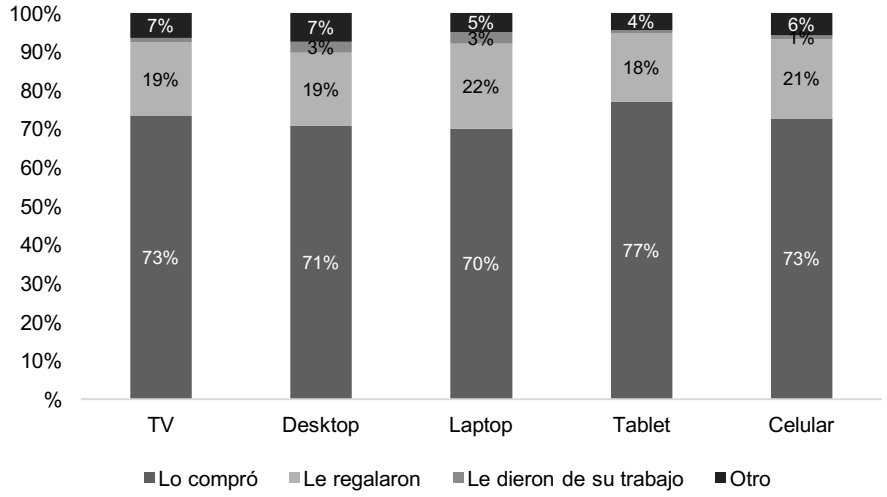
Figura 5.5: Equipos electrónicos con los que cuentan los entrevistados (porcentajes)



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

La mayoría de las personas reciben sus equipos electrónicos en estado nuevo (producto nuevo de paquete o nuevo re-acondicionado). Más del 70% de las personas han comprado su equipo electrónico y entre un 17%- 20% lo ha recibido de regalo (Figura 5.6). En bajos porcentajes, los encuestados recibieron su equipo por medio de su trabajo (1%-3%) o por trueque o como donativo (otro 4% - 7%). Entre el 76%- 80% de los encuestados han recibido su electrónico en condiciones nuevas (Tabla 5.5). Menos del 2% lo han recibido re-acondicionado o usado ya que en el sitio donde trabajan les ha entregado como herramienta de trabajo.

Figura 5.6: Cómo adquirió el equipo electrónico el entrevistado (porcentajes)



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Tabla 5.5: Condición del equipo electrónico que recibió el entrevistado (porcentajes)

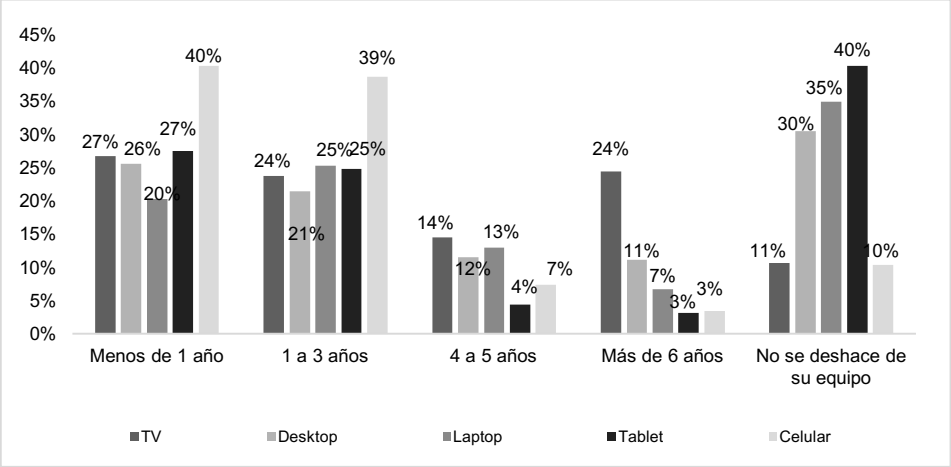
Condición del electrónico	TV	Desktop	Laptop	Tablet	Celular
	Porcentaje				
Nuevo	79.8%	76.1%	78.1%	77.9%	80.0%
Usado	18.9%	20.6%	19.6%	14.6%	17.2%
Re-acondicionado	0.4%	1.6%	0.3%	0.9%	0.5%
No sabe	0.8%	1.6%	2.0%	6.6%	2.3%
Total	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Dependiendo del equipo electrónico, las personas lo usan por diferentes períodos de tiempo o incluso no se deshacen de ellos y los almacenan. La Figura 5.7 muestra que el 38.6% de los entrevistados usa el celular entre 1 a 3 años y posteriormento lo regalan o venden en un mercado de segunda maño. Sin embargo, el 40.3% respondieron que usan su celular menos de

1 año ,ya que su plan de telefonía celular les permite cambiar por uno mejor antes del año. Para el caso de las computadoras de escritorio el tiempo medio de uso se encuentra entre menos de 1 año (25.5%) hasta 3 años con el 25.2%, incluso el 30% de los encuestados los tienen almacenadas en sus casas porque no se deshacen del equipo. El caso de las laptop y las tablet es un fenómeno similar al de las computadoras de escritorio, su tiempo medio de uso fluctúa entre menos de un año a 1-3 años. Entre 30%-35% de las personas no se deshacen de su equipo y lo almacenan para usarlo "algún día" como mencionaron algunas personas.

Figura 5.7: Tiempo de uso del equipo electrónico antes de deshacerse del mismo



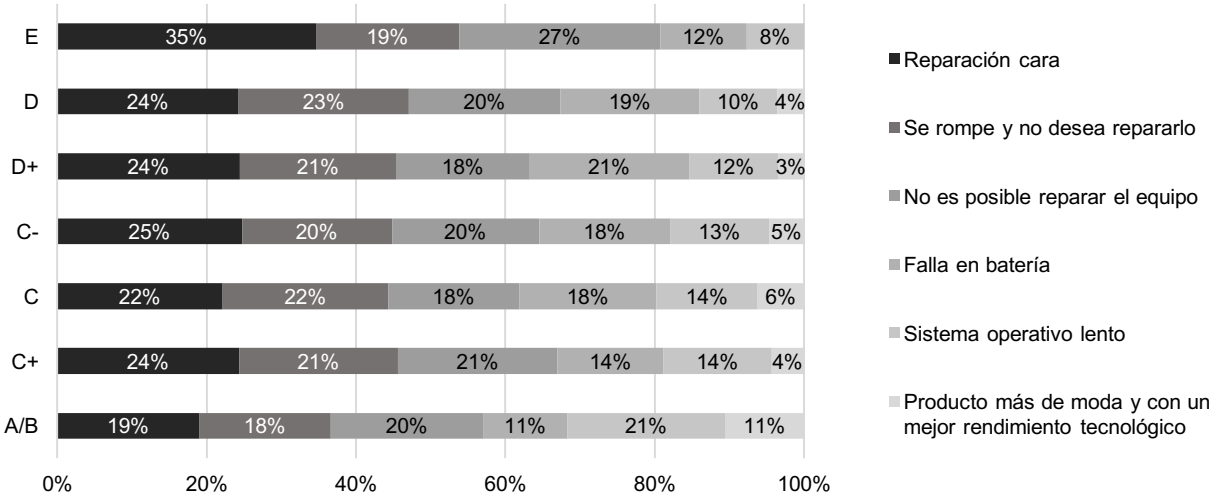
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Comportamiento al finalizar el tiempo de uso del equipo electrónico

En esta sección se presentan los resultados en referencia al comportamiento del consumidor con base a los motivos por los que su equipo electrónico ya no es útil o lo considera obsoleto, el tiempo que lo tiene almacenado y maneras en cómo se deshace de su producto electrónico. El nivel socio-económico de las personas puede ser motivo para que un equipo electrónico ya no sea útil o lo considere obsoleto. En la Figura 5.8 se puede apreciar que todos los niveles socio-económico consideran que un equipo electrónico deja de ser útil cuando su reparación es cara (34.6% - 19%). Otro motivo también es cuando no es posible reparar el equipo (26% - 20%). Otra causa similar es cuando se rompe el equipo y no se desea repararlo. Finalmente, otra razón que los entrevistados consideraron que un equipo ya no es funcional es cuando falla la batería o el sistema operativo. Un dato que llama la atención es la respuesta del nivel socio-económico A/B que indica que un equipo electrónico puede llegar a no ser útil cuando aparece

un producto más de moda y con mejor rendimiento tecnológico (10.6%), aspecto que tiene baja o nula aceptación en los niveles socio económicos bajos como el D+, D y E.

Figura 5.8: Razones para considerar que un electrónico ya no es funcional dependiendo su nivel socio-económico (porcentajes).



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Un equipo electrónico puede ser almacenado entre 1-3 años cuando ya no es útil para el consumidor. La Tabla 5.6 indica el porcentaje de personas que almacenan su equipo electrónico por menos de un año. Por ejemplo, los televisores y celulares son guardados durante este tiempo por el 54% – 58% de encuestados. Entre 1-3 años las personas almacenan las computadoras de escritorio y portátiles (18% – 22%). Sin embargo, existe un porcentaje de la muestra que no almacena sus equipos (20% - 33%) y buscan otro tipo de alternativas para ingresarlos de nuevo al mercado, ya sea regalando a un familiar o amigo o vendiéndolo en un mercado de segunda mano (Figura 5.9).

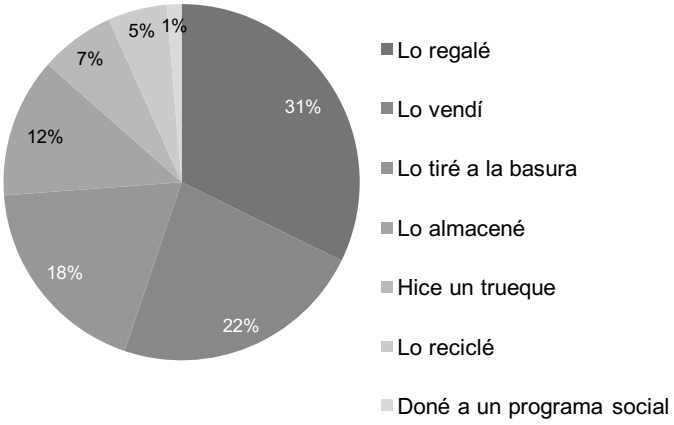
Tabla 5.6: Tiempo que las personas almacenan su equipo electrónico obsoleto

	TV	**Desktop**	**Laptop**	**Tablet**	**Celular**
Tiempo de almacenamiento			Porcentaje		
Menos de 1 año	54.2%	44.0%	44.9%	50.0%	58.1%
1- 3 años	19.9%	22.2%	18.9%	15.0%	14.6%
4 - 5 años	5.6%	5.3%	6.3%	1.8%	4.3%
No almacena	20.4%	28.5%	29.9%	33.2%	23.0%

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Regalar o vender a un familiar o conocido son los primeros motivos por los que el consumidor se deshace de un equipo electrónico. En la Figura 5.9 se muestran algunas maneras en cómo los entrevistados desechan sus electrónicos. El principal motivo con casi 31%, fue regalarlo a un familiar o a un amigo, seguido de venderlo en un mercado de segunda mano, con el 22%. Una alternativa poco amigable con el medio ambiente y con grandes impactos socio-ambientales es tirarlo a la basura 17.8% de los encuestados toman esa opción. Intercambiar su equipo con otro producto, reciclar o donarlo a un programa social son las opciones de menor puntuación con porcentajes de 7.5%, 6.1% y 3.7% respectivamente.

Figura 5.9: Maneras en cómo las personas se deshacen de su equipo electrónico



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Destino final del equipo electrónico

En esta sección se presentan los resultados en referencia al destino final de un equipo electrónico y se indica si el usuario tiene conocimiento sobre lo que sucede con su dispositivo y cuáles son las posibles rutas finales. Un bajo número de personas conocen lo que sucede con sus productos electrónicos después que se deshacen de ellos y estos han llegado al final de su vida útil. La Tabla 5.7 muestra los porcentajes de conocimiento y desinformación de los encuestados. Indistintamente del género de las personas, más del 86% respondieron que no saben lo que le sucede a su dispositivo electrónico. Sin embargo, de las personas que respondieron que sí saben lo que les sucede (8.8% - 13.5%), casi un 60% indicaron que van a procesos de reciclaje (Tabla 5.8). Con respecto a la edad, se pudo determinar que los mayores

de 36 años tienen mayor información y conocimiento sobre el destino final de su electrónico, aunque los porcentajes son bajos (12% - 13.5%). Casi un 68.9% de las personas conocen e indican que su electrónico pasa a un proceso de reciclado, y también son mayores de 35 años. Las personas menores a 35 años consideran también que su electrónico va a un proceso de acondicionamiento/re-manufactura (33.3%), además del de reciclaje (52.4%). Los menores de 23 años mencionaron que sus electrónicos van a vertederos (41.2%) a más de considerar el proceso de reciclaje (52.9%).

Tabla 5.7: Conocimiento sobre el destino final de un electrónico según (edad y género)

Características Sociodemográficas		Respuesta	
		No	**Sí**
Sexo	Masculino	86.5%	13.5%
	Femenino	91.2%	8.8%
Edad	18 a 23	90.4%	9.6%
	24 a 35	91.4%	8.6%
	36 a 50	87.9%	12.1%
	Más de 50	86.5%	13.5%

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Tabla 5.8: Opciones que un electrónico tiene al final de su vida útil (edad y género)

Características Sociodemográficas		Reciclaje	Vertedero	Re-acondicionamiento o re-manufactura	Incineración
Sexo	Masculino	58.2%	16.4%	19.4%	6.0%
	Femenino	59.1%	20.5%	13.6%	6.8%
Edad	18 a 23	52.9%	41.2%	5.9%	0.0%
	24 a 35	52.4%	9.5%	33.3%	4.8%
	36 a 50	68.2%	9.1%	13.6%	9.1%
	Más de 50	51.7%	24.1%	17.2%	6.9%

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

El nivel de educación de las personas les permite tener un mayor conocimiento sobre el destino final de un equipo electrónico. La Tabla 5.9 presenta que entre el 66% y el 68% de los encuestados que cuentan con un nivel de pregrado y posgrado indicaron que el destino final de

un electrónico es el reciclaje, así mismo, un 20% de los de pregrado indicaron también que van a vertederos y un 33% de los posgraduados respondieron que el equipo va a incineración.

Tabla 5.9: Opciones que un electrónico tiene al final de su vida útil (nivel de escolaridad)

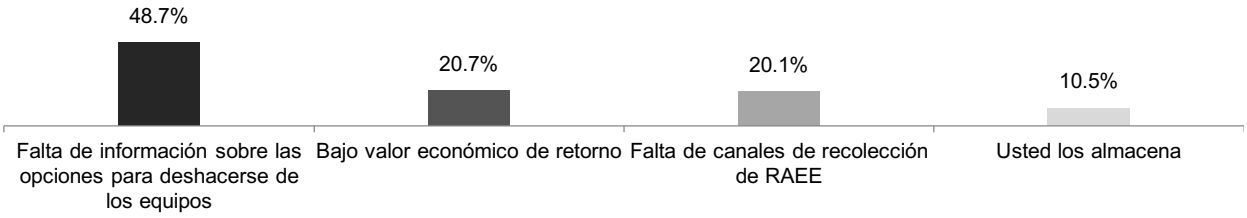
Escolaridad	Reciclaje	Vertedero	Re-acondicionamiento o re-manufactura	Incineración
Primaria y secundaria	46.5%	10.8%	39.2%	3.4%
Preparatoria	57.1%	13.9%	12.0%	17.0%
Carrera técnica	60.7%	7.1%	0%	32.1%
Pregrado	67.9%	20.2%	9.5%	2.4%
Posgrado	66.7%	0%	0%	33.3%

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Reciclaje de equipos electrónicos

En esta sección se presentan los resultados sobre el reciclaje de un equipo electrónico y muestran los motivos por los que el usuario no entrega su electrónico al reciclador al finalizar la vida útil de su equipo. Se plantean opciones de contribución ambiental por medio del pago de una suma de dinero al momento de comprar su electrónico. La falta de información sobre las opciones para deshacerse de los equipos electrónicos impide que los consumidores entreguen sus dispositivos al al fabricante para reciclarlos. La Figura 5.10 indica los principales motivos que dificultan al reciclador para que reciba un EEE en desuso. Falta de información fue el principal motivo por los que no se entrega un aparato electrónico, con un porcentaje del 48.7%. La segunda razón es debido a un bajo valor económico de retorno (20.7%). Esto se debe a que las tiendas no otorgan incentivos económicos acordes con los requerimientos del consumidor. Los entrevistados indicaron que ganan más vendiendo su equipo electrónico en un mercado de segunda mano, que entregándolo al fabricante. Además, las tarjetas regalo y descuentos por parte del distribuidor tampoco son atractivos para el consumidor. Finalmente, un 20.1% de los encuestados señalaron que no existen canales de recolección adecuados para entregar sus equipos, ni conocen de campañas o sitios cercanos a sus hogares u oficinas para poder dejar sus productos. Respondieron también que las autoridades no informan adecuadamente sobre las alternativas para entregar o donar sus electrónicos.

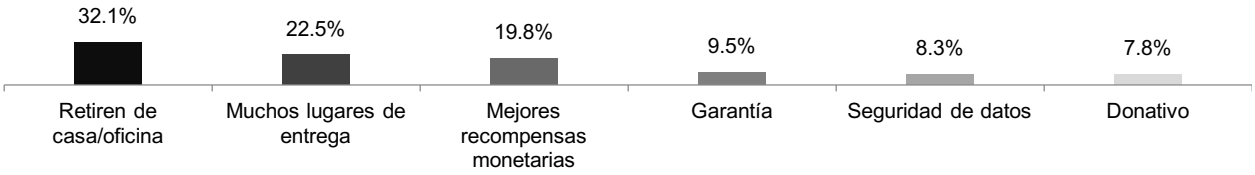
Figura 5.10: Motivos que impiden dar los equipos electrónicos al fabricante para reciclarlos



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

El fabricante debe plantearse distintos mecanismos para atraer los equipos electrónicos que ya no utilice el consumidor. Los resultados de la encuesta en la Figura 5.11 muestran que el principal motivo para que un usuario entregue sus electrónicos es simplemente que los retiren de su casa u oficina (32.1%) o en su defecto, que haya una mayor cantidad de lugares para entregar estos equipos (22.5%). Adicionalmente, los encuestados mencionaron que el fabricante/distribuidor debe plantear mejores opciones de recompensas monetarias que compitan con los mercados de segunda mano (19.8%). Por ejemplo, que les reconozcan una mayor cantidad de dinero, tarjetas de regalo o un mayor porcentaje de descuento en la compra de un nuevo equipo. Por otro lado, la opción donde se les garantice que su dispositivo va a ser reciclado de una manera ambientalmente responsable tuvo un porcentaje del 9.5%. Otro motivo fue el aseguramiento de eliminación de datos (8.3%) o que sus dispositivos puedan ir como donativo para programas sociales (7.8%).

Figura 5.11: Motivos para devolver los equipos electrónicos al fabricante para reciclarlos

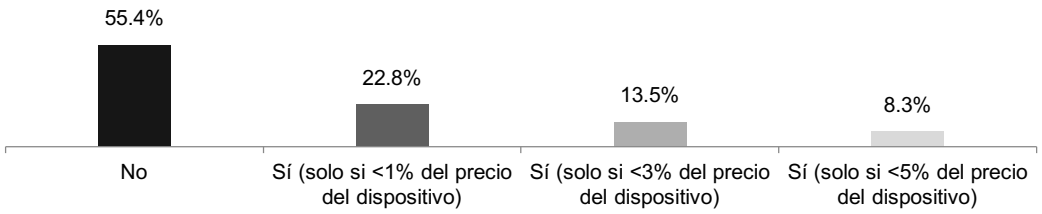


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

En algunos países de Europa las contribuciones ecológica o llamadas *fee* (término en inglés), han permitido generar un fondo ambiental para tratar los residuos electrónicos. En la encuesta nacional se les consultó a las personas si están dispuestas a pagar una contribución ecológica al fabricante/distribuidor para que se de el mejor reciclaje posible y responsable, y

conocer el destino final de sus productos electrónico. La Figura 5.12 indica que casi la mitad de los encuestados (44.4%) si está dispuesto a pagar una contribución ecológica. De ese porcentaje, el 22.8% lo pagaría si la contribución es menor al 1% del precio del equipo y, un 13.5% y 8.3% si la contribución es menor al 3% o 5% del precio del equipo respectivamente.

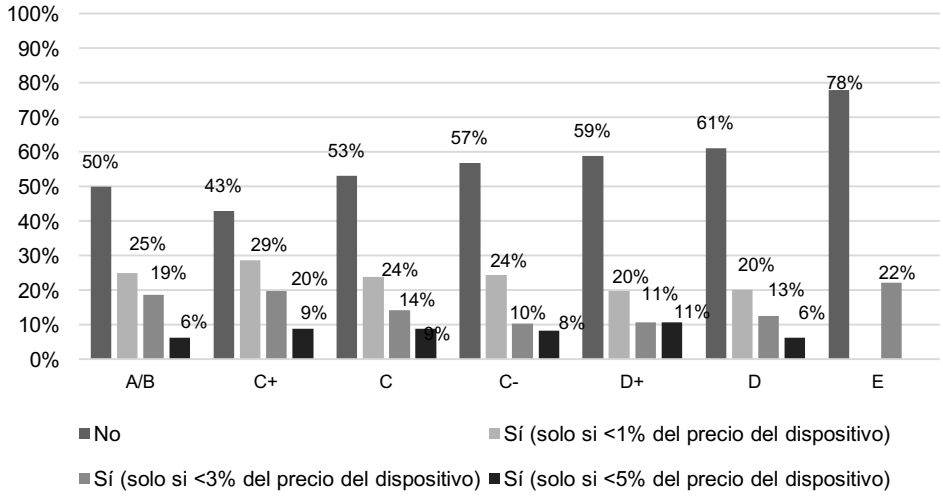
Figura 5.12: Contribución ecológica para un reciclaje responsable (porcentajes)



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

La contribución ecológica se reduce conforme disminuyen los ingresos económicos del consumidor. La Figura 5.13 muestra que el 50% de personas provenientes del nivel socioeconómico A/B (mayores ingresos) si están dispuesto a aportar con este aporte ecológico. No obstante, conforme va disminuyendo su poder adquisitivo está decisión disminuye, por ejemplo, desde nivel C- hasta el E un 77% de personas no aportarían ecológicamente.

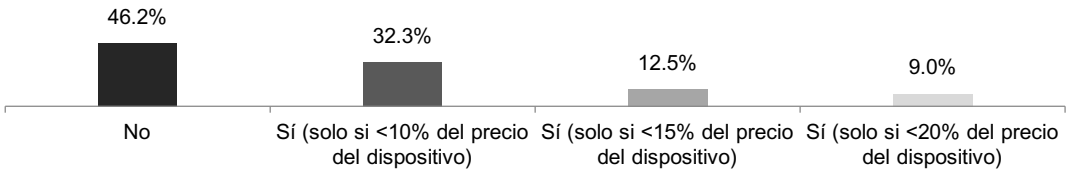
Figura 5.13: Contribución ecológica para un reciclaje responsable con base al nivel socioeconómico de los entrevistados



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Otra alternativa ecológica que se planteó fue dejar un depósito en la compra del nuevo producto. Esto con el objetivo de que el consumidor devuelva el equipo electrónico cuando ya no le sea útil y el fabricante le regresará el depósito y reciclará el producto de una manera responsable. La Figura 5.14 muestra que un 53.8% de los encuestados sí están dispuestos a dejar un depósito ecológico, siempre y cuando sea menor al 10% del precio del equipo (32.3%), menor del 15% del precio (12.5%) y menos del 20% del precio final del dispositivo un 9%.

Figura 5.14: Conformidad con un depósito ecológico para un reciclaje responsable



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

El nivel de escolaridad permite al consumidor tener más conocimiento e información sobre los depósitos ecológicos. La Tabla 5.10 presenta las reacciones de los encuestados sobre la aportación o no del depósito ecológico. El 46.2% de personas que no están de acuerdo con la aportación disminuye conforme aumenta su nivel académico. Por ejemplo, el 66.7% de las personas sin escolaridad no pagarían, mientras que el 70% de personas que tienen maestrías y/o doctorados sí lo harían.

Tabla 5.10: Depósito ecológico para un reciclaje con base al nivel de escolaridad

Escolaridad	No	Sí
Sin escolaridad	67%	33%
Primaria y secundaria	56%	44%
Preparatoria	40%	60%
Carrera técnica	45%	55%
Pregrado	43%	57%
Posgrado	30%	70%
Promedio	47%	53%

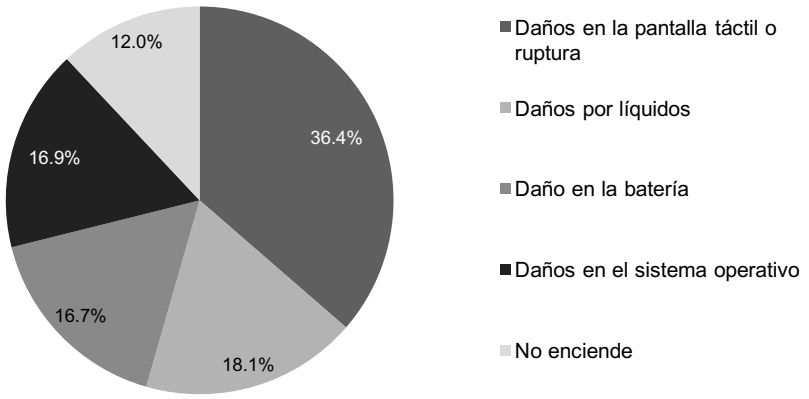
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Reparación de celulares

En esta sección se presentan los resultados sobre el comportamiento de los encuestados en temas de reparación, específicamente de celulares, y cómo el aspecto económico influye en reparar o no su equipo electrónico. Esta sección de la encuesta se enfocó en teléfonos celulares ya que las siguientes investigaciones se centrarán en tiendas formales e informales de reparación celular y análisis de flujo de materiales de residuos celulares.

Un celular puede tener diversos problemas físicos u operativos durante su vida útil. La Figura %.15 indica que uno de los principales daños que sufre un celular es por ruptura o daño en la pantalla táctil (36.4%), seguido de un 18.1% al dañarse por líquidos. En porcentajes similares se encuentran los daños en el sistema operativo o en la batería con 16.9% y 16.7% respectivamente. Finalmente, un 12% de los encuestados indicó que otro problema es cuando el celular ya no enciende.

Figura 5.15: Tipos de problemas que puede tener un celular durante su vida útil

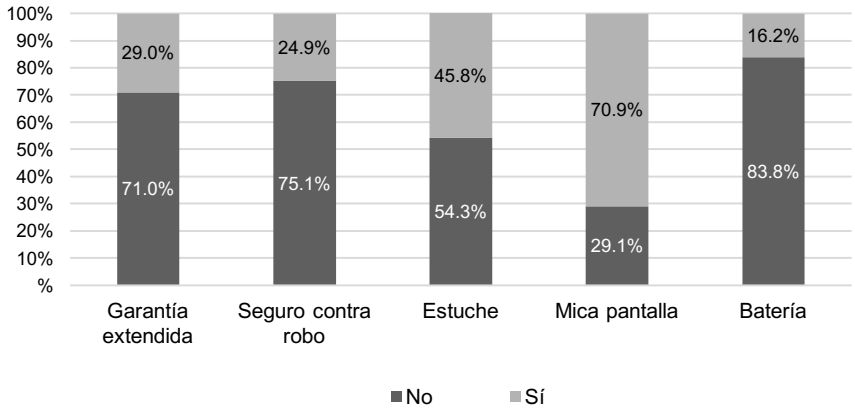


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Cuando el consumidor adquiere un teléfono celular existen más servicios o accesorios que compran para mejorar o proteger su equipo. La Figura 5.16 presenta los principales servicios o accesorios que los encuestados adquieren al momento de comprar su celular o durante su uso. Cabe mencionar que esta pregunta fue de opción múltiple y el usuario escogió desde la más importante hasta la menos importante. La mica de protección para la pantalla es la más adquirida por parte del consumidor; 70.9% de los entrevistados confirmaron haberla adquirido. Además de la mica, 45.8% también compraron un estuche de protección para su

celular. Con respecto a los servicios, 29% compraron una garantía extendida por parte del fabricante, en caso de que haya algún tipo de mal funcionamiento. Adicionalmente, si cuentan con un plan de telefonía celular, 24.9% de los encuestados adquieren un seguro contra robo. Finalmente, la batería es la última opción que adquieren los encuestados (16.2%). Indicaron que sus modelos de teléfonos ya no se les puede cambiar fácilmente la batería, y necesitan que un técnico realice este cambio.

Figura 5.16: Principales servicios o accesorios que el consumidor adquiere para su celular

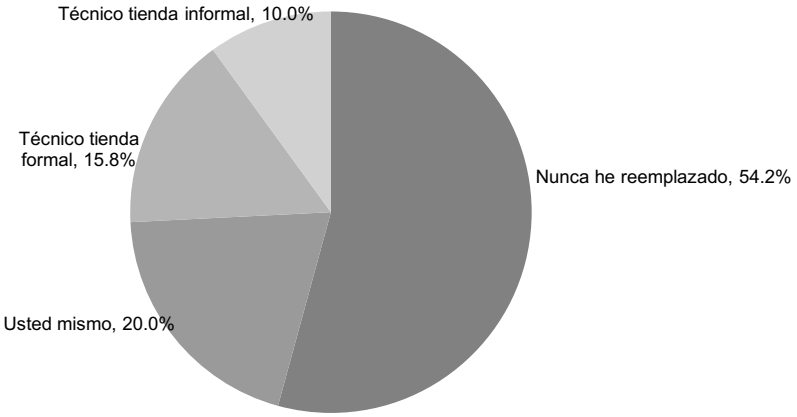


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

La batería de un celular puede ser cambiada por el mismo dueño o por medio de un técnico especialista. Con base al resultado de la anterior pregunta, se quiso conocer más sobre el cambio de la batería en celulares. En la encuesta, se preguntó a las personas si habían reemplazado alguna vez su batería y quién lo hizo (Figura 5.17). El 54.2% de la muestra expresó que nunca la habían cambiado y un 20% de los encuestados cambiaron ellos mismos la batería. El resto cambió con ayuda de técnicos especialistas en tiendas formales[1] (15%-8%) o en tiendas informales[2] (10%).

[1] Tiendas formales son aquellas tiendas que entregan facturas y declaran impuestos.
[2] Tiendas informales son aquellas que no declaran impuestos ni emiten facturas.

Figura 5.17: Opciones para cambiar la batería de su celular (porcentajes)

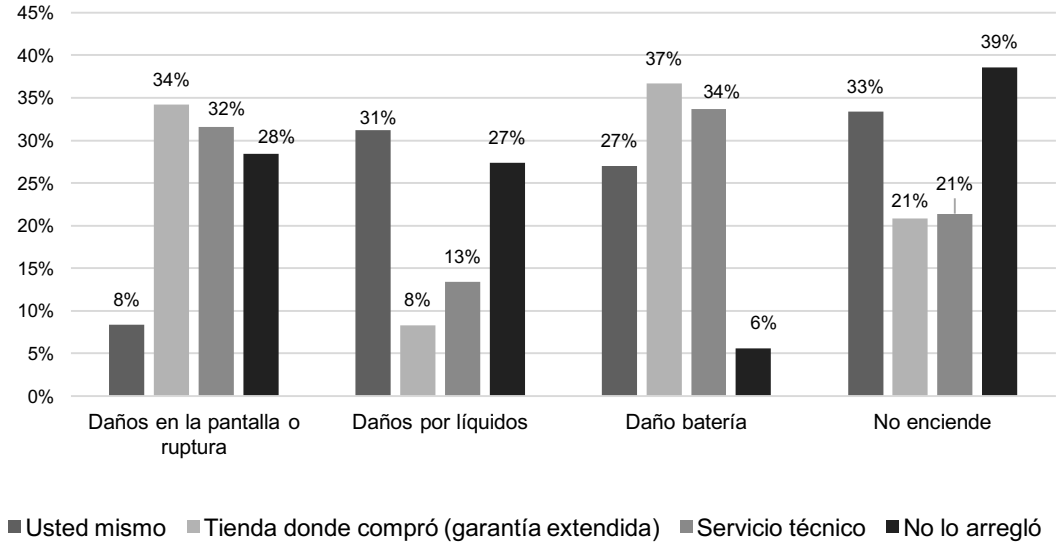


Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Con base a los problemas que puede tener un celular durante su vida útil, la siguiente pregunta se enfocó en si la persona repara o no estos daños. La Figura 5.18 muestra que el consumidor inicialmente trata de arreglar los problemas de su celular por sí mismo, como por ejemplo daños por líquidos (31.2%) y problemas en la batería (27%). En esta última opción el consumidor indicó que lo harían por sí mismos siempre y cuando el modelo y tipo de celular lo permitan, por medio del uso de herramientas tradicionales y que la batería no tenga ningún tipo de pegamento.

El costo de reparación juega un papel importante para que el usuario la realice o no. Adicional a los problemas previamente mencionados, otro problema que se puede presentar es que no encienda el celular. En la Figura 5.18, 33.4% mencionaron que lo revisan y tratan de reiniciar o actualizar el sistema operativo y si no funciona, lo llevan a un servicio técnico o aplican la garantía extendida. Si el arreglo es muy caro o no es aceptada la garantía, no arreglan el celular. Así mismo, si la pantalla sufre algún daño o ruptura, el 65.8% de los encuestados indicaron que lo llevan a un servicio técnico o a la tienda donde lo compraron. Sin embargo, si esta reparación es muy costosa, el 28.4% de los entrevistados no lo hacen. De igual manera, cuando la batería presenta problemas o daños, la mayoría de encuestados (70.4%) lo llevan a un servicio técnico para revisión y cambio.

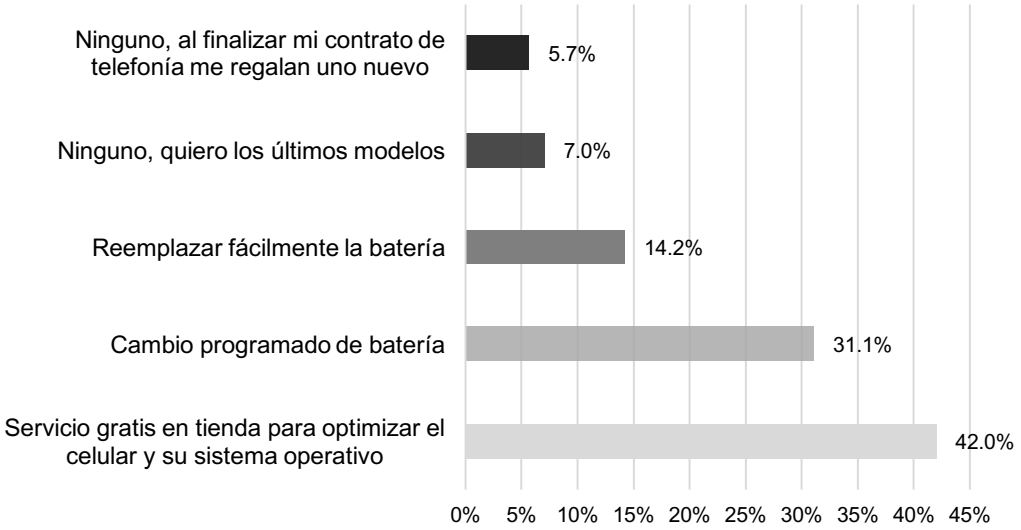
Figura 5.18: Alternativas de reparación de un celular durante su vida útil (porcentajes)



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Como se mencionó en la sección 5.1, el tiempo promedio que los encuestados tienen sus celulares antes de deshacerse de ellos está entre 1–3 años. Con base a esta pregunta, surgió la necesidad de presentarle al encuestado alternativas para usar más tiempo su celular. La Figura 5.19 muestra que un 42% de los encuestados usarían más tiempo su celular si la tienda donde lo compraron les brinda servicio gratis para optimizar su equipo y sistema operativo. Un 31.1% estuvo de acuerdo si la tienda les incluye un plan programado de cambio de batería. De igual manera, un 14.2% mencionó que sería mejor si la batería es reemplazada con mayor facilidad. Finalmente, en menor porcentaje, hubo personas que no estuvieron de acuerdo con usar más tiempo su celular porque quieren tener siempre los últimos modelos (7%) o porque el contrato de telefonía celular les entrega un nuevo celular cuando renuevan contrato.

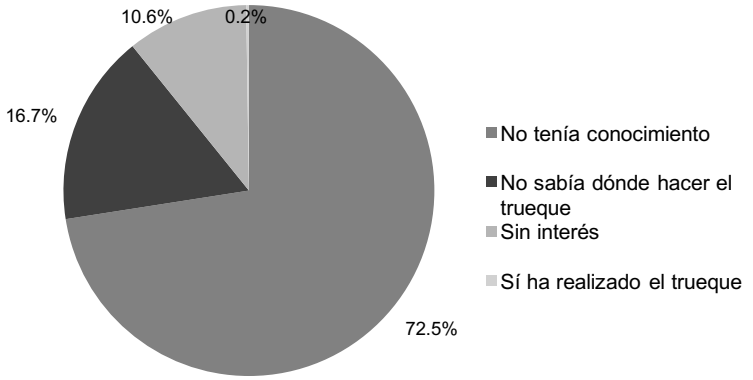
Figura 5.19: Opciones para mantener su celular más tiempo de lo esperado (porcentajes)



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

El trueque o intercambio (*trade-in* por su término en inglés) es otra alternativa para deshacerse de un equipo electrónico. La encuesta consultó a las personas si tenían conocimiento o no sobre este tipo de programas que algunas empresas de electrónicos cuentan. La Figura 5.20 presenta que la mayoría de los entrevistados (72.5%) no tenían conocimiento sobre estos programas y tan solo 0.2% sí habían realizado este trueque. Existen también personas que no cuentan con la información adecuada para hacer el trueque (16.7%) o no les interesa esta alternativa (10.6%).

Figura 5.20: Conocimiento sobre programas de trueque o intercambio de celulares



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la encuesta nacional (2018)

Conclusiones

- Casi el 80% de los mexicanos optan por buscar tecnologías que ya han sido probadas y se informan antes sobre las opciones para adquirir un EEE. Particularmente, las mujeres son más reservadas y precavidas al momento de adquirir nuevas tecnologías.

- Los equipos electrónicos con más uso por parte de los mexicanos es el televisor (97%), computador portátil o laptop (70%) y celular (87%). De estos usuarios, el 70% compraron estos equipos como nuevos. Posteriormente, el tiempo de uso de estos equipos se encuentran en menos de 4 años para el caso de los TV y los celulares, casi el 80%, cambian su equipo celular en menos de 3 años.

- El modelo de consumo de electrónicos en el país presenta una dinámica circular, en dónde el consumidor trata de extender el tiempo de vida de su electrónico y, a su vez, ganar algún tipo de beneficio emocional o económico a través del reúso o venta en mercados de segunda mano.

- El conocimiento ambiental del consumidor en temas de reciclaje de electrónicos es muy limitado. Los motivos se deben a desinterés por parte del mismo usuario y del gobierno al no fomentar más campañas de concientización y recolección de EEE. A pesar de que el nivel académico de las personas les puede brindar un mayor conocimiento sobre las opciones de reciclaje, no existe gran variación entre una persona que finalizaron preparatoria vs. una persona con título de tercer nivel (título de pregrado).

- El consumidor mexicano estaría dispuesto en dejar un depósito o garantía económica para asegurar un adecuado reciclaje de su equipo electrónico (rango entre 44% - 54%). Esto demuestra una vez más que la cultura de consumo en el país presenta un modelo de economía circular enfocada a recirculación de los productos, extender el tiempo de vida de los equipos y reciclar los residuos para aprovechar al máximo los materiales de manera local.

- La cultura del consumidor permite analizar los tiempos de vida media que un equipo electrónico tiene con el primer usuario, para de esta manera estimar el tiempo que puede demorar un tipo de EEE hasta ser considerado obsolescente y buscar los mecanismos de recuperación y recolección adecuados para que el cliente no almacene su equipo. El

porcentaje de personas que almacenan sus equipos electrónicos, principalmente, computador de escritorio, laptop y tableta se encuentra en el rango de 30% - 40%.

- Con respecto a temas de reparación el consumidor mexicano en su mayoría va a optar por buscar los mecanismos para arreglar su equipo, ya sea por uno mismo o llevándolo a un servicio técnico, siempre y cuando sea económico y salga más barato que comprar un nuevo EEE.

5.2 Reciclaje de electrónicos: teléfonos celulares en México

La investigación sobre reciclaje de electrónicos se llevó a cabo en México en las ciudades de Monterrey, Guadalajara y Ciudad de México, donde se analizaron a doce empresas de reciclaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), entre finales del año 2015 y primer semestre del 2016. El objetivo de este estudio fue analizar el nivel tecnológico de las empresas de reciclaje, con el fin de generar una línea base para conocer los actores y procesos que permitan determinar la factibilidad en implementar un modelo de economía circular en la industria electrónica de México.

5.2.1 Metodología

A través de un cuestionario, se entrevistó de manera personal y confidencial a los gerentes generales o de procesos. Previa a la visita de campo, se les contactó a las recicladoras, vía telefónica, para agendar la cita y enviarles por correo electrónico el cuestionario de las preguntas, con el objetivo de optimizar el tiempo de la entrevista y que el encargado de la empresa se sienta tranquilo de responder a las preguntas.

El banco de preguntas se basó en aspectos tales como: características de la empresa, tecnología de reciclaje, certificaciones de calidad y ambiente, seguridad y salud, entre otros aspectos que se pueden encontrar en el Anexo B. Las doce empresas fueron clasificadas por ciudad y a cada una se la nombró con la primera letra de su ciudad, por ejemplo, para Monterrey tenemos a M1 y M2; ciudad de México: C1, C2, C3, C4, C5 y C6; y finalmente Guadalajara: G1, G2, G3 y G4.

5.2.2 Resultados

Se clasificó a las empresas recicladoras con base al número de empleados que trabajan en ellas. La Tabla 5.11 muestra las características generales de las recicladoras y cómo se encuentran clasificadas como pequeñas, medianas y grandes empresas. Existen recicladoras grandes (C1, C3, C6, G1, M1), con un número de empleados superior a las 60 personas y entre 500 – 1,200 toneladas por año de RAEE procesados. Las empresas medianas se encuentran en la ciudad de Guadalajara (G2 y G3) las que procesan entre 100 – 499 ton / año de RAEE, con un número de empleados en el rango de 35 – 59 personas. Finalmente, las pequeñas empresas (C2, C4, C5, G3, M2) procesan menos de 100 ton/año de residuos electrónicos y cuentan con un número máximo de 35 empleados.

Tabla 5.11: Características generales de las empresas recicladoras de RAEE (2015)

Recicladoras entrevistadas			
Tamaño	**Número de Empleados**	**Total RAEE Procesado (ton / año)**	**Código: M: Ciudad de México G: Guadalajara M: Monterrey**
Pequeñas	<35	<100	C2, C4 C5, G3, M2
Medianas	35–59	100–499	G2, G4
Grandes	>60	500–1200	C1, C3, C6, G1, M1

Fuente: Elaboración propia a partir de la entrevista realizada a recicladoras de electrónicos

Residuos Electrónicos en las recicladoras de México

Las doce recicladoras procesaron un total de 4.488 toneladas de RAEE en el año 2015. En la Tabla 5.12 que se presenta a continuación, se indica la cantidad total y parcial de residuos electrónicos procesados por cada una de las empresas. De ese total se puede desagregar según el tipo de equipo electrónico: televisores (TV), computadoras de escritorio, computadoras portátiles, teléfonos celulares, tabletas y otros (impresoras y electrodomésticos). Adicionalmente, se proporciona información sobre el peso de residuos generados por empresa (toneladas por año) y los porcentajes anuales por electrónicos.

Las empresas grandes manejan volúmenes de residuos superiores a las 500 toneladas por año, en comparación con las medianas y pequeñas recicladoras que cuentan con volúmenes menores a 360 toneladas. La mayoría de las recicladoras procesan un mayor volumen de electrónicos provenientes de electrodomésticos e impresoras, esto representa el 46% del total de residuos recolectados. Los volúmenes de electrónicos de recolección media fluctúan en porcentajes similares entre 10-20%, y son, por ejemplo, los televisores, computadores de escritorio y portátiles. En comparación con los celulares que representan un menor porcentaje (7%), sin embargo, su contenido de materiales y la calidad de los metales ferrosos y no ferrosos es muy atractivo para las recicladoras.

Tabla 5.12: Toneladas y porcentajes de generación de residuos electrónicos procesados por cada una de las empresas de reciclaje entrevistadas (2015)

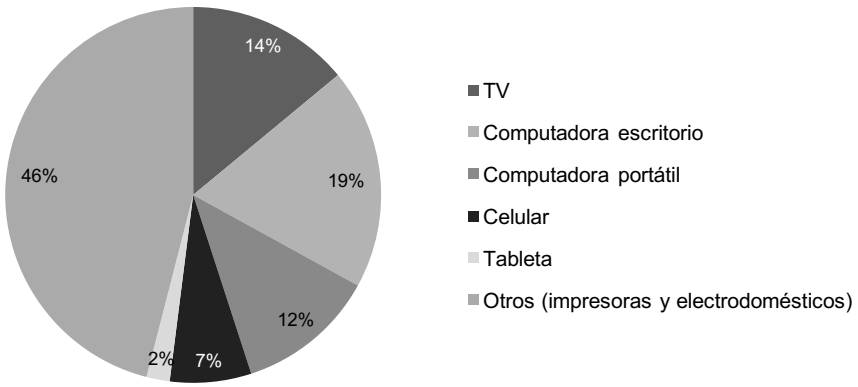
Compañía	Total RAEE	TV	Computadora escritorio	Computadora portátil	Celular	Tableta	Otros
			Pequeña				
			Peso (Ton/año)				
C2	60	3.6	1.2	1.2	1.8	0	52.2
C4	96	23.0	17.3	14.4	8.6	1.9	30.7
C5	60	10.2	10.8	7.2	6.0	3.0	22.8
G3	72	14.4	18.0	12.2	8.6	0.7	18
M2	84	3.4	23.5	17.6	5.9	0.8	32.76
			Mediana				
			Peso (Ton/ año)				
G2	120	22.8	36.0	19.2	10.8	0.0	31.2
G4	360	25.2	64.8	75.6	14.4	18.0	162
			Grande				
			Peso (Ton/ año)				
C1	540	81.0	129.6	43.2	32.4	5.4	248
C3	636	12.7	114.5	12.7	12.7	0.0	483.36
C6	720	108.0	122.4	108.0	43.2	21.6	316.8
G1	600	90.0	96.0	60.0	60.0	18.0	276.0
M1	1140	228.0	205.2	114.0	57.0	34.2	501.6
Total (ton/año)	4488	622.3	839.3	485.4	261.5	103.7	2175.8
Porcentaje	100%	14%	19%	12%	7%	2%	46%

Fuente: Elaboración propia a partir de la entrevista realizada a recicladoras de electrónicos

La Figura 5.21 indica los residuos electrónicos que más recibieron las recicladoras, en el año 2015. El mayor porcentaje fueron impresoras y electrodomésticos (47%), seguido de computadoras de escritorio (19%), TV (14%), computadoras portátiles (12%), celulares (7%) y

tabletas (2%). Tanto en la Tabla 5.12 como en la Figura 5.21 se hace mayor énfasis en los celulares, ya que van a ser el punto de análisis en el mapeo de flujo de materiales, los cuales representan el 7% del total recibido por las empresas de reciclaje entrevistadas.

Figura 5.21: Porcentajes de generación de residuos electrónicos procesados por cada una de las empresas de reciclaje entrevistadas (2015)



Fuente: Elaboración propia a partir de la entrevista realizada a recicladoras de electrónicos

Etapas de Procesamiento de Residuos Electrónicos

Existen diferentes procesos de reciclaje en las recicladoras de residuos electrónicos. En la Tabla 5.13 se puede apreciar las distintas fases por las que un RAEE es procesado por cada empresa de reciclaje. El primer paso en todas las recicladoras es el análisis y diagnóstico del equipo electrónico, esto con el fin de determinar si el equipo puede ser reusado a través de la reparación, reacondicionamiento o re-manufactura. Posterior al análisis, todas las recicladoras realizan un formateo del equipo donde se elimina toda la información que contenía dicho electrónico. El siguiente paso es determinar si el equipo puede ser reusado para ser vendido en un mercado de segunda mano. En las entrevistas a las doce recicladoras se pudo determinar que el 58% de los residuos electrónicos se pueden reutilizar y entrar a un mercado de segunda mano. El 42% de RAEE restante entra a un proceso de separación manual de sus partes y componentes, todas las recicladoras tienen este procedimiento manual y lo realiza personal técnico con herramientas tales como: destornilladores, martillos, pinzas, etc.

Una vez finalizado el desensamblado manual, los componentes o piezas pasan a procesos de separación mecánica, aprovechamiento de materiales y disposición final. La separación mecánica lo realiza el 67% de las recicladoras (C1, C3, C6, G1, M1), y se basa en el uso de equipos mecánicos como trituradoras, separadores magnéticos ni compactadoras de metales. Una vez desensamblado el equipo, todas las doce recicladoras realizan un inventario de las partes, por ejemplo: plástico, acero, aluminio, tarjetas de circuito impresas (*PCB* por sus siglas en inglés), metales, vidrio, baterías, etc. Todas las empresas exportan las PCB a excepción de las pequeñas empresas como C5, G3 y M2. El objetivo de exportar estos materiales es para recuperar su valor económico ya que en otros países se cuenta con tecnologías de procesamiento final: China, EE.UU., Japón, Bélgica y Canadá. Los materiales que no pueden ser vendidos, son enviados a destrucción y disposición final, con base a las normas oficiales mexicanas.

Tabla 5.13: Procesos de reciclaje de las empresas recicladoras de RAEE (2015)

Recicladoras entrevistadas		**Procesos de Separación**		**Reúso y Reciclaje**		
Tamaño	Ciudad	Manual	Mecánica	Venta de Segunda Mano	PCB Exportación	Reciclaje Local de Materiales
Pequeñas	C2, C4	Sí	No	Sí	Sí	Sí
	C5, G3, M2	Sí	No	Sí	No	Sí
Medianas	G2, G4	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Grandes	C1, C3, C6, G1, M1	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia a partir de la entrevista realizada a recicladoras de electrónicos

Certificaciones de recicladoras de residuos electrónicos

Las certificaciones ambientales y de calidad muestran el nivel de compromiso de las empresas en referencia a los temas de medio ambiente y calidad en el servicio. A continuación se presenta la Tabla 5.14 en la que muestra que seis de las doce empresas (50%) cuentan con la certificación de calidad ISO 9001. Ocho de las doce recicladoras (66%) cuentan con la norma ISO 14001 de certificación ambiental. Estas dos certificaciones mencionadas tienen relación directa con las empresas medianas y grandes que manejan volúmenes de residuos superiores a las 500 toneladas por año, a excepción de la empresa C5 que, aunque maneja bajos volúmenes de RAEE, su responsabilidad en la calidad de sus procesos es su prioridad y política.

Así también se tiene a la empresa G4 que maneja volúmenes de 360 ton/año, no cuenta con ISO 9001 de calidad, pero su principal política es tener procesos amigables con el medio ambiente y es por este motivo, que cuentan con la norma ISO14001.

Existen certificaciones internacionales se seguridad industrial y salud (OHSAS 18000) y certificaciones nacionales otorgadas por el gobierno. La Tabla 5.14 indica que la certificación OHSAS la tienen tres de las empresas más grandes de cada ciudad (C1, G1 y M1), las demás empresas cumplen con los requisitos de ley y normas oficiales mexicanas. Los trabajadores cuentan con los equipos de protección personal adecuados para cada una de sus actividades y son monitoreados y controlados periódicamente por entidades del gobierno.

Las certificaciones de responsabilidad en los procesos de reciclaje R2 y e-Stewards muestran también el nivel de profesionalismo y calidad de una recicladora. Estas certificaciones son similares entre sí, solamente que son emitidas por dos diferentes organismos internacionales, y se basan en estándares de calidad, medio ambiente y responsabilidad en el correcto reciclaje de los electrónicos. Seis de las doce recicladoras cuentan con estas certificaciones (empresas grandes y medianas). Las grandes empresas de cada ciudad (C1, G1 y M1) tienen la certificación R2 y nuevamente, la empresa C4, confirmando sus políticas de responsabilidad ambiental, muestra la importancia de tener ambas certificaciones.

Tabla 5.14: Tipos de certificaciones que cuentan las empresas de residuos electrónicos, 2015

Recicladoras entrevistadas		**Certificaciones internacionales**				
Tamaño	**Ciudad**	**ISO 9001**	**ISO 14001**	**OHSAS**	**R2**	**e-Stewards**
Pequeñas	C2, G3, M2	No	No	No	No	No
	C4	Sí	Sí	No	No	No
	C5	Sí	No	No	No	No
Medianas	G2	No	Sí	No	Sí	No
	G4	No	Sí	No	Sí	Sí
Grandes	G1, M1	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	C1	Sí	Sí	Sí	Sí	No
	C3	Sí	Sí	No	Sí	No
	C6	Sí	Sí	No	No	No

Fuente: Elaboración propia a partir de la entrevista realizada a recicladoras de electrónicos

Conclusiones

- Las recicladoras entrevistadas cuentan, en su mayoría, con residuos electrónicos conformados por impresoras y computadoras (escritorio y portátiles). En el caso de los televisores, se encontró un bajo porcentaje (13%), en comparación a estudios realizados en el año 2010 por la SEMARNAT, en los que el porcentaje de estos equipos supera el 45%. Esto se debe a que el programa "Apagón Analógico" no evaluó la falta de infraestructura y tecnología para tratar los TV análogos y las empresas recicladoras decidieron no recibir ningún tipo de televisor ya sea digital o de tubos de rayos catódicos.

- La tecnología de reciclaje en México se enfoca en procesos manuales de desensamblado y procedimientos básicos mecánicos de recuperación de materiales. El principal objetivo de negocio de las recicladoras es reacondicionar y re-manufacturar los residuos electrónicos, para venderlos en mercados de segunda mano. Lo que no se pueda vender, lo desensamblan manualmente, venden de manera local y, lo más importante, exportan las tarjetas de circuitos impresos, cuyos materiales son recuperados en otros países, ocasionando pérdidas económicas al país y evitando que metales preciosos y otro tipo de materiales puedan ser reingresados al sistema industrial local.

- La nueva ley enfocada en la gestión integral de RAEE todavía sigue en elaboración. Por este motivo, los diferentes actores que forman parte de la manufactura, distribución, consumo, reparación y reciclaje no cuentan con políticas públicas ni regulaciones adecuadas para una correcta y ambientalmente adecuada disposición final de los residuos de productos electrónicos. Generando daños socio-ambientales durante la recuperación de los materiales y ocasionando graves impactos al botarlos en rellenos sanitarios,

- Si las empresas de productos electrónicos quieren caminar hacia un modelo de economía circular, primero deben modificar las políticas de manejo de sus residuos y analizar internamente sus procesos de recuperación de materia prima. Además de empezar a diseñar sus productos pensando en que los materiales de un EEE deben servir para ser reingresados al sistema cuando el equipo electrónico llega al final de su vida útil.

5.3 Cálculo de generación de residuos de teléfonos celulares

La generación de residuos electrónicos de un país tiene relación directa con su producto interno bruto (PIB). Estudios realizados por Yu *et al.* (2010), Baldé *et al.* (2015) y Kumar *et al.* (2017), demostraron que el consumo per cápita de un equipo electrónico se encuentra entre 1 y 1.1 celulares por persona, y conforme incrementa el PIB de un país, la generación de sus residuos aumenta en proporción similar. Por ejemplo, en China el PIB en el año 2008 fue de 4.6 trillones de dólares americanos y tuvieron una generación de 11,5 kilo toneladas de residuos celulares (RC), mientras que para el año 2015 el PIB fue de 11,6 trillones de dólares y una generación de 29,1 toneladas de residuos celulares. Con base a esta información y ante la falta de estos datos en el país, la investigación realizó el cálculo de generación de residuos electrónicos (teléfonos celulares) en México a partir del PIB de China para el año 2015 y su generación de RAEE. A continuación se presenta la metodología y resultados de este estudio.

5.3.1 Metodología

Como se mencionó previamente, en el año 2015 no se tenía información referente a la generación de residuos electrónicos en México. Por esta razón, y con base a los resultados obtenidos en las recicladoras, se realizó el cálculo de generación de residuos celulares. Primero, se determinó el peso de generación de residuos celulares en China en el año 2008 ($N_{CH\text{-}2008}$) a partir de un estudio realizado por Yu *et al.* (2010). La generación de residuos celulares se determinó a partir de 77 millones de unidades y el peso promedio de un teléfono celular analizado en este estudio que fue de 150 gramos/unidad (W_{CH}). El estudio calculó que 11,550 toneladas de residuos celulares se generaron en China en el año 2008 ($CW_{CH\text{-}2008}$) como se describe en la ecuación 4.2.

$$CW_{CH-2008} = W_{CH} * N_{CH-2008} \text{ (generación de residuos celulares en China 2008, [ton/año])} \quad (4.2)$$

Con base a la bibliografía analizada, en este estudio se asumió que el crecimiento de los residuos celulares es proporcional al producto interno bruto. Por lo tanto, se estimó que los residuos celulares de China del año 2008 incrementarían de $CW_{CH\text{-}2008}$ = 11,550 ton en el 2008 a $CW_{CH\text{-}2015}$ = 27,795 ton en el 2015, como indica la ecuación 4.3. Adicionalmente, para este cálculo se considerando también al PIB Chino 2008 ($GDP_{CH\text{-}2008}$ = $ 4,598 billones de dólares

americanos) y al PIB Chino 2015 ($GDP_{CH\text{-}2015}$ = $ 11,065 billones de dólares americanos) (Banco Mundial, 2018).

$$CW_{CH-2015} = CW_{CH-2008} * \left(\frac{GDP_{CH-2015}}{GDP_{CH-2008}}\right) \text{ (generación de residuos celulares China 2015, [ton/año]} \quad (4.3)$$

El producto interno bruto de China es proporcional al PIB de México. De esta manera, se realizó el cálculo de la generación de residuos celulares en México para el año 2015. Los datos de referencia son PIB China para el año 2015 ($GDP_{CH\text{-}2015}$ = $ 11,065 billones de dólares americanos), PIB México para el año 2015 ($GDP_{MX\text{-}2015}$ = $ 1,173 billones de dólares americanos) y 27,795 ton de residuos celulares generados en China el año 2015 ($CW_{CH\text{-}2015}$), como se ilustra en la ecuación 4.4. Por lo tanto, se estimó una generación de 2,947 ton de residuos celulares en México para el año 2015.

$$CW_{MX-2015} = CW_{CH-2015} * \left(\frac{GDP_{MX-2015}}{GDP_{CH-2015}}\right) \text{ (generación de residuos celulares México 2015, [ton/y])} \quad (4.4)$$

5.3.2 Resultados

La generación residuos celulares en México para el año 2015 fue de 2,947 toneladas. Según estudios realizados por SEMARNAT (2017) y Cruz *et al.* (2017), el mercado formal de reciclaje en México solo captura el 10.8% de los desechos electrónicos a nivel nacional. Por lo tanto, se estimó que 316.85 toneladas de desechos de teléfonos celulares se reciclaron formalmente en México en 2015 (Tabla 5.15). Finalmente, la proporción de residuos celulares del total de RAEE generados se estimó en 0.3% para México. El estudio de campo mostró que solo el 7% de los residuos de teléfonos celulares de las 12 instalaciones de reciclaje (301 toneladas de las 4,488 toneladas generadas por año) provinieron del reciclaje formal. Por lo tanto, procedimos a analizar los locales de reparación de electrónicos formal / informal en México para comprender cómo funcionan estas tiendas y qué hacen con sus residuos electrónicos (consulte la sección 5.5).

Tabla 5.15 Relación entre el producto interno bruto (PIB) y la generación de residuos de teléfonos celulares en China y México en el año 2015.

Indicador / Dato calculado	Unidades	China (2015)	México (2015)
Población	(millones)	1371.3	125.9
PIB	(billones USD)	11,065	1173
Generación total de RAEE	(ton/año)	N/A	1,103,570 [SEMARNAT]
Generación total de residuos celulares, CW	(ton/ año)	27,794 ***	2947 ***
Generación formal de residuos celulares en México (basados en 10.8% [SEMARNAT])	(ton/ año)	N/A	316.85 ***
Estudio de campo: generación de residuos celulares recicladoras entrevistadas Mx (7%)	(ton/ año)	N/A	301 +++
Porcentaje de residuos celulares en el total de RAEE	(%)	N/A	0.3 ***

*** Dato estimado +++ Dato de campo.

Fuente: elaborado por el autor con base en Yu *et al.* (2010); Baldé *et al.* (2015); Cruz *et al.* (2017); SEMARNAT (2017); Banco Mundial (2018)

Conclusiones

A partir del PIB mexicano se pudo determinar que la generación de residuos de teléfonos celulares en el año 2015 fue de 2,947 toneladas. Sin embargo, la falta de leyes y control del reciclaje informal ha generado grandes pérdidas económicas en el país. Ya que casi el 90% de los RAEE generados van a canales informales (e ilegales), evitando una adecuada recolección formal de RAEE con volúmenes adecuados para recuperar posibles inversiones en tecnologías de procesamiento final para recuperar metales preciosos de las PCB.

5.4 Reparación de electrónicos: teléfonos celulares

Con base a los resultados obtenidos en la caracterización de las empresas recicladoras, el tercer estudio se enfocó en tiendas de reparación de electrónicos en México. Esta investigación se realizó entre finales el año 2015 y primer semestre del 2016, para complementar temas sobre tecnología, reparación, re-uso, re-manufactura, seguridad y medio ambiente en equipos electrónicos. El objetivo de esta investigación se centró en analizar la formalidad e informalidad de la reparación de teléfonos celulares, con el fin generar información que permita evaluar la capacidad tecnológica y los recursos humanos en estos locales. Otras motivaciones fueron las

siguientes: presencia de trabajo infantil, características de las instalaciones y equipos; seguridad y salud; conciencia ambiental, entre otros.

5.4.1 Metodología

La metodología se enfocó en entrevistas personales realizadas a los encargados de cada tienda. En total se entrevistaron a 33 centros de reparación formales y 33 tiendas informales en las ciudades seleccionadas de Monterrey, Guadalajara, Ciudad de México y Querétaro. En este estudio se determinó como tienda formal, a los locales que entregan un comprobante fiscal al momento de la compra, caso contrario se catalogó como tienda informal. Las tiendas fueron seleccionadas al azar y una vez ubicado el local, se entrevistó cara a cara al gerente o encargado de cada local durante 20 minutos aproximadamente. Las preguntas de la encuesta se encuentran en el Anexo C de este documento.

Previa a la investigación de campo, se realizó un formulario de preguntas basado en los siguientes aspectos:

1. **Información de contacto:** nombre de la tienda, dirección, persona encargada, entrega de comprobante fiscal.
2. **Instalaciones y características del lugar de trabajo:** tipo de herramientas, tipo de equipos, número de reparaciones por día, ventas por día.
3. **Recursos Humanos:** número de empleados, menores de edad, funciones de los empleados, nivel académico (básico: secundaria; medio superior: preparatoria; técnico y superior: universidad en curso o finalizada), habilidades y destrezas para desempeñar sus funciones.
4. **Seguridad y Salud:** equipo de protección personal, botiquín de primeros auxilios, extintores de fuego, señalética, etc.
5. **Medio Ambiente:** manejo de residuos electrónicos (RAEE), manejo y disposición final de sustancias peligrosas.

5.4.2 Resultados características del mercado formal

Dentro del mercado formal se analizaron a las tiendas encargadas de reparación y venta de celulares. Primero se analizó el área de servicio al cliente, en donde se pudo encontrar que las 33 tiendas formales, cuenta con un mostrador, el cual es ocupado por una o dos personas para la venta de los productos. También se hallaron locales donde sus vendedores atendían de manera exclusiva al cliente, desde su escritorio con su computadora. Todas las tiendas cuentan con vitrinas para mostrar los equipos celulares, accesorios, componentes; y en las paredes existe publicidad y planes de telefonía celular.

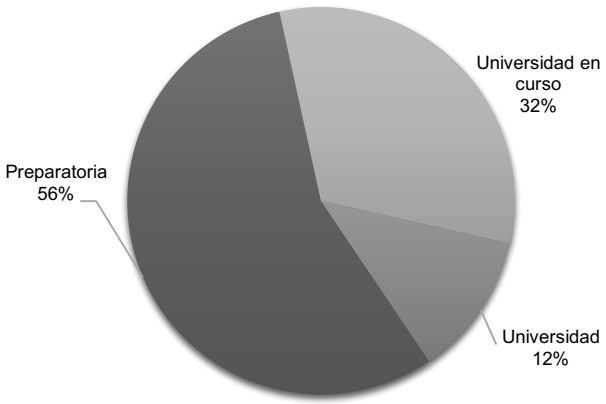
El área de reparación de los locales formales está separada de la zona de ventas y atención al cliente, la cual cuenta con uno o dos técnicos y está equipada con mesas de madera o de aluminio y sillas metálicas con acolchonamiento. Las herramientas que manejan los empleados son muy diversas, podemos mencionar las siguientes: kit de destornilladores cruz y planos, martillos, soldadores, pinzas de diversos tamaños y cables. De los equipos más comunes que se utilizan para la reparación se encontraron los siguientes: soldador profesional, cautín, fuente de voltaje, multímetro, cajas de flasheo, microscopio (tres tiendas), lupas profesionales, manilla antiestática (usa el técnico para evitar dañar el equipo con la estática suya y del ambiente), guantes antiestáticos, ionizador, extractor de humo, nebulizador, lavadora ultrasónica y pistola de aire caliente. Cabe mencionar que algunas tiendas no permitieron acceder a la zona de reparación, como fue el caso de los locales ubicados en plazas comerciales; y de igual manera, no se pudo tomar fotografías al interior de estos establecimientos.

Recursos Humanos: nivel académico

En relación con los recursos humanos que trabajan en las tiendas formales, se pudo determinar que el nivel académico de los empleados encargados del servicio al cliente y ventas, se encuentra entre preparatoria y universidad (Figura 5.22). Los trabajadores encargados de la reparación presentan un nivel académico de técnicos o con estudios universitarios (Figura 5.23). Del total de 103 trabajadores, el 56% de los empleados de servicio al cliente cuentan con preparatoria y el 44% restante están en la universidad o ya se graduaron. El 56% de los recursos humanos enfocados en la reparación de teléfonos celulares presentan en su mayoría un nivel

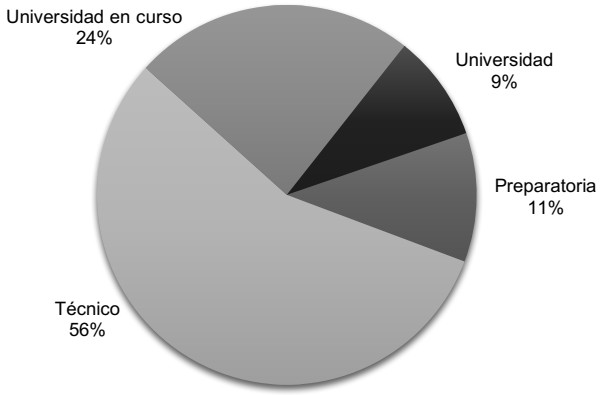
académico de formación técnica. El 33% de los empleados están cursando la universidad o ya se graduaron; mientras que el 11% de los técnicos tienen solamente estudios de preparatoria. Es importante mencionar que entre las ciudades estudiadas, el nivel académico no varía, ya que los requisitos de selección de personal son similares en las tiendas formales.

Figura 5.22: Nivel académico de los vendedores en tiendas formales de reparación de un total de 103 trabajadores



Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

Figura 5.23: Nivel académico de los técnicos en tiendas formales de reparación de un total de 103 trabajadores



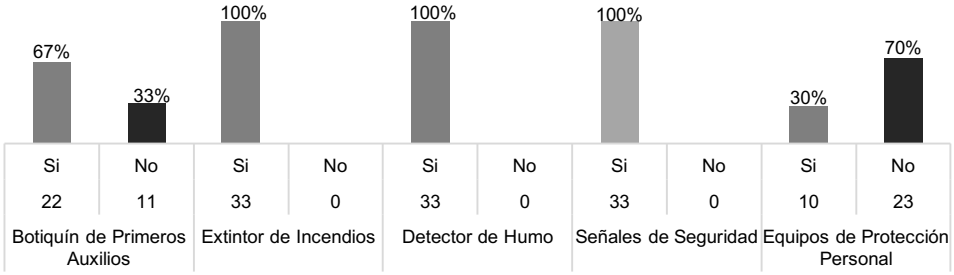
Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

Seguridad y Salud

Concerniente a las condiciones de seguridad y salud, en general los locales cumplen con la normativa de cada municipio y los permisos otorgados por protección civil y bomberos. En la Figura 5.24 se puede observar que los locales cuentan con señalética, detectores de humo y extintor de incendios. El 67% de los mismos cuentan con botiquines completos de primeros auxilios, los demás los tienen incompletos. Con respecto a los equipos de protección personal (EPP), solamente el 30% de los técnicos utilizan guantes, pantalón, camisa de mezclilla y gafas. Cabe mencionar que se requieren este tipo de implementos de protección personal, con el fin de proteger al técnico de cualquier derrame o conato de incendio, debido a que manejan sustancias inflamables, baterías y equipos de soldadura.

Como se indica en la figura, los aspectos referentes a la seguridad de los trabajadores (botiquín de primeros auxilios y EPP) son los que no cumplen al 100% los requisitos. Esto se debe a que no son períodicamente controlados por la administración de la tienda o plaza comercial. Por lo tanto, pueden estar incompletos ya que esto no afectaría al cliente. Al contrario de lo que no sucede con los extintores, señalética y detectores de humo, los cuales si no cuentan con un monitoreo diario o semanal, por la administración y cada tres o seis meses por protección civil, su falencia puede causar daños tanto a trabajadores como a los clientes.

Figura 5.24: Requisitos de seguridad y salud en tiendas formales (en número y en porcentaje)



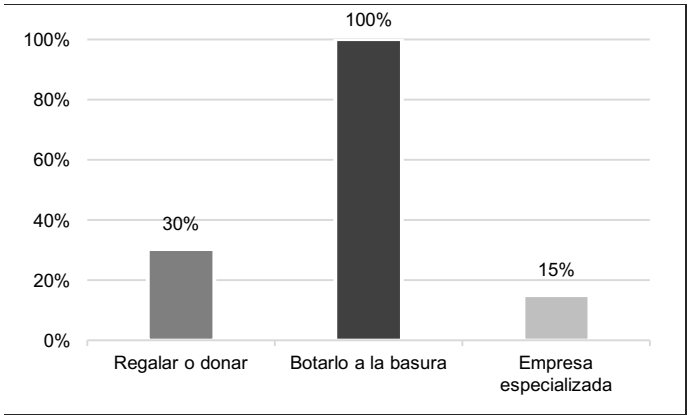
Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

Medio Ambiente: manejo de residuos electrónicos

Con respecto al tema ambiental en el manejo de los residuos de teléfonos celulares, se puede apreciar en la Figura 5.25 que la generación mensual de estos residuos es muy baja (menor a

un kilogramo). Se reutilizan la mayoría de los componentes o materiales electrónicos. Sin embargo, en caso de que se generen RAEE el primer destino es tirarlos a la basura (100% de los casos). Eventualmente el 13% de las tiendas los regalan o donan a personas. Un 15% se entrega a una empresa especializada en residuos de manejo especial, siempre y cuando vayan a retirarlos del local y eso sucede una o dos veces al año.

Figura 5.25: Disposición final de los RAEE en tiendas formales

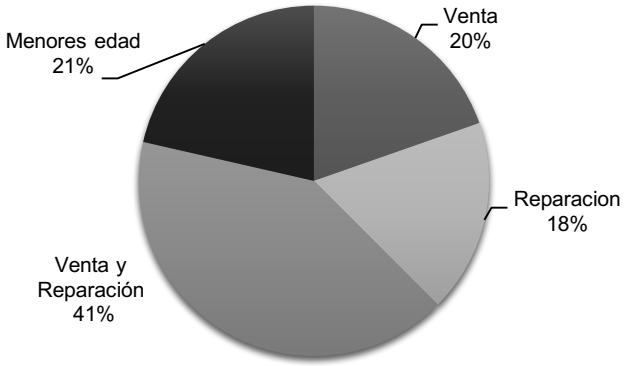


Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

5.4.3 Características del mercado informal

En el análisis del mercado informal en las ciudades de MTY, GDL, CDMX y QRO, se pudo corroborar que en las 33 tiendas las áreas de atención al cliente y reparación se desarrollan en la misma zona. En la Figura 5.26, se muestra que el 41% de los locales cuentan con un mismo empleado encargado del servicio al cliente y reparación, el 59% restante cuentan con empleados para cada área. Se pudo comprobar la presencia de menores de edad, por las tardes y los fines de semana, en tres de las cuatro ciudades: MTY, GDL y CDMX. Un total de 12 niñas y niños están encargados de la atención al cliente y ventas, lo que representa el 21% del total de empleados. Además, en el caso de los niños, su oficio también está designado al área de reparación, ayudando y aprendiendo del técnico (en todos los casos era su familiar) con las herramientas, manipulando los equipos celulares y desarmando las partes fáciles de extraer (baterías, tarjetas de memoria, chips, cámaras, entre otros).

Figura 5.26: Distribución de los 56 empleados informales



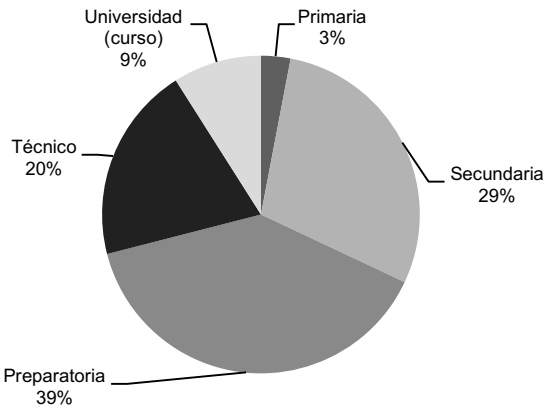
Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

Con respecto a las instalaciones, para la zona de ventas se encuentran uno o dos mostradores que contienen celulares nuevos, reparados e incluso dañados. Estos últimos sirven para que sus componentes sean colocados en otros equipos celulares para posteriormente ser vendidos. En la mayoría de los casos se pudo ver que las tiendas cuentan con sillas metálicas, viejas y oxidadas; el técnico repara los equipos sobre una mesa pequeña (1metros x 2metros) de metal o madera. Adicionalmente, se pueden apreciar herramientas de reparación muy básicas, muchas de ellas oxidadas y en desuso. Ejemplos de lo anterior son los siguientes: desarmadores de cruz y planos, pinzas, lupas y voltímetros; además de frascos de líquidos como alcohol y peróxidos; trapos o franelas para limpiar las piezas y equipos.

Recursos Humanos: nivel académico

Con respecto a los recursos humanos se pudo determinar que el nivel académico de los 56 empleados se encuentra entre secundaria y preparatoria, destacándose además una minoría con nivel básico de primaria. Como se mencionó previamente se pudo observar la presencia de 12 niñas y niños, de entre 8 a 15 años. En la Figura 5.27 se puede apreciar que, de un total de 56 empleados incluidos menores de edad, el 68% cuenta con un nivel académico de secundaria y preparatoria, mientras que el 29% es de nivel técnico o está cursando la universidad. Finalmente, un 3% tiene un nivel académico de primaria.

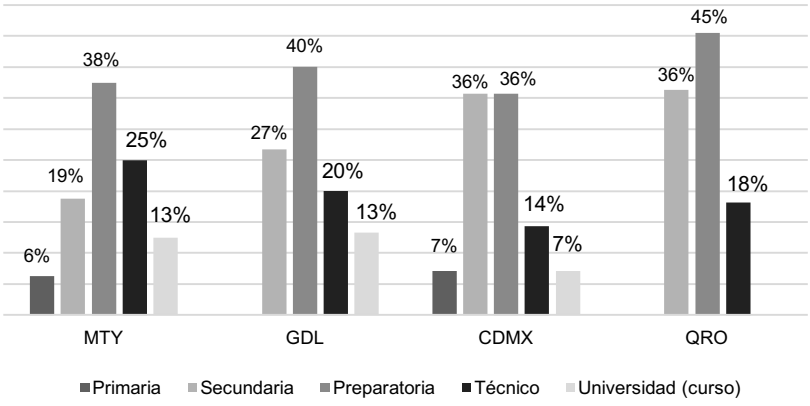
Figura 5.27: Nivel académico de los 56 empleados en tiendas informales de reparación



Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

El nivel académico con mayor porcentaje se presenta en las cuatro ciudades y es el nivel de preparatoria. La Figura 5.28 indica que en MTY, GDL y CDMX existe una minoría de empleados cursando la universidad (7-13%). Tanto Guadalajara como Querétaro presentan un mayor porcentaje con nivel de preparatoria (40-45%), mientras que Monterrey tiene el mayor porcentaje de personas con grado técnico (25%). Existe una minoría de empleados que tienen un título de educación básica – primaria que se encontraron en las ciudades de MTY y CDMX.

Figura 5.28: Nivel académico de los empleados informales clasificados por ciudades (total de 56 empleados)

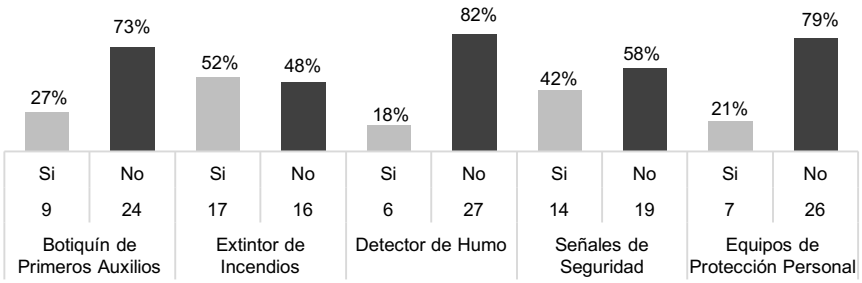


Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

Seguridad y Salud

En relación a las condiciones de seguridad y salud, los estándares se cumplen parcialmente. En la Figura 5.29 se puede observar que solamente nueve locales (27%) tienen botiquín de primeros auxilios, 18% detectores de humo y menos del 50% señalética de seguridad. El 21% de los técnicos cuentan con equipos de protección personal como pantalón de mezclilla, gafas y guantes. Con respecto a los extintores de incendios, todos los locales cuentan con esos equipos, sin embargo, la mitad de ellos tienen los manómetros con presiones bajas, por lo tanto, no funcionan.

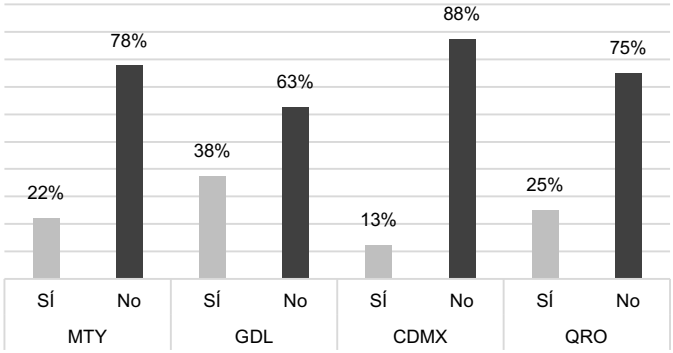
Figura 5.29: Condiciones de seguridad y salud en tiendas informales



Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

Con respecto a los implementos de primeros auxilios, en general todas las tiendas informales tienen una carencia de los mismos. Se puede obervar en la Figura 5.30 que en ninguna ciudad se cumplen estos requisitos básicos de protección al empleado o al cliente. En MTY, CDMX y QRO más del 75% de estos locales no cuentan con botiquín de primeros auxilios o están incompletos. Al igual que GDL donde su porcentaje es menor y más de la mitad de los establecimientos (63%) no cumplen con el kit de primeros auxilios.

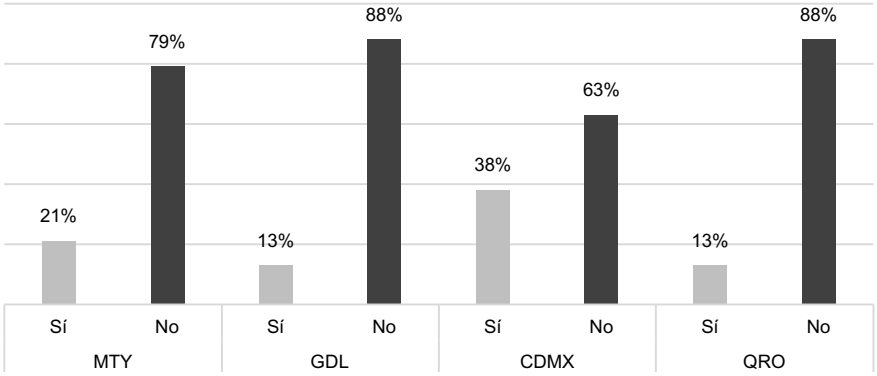
Figura 5.30: Análisis por ciudad de implementos en primeros auxilios dentro de las tiendas informales



Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

En las cuatro ciudades, menos del 40% de los técnicos cuentan con el equipo de protección personal. La Figura 5.31 indica que las ciudades de GDL y QRO presentan un mayor número de empleados (88%) sin pantalón de mezclilla, guantes y gafas. CDMX presenta mejores condiciones para los empleados encargados de la reparación con un 38%, sin embargo no son las condiciones idóneas para trabajar.

Figura 5.31: Análisis por ciudad del equipo de protección personal de empleados informales

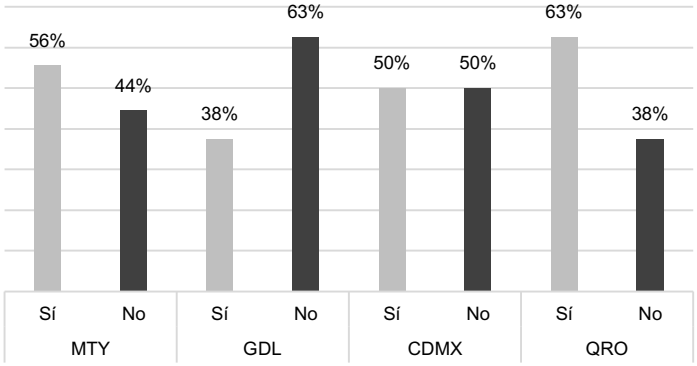


Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

En referencia a los implementos para combatir un conato de incendio, ninguna ciudad cumple correctamente con estos requisitos que son extintores para incendios ni detectores de humo. Se puede obervar en la Figura 5.33 que GDL es la ciudad que presenta tiendas con un menor número de extintores (38%), en comparación con QRO donde más del 60% de locales cumplen con esta norma. Resultados relacionados se presentan en la gráfica 4.32 donde se

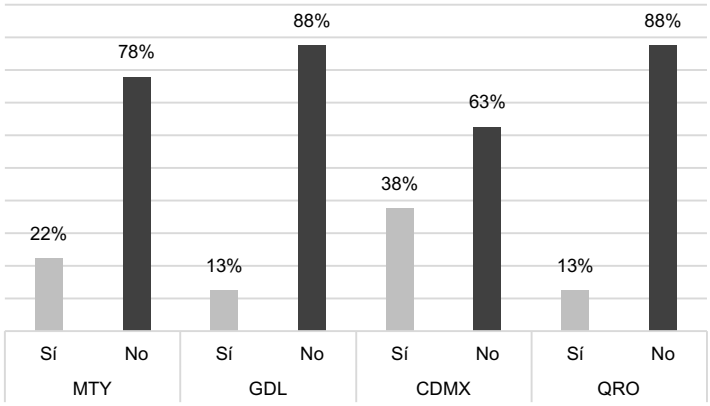
muestra que el 88% de las tiendas en GDL, MTY y QRO no cuentan con detectores de humo. La ciudad con mejores condiciones para combatir un incendio es CDMX donde la mitad de tiendas cuentan con extintores y casi un 40% tienen detectores de humo.

Figura 5.32: Análisis por ciudad de extintor de incendio dentro de las tiendas informales



Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

Figura 5.33: Análisis por ciudad de detectores de humo dentro en las tiendas informales

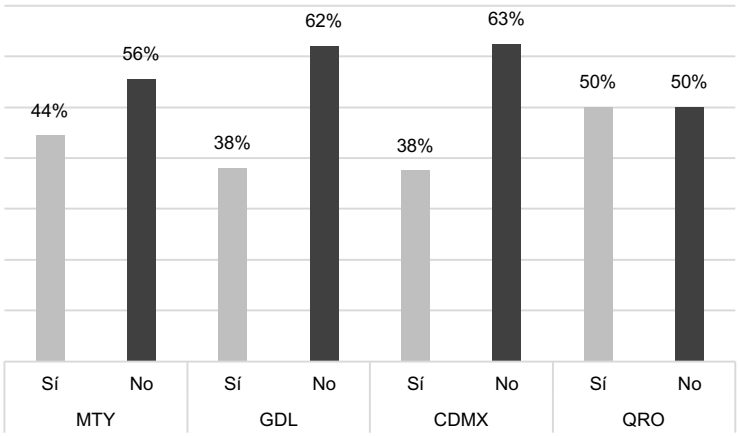


Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

Complementando el accionar ante un conato de incendio, menos del 50% de tiendas informales cumplen con la señalética de seguridad adecuada. En la Figura 5.34 la mitad de locales en la ciudad de QRO acatan de mejor manera este requisito, seguido de las tiendas en MTY (44%) y con un menor porcentaje en GDL y CDMX (38%). Confirmando así que las medidas de seguridad y protección en las cuatro ciudades, no cumplen con las normas

establecidas por protección civil y tanto los empleados como clientes comercializan en lugares inseguros.

Figura 5.34: Análisis por ciudad de las señales de seguridad dentro en las tiendas informales



Fuente: Elaboración propia con base a las entrevistas en tiendas de reparación (2015)

Medio Ambiente: manejo de residuos electrónicos

Analizando el tema ambiental en el manejo de residuos de teléfonos celulares en las tiendas informales, se pudo determinar, que la generación mensual de estos residuos electrónicos es menor a un kilo. No existe algún tipo de clasificación ni tratamiento de estos residuos que eviten impactar al medio ambiente. En las cuatro ciudades se pudo constatar el mismo accionar de los empleados, siendo su única opción el tirar a la basura, siempre y cuando no se puedan reutilizar los componentes o materiales.

Conclusiones

- Existen grandes diferencias entre las tiendas formales e informales de reparación celular. Sin embargo, se pudo comprobar que independientemente del número de empleados, nivel académico, equipamiento y tecnología, el consumidor siempre va a buscar un servicio eficiente y a bajo costo.

- Dentro de las entrevistas, se pudo constatar que por lo menos el 70% de las tiendas formales trabajan de manera directa con técnicos de locales informales. Lo que confirma que el nivel y conocimiento de reparación de celulares en México no necesariamente requiere de un título académico. Muchas tiendas informales han pasado de generación en generación y el oficio de reparación de electrónicos ha pasado de padres a hijos y nietos.

- Las tiendas informales pueden no contar con requisitos completos de seguridad, salud y medioambiente, más la organización de cada una de estas tiendas está muy bien ordenada para colaborar con los recicladores informales y venta en mercados de segunda mano.

5.5 Análisis de Flujo de Materiales de Residuos de Teléfonos Celulares

El análisis de flujo de materiales (AFM) es una herramienta de toma de decisiones para una adecuada gestión y manejo de residuos. Por medio de los datos e información de los diferentes actores y procesos se puede tener una visión más precisa sobre el movimiento y flujo de los residuos electrónicos. Ahora, la siguiente investigación se enfocó en realizar un análisis de flujo de materiales para ver cómo dichos materiales, contenidos en los RAEE particularmente en los residuos de teléfonos circulares, fluyen a través de los diferentes procesos de desensamblado hasta su recuperación. Se analizaron las eficiencias de desensamblado, balance de materiales y composición de los residuos de teléfonos celulares.

5.5.1 Metodología

La metodología de análisis de flujo de materiales de los residuos de teléfonos celulares se enfocó en el balance de materiales y la eficiencia de desensamblado de los equipos celulares. La recicladora Proambi brindó todo el apoyo logístico y técnico para este estudio y donó 80 teléfonos celulares. Primero, se llenó una hoja de datos de las características de cada teléfono celular, junto con los materiales, herramientas y equipos que se requirieron para el proceso. Luego, con el apoyo de un técnico se procedió al desensamblado manual. Cada parte o componente del teléfono celular fue pesado sobre una balanza analítica (Modelo PPN-40S,

TecnoCor) y se cronometró cada paso del desmontaje. En el Anexo D se presentan algunas fotografías del proceso.

El número de piezas desensambladas osciló entre 13 y 15 partes, según el tipo de teléfono celular. Se analizaron las siguientes marcas y modelos de teléfonos (con el número de unidades entre paréntesis): Alcatel 6045 (10), BTE (15), Huawei Y520-U03 (15), Huawei G527-U081 (15), BLU Star4.5 (2), BLU Life (2), ZTE Blade A475 (2), ZTE V6 (2), ZTE Blade L3 (2), Samsung SMJ1000MU (10), Samsung J1 (1), Samsung J3 (2) y Samsung Grand Prime (2).

Una vez registrada esta información, se realizó un análisis de balance de masas de cada teléfono celular y sus componentes, con base en las metodologías propuestas por Yu *et al.* (2010) y Badiru *et al.* (2013). La variación en el material durante el proceso de desmontaje manual (ΔM) se determinó calculando la diferencia entre el peso inicial del teléfono celular (Σf_{in}) y la suma del peso de todos los componentes que abandonaron el proceso (Σf_{out}) (Ecuación 4.5). Además, se calculó la variación porcentual del material durante el desensamblado (*Em*) para determinar la eficiencia del proceso y el porcentaje de pérdidas de material (Ecuación 4.6).

$$\Delta M = \Sigma f_{\text{in}} - \Sigma f_{\text{out}} \text{ (Ecuación de Balance de Materiales)} \quad (4.5)$$

$$Em = \left[\left(\frac{\Sigma f_{\text{out}}}{\Sigma f_{\text{in}}}\right)\right] * 100 \text{ (Ecuación de Eficiencia de Desensamblado)} \quad (4.6)$$

A partir del peso obtenido de cada teléfono celular y el pesaje de cada uno de sus componentes, cálculo el porcentaje y peso de los materiales de los residuos celulares en México. Es así como se pudo determinar el peso de los metales comunes (Al, Cu, Fe, Pb, Sn, Zn), metales preciosos (Ag, Au, Pd), metales poco comunes como (Be, Pt, Ta, In), plástico y vidrio. Se tomó como referencia los datos de generación de residuos electrónicos obtenidos en el año 2015 por la SEMARNAT (RAEE: 1,103.57Kt) y Baldé *et al.* (RAEE: 1000 Kt). Estudios realizados por Baldé *et al.* indican que solamente el 0.5% del total de los RAEE generados contienen teléfonos celulares, por lo tanto, el peso de los residuos celulares para la SEMARNAT es de 5517.9 toneladas y para la investigación de Baldé *et al.* es de 5000 toneladas. Adicionalmente, se utilizó el dato obtenido de las entrevistas a las recicladoras en México, los resultados mostraron que las doce empresas reciclaron un total de 301 toneladas de residuos celulares.

5.5.2 Resultados

Los resultados del análisis de flujo de materiales en residuos de teléfonos celulares, mostró una alta eficiencia en el proceso de desensamblado manual. La Tabla 5.16 muestra la eficiencia de desensamblado, la cual estuvo entre 98% y 99%. La marca Huawei presentó una mayor eficiencia de separación manual con 99%, mientras que las demás marcas tuvieron una eficiencia del 98%. El tiempo de separación también se analizó y fluctuó entre los 3.24 minutos hasta los 4.22 minutos. La marca Samsung fue la más rápida en ser desensamblada (3.24 min) y el celular de la marca BLU tuvo el mayor tiempo promedio de desensamblado que fue de 4.22 minutos. Con respecto al peso de cada componente, existen partes cuyo peso varía dependiendo la marca de celular. Al analizar cada pieza se pudo observar que la mayoría tienen pesos similares sin importar la marca del equipo.

Una de las partes que mayor importancia tiene en el reciclaje de celulares es la tarjeta de circuitos impresos (*PCB*). Estudios a nivel mundial coindicen que el componente con mayor valor económico y contenido de metales preciosos es la tarjeta de circuitos impresos (Ogunniyi *et al.* 2009, Ouguchi *et al*. 2011, Kumar *et al*. 2015, Yamane *et al.* 2011, Holgersson *et al.* 2018). De los cinco modelos de celulares analizados, se realizó el cálculo del porcentaje que representa la tarjeta madre en el celular, y se obtuvo que la PBC ocupa un 9% del peso total del equipo. La tarjeta madre de tres de las cinco marcas tienen el mismo peso de 13 gramos, mientras que Huawei tiene un mayor peso con 16 gramos (19% más) y Samsung con el menor peso de 11 gramos (15% menos que las tres marcas).

Tabla 5.16. Peso y eficiencia de los componentes de un teléfono celular obtenidos a partir del desensamblado manual

Ítem	Componentes de Celular	Peso promedio de los componentes del teléfono celular [g]				
		Samsung (20 unid)	Huawei (20 unid)	Alcatel (15 unid)	BLU (15 unid)	ZTE (10 unid)
1	Carcaza delantera	15.0	16.0	17.0	11.0	16.0
2	Altavoz	2.0	1.0	1.4	2.0	2.0
3	Pantalla táctil	13.0	15.0	***	18.0	22.0
4	Display	21.0	20.0	33.0	21.0	24.0
5	Batería	42.0	35.0	44.0	30.0	44.0
6	Tarjeta de Circuitos Impresos	11.0	16.0	13.0	13.0	13.0
7	Centro de carga	5.0	5.0	6.0	5.0	1.0

8	Cámara frontal	0.2	0.5	0.5	0.5	0.5
9	Cámara posterior	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
10	Bocina	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
11	Botones (Inicio, vibración)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
12	Audio	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0
13	Carcaza posterior	18.0	20.0	18.0	20.0	16.0
14	Bandeja tarjeta SIM	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5
15	Otros (Tornillos, flexores, cables, botones, plásticos.)	18.0	8.0	21.0	8.0	11.0
	Peso inicial (g)	150	140	160	133	155
	Peso final (g)	147	138	156	130	152
	Eficiencia (%)	98	99	98	98	98
	Tiempo de Desensamblado (min)	3.24	3.95	4.11	4.22	3.67

*** Pantalla táctil pegada al display

Fuente: Elaboración propia a partir de las pruebas de desensamblado manual (2017)

La composición general de los celulares está conformada por 23 elementos y una categoría de “otros” que abarca porcentajes de materiales que no pueden ser recuperados como porcelanas, flexores, partes plásticas, pegamento, entre otros (Baldé *et al.*, 2015; Cucchiella *et a*l., 2015). En la Tabla 5.17 se muestra un cuadro comparativo de las diferentes composiciones de los residuos celulares en México, a partir de estudios hechos por Cucchiella *et a*l. y Baldé *et al.* en el año 2015. Posteriormente se calculó el peso de cada elemento con los datos de residuos celulares generados por la SEMARNAT (5,517.9 toneladas), Baldé *et al*. (5,000 ton) y la investigación de campo realizada en doce recicladoras (301 ton). En esta Tabla se visualizan las categorías que han sido clasificados los elementos, junto con su porcentaje y pesos reales, con el fin de determinar qué materiales predominan o no en un celular.

Los 19 elementos que componen un teléfono celular están clasificados según su composición físico-química: metales, no metales, metales preciosos y tierras raras. En la categoría de los metales, existen 11 elementos que componen un celular (Tabla 5.17). El elemento metálico que se encuentra en mayor porcentaje es el cobre (9.94%), seguido del acero (9.74%) y cobalto (5%). En menor proporción se encuentran el litio (0.35%), tantalio (0.018%), tungsteno (0.31%) y zinc (0.4%). Los metales que se encuentran en concentraciones muy bajas son el indio y el plomo con porcentajes de 0.00006 y 0.004 respectivamente. En segundo lugar, se encuentran los metales preciosos conformados por materiales como el oro (0.02%), paladio (0.008%) y plata (0.24%). Como se mencionó previamente, estos metales se encuentran principalmente en las tarjetas de circuitos impresos y su recuperación tiene un gran atractivo comercial. Las tierras raras son elementos nuevos que forman parte de los celulares y sirven

como magnetos, por ejemplo, el neodimio y praseodimio los cuales se encuentran en porcentajes de 2.21 y 0.0079. Finalmente, el plástico es el material que mayor porcentaje se encuentra en el celular (45.03%) y la categoría de "otros" que representa el 21.15% y está conformado por restos de cables, flexores, gomas, restos de pintura, entre otros.

Tabla 5.17: Peso estimado de los materiales que componen los residuos celulares en México

Ítem	Material	Composición Celular (%) ***	Peso de los Materiales en Residuos de Celulares (Datos Estimados) (ton/año)		
			Total RAEE en México: 5517.9 ton/y (S)	Total RAEE en México: 5000 ton/año (B)	Total RAEE de las recicladoras formales en México 301 ton/año (C)
			Metales		
1	Aluminio	2.35	129.67	117.50	7.07
2	Cobalto	5.00	275.90	250.00	15.05
3	Cobre	9.94	548.48	497.00	29.92
4	Indio	0.00006	0.003	0.003	0.00
5	Plomo	0.004	0.22	0.20	0.01
6	Litio	0.35	19.31	17.50	1.05
7	Níquel	1.6	88.29	80.00	4.82
8	Acero	9.74	537.44	487.00	29.32
9	Tantalio	0.018	0.99	0.90	0.05
10	Tungsteno	0.31	17.11	15.50	0.93
11	Zinc	0.4	22.07	20.00	1.20
			Metales Preciosos		
12	Gold	0.02	1.10	1.00	0.06
13	Paladio	0.008	0.44	0.40	0.02
14	Plata	0.24	13.24	12.00	0.72
			Tierras Raras		
15	Neodimio	0.04	2.21	2.00	0.12
16	Praseodimio	0.0079	0.44	0.40	0.02
			No metales		
17	Vidrio	3.8	209.68	190.00	11.44
18	Plásticos	45.03	2484.71	2251.50	135.54
19	Otros	21.15	1167.04	1057.50	63.66
	TOTAL	100	5518	5000	301

S: SEMARNAT (2017), B: Baldé *et al.* (2015), C: Estudio de campo con las 12 recicladoras entrevistadas, ***Datos duros Baldé *et al.* (2015).

Fuente: Preparado por el autor con base a estudios de campo (2017) y literatura de SEMARNAT (2017) y Baldé *et al.* (2015)

Conclusiones

- Por medio del análisis de flujo de materiales se pudo determinar la eficiencia de los procesos de desensamblado. Con los datos y cálculos obtenidos en estas pruebas, se pudo establecer que no todas las marcas presentan la misma eficiencia. Sin embargo, el proceso de desensamblado de los técnicos tuvo altos porcentajes de eficiencia (98% - 99%). La marca

de celular con mayor facilidad para desensamblar de manera manual fue Huawei en un tiempo menor a 4 minutos. La marca que presentó un porcentaje menos de facilidad de desensamblado fue Samsung con 98%, pero fue la marca que más rápido pudo desensamblarse con un tiempo de 3.24 minutos. La marca BLU tuvo el mayor tiempo promedio de desensamblado que fue de 4.22 minutos.

- Estudios a nivel mundial confirman que la tarjeta de circuitos impresos es uno de los componentes que tiene mayor importancia comercial, ya que contiene metales preciosos. La marca Huawei presenta un mayor peso de tarjeta de circuitos impresos (16gramos), lo que se podría asumir que puede contener una mayor cantidad de metales preciosos. El peso de la PCB de los demás modelos de celulares analizados fluctúa entre 13 y 11 gramos, siendo este último peso proveniente de la marca Samsung.

- Esta información es necesaria para futuras políticas públicas y programas para extender el tiempo de vida útil de un producto electrónico. Tanto en Europa como en Asia, la corriente para que la reparación la pueda hacer el mismo usuario ha traído grandes controversias en temas de seguridad y salud. Muchas marcas de fabricantes de electrónicos están opuestas a la reparación por parte del consumidor, mientras que empresas como iFixit motivan a las personas a reparar sus electrónicos y extender el tiempo de vida de sus AEE. Analizando los procesos y cada componente de un equipo, iFixit ha generado videos tutoriales que explican paso a paso como el consumidor puede cambiar la batería o la pantalla quebrada de un celular.

5.6 Impacto Económico de los materiales de Tarjetas de Circuitos Impresos de Teléfonos Celulares

La tarjeta madre o tarjeta de circuitos impresos es el componente de mayor importancia y valor económico-comercial que posee un teléfono celular (Yamane *et al.* 2011, Holgersson *et al.* 2018). En las recicladoras evaluadas fue el único componente que exportan. A continuación se presenta un análisis del impacto económico de los materiales que componen a la tarjeta de circuitos impresos y las pérdidas económicas que México sufre debido a la falta de tecnologías de procesamiento final y de una correcta gestión integral de RAEE.

5.6.1 Metodología

A partir de diferentes estudios se determinó el porcentaje promedio de los materiales que componen la tarjeta de circuitos impresos. Inicialmente, se investigaron diferentes autores sobre reciclaje de residuos electrónicos (Alcántara *et al.* 2016; Ghosh *et al*., 2015; Kumar *et al.,* 2017), análisis comparativos de residuos de teléfonos celulares (Baldé *et al*., 2015), pruebas de desensamblado de celulares (Yu *et a.l*, 2010), investigaciones sobre gestión y mapeo de flujo de materiales provenientes de RAEE (Cruz *et al.*, 2017; Badiru *et al.*, 2013; Navazo *et al.*, 2014), entre otros estudios. El objetivo de recabar esta información fue para determinar el contenido promedio de materiales que componen la tarjeta de circuitos impresos. Posterior a la determinación del porcentaje de materiales de la PCB, se calculó el valor de mercado de cada material con la ayuda de comercializadores internacionales.

5.6.2 Resultados

La tarjeta madre contiene 10 principales materiales con un alto valor comercial. La Tabla 5.18 muestra que la composición de metales preciosos están presentes en concentraciones menores de 0.1%, mientras que los materiales que proporcionan estructura a la tarjeta madre tienen mayores concentraciones y son el cobre (40.34%) y el acero (3.5%). Otros materiales que son vitales para la integración de todos los circuitos están presentes en bajas concentraciones, como el galio (0.022%), que es un metal semiconductor que se utiliza para los circuitos de red integrada, y el neodimio, que es una tierra rara que sirve como magneto (0.028%) . En la misma Tabla se presentan los precios comerciales de estos materiales, aunque algunos de estos elementos están presentes solo en pequeñas concentraciones, tienen un alto interés comercial en todo el mundo debido a su costo unitario (oro, paladio, plata, galio).

Tabla 5.18. Porcentaje de materiales que componen la tarjeta de circuitos impresos (PCB) de los teléfonos celulares

Ítem	Elemento	PCB (% por peso)	Precio (USD/ton)	Ítem	Elemento	PCB (% por peso)	Precio (USD/ton)
1	Cobre	40.340	5490	6	Oro	0.0488	40,919,295
2	Estaño	4.118	16,000	7	Plata	0.028	553,086
3	Acero	3.494	361	8	Galio	0.022	317,000
4	Níquel	2.598	11,788	9	Neodimio	0.028	54,614
5	Titanio	0.350	55,556	10	Paladio	0.00564	24,395,944

*Fuente***:** Elaboración propia a partir de la literatura investigada (OCDE, 2010; Kiddee *et al.*, 2013;Navazo *et al.*, 2014; Khan, 2015; Garlapati; 2016; Turner *et al.*, 2016; Kumar *et al.,* 2017; Guilherme *et al.*, 2018; Kitco, 2018)

Los impactos económicos para México de las tarjetas de circuitos impresos de residuos celulares se encuentran en un rango de $ 11,000 – $ 12,444 millones de dólares. La Tabla 5.19 muestra el porcentaje promedio de materiales contenidos en la PCB seguido del costo estimado por tonelada de cada uno de estos materiales. Los estudios realizados por SEMARNAT indicaron que 496.6 toneladas de PCB se generaron de teléfonos celulares en México en el 2015, lo que representa un 9% de un total de 5,517.9 toneladas de RAEE, con un valor total estimado de aproximadamente $ 12,444 millones de dólares. De manera similar, los valores obtenidos de los estudios realizados por la Universidad de las Naciones Unidas (Baldé *et al.*, 2015) dieron un valor económico estimado de $ 11.277 millones de dólares para México. Finalmente, el estudio de campo realizado en 12 instalaciones de reciclaje mostró que se generaron 27 toneladas de PCB, lo que equivale a un valor estimado de casi $ 676,596 USD para estas compañías.

Tabla 5.19. Valor económico de los materiales que componen las tarjetas de circuitos impresos de teléfonos celulares en México en 2015

Ítem	Material	Composición	Precio en el Mercado	Total celulares en México				Reciclaje Formal en México	
				Celulares: 5,517.9 ton/año (S) PCB: 496.6 ton/año (S)		Celulares: 5,000 ton/año (B) PCB: 450 ton/año (B)		Celulares: 301 ton/año (F) PCB: 27 ton/año (F)	
		[%] +++	[USD/ton] ***	Peso [ton/año]	Valor [USD]	Peso [ton/año]	Valor [USD]	Peso [ton/año]	Valor [USD]
Metales									
1	Cobre	40.340	5,490	200.33	1,099,803	181.53	996,600	10.89	59,796
2	Níquel	2.598	11,788	12.90	152,085	11.69	137,814	0.70	8,269
3	Acero	3.494	361	17.35	6,264	15.72	5,676	0.94	341
4	Antimonio	4.118	16,000	20.45	327,200	18.53	296,496	1.11	17,790
5	Titanio	0.350	55,556	1.74	96,562	1.58	87,501	0.09	5,250
6	Galio	0.022	317,000	0.11	34,633	0.10	31,383	0.01	1,883
Metales Preciosos									
7	Paladio	0.006	24,395,944	0.030	726,902	0.027	658,690	0.002	39,521
8	Plata	0.028	553,086	0.139	76,906	0.126	69,689	0.008	4,181
9	Oro	0.0488	40,919,295	0.243	9,916,415	0.221	8,985,877	0.013	539,15
Tierras Raras									
10	Neodimio	0.028	54,614	0.139	7,594	0.126	6,881	0.008	413
	TOTAL				12,444,362		11,276,607		676,59

S: SEMARNAT (2015) B: Baldé *et al.* (2015) C: Estudio de campo en las 12 recicladoras

+++ Datos estimados de la Tabla 4

*** Datos del año 2015

Fuente: preparado por el autor con base en los datos obtenidos en estudios de campo y las entrevistas realizadas en las instalaciones de reciclaje de electrónicos en México

Conclusiones

- La tarjeta de circuitos impresos posee un alto valor económico. En México las pérdidas de estos componentes son inminente ante la falta de tecnologías de procesamiento final. Se estima que las pérdidas de las PCB se encuentra en un rango de $11.3 – 12.4 millones de dólares en el mercado formal (considerando que el mercado informal que maneja casi el 90% de los volúmenes de los RAEE en el país). Los recicladores cuentan con inversionistas que quieren invertir e implementar modelos de minería urbana en México. Sin embargo, los bajos volúmenes de recolección de RAEE impide que la inversión sea recuperable en menos de 5-8 años.

- El mercado informal del reciclaje se encuentra muy bien organizado con los actores que gestionan los RAEE en el país. Existe una planificada organización entre el “pepenador” o reciclador base, las tiendas de reparación, los transportistas de RAEE y las recicladoras informales. Todos ellos crean un sistema que extiende el tiempo de vida de un producto electrónico y lo envían a mercados de segunda mano en Centroamérica y Sudamérica. En caso que no se puedan reparar los electrónicos, los trabajadores informales se encargan de desensamblar los equipos y sacar todo lo que tenga valor comercial. Lo que no les sirve o no tienen valor comercial es tirado a los ríos, quebradas, enterrado o, en el mejor de los casos, enviados a rellenos sanitarios.

Capítulo 6

Discusión

El estudio determinó que para implementar un modelo de economía circular en la industria de productos electrónicos se requiere analizar los actores y procesos involucrados en la fabricación, distribución, consumo, reciclaje y disposición final de un producto a nivel local, nacional, regional y mundial. Una vez identificado y analizado el sistema de gestión integral, se debe eco-diseñar los productos con materia prima que pueda ser reutilizada al final de su vida útil. Estudios realizados por EMF (2013); Bocken *et al.* (2016); Kirchherr *et al.* (2017), Urbinatti *et al.* (2018), coinciden que la EC es un sistema económico-industrial que reemplaza "el fin de un producto" por nuevos conceptos como uso de materias primas reciclables, reúso, re-manufactura, reciclaje y recuperación de materiales a partir de residuos. Se requiere un análisis de los actores involucrados en el proceso, a niveles micro (producto, fabricantes, consumidor), niveles medios (parques eco-industriales) y niveles macro (alcaldías, municipios, gobiernos y entre naciones); con el objetivo de alcanzar un desarrollo económico circular sostenible, creando calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social (Kirchherr *et al.*, 2017; Urbinatti *et al.* 2018).

6.1 Comportamiento del consumidor

El comportamiento del consumidor en el desarrollo de la economía circular, es una de las principales claves con las que el fabricante debe trabajar para generar productos sostenibles y circulares. Hobson y Lynch (2016) y Repo *et al*. (2018) concuerdan que el papel de los consumidores es primordial para que funcione un modelo circular. El consumidor es el principal juez para aprobar o no un nuevo producto. Por lo tanto, se debe analizar su comportamiento frente a nuevos artículos, indicarles las opciones de reúso, reparación, canales para reciclar el producto e informarles sobre el reciclaje y recuperación de materiales. Estudios realizados por Repo *et al*. (2018) muestran que se ha dejado de lado la opinión del consumidor y su análisis

en este nuevo modelo de EC. Bocken *et al.* (2016) confirma que en la última década las industrias han fabricado productos sostenibles y circulares; sin embargo, estos productos han generado pérdidas por no haber considerado al consumidor en cada una de los procesos. De hecho, Rizos *et al.* (2016), Abbey *et al.* (2017), e Iran y Schrader (2017) indican que existen productos de gran calidad fabricados a partir de materiales reciclados, que los consumidores han decidido almacenar y coleccionar, haciendo que las empresas no puedan recuperar de nuevo los materiales.

El comportamiento del consumidor en productos electrónicos, dentro de un modelo de economía circular, no dista de otro tipo de artículos provenientes de otras industrias. Se debe analizar su accionar en todos los procesos, porque de manera directa o indirecta, su comportamiento puede influir en cómo se venden y distribuyen los productos, extender el tiempo de vida útil y recolectar cantidades óptimas de RAEE. Reportes realizados por Afroz *et al.* (2013), Kirchherr *et al.* (2018), y Boveo *et al.* (2016) muestran que en Europa y Asia la falta de interés en conocer el comportamiento del cliente y el bajo conocimiento socio-ambiental del consumidor es un gran impedimento para transitar hacia un modelo de EC. Investigaciones realizadas por Cox *et al*. (2013) y Bocken *et al.* (2016) confirman que el consumidor es el principal protagonista para que un modelo de economía circular sea factible en la industria electrónica. Por este motivo, el consumidor debe ser analizado bajo diferentes aspectos tales como características demográficas, tiempos de uso de un EEE, razones para considerar un equipo como obsoleto, maneras de deshacerse del dispositivo, reparación, reciclaje, entre otros (Islam *et al*., 2016; Hennies and Stamminger, 2016; Sabbaghi *et al*., 2016; Bovea y Pérez-Belis, 2017).

A nivel mundial el comportamiento del consumidor en la compra de múltiples EEE está impulsando el crecimiento de generación de RAEE. Este comportamiento genera el creciente uso de múltiples productos electrónicos, particularmente equipos como televisores, computadoras personales, celulares y tabletas (Afroz *et al.,* 2013; Baldé *et al.,* 2015; Bocken *et al.* 2016). En el caso de México, este comportamiento sigue la misma tendencia, la encuesta nacional demostró que muchos usuarios tenían múltiples dispositivos como televisor, computadora portátil y teléfono celular. En menor proporción había usuarios que contaban también con computadoras de escritorio. Estudios realizados por Anderson (2015) y Amit *et al.* (2017) determinaron que para el 2016, una de cada dos personas en los Estados Unidos tenía un teléfono celular y una de cuatro personas contaban también con un televisor o tableta. Entre

el 2012 y 2015, el número de estadounidenses que tenían un teléfono inteligente, una computadora y una tableta se duplicó.

En la investigación se pudo determinar que los encuestados mexicanos prefieren esperar que otras personas prueben un producto tecnológico o son más precavidas en probar un nuevo artículo electrónico. El 70% de las mujeres entrevistadas prefieren esperar que otras personas prueben nuevos productos. En comparación con los hombres que están más al tanto de lo que sucede en este sector y un 26% están entre los primeros en probar un nuevo producto y comprarlo. Estudios realizados por Hobson y Lynch (2016) indican que en Estados Unidos los hombres tienden a comprar nuevos productos electrónicos con base a mejoras tecnológicas en el sistema operativo. Por otro lado, investigaciones realizadas por Jui-Che *et al.* (2018) en Taiwán muestran que las mujeres esperan temporadas de rebajas y opiniones sobre la apariencia, marca y tendencias de moda para adquirir un nuevo equipo electrónico.

Estudios realizados por Hennies and Stamminger (2016) y Amankwah-Amoah (2016) muestran que la cantidad de equipo obsoleto es impulsada por ciclos de reemplazo relativamente cortos. Dado que las tecnologías cambian rápidamente, muchos usuarios cambian de dispositivo regularmente y con mayor frecuencia antes de que realmente se rompa (Mmereki *et al.*, 2015; Kiddee *et al.,* 2013). En el caso de México, casi el 80% de los encuestados usan su celular en menos de 3 años ya que su plan de telefonía les permite cambiar por uno nuevo al momento de renovar su plan o simplemente porque salió un teléfono móvil con mejor capacidad tecnológica. Con respecto a los televisores y computadores de escritorio, investigaciones realizadas por Alcántara *et al.* (2016) y Cruz *et al.* (2017) confirmaron que entre 2013 y 2015, el ciclo de vida promedio de estos dispositivos en México no excedió los 5 años. Al igual que los resultados obtenidos en esta investigación, donde el 65% de los TV y el 60% de las computadoras de escritorio no excedieron los 5 años de uso en el año 2015.

La encuesta indicó que el 70% de las personas han comprado sus EEE en estado nuevo, no como productos usados o re-manufacturados de venta de segunda mano. Esto se debe a que las personas no sienten confianza por los productos usados, piensan que ya vienen dañados y les van a funcionar por poco tiempo. A excepción de un 17% - 20% de los encuestados que estuvieron de acuerdo en comprar productos electrónicos usados siempre y cuando sepan su procedencia ya sea de un familiar o amigo. Estudios realizados por Montgomery y Mitchell (2014), Fortuna y Diyamandoglu (2016), y Pérez-Belis *et al.* (2017) confirman esta aseveración. Esos estudios señalan que la principal razón de no comprar productos electrónicos de segunda mano se debe a que los consumidores asocian estos

productos como previamente dañados y reparados, de baja calidad y poca duración. Por otro lado, Pérez-Belis *et al.* (2017) confirman que los usuarios aceptan comprar en mercados de segunda mano si provienen de personas que conocen como amigos o conocidos, para revisar personalmente el estado y funcionamiento del producto electrónico.

Comportamiento al finalizar el tiempo de uso del equipo electrónico

El nivel socio-económico es una de las principales razones para que una persona tenga un tipo de comportamiento de consumo. Estudios realizados por Kiddee *et al.* (2013), Baldé *et al.* (2015), y Pérez-Belis *et al.* (2017) confirman que el comportamiento del usuario en países de economías emergentes y en EE.UU. ha generado una nueva ola de "sociedad desechable" caracterizada por el consumismo y la tendencia a deshacerse y comprar "algo nuevo" en lugar de mantenerlo y repararlo. En México, este comportamiento se pudo ver reflejado en las clases alta A/B, que indicaron que cambian su equipo electrónico cuando aparece un producto más de moda y con mejor rendimiento tecnológico.

La clase media alta en México (C+, C y C-) por lo general tratan de aprovechar las ofertas y rebajas para adquirir un electrónico nuevo. Los principales motivos para comprarlo son el estatus y la unión con la familia y amigos. Bovea *et al.* (2016), Baldé *et al.* (2017), y Pérez-Belis *et al.* (2017) demostraron que particularmente la clase media con ingresos más altos a menudo prefiere comprar un nuevo producto o dispositivo, ya que en muchos casos esto posee un símbolo de estatus y proporciona reconocimiento social. Estudios realizados por Cruz *et al.* (2016) y Alcántara *et al.* (2017), coinciden que las clases medias mexicanas adquieren con mayor frecuencia nuevos productos electrónicos para mejorar su comodidad y mostrar mejores condiciones de vida a los demás. Pérez-Belis *et al.* (2017) indican que en España, tanto hombres como mujeres de clase media, coinciden que la marca y tener un nuevo electrónico es símbolo de estatus.

El costo de reparación de un electrónico puede ser motivo para que un equipo ya no sea útil o lo considere obsoleto. Los resultados del estudio indicaron que todos los niveles socio-económico consideraron que un equipo electrónico deja de ser útil cuando su reparación es cara, cuando no es posible reparar el equipo o se rompe. Investigaciones realizadas por Dindarian *et al.* (2012) y Gutierrez *et al.* (2011) indican que en países desarrollados los equipos dejan de ser funcionales si se rompen y no es posible repararlos. Además, muestran que el servicio de reparación formal en estos países es muy costoso, así que prefieren almacenar los

equipos o tirarlos a la basura. En Taiwán, estudios realizados por Jui-Che *et al.* (2018) indican que el 63% de clase media prefiere tirar a la basura su EEE si la reparación es muy costosa y el porcentaje restante prefiere almacenar su electrónico.

Finalmente, otra razón que los entrevistados consideraron que un equipo ya no es funcional es cuando aparece un nuevo modelo, más a la moda, con un mayor rendimiento tecnológico. Un dato que llama la atención en el estudio es la respuesta del nivel socio-económico A/B que indica que un equipo electrónico puede llegar a no ser útil cuando aparece un producto más de moda y con mejor rendimiento tecnológico. Este aspecto tiene baja o nula aceptación en los niveles socio económicos bajos como el D+, D y E. Jui-Che *et al.* (2018) indican que en Taiwán aproximadamente el 17% de las mujeres que provienen de niveles socioeconómicos altos, se deshacen de su celular o lo almacenan cuando aparece un nuevo modelo que este más a la moda. En Japón, Huang *et al.* (2017) analizaron el comportamiento del consumidor y determinaron que la élite japonesa cambia de teléfono inteligente cuando aparece un modelo más de moda, independientemente si tiene un mejor rendimiento tecnológico (Ejem.: caso celular Nokia retro modelo 8110).

Regalar, vender en un mercado de segunda mano, y almacenar son las principales formas para deshacerse de un equipo electrónico obsoleto. En China, Huang *et al.* (2014) indica que aproximadamente el 40% de los usuarios chinos almacenan sus teléfonos móviles, el 31% los regala a familiares y amigos, el 23% los vende en mercados de segunda mano, el 3% los tira como basura ordinaria, y solo el 1% los entrega a recicladoras formales. En el caso de México, entre el 58% de los encuestados almacenan su teléfono celular por menos de 1 años (para usarlo en caso de emergencia o si se les daña el actual equipo electrónico). Culminado este tiempo, el consumidor lo regala a un familiar o conocido o lo vende en un mercado de segunda mano. Pérez-Belis *et al.* (2013) y Barletta *et al.* (2016) encuentran que el comportamiento del consumidor en Europa de equipos pequeños, como celulares y tabletas, tiende hacia el almacenamiento para proteger de sus datos.

Dependiendo del consumidor, un equipo electrónico puede ser almacenado entre uno y seis-años, cuando ya no es útil para el usuario. Particularmente, los teléfonos celulares son almacenados por el usuario para tenerlo en caso de emergencia o regalarlo. Estudios realizados por Cucchiella *et al.* (2015) y Navazo *et al.* (2015) muestran que en Europa el consumidor almacena sus teléfonos celulares en un período de cinco – seis años. De igual manera, en México Cruz *et al.* (2017) indican que tanto las computadoras de escritorio como impresoras, muchas veces están decorando los escritorios de las casas, pero en realidad no se han utilizado

estos equipos por varios años. En el caso de los celulares, Alcántara *et al.* (2016) determinaron que el 40% de los consumidores mexicanos almacenan su celular por menos de un año, para posteriormente venderlo, regalarlo o tirarlo a la basura. Mientras que el 60% restante espera más tiempo para regalarlo o venderlo en un mercado de segunda mano.

Destino final del equipo electrónico

El estudio reveló que un porcentaje relativamente bajo de personas (14%), indistintamente de su género, conoce lo que sucede con sus productos electrónicos después de deshacerse de ellos. No obstante, el nivel de educación les permite tener un mayor conocimiento sobre el destino final. En el 2012, Manomaivibool y Vassanadumrongdee encontraron que en Tailandia el consumidor no conoce el destino final de un electrónico y pocos asumen que van a un relleno sanitario. En China, Wan y Hazen (2016) analizaron el mercado del consumidor de productos electrónicos y confirmaron que el nivel de educación de los encuestados les brinda un mayor conocimiento sobre el reciclaje y disposición final de sus electrónicos.

La edad y nivel de educación están relacionada con la conciencia ambiental. La gente joven (18-24 años) es más consciente sobre el deterioro del planeta. Las personas de mayor edad (36-50 años) y con mejor educación tienen una conducta más ecológica (Zelezny *et al.,* 2000). La educación está positivamente correlacionada con el conocimiento, conciencia y actitud de la gente sobre el destino final de sus productos electrónicos (Lee, K., 2008). El estudio de Jui-Che *et al.* (2018) reveló que la edad y nivel de educación no tienen relación directa con la percepción de la sostenibilidad, pero sí de conocer los posibles impactos ambientales que los RAEE pueden ocasionar el final de su vida útil. Las personas con nivel académico de pregrado y posgrado están más conscientes de los impactos ambientales generados en la industria de los electrónicos.

Reciclaje de equipos electrónicos

Existe gran desinformación y barreras que impide que los consumidores entreguen sus dispositivos electrónicos al fabricante para reciclarlos. La falta de información sobre las opciones para deshacerse de los equipos electrónicos y el bajo valor económico de retorno, son motivos

para que el usuario prefiera almacenar su equipo o venderlo en un mercado de segunda mano. Anderson (2015) y Amit *et al.* (2017) encontraron que en EE.UU. el consumidor tiene una mejor tendencia de entregar sus electrónicos al reciclador, debido a existe mayor información y canales de entrega, o en su defecto, el fabricante los va a retirar de sus casas/oficinas. Cruz *et al.* (2017) también confirman que los mexicanos estarían dispuestos a entregar sus productos si existiese mayor información y canales de entrega. Por otro lado, Perez-Beliz *et al.* (2017) muestran que el consumidor español tiende más a buscar alternativas de reparación y de venta en mercados de segunda mano. Esto se debe a que el usuario gana más vendiendo su equipo electrónico, que devolviendo al fabricante por un descuento ínfimo o una tarjeta regalo de menos de 10 euros (Navazo *et al.,* 2017).

Otra iniciativa para promover el reciclaje de electrónicos se centra en pagos ecológicos o depósito ambiental, las cuales tienen mayor aceptación de acuerdo al nivel económico y de educación del consumidor. Estas propuestas fueron creadas en países desarrollados para que el usuario entregue su electrónico al fabricante (Directiva Europea, 2012). En el estudio, la contribución ecológica al igual que el depósito tuvieron mayor aceptación en el nivel económico medio y alto, así como su nivel de educación (pregrado y posgrado). Song *et al.* (2012) indican que mientras mayores son los ingresos económicos del consumidor, mayor aceptación en dar una contribución ecológica. En India, Dwivedy y Mittal (2013) muestran que los estudiantes de universidad en posgrado, presentaron una mayor predisposición en entregar una contribución para asegurar un reciclaje responsable de sus equipos electrónicos. De igual manera, Knot y Luiten (2015) señalaron que en Países Bajos la clase con mayores ingresos económicos muestran gran aceptación para dejar un depósito ambiental, sin embargo, olvidan de devolver su electrónico al fabricante, por lo tanto, el depósito se sigue incrementando y el fabricante no sabe qué hacer con el dinero.

Tanto el depósito como la contribución ecológica tuvieron un grado medio de aceptación en México. La implantación de un impuesto ecológico no tuvo aceptación, ya que el gobierno estaría manejando dicho dinero. No existen leyes referentes a la responsabilidad extendida del consumidor, y en las entrevistas los encuestados no estuvieron de acuerdo con pagar un impuesto ecológico manejado por el gobierno. Estudios realizados por Cruz *et al.* (2017) en México confirman esta aseveración, por ejemplo, la población pierde su motivación ambiental al ver que su basura (separada) termina mezclada en los camiones recolectores de basura. Además, ven a los alcaldes y autoridades manejar el dinero destinado a proyectos ambientales (Ej.: tenencia de autos) de una manera ineficiente y sin presentar las cuentas clara. En el caso

de Europa, Herat y Agamuthu (2012) demostraron que las leyes de reciclaje de electrónicos obligan al consumidor a tener una responsabilidad extendida. Lo que les exige disponer de sus productos de manera correcta en canales de recolección, entrega al fabricante y le devuelve su depósito o contribuyen económicamente para un óptimo reciclaje (Jena y Sarmah, 2015).

Reparación de celulares

Daño o ruptura en la pantalla, así como derrame de líquidos en su equipo electrónico, fueron los principales problemas que un celular sufre durante su vida útil. De acuerdo con Guiltinan (2009) los usuarios de equipos celulares comentaron que si sus electrónicos sufren pequeños daños o se mojan, ellos mismo tratan de repararlos. De igual manera, investigaciones de Huang *et al.* (2017) y Jui-Che (2018), mostraron que el usuario trata de arreglar su celular cuando se moja, por medio de remedios caseros y su última opción es llevarlo al servicio técnico. Estos mismos autores concuerdan que el consumidor prefiere ver tutoriales para poder arreglar su dispositivo electrónico, ya que la reparación en tiendas formales o con el distribuidor puede ser costosa (casi como comprar un equipo nuevo).

Los usuarios señalaron que además del alto costo en reparación, el elevado precio de los componentes (como pantalla y batería) y disponibilidad son los limitantes para reparar sus equipos. Investigaciones realizadas por Jiménez-Parra *et al.* (2014); Wang y Hazen (2016) y Abbey *et al.* (2017) indicaron que la información para que un usuario repare por sí mismo su celular es muy limitada, además que los planes de pago para comprar un nuevo equipo son más accesibles en comparación con el tiempo de espera y el costo para reparar un equipo. En Europa se está promoviendo la legislación para obligar a los fabricantes a generar manuales y tutoriales de reparación, para que el mismo usuario pueda reparar su equipo (Ardente y Mathieux, 2016). La empresa iFixit ha generado manuales de reparación y herramientas de diagnóstico para ayudar al consumidor a reparar daños que no requieran de un técnico especializado, como cambiar la batería, pasos para “salvar a su celular mojado”, entre otros. Además de informar al consumidor, a nivel mundial, sobre temas de reúso, durabilidad, canales de reciclaje, re-manufactura, trueque y asuntos relacionados con extender el tiempo de uso y vida de su equipo electrónico (iFixit, 2018).

6.2 Reciclaje de electrónicos: teléfonos celulares en México

Las recicladoras en México trabajan con procesos básicos de separación, tanto manual como mecánica. Esto confirma los hallazgos de los estudios realizados por SEMARNAT (2017) y Cruz *et al*. (2017), que demostraron que los procesos de reciclaje en México son elementales y simples, y no incluyen tecnologías de procesamiento final para la recuperación de materiales. Del mismo modo, los estudios de Kumar *et al*. (2010) y Ghosh *et al*. (2015) encontraron que los países con economías emergentes generalmente tienen tecnologías de reciclaje manual y rudimentario. Las tecnologías de procesamiento final para recuperar materiales a través de mecanismos químicos y/o biológicos aún no son aplicadas en México. Namias (2013) analizó la industria del reciclaje en EE.UU. y pudo establecer que, al igual que México, el país cuenta con procesos manuales y mecánicos, más no con procesos finales de recuperación de materiales y éstos son enviados a Europa o Asia para recuperar metales preciosos.

En el estudio casi un 50% de los RAEE recolectados por las recicladoras estuvo conformado por electrodomésticos e impresoras y menos del 10% por teléfonos celulares. Este hallazgo es consistente con el estudio realizado por Cucchiella *et al.* (2015), quien muestra que el flujo de residuos electrónicos está constituido principalmente por electrodomésticos. Yamane *et al.* (2011), Badiru *et al.* (2013), Baldé *et al.* (2015) y Ghosh *et al.* (2015) determinaron que los equipos largos y los equipos de intercambio de temperatura son los que se encuentran en mayor porcentaje en la corriente de RAEE. Similarmente, Baldé *et al.* (2015) y Holgersson *et al.* (2017) confirmaron que los residuos celulares (equipos pequeños y de telecomunicación) constituyen los flujos de menor proporción.

Todas las recicladoras entrevistadas exportan sus tarjetas de circuitos impresos hacia EE.UU., Canadá, Japón, China y Bélgica, para recuperar materiales como oro, paladio, cobre y plata. En el año 2015, Ghosh *et al.* realizó un análisis bibliográfico de más de 150 artículos relacionados con el reciclaje de las tarjetas de circuitos impresas, con el fin de definir las diferentes rutas de reciclaje y tecnologías de procesamiento final, para la recuperación de materiales de dichos componentes. Yamane *et al.* (2011) y Holgersson *et al.* (2017) confirmaron que existen contados países que cuentan con tecnologías de recuperación, además de corroborar las rutas de envío de materiales provenientes de residuos electrónicos hacia países asiáticos.

Existen algunos problemas relacionados con los residuos generados durante la fabricación del electrónico y al final de su vida útil durante el proceso de reciclaje. Estudios

realizados por Ogunniyi *et al.* (2009), Veit *et al.* (2014) y Ghosh *et al.* (2015) concuerdan que algunas partes electrónicas de los RAEE (por ejemplo, tarjetas de circuitos impresos) no se desarman adecuadamente; por lo tanto, no se recuperan sus materiales completamente, dejando el proceso de reciclaje demasiado pronto o entrando a diferentes (y equivocados) procesos. Por otra parte, al momento de la fabricación del electrónico se generan también residuos (productos defectuosos y componentes), los cuales no se reutilizan de forma sostenible para la producción de nuevas partes, generándose una pérdida de materiales críticos (Ghosh *et al.*; 2015 y Holgersson *et al.*, 2017). El estudio confirmo que las actuales tecnologías de reciclaje y los modelos lineales de negocios de los recicladores no permiten alcanzar una ventaja económica para todos los materiales valiosos provenientes de estos RAEE. De esta manera, las tasas de recuperación siguen siendo extremadamente bajas, ya que el mercado informal abarca casi el 90% de la recolección de RAEE a nivel nacional (SEMARNAT, 2017; Cruz *et al.,* 2017).

6.3 Cálculo de generación de residuos de teléfonos celulares

El producto interno bruto de un país tiene relación directa con la generación de sus residuos electrónicos. Estudios realizados por Yu *et al.* (2010), Baldé *et al.* (2015) y Kumar *et al.* (2017) confirmaron esta aseveración y demostraron que el PIB de una nación es directamente proporcional con la generación de sus residuos electrónicos. Adicionalmente, un estudio realizado por la Universidad de las Naciones Unidas (Baldé *et al.,* 2015) correlacionó el total generado de residuos electrónicos en 50 países con el producto interno bruto y el tamaño de su población, y demostraron que estos tres factores tienen relación entre sí. La generación de residuos electrónicos tiene relación con el PIB de cada país, más no existe una relación significativa ni tendencia con el número de sus habitantes. Por lo tanto, un país con una población más grande no necesariamente produce una cantidad significativamente mayor de residuos electrónicos (Baldé *et al.,* 2015; Kumar *et al.,* 2017).

6.4 Reparación de electrónicos: teléfonos celulares

El nivel académico y número de los empleados provenientes de las tiendas de reparación formal es superior a las informales. En la investigación, el número de trabajadores formales difiere en casi el doble o triple que los informales. Vale la pena señalar que se pudo confirmar presencia de trabajo infantil en los locales no formales, cuyas edades oscilan entre los 8-15 años. La Ley Federal del Trabajo enfocada en trabajo infantil estipula que solamente los niños y niñas mayores de quince años pueden prestar libremente sus servicios. Además, los menores de 16 años necesitarán autorización de sus padres o tutores para poder trabajar (STPS, 2015). Investigaciones realizadas por Estrada y Kahnat (2013), y Cruz *et al.* (2017) confirmaron la presencia de trabajo infantil en la cadena de valor de los residuos electrónicos, principalmente en sitios de reparación informal. Así mismo, Perez-Belis *et al*. (2017) encuentran que los empleados provenientes del mercado informal presentan educación básica e incluso analfabetismo en países de economías emergentes.

Se pudo establecer que en México el proceso de reparación y atención al cliente en las tiendas de reparación de equipos electrónicos puede ser similar ya sea en tiendas formales o informales. Sin embargo, las tiendas informales pueden ser más eficientes y económicas, aunque sus estándares de seguridad y salud, medioambiente e infraestructura sean de baja calidad. Sabbaghia *et al.* (2016) señalan que el consumidor en EE.UU. muestra poco interés en reparar sus electrónicos debido al alto costo y tiempos de reparación. Fenómeno opuesto en México ya que en tiendas informales la reparación puede demorar 48 horas (formales 5 días), y los costos de reparación son económicos al usar piezas genéricas. Los estudios realizados por Atlason *et al.* (2017), Pérez-Belis *et al.* (2017), y Nduneseokwu *et al.* (2017) mostraron que los consumidores buscan tiendas de reparación formales según el tipo y la calidad del servicio al cliente, pero a menudo prefieren la solución más económica y eficiente en términos de tiempo y precio de reparación, independientemente si la tienda no presenta infraestructura adecuada, está desordenada y con herramientas viejas y oxidadas.

En México, el sector informal compite de manera desigual con las tiendas formales de reparación de electrónicos. Sin embargo, la informalidad se identificó como una fuerza laboral bien organizada y ofrece al cliente la misma calidad de trabajo en menos tiempo y a precios más económicos. Cruz *et al.* (2017) confirma que la industria informal en México, principalmente en las zonas metropolitanas, mantiene una estructura organizada y muy similar a la formal. A pesar de contar con herramientas y equipos básicos de reparación, los negocios informales cumplen

con las mismas actividades que las tiendas formales de electrónicos, pero en condiciones laborales inadecuadas, las cuales aumentan los riesgos de accidentes debido a las condiciones de salud y seguridad inadecuadas (Alcántara *et al.,* 2016).

En la investigación se confirmó que los costos de reparación técnica y mano de obra en las tiendas informales son más económicos, además que las piezas genéricas vs. las originales son hasta un 50% más baratas. Alcántara *et al.* (2016) al igual que Cruz *et al.* (2017) determinaron que el usuario puede reparar dos o tres veces un dispositivo electrónico siempre y cuando la reparación no supere el 30% del costo de un nuevo equipo. En países de economías emergentes, el consumidor tiende a reparar su equipo electrónico en lugares económicos para venderlo en un mercado de segunda mano, pero si la reparación es costosa, no lo repara y lo vende más barato (Pérez-Belis *et al.*, 2017). Estudios realizados por Estrada y Kahhat (2013) y Navazo *et al.* (2014) muestran que, en América Latina el consumidor considera los factores económicos y de tiempo para reparar o no un celular. En caso que la reparación sea más costosa que un equipo nuevo, tratarán de venderlo en un mercado de segunda mano, aunque sea por partes o componentes.

Adicionalmente, el tema de las tiendas informales mantiene una relación directa con respecto a la competencia en el mercado, ya que se identificó que estos establecimientos pueden llegar a ofrecer mayores beneficios económicos a las recicladoras informales. Esto asociado al estudio realizado por la SEMARNAT (2017) donde indican que los RAEE están considerados como residuos de manejo especial, y aunque requieran un manejo y tratamiento específico, los mecanismos de vigilancia por parte de autoridades locales son ineficientes o inexistentes. Consecuentemente, las tiendas informales pueden manejar los RAEE y entregar a empresas recicladoras que no cumplen con los lineamientos establecidos por la SEMARNAT, incentivando la venta de equipos al mejor postor.

6.5 Análisis de Flujo de Materiales de Residuos de Teléfonos Celulares

El análisis de flujo de materiales en residuos celulares permitió conocer las entradas y salidas de partes/componentes en el sistema de desensamblado, así como posibles pérdidas de materiales. Durante los procesos de reciclaje, tanto en el desensamblado manual como mecánico, se debe realizar un balance de las entradas y salidas de los materiales al sistema. Kumar *et al.* (2017) muestran la importancia de realizar un mapeo de flujo de materiales por

medio de balance de masas, para especificar simultáneamente múltiples entradas y salidas de materiales al sistema. Van Eygen *et al.* (2016) determinó la importancia de realizar análisis de flujo de materiales en los procesos de reciclaje, con el objetivo de ahorrar recursos y utilizar estos materiales como fuente de minería urbana. Yu *et al.* (2010) realizó un estudio en China sobre mapeo de flujo de materiales para determinar los impactos y pérdidas de materiales que los teléfonos celulares pueden generar durante el proceso de remanufactura hasta la generación de residuos electrónicos.

Por medio de las pruebas de análisis de flujo de materiales se pudo identificar cuáles materiales pueden ser recuperados de manera local. Además, se confirmó que las compañías de reciclaje en México exportan todos los PCB extraídos de los teléfonos celulares. Estos hallazgos son congruentes con los de Ghosh *et al.* (2015), quienes definieron las diferentes rutas de reciclaje y tecnologías de procesamiento final analizando más de 150 artículos y confirmaron que pocos países tienen este tipo de tecnología de recuperación, y que estos materiales generalmente se envían a países asiáticos y europeos. Por su parte, Estrada *et al.* (2013) y la SEMARNAT (2017) establecieron que los materiales de alto valor comercial provenientes de los RAEE, son exportados hacia Europa y Asia, ya que México no cuenta con tecnologías de recuperación de materiales.

El análisis de flujo de materiales provenientes de residuos electrónicos ha sido investigado por varios autores, entre ellos Shinkuma y Nguyen (2009), Yu *et al.* (2010), y Kumar *et al.* (2017), con referencia a EE.UU., Asia y Europa. A través de sus análisis se ha podido determinar cómo los RAEE migran hacia países de economías emergentes para ser vendidos en mercados de segunda mano, o sus componentes (principalmente PCB) exportados a otros países que poseen tecnologías de recuperación de materiales tales como separación física, química y/o biológica. En México, todas las recicladoras entrevistadas exportan sus tarjetas de circuitos impresos hacia EE.UU., Canadá, Japón, China y Bélgica, para recuperar materiales como oro, paladio, cobre y plata. Sin embargo, los otros materiales (estaño, níquel, titanio, tungsteno, galio, disprosio, neodimio) no son cotizados ni considerados en la negociación.

6.6 Impacto Económico de los materiales de Tarjetas de Circuitos Impresos de Teléfonos Celulares

Uno de los componentes con mayor valor económico, dentro de la corriente de residuos electrónicos, es la tarjeta de circuitos impresos. En la investigación de campo se determinó que

en el año 2015 México perdió la suma $USD12.4 millones de dólares proveniente de las tarjetas madre de teléfonos celulares de las 496 toneladas generadas en ese año. Investigaciones realizadas por Ouguchi *et al*. (2011), Baldé *et al.* (2015), Kumar *et al*. (2017) y Holgersson *et al.* (2018) confirman que la PCB es de gran relevancia económica, debido a que cuenta con el mayor número de metales preciosos y materiales de mayor valor comercial. Yu *et al.* (2010) demostraron que en China el beneficio económico de reciclar una tonelada de residuos celulares fue de $USD10,860 dólares. Baldé *et al.* (2015) encontraron que la composición de diferentes corrientes de residuos electrónicos y el cálculo del valor económico solamente de metales preciosos (oro, plata y paladio) provenientes de los RAEE es de $USD15.12 millones de dólares.

Si los residuos electrónicos se reciclan de forma adecuada y la recuperación de sus materiales se realiza de manera local, el beneficio económico de un país va a ser inmediato. Kumar *at al.* (2017) sostienen que, si a nivel mundial los residuos electrónicos se reciclan de forma eficiente y local, el beneficio económico de recuperar materiales tales como oro, cobre, plata y paladio, asciende a los USD$48 billones de dólares. Cucchiella *et a*l. (2015) concluye que los posibles ingresos procedentes del reciclado de residuos electrónicos equivalen a $USD2.50 billones de dólares para el año 2015. Un análisis realizado por McKinsey para la Fundación Ellen MacArthur (2012) muestra que si un subconjunto del sector manufacturero de la Unión Europea adoptara modelos de negocio de CE, podría lograr un ahorro neto de materiales de hasta $USD630 mil millones de dólares por año para el 2025.

6.7 Conclusiones

- Para implementar un modelo de EC en la industria de los productos electrónicos se requiere analizar el producto desde su eco-diseño, luego evaluar los actores involucrados a niveles micro, medio y macro, y finalmente invertir en tecnologías de reciclaje que permitan recuperar los materiales del producto, para que reingresen al sistema y alcanzar un desarrollo circular sostenible.

- El comportamiento del consumidor es uno de los pilares de análisis primordiales para determinar si un modelo de economía circular el factible o no. La falta de interés por parte del fabricante, y la falta de conocimiento y conciencia ambiental por parte del usuario, son un gran impedimento para transitar hacia un modelo de EC. Adicionalmente, a nivel regional los gobiernos carecen o no encuentran las estrategias adecuadas para transmitir un mensaje

eficiente para una óptima gestión integral de los residuos, además de fomentar un mayor compromiso con el fabricante e incentivos económico-ambientales al consumidor.

- Los usuarios cambian sus dispositivos electrónicos con mayor frecuencia, en comparación con tendencias de hace cinco o diez años. No obstante, en países de América Latina, los niveles socio-económicos medios usan por más tiempo sus equipos en comparación a los países como EE.UU., Europa y Asia. Además, los latinos, provenientes de nivel socio-económico medio y bajo, tienen la cultura de la reparación, el reúso y la venta de segunda mano; siempre y cuando el precio de reparación no sea muy elevado, y puedan alcanzar un beneficio económico y/o emocional.

- El costo de reparación es el principal impedimento y motivo para que un usuario cambie de equipo electrónico. Tanto en países de la región, como en países de Asia y Europa, el costo para reparar un equipo es más elevado en tiendas formales. En consecuencia, el usuario va a buscar mecanismos más económicos y eficientes para arreglar su electrónico ya sea por sí mismo a través de manuales/tutoriales o con técnicos informales.

- A nivel mundial existen alternativas para impulsar el reciclaje de electrónicos e incentivar al consumidor, de manera obligatoria o voluntaria, para entregar sus RAEE al reciclador. La responsabilidad extendida del productor, así como la responsabilidad del consumidor son las herramientas planteadas por países desarrollados para recuperar los residuos electrónicos. En la región, países como Colombia ya cuentan con la REP y, Chile, Perú, Argentina y Ecuador están planteándose estrategias para aumentar el volumen de recolección de sus RAEE.

- Los países con economías emergentes tienen tecnologías de reciclaje manual y mecánico. Sin embargo, EE.UU. a pesar de ser un país desarrollado, también cuenta con tecnologías de pre-procesamiento y no con procesos finales de recuperación de materiales y éstos son enviados a Europa o Asia para recuperar metales preciosos. A pesar de que México vende las tarjetas de circuitos impresos a EE.UU., ellos en realidad son intermediarios y exportan las PCB a Europa y Asia para recuperar los metales preciosos.

- Conocer el destino final de cada material proveniente de los RAEE, permite determinar los impactos técnico y económicos que un país debe asumir al carecer de legislación y

tecnología adecuada para generar modelos de EC. Los gobiernos deben trabajar con el fabricante y el reciclador, para desarrollar estrategias más eficientes de recolección de residuos y tecnologías de recuperación de materiales de manera local. Adicionalmente, establecer mecanismos o convenios que permitan exportan RAEE para recuperar materiales en otros países, y aunque se pierda esta materia prima del país, recuperar estos materiales en términos económicos.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La principal aportación de esta investigación se centra en brindar información actualizada y clara sobre el subsistema productivo-económico de los residuos electrónicos, a través del mapeo de flujo de materiales en el país, principalmente en teléfonos celulares. Además de identificar los actores y procesos clave que influyen, de manera directa, en el tránsito hacia un modelo de economía en la industria electrónica. Se recomienda que el gobierno, la industria y la academia realicen diagnósticos sobre de la situación de las demás industrias en el país, identificando los actores clave, procesos y condiciones que permiten o inhabilitan la transición hacia una EC. Además, de recomienda generar, periódicamente, información actualizada sobre el subsistema productivo y económico del flujo de los materiales provenientes de residuos.

2. Esta investigación encuentra que México tiene el potencial para transitar hacia un modelo de economía circular, solo que necesita diseñar las políticas públicas correspondientes. Para que el país se mueva más aceleradamente, se requiere de la cooperación entre el gobierno, empresas, sociedad civil y la academia. Se ha podido comprobar que, en el caso de la EC, se pueden generar grandes oportunidades de progreso y crecimiento económico. Para el caso de los electrónicos, un adecuado reciclaje de RAEE genera grandes beneficios. Considerando que a nivel mundial cada año se genera un promedio de 1.500 millones de teléfonos celulares, la recuperación de materiales podría valer hasta USD 11.5 mil millones de dólares.

3. En México existe poca literatura disponible sobre generación y gestión integral de residuos de aparatos electrónicos y electrónicos. A partir del 2016 se ha visto una mejora en la investigación gubernamental sobre este tema. Se espera que los nuevos estudios y análisis permitan generar mejores políticas públicas que incentiven la recolección formal de los RAEE, además de inversión para tecnologías de recuperación de materiales. El hecho de que el mercado informal de electrónicos en el país tenga una representación del 89.2% muestra la importancia de crear alianzas entre el gobierno, fabricantes, sociedad civil y

recicladoras para detener estas mafias que empobrecen a la sociedad, además de generar graves impactos de salud en sus trabajadores por las precarias condiciones laborales. Para atender la gravedad de estas cuestiones, el país necesita una gestión integral de RAEE; el papel del gobierno es fundamental para brindar los mecanismos y condiciones que la hagan posible.

4. En los últimos años el modelo de Economía Circular (EC) ha recibido una gran atención internacional. Sin embargo, su concepto se ha desarrollado desde hace más de cincuenta años por diferentes investigadores desde diversos enfoques y perspectivas. Por ejemplo, la teoría de Boulding que introdujo a la economía como un sistema circular (1966), Vernon y su teoría de ciclo de vida del producto (1967), Naciones Unidas en Río+20 que establecieron el concepto sobre desarrollo sostenible (1982), y una década después el surgimiento de la ecología industrial (1995) y los modelos de la cuna a la cuna de Braungart y McDonough (2002). Estos académicos, escuelas y organismos internacionales han permitido modelar los sistemas de economía circular.

5. Una definición generalmente aceptada de EC sigue siendo difícil de alcanzar, lo que motiva a la investigación académica a analizar una amplia gama de conceptos y métodos relacionados con el fin de contar con una definición que pueda relacionar los modelos circulares con los pilares de la sostenibilidad. Esta investigación se apoya en Kirchherr *et al.* quienes describen a la economía circular como un sistema que se basa en modelos industriales que reemplazan el concepto de *final de vida útil* con la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales en los procesos de producción / distribución y consumo, operando así a un nivel micro (productos, empresas, consumidores), nivel meso (parques ecoindustriales) y nivel macro (ciudad, región, nación y más), con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible. Una vez establecida la definición de EC, es también importante determinar los actores, condiciones y procesos para analizar los productos o servicios desde la *cuna a la tumba* y moverse hacia modelos de la *cuna a la cuna*

6. Junto con el surgimiento de indicadores de sostenibilidad y la creación de sistemas de ciclo cerrado, la economía circular permite transformar los procesos lineales en modelos circulares, que no generen desechos y todos los residuos sean aprovechados como materia prima para la misma industria u otras industrias.

7. En América Latina, particularmente en México, el concepto de economía circular es nuevo, su desarrollo e investigación ha iniciado tanto en la academia como en el gobierno e industria. El estudio de este modelo en el sector industrial debe partir de información actualizada de procesos y análisis de los actores que están involucrados en la fabricación, manejo y reciclaje de un producto. En el caso de los productos electrónicos en el país, el consumo, manejo y disposición final de sus residuos carecen de datos relevantes y actualizados.

8. En América Latina, solo el 20% de los residuos electrónicos se recolectan y reciclan en condiciones adecuadas, mientras que los RAEE restantes se tiran a la corriente de desechos residuales o se descargan, comercializan o tratan sin condiciones estandarizadas ni seguras. La Fundación Ellen McArthur declaró la importancia de repensar el diseño de los productos electrónicos para permitir la reutilización económica de sus componentes y materiales. Sin embargo, si los consumidores continúan enviando a basureros/rellenos sanitarios o almacenando sus equipos electrónicos obsoletos, el impacto de un mejor diseño y recuperación de los materiales es limitado. Si se adoptan nuevos modelos de negocio basados en ciclos circulares, se podrá lograr una mayor circularidad del producto y un mejor cálculo y aprovechamiento económico de sus residuos.

9. La generación de RAEE a nivel mundial tiene una tendencia de crecimiento exponencial, debido a la aparición de nuevas tecnologías y productos electrónicos asequibles. Es por este motivo, que se ha visto la necesidad de generar datos e información actualizada con el fin de planificar y desarrollar planes de manejo integral de los residuos y reutilización de sus materiales en la industria local. Los residuos electrónicos requieren de procesos integrales de reciclaje, para evitar por un lado problemas ambientales, sociales y sanitarios, y, por otro lado, pérdidas económicas para gobiernos, fabricantes y recicladoras, al no contar con la tecnología necesaria de recuperación de materiales y su conversión hacia materias primas de alto valor.

10. La industria del reciclaje de electrónicos puede ser considerada como un mercado clave que permita cerrar ciclos para recuperación de materiales. Los impactos económicos que los RAEE traen consigo, abren la posibilidad de crear nuevos productos, a partir de materia prima secundaria recuperada. Los procesos de reciclaje permiten generar minería urbana para que la extracción de materiales sea más eficiente y disminuya la extracción por fuentes

no renovables. Un kilogramo de mineral extraído de una mina contiene 1.01 mg de oro, 2.7 mg de paladio y 215.5 mg de plata; mientras que de un kilogramo de celulares se puede extraer 340 mg de oro, 130 mg de paladio y 3500 mg de plata.

11. La industria del reciclaje de RAEE en los países emergentes se basa en operaciones de desensamblado manual. Dichos procesos deben tener estándares de seguridad y salud para el trabajador, si no cuenta con equipos de protección personal, los empleados pueden exponerse a contaminantes volátiles y tóxicos para su salud. En estos países el reciclaje informal puede manejar entre un 80%-90% del mercado de los RAEE y contratar a menores de edad para procesos de reparación o desensamblado de estos productos. Los empleados, principalmente menores de edad, pueden estar expuestos a sustancias tóxicas como plomo, mercurio, arsénico, cadmio, selenio, cromo hexavalente y retardantes de flama, que crean emisiones de dioxinas cuando se queman. Dichas sustancias pueden causar retraso mental, daño renal y hepático, y liberaran al aire carcinógenos que causan daño a los pulmones.

12. Internacionalmente existen numerosos convenios y normativas para promover el reciclaje y recuperación de materiales a partir de RAEE, bajo estándares aprobados por Naciones Unidas y de derecho ambiental. Japón, China y la Unión Europea han sido líderes en el desarrollo y la implementación de regulaciones para la gestión de residuos electrónicos. Japón en el año 2001 lanzó la Ley de Reciclaje de Electrodomésticos y la Ley de Reciclaje de Pequeños Electrodomésticos. Además, utiliza el sistema 3Rs (reutilización, reciclaje y recuperación) para promover la devolución por parte de los fabricantes, y también utilizan el pago directo del costo de reciclaje por parte de los consumidores japoneses. Europa utiliza el principio de responsabilidad extendida del productor (REP) como regla principal de sus RAEE, que responsabiliza a los productores por la devolución de los electrónicos. En 2009 China determinó los objetivos de los residuos electrónicos, mediante la financiación de instalaciones de reciclaje electrónico seguras, a través de la ley de regulación de la Administración de Recuperación y Eliminación de Productos Eléctricos y Electrónicos.

13. El 50% de los RAEE recolectados en países desarrollados se envían para procesamiento o eliminación a países del Asia y África. India, Pakistán y Nigeria se han convertido en los principales destinos. Aunque estos países firmaron y ratificaron el Convenio de Basilea y tienen otras políticas reglamentarias, es posible la importación de desechos peligrosos y barcos que contengan residuos electrónicos, si están etiquetados para “otros usos”, o como

bienes usados (no prohibidos por Convenio de Basilea) o si declaran que los RAEE son para reexportación.

14. En América Latina, países como Brasil, Argentina, Chile y Bolivia están desarrollando legislaciones para la gestión de residuos electrónicos. Brasil es el primer país de la región que desarrolló en el año 2010 la Ley Nacional de Política de Residuos Sólidos para preservar el principio REP en forma de logística inversa. Chile ya cuenta con una legislación, pero a diferencia de los demás países, ellos consideran a los RAEE como desechos peligrosos. Paraguay, Uruguay y Venezuela no cuentan con una regulación específica sobre residuos electrónicos, pero su ley general de residuos ayuda a recolectar los RAEE y enviarlos a vertederos. Colombia y Perú cuentan con una ley específica de gestión de residuos electrónicos. Colombia, en el año 2013 resolvió la ley "Política nacional sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, basada en la REP. Ecuador contará a finales del 2019 con una regulación nacional para residuos electrónicos de manejo especial, basada en el principio responsabilidad extendida del productor junto con metas de recolección por parte del fabricante o distribuidor.

15. A nivel mundial existen alternativas para impulsar el reciclaje de electrónicos e incentivar al consumidor, de manera obligatoria o voluntaria, para entregar sus RAEE al reciclador. La responsabilidad extendida del productor, así como la responsabilidad del consumidor son las herramientas planteadas por países desarrollados para recuperar los residuos electrónicos. En la región, países como Colombia ya cuentan con la REP y, Chile, Perú, Argentina y Ecuador están planteándose estrategias REP para aumentar el volumen de recolección de sus RAEE.

16. A partir de una legislación específica sobre residuos electrónicos, una correcta gestión integral de RAEE y un óptimo reciclaje, se pueden plantear modelos de economía circular. Países emergentes de la región se han adherido a convenios internacionales y han tomado, de países desarrollados, las legislaciones de RAEE y de economía circular, particularmente de la Unión Europea. La realidad de los países en América Latina es cada vez más esperanzadora. Por ejemplo, los países como Brasil, Colombia y Chile son ejemplos modelo de implementación de leyes enfocadas en Economía Circular tomando como base la Directiva Europea. En el caso de Ecuador y Perú la tendencia hacia modelos circulares

empezó desde el enfoque de residuos, pero los nuevos programas de EC se están enfocando hacia la industria y productividad.

17. México cuenta con convenios internacionales y un marco jurídico que busca asegurar el manejo integral de residuos y su prevención. Existen diferentes instrumentos que permiten cumplir este objetivo, comenzando por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la LGEEPA, la LGPGIR y los reglamentos y normas oficiales mexicanas. A pesar de que el país no cuenta con una ley específica de residuos electrónicos, los convenios y leyes mencionadas facilitan la gestión de RAEE. El gobierno mexicano debe apostar por promulgar una ley específica de RAEE. Sin embargo, aunque no existe una ley de residuos electrónicos en el país, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) podría habilitar la creación de modelos de negocios circulares en el país. A través de la LGPGIR se pueden introducir cadenas de valor circulares en México, en los procesos de consumo, reparación y reciclaje, con el fin de implementar una gestión integral de residuos y revalorización circular de los materiales, no solo de productos electrónicos, sino de residuos sólidos en general.

18. La situación actual de México muestra que tiene el potencial para moverse hacia un modelo de economía circular en la industria de los productos electrónicos. Esto gracias a los procesos, actores y condiciones que facilitan, en cierto grado, avanzar hacia ese modelo. El consumidor, las tiendas de reparación y las recicladoras en el país tratan de extender al máximo el tiempo de vida de un producto electrónicos y sus componentes. No obstante, estos actores y procesos circulares se pueden afectar por condiciones externas tales como leyes inexistentes, falta de control y seguimiento por parte del gobierno, deficiencia en la gestión de residuos y ausencia de responsabilidad extendida del productor; lo que ocasiona rupturas en el modelo circular.

19. El comportamiento del consumidor es uno de los pilares de análisis primordiales para determinar si un modelo de economía circular es factible o no. El consumidor presenta circularidad al tratar de extender el tiempo de vida de su electrónico y, a su vez, ganar algún tipo de beneficio emocional o económico a través del reúso o venta en mercados de segunda mano. Sin embargo, la falta de interés por parte del fabricante, y la falta de conocimiento y conciencia ambiental por parte del usuario, son un gran impedimento para transitar hacia un modelo de EC. Adicionalmente, a nivel regional los gobiernos carecen o no encuentran las

estrategias adecuadas para transmitir un mensaje eficiente para una óptima gestión integral de los residuos, además de fomentar un mayor compromiso con el fabricante e incentivos económico-ambientales al consumidor.

20. El conocimiento ambiental del consumidor sobre reciclaje de electrónicos es muy limitado. Independientemente del nivel académico de las personas y sus ingresos económicos, no existen los canales adecuados que les informen y el gobierno no fomenta campañas eficientes de concientización, recolección y reciclaje de RAEE en el país. De hecho, esta responsabilidad les ha dado a los fabricantes y distribuidores que bien o mal han tratado de llegar a todos los nichos sociales para fomentar un reciclaje responsable con incentivos económicos y ambientales que, en algunos casos, no son atractivos para el usuario.

21. El comportamiento del consumidor en el país permite analizar los tiempos de vida media que un equipo electrónico tiene con el primer usuario, para de esta manera estimar el tiempo que puede demorar un tipo de EEE hasta ser considerado obsolescente y buscar los mecanismos de recuperación y recolección adecuados para que el cliente no almacene su equipo.

22. Los usuarios cambian sus dispositivos electrónicos con mayor frecuencia, en comparación con tendencias de hace cinco o diez años. No obstante, en países de América Latina, los niveles socio-económicos medios usan por más tiempo sus equipos en comparación a los países como EE.UU., Europa y Asia. Además, los países de la región, provenientes de nivel socio-económico medio y bajo, tienen la cultura de la reparación, el reúso y la venta de segunda mano; siempre y cuando el precio de reparación no sea muy elevado, y puedan alcanzar un beneficio económico y/o emocional.

23. El consumidor mexicano estaría dispuesto en dejar un pago o garantía económica para asegurar un adecuado reciclaje de su equipo electrónico (rango entre 44% - 54%). Esto demuestra una vez más que la cultura de consumo en el país presenta un modelo de economía circular enfocada a la recirculación de los productos, extender el tiempo de vida de los equipos y reciclar los residuos para aprovechar al máximo los materiales de manera local.

24. Con respecto a temas de reparación, el consumidor mexicano va a optar por buscar los mecanismos para extender el tiempo de vida de su equipo: repararlo, ya sea por sí mismo o llevándolo a un servicio técnico. Tanto en países de la región, como Asia y Europa, el costo para reparar un equipo es más económico en tiendas informales. En consecuencia, el usuario va a buscar mecanismos más baratos y eficientes para arreglar su electrónico, ya sea por sí mismo, a través de manuales/tutoriales, o con técnicos informales.

25. En el 2015 el mayor porcentaje de residuos electrónicos estuvo conformado por impresoras y computadoras (escritorio y portátiles). En el caso de los televisores, se encontró un bajo porcentaje (13%). En el año 2010, el porcentaje de estos equipos superaba el 45%. Esto se debe a que el programa “Apagón Analógico” no evaluó la falta de infraestructura y tecnología para tratar los TV análogos y las empresas recicladoras decidieron no recibir ningún tipo de televisor, ya sea digital o de tubos de rayos catódicos.

26. La industria del reciclaje formal en México es en realidad una industria de reparación, lo que les da, en cierto grado, circularidad. Las recicladoras tratan de extender el tiempo de vida de los electrónicos, para venderlos en mercados de segunda mano. Sin embargo, existen empresas privadas y de gobierno que obligan al reciclador a destruir sus electrónicos por completo lo que genera importantes pérdidas de materiales al país. Estas prácticas son consecuencia de una inexistente ley de residuos electrónicos y la falta de compromiso de las industrias en generar procesos sostenibles y circulares, al final de la vida útil de sus equipos.

27. Si las empresas de productos electrónicos quieren caminar hacia un modelo de economía circular, primero deben modificar las políticas de manejo de sus residuos y analizar internamente sus procesos de recuperación de materia prima. Además de empezar a diseñar sus productos pensando en que los materiales de un EEE deben servir para ser reingresados al sistema cuando el equipo electrónico llegue al final de su vida útil.

28. El reciclaje en el país también carece de tecnologías de procesamiento final y de recuperación de materiales. En consecuencia, a nivel local se genera una ruptura del modelo circular del reciclaje de electrónicos. Sin una ley específica de residuos electrónicos, la transición hacia un modelo de EC en México será lenta.

29. La generación de residuos de teléfonos celulares en el año 2015 fue de 2,947 toneladas. Sin embargo, la falta de leyes y control del reciclaje informal ha generado grandes pérdidas económicas en el país. Ya que casi el 90% de los RAEE generados van a canales informales (e ilegales en algunos casos), lo que ocasiona que posibles inversiones en tecnologías de procesamiento final se vean limitadas al no procesar volúmenes óptimos para recuperar metales preciosos de las PCB. Si el gobierno no brinda los mecanismos y condiciones adecuados para que una eficiente gestión integral de RAEE, el modelo circular se quiebra o se destruye. Ocasionando también que el mercado informal siga captando el 90% de los residuos electrónicos a nivel nacional.

30. Existen grandes diferencias entre las tiendas formales e informales de reparación celular. El ambiente de trabajo, materiales y equipos en una tienda formal, son mejores que una tienda informal. Las condiciones laborales y los equipos con los que trabajan los empleados en los locales informales no son los óptimos. Sin embargo, se pudo comprobar que independientemente de las condiciones del local, la falta de seguridades y protección al cliente, número de empleados, el tipo de atención del vendedor/técnico y equipamiento tecnológico, el consumidor va a optar por un servicio de reparación eficiente y de bajo costo.

31. Por lo menos el 70% de las tiendas formales trabajan de manera directa con técnicos de locales informales. Lo que confirma que el nivel y conocimiento de reparación de celulares en México no necesariamente requiere de un título académico. Muchas tiendas informales han pasado de generación en generación y el oficio de reparación de electrónicos ha pasado de padres a hijos y nietos. Lo cual confirma también la presencia de trabajo infantil con niños menores de 15 años en las tiendas informales. Tanto niñas como niños aprenden desde pequeños este oficio, sin embargo, el gobierno debe de tener un mayor control de estos establecimientos. La ley federal enfocada en el trabajo infantil prohíbe el trabajo a niñas y niños menores de 15 años, por este motivo, el DIF (Desarrollo Integral de la Familia) debe monitorear estas plazas de la tecnología por las tardes y fines de semana que es donde se encontró presencia de trabajo infantil.

32. Los procesos técnicos en las tiendas de reparación cumplen con un modelo de economía circular, indistintamente si son tiendas formales/informales. El escenario de la reparación en México está bien organizado, principalmente el mercado informal que va de la mano con el reciclaje informal. Los locales informales brindan al cliente diferentes soluciones para

extender el tiempo de vida de sus electrónicos o alternativas para recuperar las partes o componentes del EEE. Sin embargo, este grado de circularidad se verá afectado si la tienda tira a la basura los RAEE y/o vende a recicladores informales.

33. Por medio del análisis de flujo de materiales se pudo determinar la eficiencia de los procesos de desensamblado, así como conocer hacia dónde fluyen los materiales a través de los diferentes procesos. Además, se pudo determinar el grado de rapidez con el que un equipo puede desensamblarse y la facilidad con la que un técnico puede separar cada componente. Se comprobó la importancia de una adecuada capacitación, equipo y herramientas para desensamblar un equipo, en el caso de que una persona común desee reparar su electrónico.

34. La tarjeta de circuitos impresos es la pieza clave que México debería resguardar y extraer sus materiales por medio de tecnologías de procesamiento final. Las tarjetas madre son “pequeñas minas oro” ya que albergan, en su composición, metales preciosos de alto valor económico. En el año 2015, México perdió aproximadamente entre USD$11.3 - USD$12.4 millones de dólares por no tener este tipo de tecnologías. Los recicladores cuentan con inversionistas que quieren invertir e implementar tecnologías recuperación de materiales y modelos de minería urbana en México. No obstante, los bajos volúmenes de recolección de RAEE impide que la inversión sea recuperable a corto plazo, generando también rupturas en la generación de un posible modelo de EC en el país.

35. Conocer el destino final de cada material proveniente de los RAEE, permite determinar los impactos técnico y económicos que un país debe asumir al carecer de legislación y tecnología adecuada para generar modelos de EC. Los gobiernos deben trabajar con el fabricante y el reciclador, para desarrollar estrategias más eficientes de recolección de residuos y tecnologías de recuperación de materiales de manera local. Adicionalmente, se requiere de mecanismos o convenios que permitan exportan RAEE para recuperar materiales en otros países, y aunque se pierda esta materia prima, recuperar estos materiales en términos económicos.

36. A nivel internacional es factible incorporar cadenas de valor circulares, pero todo va a depender del tipo de residuo. Para el caso de los electrónicos, se pueden exportar y vender materiales que técnicamente no pueden ser recuperados en el país, debido a que México no cuenta con tecnología de procesamiento final. La exportación de estos residuos (Ej.: tarjetas madre para

extraer oro, plata, paladio), es factible gracias a la LGPGIR y los acuerdos y convenios suscritos por México, como por ejemplo formar parte de la OCDE o del TLCAN (ahora T-MEC). Estas exportaciones son permitidas, siempre y cuando los países que reciben los RAEE no los consideren como residuos peligrosos ni entren en conflicto con los convenios transfronterizos como Basilea.

37. El mercado informal del reciclaje se encuentra muy bien organizado con los actores que gestionan los RAEE en el país. Existe una planificada organización entre el "pepenador" o reciclador base, las tiendas de reparación, los transportistas de RAEE y las recicladoras informales. Todos ellos crean un sistema circular informal que trata de extender el tiempo de vida de un producto electrónico y lo envían a mercados de segunda mano en Centroamérica y Sudamérica. En caso que no se puedan reparar los electrónicos, los trabajadores informales se encargan de desensamblar los equipos y sacar todo lo que tenga valor comercial. Lo que no les sirve o no tienen valor comercial es tirado a los ríos, quebradas, enterrado o, en el mejor de los casos, enviados a rellenos sanitarios. Estos últimos procesos son los que rompen el posible modelo circular que se puede generar en el mercado informal.

Recomendaciones y Trabajos Futuros

1. Los modelos de economía circular requieren del desarrollo de varias herramientas para identificar, analizar y evaluar los flujos de materiales en un sistema. Para que el gobierno potencialice dichos modelos, se recomienda promover en la industria el uso de herramientas como análisis de ciclo de vida, análisis de criterios múltiples, análisis de flujo de materiales y la responsabilidad extendida del productor. Estas herramientas permiten generar información certera, precisa y, sobretodo, pública, de lo que sucede antes, durante y al final de la vida útil de un producto. El consumidor tiene el derecho de conocer toda esta información, la composición de los equipos, procesos de fabricación, así de las maneras, opciones para reparar cada uno de sus componentes y alternativas de reciclaje.

2. Es importante que las industrias empiecen a repensar el diseño de los productos electrónicos para permitir la reutilización económica de sus componentes y materiales al final de su vida útil y generar una minería urbana con materiales reciclados. Se recomienda también plantear y brindar incentivos técnicos y económicos a las industrias para que utilicen materia prima

secundaria. De esta manera, México no perderá materiales y no se explotarán fuentes de recursos no renovables.

3. Es necesario identificar los nichos de mercado local que puedan usar los materiales provenientes de los RAEE como materia prima secundaria. Para alcanzar este fin, se recomienda un trabajo conjunto entre el gobierno, las industrias electrónicas y las recicladoras para que informen a la industria local la composición de cada uno de los productos electrónicos al final de su vida útil. De esta manera, conseguir que la industria local se provea de materia prima proveniente de los RAEE, es decir convertir a la recicladora en un "hub" o centro de reciclaje y de materia prima en el país y, a su vez, generar una minería urbana en la región.

4. Existen estudios a nivel mundial y local sobre los impactos ambientales, sociales y económicos que involucra la explotación de una mina (cielo abierto y cielo cerrado). Sin embargo, es primordial compararlos con los posibles impactos que puede generar la minería urbana. Investigar los costos ambientales y de salud pública que involucra la minería urbana es una tarea apremiante para poder compararlos con la minería legal. Con el objetivo de asegurar que la minería urbana puede ser una alternativa socio-ambientalmente más idónea para la recuperación de materias primas.

5. La metodología de este estudio puede ser replicada en otras ciudades del país, y ampliar el conocimiento sobre el tema central de esta investigación. Los resultados obtenidos de los casos de estudio seleccionados – Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey y Querétaro - si bien son muy interesantes y reveladores, no se pueden tomar como el mosaico nacional en torno a este tema. Además de las posibles similitudes, las regiones frontera norte y frontera sur, por ejemplo, podrían presentar otras realidades.

6. Otras investigaciones podrían avanzar hacia un modelo de economía circular bajo los pilares de la sostenibilidad. Profundizar en aspectos ambientales y sociales, entre los cuales se tienen los siguientes: impactos nocivos de los residuos en la salud pública de los recicladores informales y la comunidad cercana al botadero de electrónicos; el paso de la informalidad a la formalidad; presencia e impactos del trabajo infantil en tiendas de reparación y recicladoras informales; educación y comunicación en temas ambientales en

general y de economía circular en particular; analizar diferentes mecanismos e incentivos, para elevar el nivel de responsabilidad ambiental del consumidor.

7. Es necesario impulsa una ley específica de residuos electrónicos. La que permita investigar, de manera periódica y nacional, monitorear y controlar la generación y manejo de los RAEE, tendiente a una gestión integral de dichos residuos. Además de avanzar hacia modelos circulares en la industria del reciclaje de electrónicos, ello podría servir de ejemplo para otras industrias.

8. La medición de los impactos ambientales y sociales de la informalidad en la industria electrónica no pudo ser abordado en esta tesis, sin embargo, es un tema apremiante que debe ser integrado a la nueva ley de residuos electrónicos y, en general, a una ley de economía circular en la industria. Además, de buscar los incentivos técnicos y económicos alineados a la política socio-ambiental para capitalizar el ecosistema informal hacia un modelo formal con condiciones laborales óptimas para la salud de los empleados, erradicación del trabajo infantil, mitigación de impactos ambientales que los residuos pueden generar en el suelo, agua y aire, y un desarrollo económico en beneficio de la sociedad y medio ambiente.

9. México como miembro de Naciones Unidas, se comprometió en desarrollar en el país los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible para el 2030. Para alcanzar las metas y mejorar los indicadores sociales, ambientales y económicos, el gobierno y los actores que forman parte de la gestión integral de RAEE, se deben enfocar en los objetivos 3 (buena salud y bienestar), objetivo 6 (agua potable y saneamiento), objetivo 11 (ciudades sostenibles), objetivo 12 (consumo responsable y producción), objetivo 8 (trabajo decente y crecimiento económico). El desarrollo de estos objetivos también va de la mano con el desarrollo de la economía circular. Esta investigación brindó la metodología necesaria para que México se potencialice hacia un modelo de EC y además contribuyó para que el país tenga más estrategias para alcanzar las metas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

10. Para terminar, vale la pena mencionar que los principales resultados de esta investigación se han publicado en la revista internacional *Sustainability*, la cual reconoce la valía del trabajo empírico. Esta contribución aparece en número de marzo del 2019, con el título “Circular Economy in the Electronic Products Sector: Material Flow Analysis and Economic

Impact of Cellphone E-Waste in Mexico. El siguiente link: da acceso abierto a la publicación https://doi.org/10.3390/su11051361.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abbey, J.D.; Kleber, R.; Souza, G.C.; Voigt, G. (2017) *The Role of Perceived Quality Risk in Pricing Remanufactured Products*. Journal Prod. Oper. Manag. Vol. 26, Pp. 100–115. https://doi.org/10.1111/poms.12628. [Fecha de acceso: 27 diciembre 2018].
2. Accenture (2018) Innovative Business Models and Technologies to Create Value in a World without Limits to Growth. https://www.accenture.com/t20150523T053139__w__/us-en/_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/DotCom/Documents/Global/PDF/Strategy_6/Accenture-Circular-Advantage-Innovative-Business-Models-Technologies-Value-Growth.pdf [Fecha de acceso: 7 febrero 2019].
3. Afroz, R., Mehedi Masud, M., Akhtar, R., Duasa, J. (2013) *Survey and analysis of public knowledge, awareness and willingness to pay in Kuala Lumpur, Malaysia – a case study on household WEEE management.* Journal Cleaner Production. Vol. 52, Pp. 185- 193. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.004. [Fecha de acceso 21 febrero 2019].
4. Alcántara-Concepción, V.; Gavilán-García, A.; Gavilán-García, I. (2016) *Environmental impacts at the end of life of computers and their management alternatives in México*. J. Clean. Prod. Vol. 131, Pp. 615-628 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.125. [Fecha de acceso: 17 julio 2018].
5. Alonso, E., Sherman, A.M., Wallington, T.J., Everson, M.P., Field, F.R., Roth R, Kirchain, R.E. (2012) *Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies.* Journal Environ. Sci. Technol., 46 (2012), pp. 3406–3414. https://doi.org/10.1021/es203518d. [Fecha de acceso: 24 abril 2018].
6. Amankwah-Amoah, J. (2016) *Integrated vs. add-on: A multidimensional conceptualisation of technology obsolescence*. Journal Technol. Forecast Soc. Chang. Vol. 116, Pp. 299 – 307. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.10.006. [Fecha de acceso 5 abril 2019].
7. Amit, K., Holuszko, M., Crocce, D., Espinosa, R. (2017*) e-Waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices.* Resources, Conservation and Recycling 122. 32–42. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.018. [Fecha de acceso: 21 noviembre 2017].
8. Andersen, M.S., 2007. *An introductory note on the environmental economics of the circular economy.* Journal Sustain. Sci. Vol. 2, Pp. 133-140. https://doi.org/10.1007/s11625-006-0013-6. [Fecha de acceso 8 marzo 2018].
9. Ardente, F.; Mathieux, F. (2016) *Integration of Resource Efficiency and Waste Management Criteria in European Product Policies—Second Phase*. Report Nº2—Analysis of Durability (final), JRC Technical Reports; European Commission: Brussels, Belgium.
10. Atlason, R., Giacalone, D., Parajuly, K. (2017) *Product design in the circular economy: Users' perception of end-of-life scenarios for electrical and electronic appliances*. Journal Clean. Prod.

Vol. 168, Pp. 1059–1069. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.082. [Fecha de acceso: 30 enero 2019].

11. Ayres, R.U. (1989) *Industrial metabolism: theory and policy. In: Ayres, R.U., Simonis, U.K. (Eds.), Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development.* United Nations University Press, Tokyo.

12. Badiru F., Begianpuye D., Giwa A., Argungu S., Amen C. (2013) *Material flow analysis of electronic wastes (e-Wastes) in Lagos, Nigeria. J. Env. Prot.* Vol. 4, Pp. 1011–1017. http://dx.doi.org/10.4236/jep.2013.49117. [Fecha de acceso: 14 septiembre 2018].

13. Baldé, CP., Kuehr, R., Blumenthal, K., Fondeur G., Kern, M., Micheli, P., Magpantay E., Huisman, J. (2015) *E-waste statistics - Guidelines on classification, reporting and indicators.* United Nations University, IAS - SCYCLE, Bonn (Germany), 51 pages. http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/partnership/E-waste_Guidelines_Partnership_2015.pdf [Fecha de acceso: 5 mayo 2018].

14. Baldé C.P., Wang, F., Kuehr, R. & Huisman, J. (2017) The global e-waste monitor 2017., United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany. http://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2017-small.pdf [fecha de acceso: 5 diciembre 2018].

15. Banco Mundial (2018) *Producto interno bruto de China y Mexico*, Washington, D.C. https://datos.bancomundial.org/?locations=CN-MX [Fecha de acceso: 11 junio 2018]

16. Barletta, I.; Larborn, J.; Mani, M.; Johannson, B. (2016) *Decision Making for Sustainable Electronic Waste Management Systems: Automatic Sorting Technology*. Journal Sustainability. Vol. 8, Pp. 84-97; https://doi.org/10.3390/su8010084. [Fecha de acceso: 29 diciembre 2018].

17. Basel convention (2014) *Protocol on Liability and Compensation for Damage Resulting from Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal* http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-e.pdf [access date: 5 mayo. 2017].

18. Belboom, S., Renzoni, R., Deleu, X., Digneffe, J.-M., Leonard, A. (2011) *Electrical waste management effects on environment using life cycle assessment methodology: the fridge case study. In: SETAC EUROPE 17th LCA Case Study Symposium Sustainable Lifestyles*, Budapest, Hungary, p. 2.

19. Birat, J.-P., 2015. *Life cycle assessment, resource efficiency and recycling.* Journal Metall. Res. Technol. Vol. 112, Pp. 1-24. https://doi.org/10.1051/metal/2015009 [Fecha de acceso: 4 mayo 2017].

20. Braungart, M. and W. McDonough (2002), Cradle to Cradle: Remaking the way we make things. North Point Press.

21. Brigden, K., Labunska, I., Santillo, D. & Allsopp, M. (2005) *Recycling of Electronic Wastes in China & India: Workplace & Environmental Contamination.* Greenpeace International, Exeter, UK, Retrieved from http://www.greenpeace.org/international/PageFiles/25134/recycling-of-electronic-waste.pdf [Fecha de acceso: 25 enero 2017].

22. Boulding, K., 1980. *The economy of the coming spaceship earth. In: Daly, H., Freeman,* W.H. Economics, Ecology, Ethics: Essay towards a Steady State Economy, San Francisco.

23. Bovea, M.D., Perez-Belis, V., Quemades-Beltran, P. (2017) *D Attitude of the stakeholders involved in the repair and second-hand sale of small household electrical and electronic equipment: case study in Spain.* Journal Environ. Manag. Vol. 196, 91-99. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.069. [Fecha de acceso 20 marzo 2019].

24. Bustamante M., Gaustad G. (2014) *The evolving copper – tellurium by product system: a review of changing production techniques & their implications.* Journal Environ. Sci. & Techno. Vol. 11 Pp.11– 16. https://doi.org./10.1002/9781118888551.ch3. [Fecha de acceso: 4 mayo 2016].

25. Castellani, V., Sala, S., Mirabella, N. (2015) *Beyond the throwaway society: a life cycle-based assessment of the environmental benefit of reuse*. Journal Integr. Environ. Assess. Manag. Vol. 11, Pp. 373-382. https://doi.org/10.1002/ieam.1614. [Fecha de acceso: 23 noviembre 2018].

26. CEC (2016) Quantitative Characterization of Domestic and Transboundary Flows of Used Electronic Products. Case Study: Used Computers and Monitors in North America. Commission for Environmental Cooperation, Montreal, Canada.

27. Chancerel, P., Meskers, C.E.M., Hagelüken, C., Rotter, V.S. (2009) *Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment*. Journal Indus. Ecol. Vol. 13, Pp. 791–810. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2. [Fecha de acceso: 4 agosto 2016].

28. Charonis, G. (2012) *Degrowth, steady state economics and the circular economy: three distinct yet increasingly converging alternative discourses to economic growth for achieving environmental sustainability and social equity*. In: World Economic Association Sustainability Conference 2012. http://sustainabilityconference2012.worldeconomicsassociation.org/wp-content/uploads/WEASustainabilityConference2012_Charonis_Alternative-Discoursesto-Economic-Growth.pdf [Fecha de acceso: 12 julio 2018].

29. Chiu, A.S.F., Geng, Y. (2004) *On the industrial ecology potential in Asian developing countries.* Journal Clean. Prod. Vol. 12, Pp. 1037-1045. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.013. [Fecha de acceso: 9 agosto 2017].

30. Comisión Económica para América Latina y el - ECLAC (2015) *Consolidación de la cadena reversa de aparatos electro-electrónicos en América Latina y el Caribe: una propuesta de*

proyecto regional. http://studylib.es/doc/7861678/pdf--acrobat- [Fecha de acceso 15 marzo 2017].

31. Cruz, S.; Ojeda, S.; Jáuregui, J.; Velázquez, K.; Santillán, N.; García, R.; Alcántara, V.; Alcántara, C. (2017) *E-Waste Supply Chain in Mexico: Challenges and Opportunities for Sustainable Management.* Journal Sustainability, Vol. 9, Pp. 503. https://doi.org/10.3390/su9040503. [Fecha de acceso: 17 noviembre 2018].

32. Cucchiella, F., D'Adamo, I., Lenny Koh, S.C., Rosa, P. (2015) *Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams*. Journal Renew. Sust. Ener*.* Vol. 51, Pp. 263–272. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.010. [Fecha de acceso: 26 mayo 2016].

33. Daly, H.E., 2007. Ecological Economics and Sustainable Development: Selected Essays Pf Herman Daly. Edward Elgar Publishing, Cheltenham.

34. Desjardins, J. (2014) *Global Gold Mine and Deposit Rankings 2013*, Retrieved May18, 2016, from http://www.visualcapitalist.com/global-gold-mine-and-deposit-rankings-2013/ [Fecha de acceso: 28 febrero 2017].

35. Diario Oficial de la Federación (2010). *Acuerdo que modifica el diverso que establece la clasificación y codificación de mercancías cuya importación y exportación está sujeta a regulación por parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5282813&fecha=19/12/2012. [Fecha de acceso: 28 junio 2017].

36. Dindarian, A., Gibson, A.A.P., Quariguasi-Frota-Neto, J. (2012) *Electronic product returns and potential reuse opportunities: a microwave case study in the United Kingdom*. Journal Clean. Prod. Vol. 32, Pp. 22-31. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.015. [Fecha de acceso 20 marzo 2019].

37. Directiva de la Unión Europea (2012) *Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)*. Official Journal of the European Union L197. Volume 55.

38. Dwivedy, M. y R.K.Mittal (2013) *Willingness of residents to participate in e-waste recycling in India.* Journal Environmental and Development. Vol. 3, Pp. 48–68 http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2013.03.001. [Fecha de acceso: 5 marzo 2017].

39. Ellen MacArthur Foundation - EMF (2015) Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf [Fecha de acceso: 21junio 2016].

40. Ellen MacArthur Foundation - EMF (2016) *Delivering the circular economy a toolkit for policymakers.*

https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_policymakertoolkit.pdf. [Fecha de acceso: 15 agosto 2017].

41. Ellen MacArthur Foundation - EMF (2017) *Circular consumer electronics: an initial exploration*. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Circular-Consumer-Electronics-2704.pdf. [Fecha de acceso: 19 marzo 2018].

42. Erkman, S. (1997) *Industrial ecology: an historical view*. Journal Clean. Prod. Vol. 5, Pp. 1-10. https://doi.org/10.1016/S0959-6526(97)00003-6. [Fecha de acceso: 6 agosto 2017].

43. Estrada, J. & Kahnat, R. (2013) *Gestión del desperdicio electrónico en el Norte de México: factores de decisión que impactan el re-uso, recolección y reciclado de computadores*. Una visión sistémica mediante el análisis estructurado. https://uaeh.edu.mx/scige/boletin/tepeji/n8/a1.html. [Fecha de acceso: 9 septiembre 2018].

44. Fortuna, L.M., Diyamandoglu, V. (2016) *Disposal and acquisition trends in secondhand products*. Journal Clean. Prod. Vol. 23, Pp.1-9. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.030. [Fecha de acceso 4 abril 2019].

45. Gaidajis, G., Angelakoglou, K., Aktsoglou, D (2010). *E-waste: environmental problems and current management.* Journal Eng. Sci. Technol. Rev. Vol. 3, Pp. 193–199. http://www.researchgate.net/publication/49607064 E-waste Environmental Problems and Current Management [access date: 5 Feb. 2017].

46. Garlapati, V.K. (2016) *E-waste in India and developed countries: management, recycling, business and biotechnological initiatives*. Journal Renew. Sustain. Energy Rev. Vol. 54, Pp. 874–881, http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.106. [Fecha de acceso: 26 junio 2017].

47. Gartner, T. (2014). *Gartner Says Smartphone Sales Surpassed One Billion Units in 2014.* http://www.gartner.com/newsroom/id/2996817 [Fecha de acceso: 16 febrero 2017].

48. Gaur, J.; Amini, M.; Banerjee, P.; Gupta, R. (2015) *Drivers of consumer purchase intentions for remanufactured products*. Journal Qual. Mark. Res. Int. Vol. 18, Pp.30–47. https://doi.org/10.1108/QMR-01-2014-0001. [Fecha de acceso: 14 febrero 2019].

49. Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S. (2015) *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems*. Journal Cleaner Production. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007. [Fecha de acceso: 20 febrero 2018].

50. Ghosh, B., Ghosh, M.K., Parhi, P., Mukherjee, P.S., Mishra, B.K. (2015) *Waste Printed Circuit Boards recycling: an extensive assessment of current status.* Journal Clean. Prod. Vol. 94, Pp. 5–19. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.024. [Fecha de acceso: 7 julio 2018].

51. Gits, C.W. (1992) *Design of maintenance*. International Journal of Production Economics, Vol. 24, Pp. 217–226.

52. Golev, A., Schmeda-Lopez, D.R., Smart, S.K., Corder, G.D. & McFarland, E.W. (2016). *Where next on e-waste in Australia?* Journal Waste Manag. 58, 348–358, http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.025 [Fecha de acceso: 25 febrero 2017].

53. Gough, M. (2016) *Australian Laws Lag on Electronic Waste Management*, from http://newsroom.unsw.edu.au/news/science-tech/australian-laws-lag-electronic-waste-management [Fecha de acceso: 2 Feb. 2019].

54. Graedel, T.E., Allenby, B.R. (1995) *Industrial Ecology*. AT&T, Prentice Hall, New Jersey, pp. 8e10, 93e6.

55. Grossman, E. (2016) *GPS Tracking Devices Catch Major U.S. Recyclers ExportingToxic E-Waste.* https://theintercept.com/2016/05/10/gps-tracking-devices-catch-major-u-s-recyclers-in-improper-e-waste-exports/. [Fecha de acceso: 17 agosto 2018].

56. Guilherme, M., Cherubini, E., Soares, S. (2018) *How Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) is aiding Life Cycle Assessment (LCA) in results interpretation*. Journal Clean Prod. Vol. 172, Pp. 609-622 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.230. [Fecha de acceso: 24 febrero 2018].

57. Guiltinan, J. (2009) *Creative destruction and destructive creations: environmental ethics and planned obsolescence*. Journal Bus. Ethics Vol. 89, Pp.19-28. http://dx.doi.org/10.1007/s10551-008-9907-9. [Fecha de acceso: 8 junio 2018].

58. Heacock, M., Kelly, C.B., Asante, K.A., Birnbaum, L.S., Bergman, A.L., Bruné, M. *et al*. (2015) *E-waste and harm to vulnerable populations: a growing global problem*. Revista Environment Health Perspective. Vol. 124, Pp. 5 – 13. http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1509699. [Fecha de acceso: 24 septiembre 2018].

59. Hennies, L., Stamminger, R. (2016) *An empirical survey on the obsolescence of appliances in German households*. Journal Resour. Conserv. Recycl. Vol. 112, Pp. 73-82. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.04.013. [Fecha de acceso 14 marzo 2019].

60. Herat, S. & Agamuthu, P. (2012) *E waste: a problem or an opportunity? Review of issues, challenges and solutions in Asian countries.* Journal Waste Management & Research. Vol. 30, Pp.1113–1129. https://doi.org/10.1177/0734242X12453378. [Fecha de acceso: 27 junio 2017].

61. Hobson, K. (2016) *Closing the loop or squaring the circle? Locating generative spaces for the circular economy*. Journal Prog. Hum. Geogr. Vol. 40, Pp. 88–104. http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309132514566342 [Fecha de acceso 16 febrero 2019].

62. Holgersson S., Britt-Marie S., Björkman M., Cullbrand K. (2017) *Analysis of the metal content of small-size Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE) printed circuit boards—part 1: Internet routers, mobile phones and smartphones*. Journal Res. Cons. Recyc. Vol. 133, Pp. 300–308. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.011. [Fecha de acceso: 9 febrero 2019].

63. Homrich, A.; Galvao, G.; Abadia, L.; Carvalho, M. (2018) *The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways.* Journal of Cleaner Production. Vol. 175, Pp. 525-543. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.064. [Fecha de acceso: 27 febrero 2019].

64. Huang, Y.F., Su, Y., Zhou, J.Z. (2017) *A research on customer satisfaction and usage time of smartphones.* Journal Glob. Bus. Oper. Manag. Vol. 9, Pp.37–44. https://doi.org/10.1108/13598541111171165. [Fecha de acceso: 2 marzo 2017].

65. iFixit, 2018. http://www.ifixit.com [Fecha de acceso: 12 mayo 2018].

66. Iniciativa Step (2014) *One Global Definition of E-Waste. United Nations University, Bonn, Germany.* http://www.step-initiative.org/files/step/documents/StEP WP OneGlobalDefinitionofE-waste 20140603 amended.pdf [Fecha de acceso: 15 Mar. 2017].

67. Instituto Nacional de Ecología - INE. (2007) *Diagnóstico sobre la generación de residuos electrónicos en México*. México. http://www2.inecc.gob.mx/descargas/sqre/res_electronicos_borrador_final.pdf [Fecha de acceso: 3 mayo 2018]

68. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático- INECC. (2012) *Los residuos electrónicos en México y el mundo. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional.* México. https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf [Fecha de acceso: 21 mayo 2018].

69. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2011) *Economía, Sectores económicos, Manufactura.* http://www.inegi.org.mx/Sistemas/temasV2/Default.aspx?s=est&c=23824. [Fecha de acceso: 7 febrero 2018].

70. Investing News Network (2016) *World-Class Copper Deposits*. http://investingnews.com/daily/resource-investing/base-metals-investing/copper-investing/what-makes-a-world-class-copper-deposit/ [Fecha de acceso: 11 marzo 2017].

71. Iran, S.; Schrader, U. (2017) *Collaborative fashion consumption and its environmental effects*. Journal Fash. Mark. Manag. Vol. 21, Pp. 468–482. https://doi.org/10.1108/JFMM-09-2016-0086. [Fecha de acceso 5 enero 2019].

72. Islam, M.T., Abdullah, A.B., Shahir, S.A., Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Shumon, R., Rashid, M.H., (2016) *A public survey on knowledge, awareness, attitude and willingness to pay for WEEE management: case study in Bangladesh*. Journal Clean. Prod. Vol. 137, Pp. 728-740. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.111. [Fecha de acceso 21 febrero 2019].

73. Jena, S. & Sarmah, S. (2015) *Measurement of consumers' return intention index towards returning the used products.* Journal Clean. Prod. Vol. 108, Pp. 818–829. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.115. [Fecha de acceso: 25 enero 2019].

74. Jiménez, J. (2017). *Con bacterias, mexicanos obtienen oro de basura electrónica.* Revista TecReview. https://tecreview.tec.mx/con-bacterias-mexicanos-obtienen-oro-de-basura-electronica/ [Fecha de acceso: 11 abril 2019].

75. Jiménez-Parra, B.; Rubio, S.; Vicente-Molina, M. (2014) *Key drivers in the behavior of potential consumers of remanufactured products: A study on laptops in Spain.* Journal Clean. Prod, Vol. 85, Pp.488–496. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.047. [Fecha de acceso: 20 marzo 2019].

76. Jirang Cui & Roven J. (2011) *Waste – a handbook for management*. Elsevier: Academic Press. Pp. 281–96.

77. Jui-Che T., Xiu-Yue Z., and Sin-Yi H. (2018) *Key Factors of Sustainability for Smartphones Based on Taiwanese Consumers' Perceived Values.* Journal *Sustainability*. Vol. *10*, Pp. 144-158; https://doi.org/10.3390/su10124446. [Fecha de acceso: 10 enero 2018].

78. Khaliq, A., Rhamdhani, M., Brooks, G., Masood, S. (2014) Metal extraction processes for electronic waste and existing industrial routes: a review and Australian perspective. Resources 3 (1), 152–179, http://dx.doi.org/10.3390/resources3010152. [Fecha de acceso: 25 mayo 2018].

79. Khan, M. (2015) *Polluter-Pays-Principle: The Cardinal Instrument for Addressing Climate Change.* Journal Laws, Vol. 4, Pp. 638–653; https://doi:10.3390/laws4030638. [Fecha de acceso: 21 abril 2019].

80. Kiddee, P., Naidu, R., Wong, M. (2013) Electronic waste management approaches: An overview. Journal Waste Mang. Vol. 33, Pp. 1237-1250. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.006. [Fecha de acceso: 10 febrero 2018].

81. Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. (2017) *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions.* Journal Resources, Conservation & Recycling. Vol. 127, Pp. 221–232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005. [Fecha de acceso: 25 febrero 2019].

82. Kitco (2018) *Estrategic metals*. https://www.kitco.com/strategic-metals/ [Fecha de acceso: 25 agosto 2018].

83. Knot, M. & Luiten, H. (2015) *User involvement in the development of sustainable product-service systems*. In User Behavior and Technology Development; Springer: Dordrecht, The Netherlands. Pp. 263–276. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5196-8_26. [Fecha de acceso: 4 noviembre 2019].

84. Korhonen, J.; Honkasalo, A.; Seppälä (2018) *The Concept and its Limitations. Ecological Economics*. Journal Circular Economy. Vol. *143*, Pp. 37–46. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041. [Fecha de acceso: 21 febrero 2019].

85. Kumar, A., Holuszko, M., Espinosa, D. (2017) *E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices.* Journal Res. Cons. Recyc. Vol 122, Pp. 32–42. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.018. [Fecha de acceso: 23 enero 2016].

86. Laszlo, E. (1972) *The Relevance of General Systems Theory: Papers Presented to Ludwig von Bertalanffy on his Seventieth Birthday*. Pp. 185.

87. Lee, K. (2008) *Making environmental communications meaningful to female adolescents—A study in Hong Kong*. Journal Sci. Commun. Vol. 30, Pp. 147–176. https://doi.org/10.1177/1075547008324364. [Fecha de acceso: 6 abril 2019].

88. Lehtoranta, S., Nissinen, A., Mattila, T., Melanen, M. (2011) *Industrial symbiosis and the policy instruments of sustainable consumption and production.* Journal Clean. Prod. Vol. 19, Pp. 1865-1875. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.002. Fecha de acceso: 6 abril 2017].

89. Li, J., Zeng, X., Chen, M., Ogunseitan, O.A., Stevels, A. (2015) *Control-Alt-Delete: rebooting solutions for the e-waste problem.* Journal Environment, Science & Technology, Vol.12, Pp.7095–7108, http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b00449. [Fecha de acceso: 2 agosto 2018].

90. Luidold S., H. Antrekowitsch (2012) Recovery of Rare Earth Metals from Waste Material by Leaching in Non-Oxidizing Acid and by Precipitating using Sulphates. Journal Cleaner Production. Vol. 51, Pp. 1-22. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037 [Fecha de acceso: 18 enero 2019].

91. Magalini F., Kuehr R., Baldé C. P. (2015) *e-Waste in Latin America: Statistical analysis and policy recommendations.* https://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2015/11/gsma-unu-ewaste2015-eng.pdf [Fecha de acceso: 11 febrero 2017].

92. Manomaivibool, P., Vassanadumrongdee, S. (2011) *Extended producer responsibility in Thailand.* Journal of Industrial Ecology. Vol. 15, Pp. 185–205. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00330.x. [Fecha de acceso: 16 abril 2019].

93. McDonough, W., Braungart, M., Anastas, P., & Zimmerman, J. (2003*) Applying the Principles of Green Engineering to Cradle-to-Cradle Design*. Journal Environ. Sci and Tech, Pp. 434–441.

94. McLeod, C. (2014) Top Primary Silver Miners Facing Declining Ore Grades http://investingnews.com/daily/resource-investing/precious-metals-investing/silver-investing/top-primary-silver-miners-facing-declining-ore-grades/ [Fecha de acceso: 5 enero 2017].

95. Miller, T.R., Duan, H., Gregory, J., Kahhat, R. & Kirchain, R. (2016) *Quantifying domestic used electronics flows using a combination of material flow methodologies: a US case study*. Journal Environment, Science & Technology, Vol. 50, Pp. 5711–5719 http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.6b00079 [Fecha de acceso: 5 febrero 2017].

96. Ministerio de Ambiente de Ecuador – MAE (2017) Propuesta normativa para la gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/01/Acuerdo-Ministerial-190-Pol%C3%ADtica-Nacional-de-Post-Consumo-de-Equipos-Eléctricos-y-Electrónicos1.pdf [Fecha de acceso: 27 marzo 2017].

97. Mmereki, D.; Li, B.; Li'ao, W. (2015) *Waste electrical and electronic equipment management in Botswana: Prospects and challenges.* Journal Air Waste Manag. Assoc. Vol. 65, 11–26. https://doi.org/10.1080/10962247.2014.892544. [Fecha de acceso 5 abril 2019].

98. Montgomery, R.D., Mitchell, M. (2014) *Examining the demographic profiles of thrift store donors and thrift store shoppers*. Journal Atl. Mark. J. Atl. Mark. Vol. 3, Pp. 2165 - 3879. https://doi.org/10.101613/2014.10.0069. [Fecha de acceso 7 abril 2019].

99. Mugge, R., Jockin, B., Bocken, N. (2017*) How to sell refurbished smartphones? An investigation of different customer groups and appropriate incentives*. Journal of Cleaner Production, Volume 147, Pp. 284 – 296. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.111. [Fecha de acceso: 11 enero 2019].

100. Naciones Unidas - UNEP (2014) *Basel convention on the control of transboundary movements of hazardous wastes and their disposal.* United Nations Environment Program. http://www.basel.int/ [Fecha de acceso: 28 mayo 2017].

101. Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible - UNSD (2013) Agenda 21 https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf [Fecha de acceso: 15 junio 2017].

102. Namias, J. (2013) *The Future of Electronic Waste Recycling in the United States: Obstacles and Domestic Solutions (Ph.D. thesis*). Columbia University, New York, United States. http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/newwtert/Research/sofos/Namias_Thesis_07-08-13.pdf [Fecha de acceso: 27 julio 2018].

103. Navazo, V., J.M., Villalba Méndez, G. & Talens Peiró, L. (2014) *Material flow analysis and energy requirements of mobile phone material recovery processes*. Journal Life Cycle Assess. Vol. 19, Pp. 567-579. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0653-6. [Fecha de acceso: 5 mayo 2018].

104. Nduneseokwu, C.K.; Qu, Y.; Appolloni, A. (2017) *Factors Influencing Consumers' Intentions to Participate in a Formal E-Waste Collection System: A Case Study of Onitsha, Nigeria*. Journal Sustainability Vol. 9, Pp. 881-903; https://doi.org/10.3390/su9060881. [Fecha de acceso: 11 febrero 2019].

105. Oguchi M, Murakami S, Sakanakura H, Kida A, Kameya T. (2011) *A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources.*

Journal Waste Manag. Vol. 56, Pp. 2150–-2160. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.009. [Fecha de acceso: 21 febrero 2018].

106. Ogunniyi, I.O., Vermaak, M.K.G., Groot, D.R. (2009) *Chemical composition and liberation characterization of printed circuit board comminution fines for beneficiation investigations*. *Journal Waste Manag*. Vol. 29, Pp. 2140–2146. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.004. [Fecha de acceso: 4 diciembre 2018].

107. Organización de la Naciones Unidas para Alimentación y la Agricultura - FAO (2017). *Law No. 12.305 on the National Policy on Solid Waste Management*. http://www.fao.org/faolex/results/details/en/?details=LEX-FAOC097590 [fecha de acceso: 5 junio 2017].

108. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - OCDE (2010) *Material case study 1: critical metals and mobile devices—working document. In: Sustainable metals management.* OECD, Mechelen. http://www.oecd.org/env/resourceproductivityandwaste/46132634.pdf [Fecha de acceso: 30 enero 2019].

109. Organization for Economic Cooperation and Development - OECD (2014) *Global Forum on Environment: Promoting Sustainable Materials Management through Extended Producer Responsibility (EPR)* https://www.oecd.org/environment/waste/Global%20Forum%20Tokyo%20Issues%20Paper%2030-5-2014.pdf [Fecha de acceso: 10 marzo 2017].

110. Parajuly, K., Wenzel, H. (2017) Product Family Approach in E-Waste Management- A Conceptual Framework for Circular Economy. Journal Sustainability. Vol. 9, Pp. 768; https://doi.org/10.3390/su9050768. [Fecha de acceso: 6 febrero 2019].

111. Pauli, G. (2013) *The Blue Economy, 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs. Paradigm Publications*. http://www.theblueeconomy.org/blue/Home.html. [Fecha de acceso: 13 diciembre 2013].

112. Pérez, A. (2013) *Un modelo explicativo procesual de la pobreza desde la psicología social comunitaria y el enfoque de los DDHH*. Universidad Complutense de Madrid. Tesis Doctoral. https://eprints.ucm.es/19915/1/T34309.pdf [Fecha de acceso: 16 mayo 2019].

113. Perez-Belis, V., Braulio-Gonzalo, M., Bove, M. (2017) *Consumer attitude towards the repair and the second-hand purchase of small household electrical and electronic equipment. A Spanish case study.* Journal Clean. Prod. Vol. 158, Vol. 261–275. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.143. [Fecha de acceso: 3 noviembre 2017].

114. Perkins, D.N., Brune Drisse, M.N., Nxele, T., Sly, P.D. (2014) *E-Waste: A Global Hazard. Annals of Global Health*. Vol. 80, Pp. 286-295. https://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.10.001. [Fecha de acceso: 24 mayo 2017].

115. Pongrácz, E., Ylan-Mella J., Tanskanen P. & Keiski RL. (2008) *In: Proceedings of the 23rd international conference on solid waste technology and management*. Journal of solid waste technology and management, Department of Civil Engineering, Widener University. Pp. 359–65.

116. Reck, T. & E. Graedel (2012) *Challenges in metal recycling*. Journal Science. Vol. 337, Pp. 690–695. DOI: 10.1126/science.1217501. [Fecha de acceso: 21 diciembre 2018].

117. Repo, P., Anttonen, M. (2017) *Emerging consumer perspectives on circular economy.* The 13th Nordic Environmental Social Science Conference Hopefulness. https://www.researchgate.net/publication/317596538_Emerging_consumer_perspectives_on_circular_economy. [Fecha de acceso 12 noviembre 2018].

118. Robinson, B.H. (2009) *E-waste: an assessment of global production and environmental impacts.* Journal Sci. Total Environ. Vol. 408, Pp.183–191, http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044 [Fecha de acceso: 5 febrero 2017].

119. Romero, D., Molina, A. (2013) *Reverse - Green Virtual Enterprises and their Breeding Environments: Closed-Loop Networks* https://pdfs.semanticscholar.org/6a76/634b4acc94429c3bb223350fb71310370938.pdf [Fecha de acceso: 23 mayo 2016].

120. Sabbaghi, M., Esmaeilian, B., Cade, W., Wiens, K., Behdad, S. (2016) *Business outcomes of product repairability: a survey-based study of consumer repair experiences.* Journal Resour. Conserv. Recycl. Vol. 109, Pp.114-122. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.014. [Fecha de acceso: 18 noviembre 2017].

121. Scruggs, C.E., Nimpuno, N. & Moore, R.B.B. (2016) *Improving information flow on chemicals in electronic products and E-waste to minimize negative consequences for health and the environment.* Journal Resour. Conserv. Recycl. Vol. 113, Pp. 149–164, http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.009. [Fecha de acceso: 21 febrero 2017].

122. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales – SEMARNAT (2013) Norma Oficial Mexicana, NOM161-SEMARNAT-2011. http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6633/1/nom-161-semarnat-2011.pdf [Fecha de acceso: 14 marzo 2017].

123. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales – SEMARNAT (2016) Inventario de generación de residuos electrónicos en México. Escala nacional y estatal para Jalisco, Baja California, y Ciudad de México. Mexico. http://www.residuoscop.org/wp-

content/uploads/2016/04/Resumen_-Ejecutivo_Inventario_RAEE_FINAL.pdf [Fecha de acceso: 4 mayo 2018].

124. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales – SEMARNAT (2017) *Caracterización de la industria formal e informal del reciclaje de residuos electrónicos en México*. México. http://www.residuoscop.org/wp-content/uploads/2017/04/Caracterización_de_la-Industria_Formal_e_Informal_del_Reciclaje_de_RAEE_en_México_FINAL_feb.pdf [Fecha acceso: 4 mayo 2018].

125. Secretaría del Trabajo y Previsión Social – STPS (2015) *Ley Federal del Trabajo, en materia de trabajo de menores.* http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lft/LFT_ref27_12jun15.pdf [Fecha de acceso 13 de mayo 2019].

126. Singh, N., Li, J. & Zeng, X. (2016) *Global responses for recycling waste CRTs in e-waste*. Journal Waste Manag. Vol. 57, Pp. 187–197, http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.013. [Fecha de acceso: 1 noviembre 2017].

127. Sistema Integrado de Minería - México. (2018) *Precio internacional de metales*. International price of metals. https://www.sgm.gob.mx/SINEMGobMx/precio_metales.jsp [Fecha de acceso: 1 septiembre 2018].

128. Song, Q., Wang, Z., Li, J. (2012) *Residents' behaviors, attitudes, and willingness to pay for recycling e-waste in Macau.* Journal Environ. Manag. Vol. 106, Pp.8-16. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.036. [Fecha de acceso: 24 mayo 2017].

129. Stahel, W.R. (2013) *Policy for material efficiency e sustainable taxation as a departure from a throwaway society.* Phyl. Trans. R. Soc. A 371, 20110567. http//dx.doi.org/10.1098/rsta.2011.0567. [Fecha de acceso: 24 septiembre 2016].

130. State Council (2009) *Regulations for the administration of the recovery and disposal of electric and electronic products.* Order of the State Council of the People's Republic of China, No. 551. Translated from Chinese by Squires, Sanders and Dempsey. http://www.loc.gov/law/foreign-news/article/china-regulations-on-electronic-waste/ [Fecha de acceso: 24 febrero 2016].

131. Sthiannopkao S., M.H. Wong (2013) *Handling e-waste in developed/developing countries.* Science of the Total Environment Pp. 463–464.

132. Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., Yu, X., 2013. A review of the circular economy in China: moving from rethoric to implementation. J. Clean. Prod. Vol. 42, Pp.215-277. https://doi.org/10.1016/S0959-23464500003. [Fecha de acceso: 11 marzo 2018].

133. Tanaka, T., Oki, K. Koyama, H. Narita & T. Oishi. (2013) Recycling of rare earths from scrap. J.C.G. Bunzli, V.K. Pecharsky (Eds.), Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, vol. 43, Elsevier, Amsterdam. Pp. 159–212 Chapter 255.

134. Techwalls, 2017. https://www.techwalls.com/production-costs-of-smartphones/. [Fecha de acceso: 13 enero 2019].

135. Trading Economics (2018) *Commodities prices–Spot–Futures. Historical data 2015*. https://tradingeconomics.com/commodity [Fecha de acceso: 28 agosto. 2018].

136. Tran, H.P., Wang, F., Dewulf, J., Huynh, T.-H., Schaubroeck, T. (2016) *Estimation of the unregistered inflow of electrical and electronic equipment to a domestic market: a case study on televisions in Vietnam.* Journal Environment, Science & Technology. Vol 50, Pp. 2424–2433, http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b01388. [Fecha de acceso: 5 septiembre 2018].

137. Tukker, A., 2015. Product services for a resource-efficient and circular economy e a review. J. Clean. Prod. 97, 76e91. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.049

138. Turner, A., Williams, I., Kemp, S. (2016) *Combined material flow analysis and life cycle assessment as a support tool for solid waste management decision making*. Journal Clean Prod http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.077. [Fecha de acceso: 18 junio 2017].

139. Urbinati, A.; Chiaroni, D.; Chiesa, V. (2017) *Towards a new taxonomy of circular economy business models.* Journal of Cleaner Production. Vol. *168*, Pp. 487–498. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.047. [Fecha de acceso: 22 octubre 2017].

140. UTS, 2015. What Will a Circular Economy Look like in Australia. Available: http://www.uts.edu.au/research-and-teaching/our-research/institute-sustainablefutures/news/what-will-circular-economy [Fecha de acceso: 3 enero 2017].

141. Van Eygen, E., De Meester, S., Tran, H.P., Dewulf, J., 2016*. Resource savings by urban mining: the case of desktop and laptop computers in Belgium.* Journal Resources, Conservation and Recycling. Vol. 107, Pp. 53–64, http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.032. [Fecha de acceso: 9 septiembre 2017].

142. Van Weelden, E.; Mugge, R.; Bakker, C. (2016) *Paving the way towards circular consumption: Exploring consumer acceptance of refurbished mobile phones in the Dutch market.* Journal Clean. Prod. Vol. 113, Pp. 743–754. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.065. [Fecha de acceso: 2 abril 2019].

143. Veit, H.M., Juchneski, N.C. & Scherer, J. (2014) *Use of gravity separation in metals concentration from printed circuit board scraps.* Revista Escola de Minas Vol. 67, Pp. 73–79, http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672014000100011. [Fecha de acceso: 1 marzo 2017].

144. Velis, C. & Mavropoulos, A. (2016) *Unsound waste management and public health: the neglected link?* Journal Waste Manag. And Res. Vol. 34, Pp. 277–279, http://dx.doi.org/10.1177/0734242X16638632 [Fecha de acceso: 25 abril 2017].

145. Vincic, J. 2015. *North American Palladium Announces Year End 2014* http://www.napalladium.com/investors/news-releases/news-release-details/2015/North-

American-Palladium-Announces-Year-End-2014-Results/default.aspx [Fecha de acceso: 8 marzo 2017].

146. Yamane, L.H., De Moraes, V.T., Espinosa, D.C.R., Tenório, J.A.S. (2011) *Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile.* Journal Waste Manag. Vol. 31, Pp. 2553–2558. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.006. [Fecha de acceso: 11 agosto 2018].

147. Yoshida, A., Terazono, A., Ballesteros, F.C., Nguyen, D.-Q., Sukandar, S., Kojima, M., Sakata, S. (2016) *E-waste recycling processes in Indonesia, the Philippines, and Vietnam: a case study of cathode ray tube TVs and monitors*. Journal Resources, Conservation and Recycling. Vol. 106, Pp. 48–58, http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.020. [Fecha de acceso: 8 abril 2017].

148. Yu J., Williams E., Meiting J. (2017) *Analysis of material and energy consumption of mobile phones in China.* Journal Ener. Pol. Vol. 38, Pp. 4135–4141. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.041. [Fecha de acceso: 27 febrero 2017].

149. Wang, Y.; Hazen, B.T. *Consumer product knowledge and intention to purchase remanufactured products.* Journal Prod. Econ. Vol. 181, Pp. 460–469. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.08.031. [Fecha de acceso: 12 enero 2019].

150. Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M. & Böni, H. (2005) *Global perspectives on e-waste*. Journal Environ. Impact Assess. Vol. 25, Pp. 436–458 http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2005.04.001. [Fecha de acceso: 5 febrero 2017].

151. Zelezny, L; Chua, P.P.; Aldrich, C. (2012) *Elaborating on gender differences in environmentalism.* Journal Soc. Issues. Vol. 56, Pp. 443–457. https://web.stanford.edu/~kcarmel/CC_BehavChange_Course/readings/Additional%20Resources/J%20Soc%20Issues%202000/zelezny_2000_6_gender_b.pdf. [Fecha de acceso: 30 marzo 2019].

152. Zeng, X., Song, Q., Li J., Yuan, W., Duan, H., Liu, L. (2014) *Solving e-waste problem using an integrated mobile recycling plant*. Journal Clean. Prod. Vol. 90, Pp. 55–59. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.026. [Fecha de acceso: 30 abril 2017].

153. Zeng, X., Gong, R., Chen, W. & Li, J. (2016*) Uncovering the recycling potential of New WEEE in China.* Journal Environ. Sci. and Technol. Vol. 50, Pp. 1347–1358, http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.5b05446. [Fecha de acceso: 2 diciembre 2018].

154. Zeng, X., Yang, C., Chiang, J.F. & Li, J. (2017*) Innovating e-waste management: from macroscopic to microscopic scales.* Journal Sci. Total Environ. Vol. 575, Pp. 1–5, http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.078. [Fecha de acceso: 6 agosto 2018].

155. Zhu, D., Wu, Y. (2007) *Plan C: China's development under the scarcity of natural capital.* Journal Popul. Resour. Environ. Vol. 5, Pp.3-8. https://doi.org/10.1026/j.jclepro.2007.05.013. [Fecha de acceso: 21 noviembre 2015].

ANEXOS

Anexo A: Formulario Encuesta al Consumidor de Electrónicos

DATOS DE IDENTIFICACION

DOMICILIO DE LA VIVIENDA _____
(Calle, avenida, callejón, carretera, camino o descripción de la vivienda)

ESTADO (ESTRATO): _____|__|__|__| MUNICIPIO/LOCALIDAD/CD: _____|__|__|__| AGEB: |__|__|__|__|__|

CÓDIGO POSTAL: : |__|__|__|__|__|__| REGIÓN: _____|__|__|__|

ENTREVISTADOR_____|___|___| FECHA DE ENTREVISTA |___|___|-|___|___|-|2|0|1|7|
Nombre *Número* *Día* *Mes* *Año*

HORA DE INICIO |___|___| : |___|___| HORA DE TERMINO |___|___| : |___|___|
Horas Minutos Horas Minutos

SUPERVISADO POR:
_____|___|___|

FECHA |____|____| -|____|____| - |2|0|1|7|
Día Mes Año

CRITICADO / CODIFICADO POR:
_____|___|___|

FECHA |____|____| -|____|____| - |2|0|1|7|
Día Mes Año

FILTRO 1: ¿Cuál es su edad? |__|__| MENOS DE 17 →**FINALICE Y MARQUE EL INTENTO**	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

1. ¿Usted cuenta con los siguientes equipos electrónicos actualmente? **LEER CADA UNO Y REGISTRE RESPUESTA**					**2.** ¿Cómo obtuvo su equipo electrónico actual? **PREGUNTE POR LOS QUE SI TIENE, Y REGISTRE UNA RESPUESTA POR EQUIPO**				
					1.Usted lo compró	2.Lo recibió como regalo	3.Lo recibió de su trabajo	4.Otro	5.N/A
1. TELEVISÓN		2.NO		1.SÍ →	1	2	3	4	5
2. COMPUTADORA DE ESCRITORIO		2.NO		1.SÍ →	1	2	3	4	5
3. LAPTOP		2.NO		1.SÍ →	1	2	3	4	5
4. TABLETA		2.NO		1.SÍ →	1	2	3	4	5
5. TELÉFONO CELULAR	1.NO	2.SÍ→	5.1 ¿Es smartphone?	1.SÍ → **2.NO→**	1	2	3	4	5

3. ¿En qué estado operativo recibió su equipo electrónico actual? **PREGUNTE POR LOS QUE SI TIENE, Y REGISTRE UNA RESPUESTA POR EQUIPO**						
	1.NUEVO	2.USADO	3.REACONDICIONADO	4.OTRO	5.NO SABE	6.N/A
1. TELEVISÓN	1	2	3	4_____	5	6
2. COMPUTADORA DE ESCRITORIO	1	2	3	4_____	5	6

Anexo A: (Con't)

3.	LAPTOP	1	2	3	4_____	5	6
4.	TABLETA	1	2	3	4_____	5	6
5.	TELÉFONO CELULAR	1	2	3	4_____	5	6

4. De las siguientes opciones, Mencióneme 3 en orden de importancia para usted, ¿Cuándo considera que un equipo electrónico ya no es útil para usted? **MUESTRE TARJETA Y REGISTRE ORDEN DE IMPORTANCIA**

1.CUANDO SE ROMPE Y NO DESEA REPARARLO	2.CUANDO EL SISTEMA OPERATIVO SE VUELVE LENTO	3.CUANDO LA BATERÍA COMIENZA A FALLAR	4.CUANDO SALE UN NUEVO PRODUCTO MÁS DE MODA Y CON UN RENDIMIENTO TECNOLÓGICO SUPERIOR	5.CUANDO LA REPARACIÓN ES CARA	6.CUANDO NO ES POSIBLE REPARAR EL EQUIPO
|__|MENCIÓN	|__|MENCIÓN	|__|MENCIÓN	|__|MENCIÓN	|__|MENCIÓN	|__|MENCIÓN

5. ¿Si no está usando su dispositivo electrónico, por cuánto tiempo lo almacena en su casa/ oficina?

	1.MENOS DE UN AÑO	2. 1 A 3 AÑOS	3. DE 4 A 5 AÑOS	4. MÁS DE 6 AÑOS	4.N/A
1. TELEVISIÓN	1	2	3	4	5
2. COMPUTADORA DE ESCRITORIO	1	2	3	4	5
3. LAPTOP	1	2	3	4	5
4. TABLETA	1	2	3	4	5
5. TELÉFONO CELULAR	1	2	3	4	5

6. ¿Cuánto tiempo tuvo su último equipo electrónico antes de deshacerse de él?

	1.MENOS DE UN AÑO	2. 1 A 3 AÑOS	3. DE 4 A 5 AÑOS	4. MÁS DE 6 AÑOS	4.N/A
1. TELEVISIÓN	1	2	3	4	5
2. COMPUTADORA DE ESCRITORIO	1	2	3	4	5
3. LAPTOP	1	2	3	4	5
4. TABLETA	1	2	3	4	5
5. TELÉFONO CELULAR	1	2	3	4	5

7. De las siguientes opciones, Mencióneme 3 en orden de importancia para usted, ¿Cómo se deshizo de su último equipo electrónico? **TARJETA 2**

1.LO REGALA	|__|MENCIÓN	9.LO TIRA A LA BASURA	|__|MENCIÓN
2.LO VENDE	|__|MENCIÓN	10.LO DONA A UN PROGRAMA SOCIAL	|__|MENCIÓN
3.LO INTERCAMBIA CON OTROS PRODUCTOS (TRUEQUE)	|__|MENCIÓN	11.LO RECICLA	|__|MENCIÓN
4.LO GUARDA EN SU CASA/ OFICINA	|__|MENCIÓN	12.LO ROBARON	|__|MENCIÓN

8. ¿Sabe lo que sucede con sus dispositivos electrónicos cuando se deshace de ellos?
1. NO
2. SÍ → ¿Qué pasa? **CIRCULE UNA RESPUESTA:** 1.VA AL VERTEDERO 2. INCINERACIÓN 3.RE-ACONDICIONAMIENTO O RE- MANUFACTURA 4.RECICLAJE

9. De las siguientes opciones, Mencióneme 3 en orden de importancia para usted, ¿Qué impide dar sus residuos electrónicos al reciclador? **EXPLICACIÓN SOBRE RESIDUOS ELECTRÓNICOS Y RECICLAJE, TARJETA 3**

1. Bajo valor de retorno (cuando devuelve el residuo electrónico a la tienda pero no pagan mucho por ello) |__|MENCIÓN
2. Falta de información sobre las opciones para deshacerse de los equipos |__|MENCIÓN
3. Falta de canales de recolección de residuos electrónicos |__|MENCIÓN
4. Usted los recolecta y almacena |__|MENCIÓN
5. Otra opción (indicar) _____ |__|MENCIÓN

10. De las siguientes opciones, Mencióneme 3 en orden de importancia para usted, ¿Qué le haría querer devolver sus dispositivos / equipos electrónicos al fabricante para reciclarlos? **TARJETA 4**

1. Que lo recojan de un sitio específico (casa, oficina) |__|MENCIÓN
2. Que existan muchos lugares de entrega |__|MENCIÓN
3. Recompensa monetaria: dinero / tarjeta de regalo o porcentaje de descuento en la compra de un nuevo dispositivo |__|MENCIÓN
4. Donar su dispositivo |__|MENCIÓN
5. Garantía: el dispositivo será reciclado de manera ambientalmente responsable |__|MENCIÓN
6. Seguridad de datos (se garantiza el borrado seguro de datos) |__|MENCIÓN

11. De las siguientes opciones, ¿Está dispuesto a pagar un impuesto/depósito ecológico para que se de el mejor reciclaje posible y conocer el destino final de sus productos electrónico? **TARJETA 5**

1.Sí (solo si <1% del precio del dispositivo)

2.Sí (solo si <3% del precio del dispositivo)

3.Sí (solo si <5% del precio del dispositivo)

4.No

12. ¿Quién reemplazó la batería de su celular? CIRCULE UNA RESPUESTA

1.(Yo mismo) Usted reemplazó la batería	3.Otro centro de servicio (de terceros)	5.Otra: _____
2.Un técnico profesional en el centro de servicio autorizado	4.Nunca he reemplazado la batería	

Anexo A: (Con't)

13. ¿Ha tenido alguno de los siguientes problemas con su Smartphone? **PREGUNTE POR CADA UNO Y CIRCULE RESPUESTA**			**14.** ¿Y quién arregló o intentó resolver estos problemas de su Smartphone?			
			1.Usted mismo	2.Tienda donde compró (garantía extendida)	3.Servicio Técnico	4.No lo arregló
Daños en la pantalla táctil o ruptura	2.NO	1.SÍ →	1	2	3	4
Daños por agua	2.NO	1.SÍ →	1	2	3	4
Funcionamiento incorrecto de los botones	2.NO	1.SÍ →	1	2	3	4
Reemplazo de la batería	2.NO	1.SÍ →	1	2	3	4
Daños en el sistema operativo	2.NO	1.SÍ →	1	2	3	4
Virus	2.NO	1.SÍ →	1	2	3	4
No enciende	2.NO	1.SÍ →	1	2	3	4

DATOS SOCIOECONÓMICOS

1. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones le describe mejor? **CIRCULE UNA RESPUESTA TARJETA 9**
1. Generalmente soy el primero en probar un producto de nueva tecnología
2. Estoy generalmente entre los primeros en probar un producto de nueva tecnología
3. Estoy generalmente en el medio cuando viene a intentar un producto de la nueva tecnología
4. En general, soy más lento para probar un producto de nueva tecnología
5. Prefiero esperar hasta que muchas otras personas hayan probado y probado un producto tecnológico

2. Sexo (ANOTE SIN PREGUNTAR) 1. MASCULINO 2. FEMENINO

3. Edad |_____|_____| AÑOS

3. Pensando en la persona que aporta la mayor parte del ingreso en este hogar, ¿Cuál fue el último año de estudios que completó? (ESPERE RESPUESTA Y PREGUNTE) ¿Realizó otros estudios? RECLASIFICAR EN CASO NECESARIO

1.SIN ESCOLARIDAD
2.PRIMARIA INCOMPLETA
3.PRIMARIA COMPLETA
4.SECUNDARIA INCOMPLETA
5.SECUNDARIA COMPLETA
6.CARRERA COMERCIAL
7.CARRERA TÉCNICA
8.PREPARATORIA INCOMPLETA
9.PREPARATORIA COMPLETA
10.LICENCIATURA INCOMPLETA
11.LICENCIATURA COMPLETA
12.MAESTRÍA/DOCTORADO

4. ¿Cuántos baños completos con regadera y w.c (excusado) hay para uso exclusivo de los integrantes de su hogar? |_____| BAÑOS COMPLETOS

5. ¿En su hogar cuenta con regadera funcionando en alguno de los baños?
1. SI 2. NO

6. ¿Cuántos automóviles propios, excluyendo taxis tienen en el hogar? |_____|AUTOMOVILES

7. ¿En este hogar cuentan con estufa de gas o eléctrica?
1. SI 2. NO

Muchas Gracias, le quiero reiterar que la información que nos ha proporcionado es confidencial, y si no tiene inconveniente le quiero solicitar su nombre y número telefónico para efectos de supervisión de este cuestionario.

Nombre: _____Teléfono: _____

Yo entrevistador _____, número _____ declaro que seguí todas las indicaciones metodológicas para la selección de la muestra y que toda la información contenida en este cuestionario es verídica. Acepto que si existe algún dato falso en él, la empresa *Berumen* tome las medidas legales pertinentes. FIRMA DEL ENTREVISTADOR _____FECHA DE ENTREVISTA |__|__|-|__|__|-| 2 | 0 | 1 |7 |

Anexo B: Formulario de Empresas de Reciclaje de Electrónico

PERFIL TECNOLÓGICO – Empresas de Reciclaje de Electrónicos

DATOS GENERALES

Razón Social **Datos de contacto**	**Número Total de Empleados** ☐ menos de 20 ☐ 150 a 200 ☐ 20 a 50 ☐ 200 a 250 ☐ 50 a 100 ☐ 250 a 500 ☐ 100 a 150 ☐ más de 500	**Exportador** ☐ SÍ ☐ NO	**Registro RENIECyT con CONACyT** ☐ SÍ ☐ NO

MERCADO DE ELECTRÓNICOS*

☐ Televisores:		☐ Celulares:		☐ Impresoras:	
☐ Computadoras escritorio		☐ Tablets:		☐ Enceres domésticos :	l %
☐ Laptops:		☐ Ipods, mp3:		☐ Otros :	%

*Unidades (miles)

MARCAS DE LOS EQUIPOS

☐ Samsung	☐ SONY	☐ Otros
☐ Apple	☐ Motorola	
☐ Ericson	☐ Philips	
☐ HP	☐ Siemens	
☐ Dell	☐ Mabe	
☐ LG	☐ Whirlpool	

CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS ELECTRÓNICOS*

Celulares: ☐ CDMA ☐ GSM ☐ TDMA

Televisores: ☐ Pantalla Plana ☐ Cinescopio

Computadoras de escritorio: ☐ Pantalla Plana ☐ Cinescopio

Impresoras: ☐ Inyección ☐ Láser ☐ Cartuchos ☐ Matriciales

*Unidades

ÁREA DE SEPARACIÓN MANUAL*

Personal Designado al Área:

☐ Separación de baterías		☐ Separación carcazas o armazones	%
☐ Separación de cables		☐ Separación de display	%
☐ Otros componentes individuales			

*% de área de separación manual

ÁREA DE SEPARACIÓN MECÁNICA*

Personal Designado al Área:

☐ Fracciones Ferrosas		☐ Separación Magnética (ferrosa)	
☐ Fracciones No Ferrosas		☐ Separación por Molino (no ferrosa)	
☐ Fracciones Poliméricas			

*% de área de separación mecánica

ÁREA QUÍMICA-TECNOLÓGICA*

Personal Designado al Área:

☐ Espectroscopia infrarroja		☐ Técnicas de dispersión	%
☐ Pirólisis Media (MIR)		☐ Fluorescencia por Rayos X	%
☐ Pirólisis en masa		☐ Refinamiento metálico	%
☐ Trituración polimérica		☐ Leaching	%
☐ Froth Flotation		☐ Otras	%

*% de área de separación química-tecnológica

ÁREA DE CALIDAD

Personal Designado al Área:

Sistemas de Calidad			**Programa de Desarrollo de Proveedores**
☐ ISO 9000.	Año de certificación:		☐ SÍ ☐ NO
☐ ISO 14000.	Año de certificación:		
☐ Otra:	Año de certificación:		

SISTEMAS DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

Personal Designado al Área:

Experiencia en Proyectos de Innovación Tecnológica para Productos y/o Procesos de Fabricación	**Vinculación con Centros Públicos de Investigación y/o Universidades**
☐ SÍ ☐ NO ☐ Fondo Estímulos a la Innovación (CONACyT) ☐ Fondo Mixto con su Estado ☐ Secretaría de Economía ☐ Otro	☐ SÍ ☐ NO

Anexo C: Formulario de Tiendas de Reparación Celular

CARACTERÍSTICAS GENERALES		
Nombre de la tienda:_____ **Distribuidor Oficial:**_____	**Entregan factura:** Si ☐ No ☐	**# Productos que reparan / día:** **# Componentes que venden / día:**
Contacto:	**Número de empleados** ☐ 1 -2 ☐ 3 -5 ☐ 5- 10 ☐ > 10	**Menores de Edad:** Si ☐ No ☐ _____
NIVEL ACADÉMICO EMPLEADOS		
Función Empleado E1: _____ **Nivel académico E1:** ☐ Primaria ☐ Secundaria ☐Prepa ☐Técnico ☐ Universidad (en curso) ☐ Universidad (finalizada) ☐ Cursos en general _____	**Función Empleado E2:** _____ **Nivel académico E2:** ☐ Primaria ☐ Secundaria ☐Prepa ☐Técnico ☐ Universidad (en curso) ☐ Universidad (finalizada) ☐ Cursos en general _____	**Función Empleado E3:** _____ **Nivel académico E3:** ☐ Primaria ☐ Secundaria ☐Prepa ☐Técnico ☐ Universidad (en curso) ☐ Universidad (finalizada) ☐ Cursos en general _____
CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES		
Áreas separadas por actividad: Si ☐ No ☐ **Área de la instalación (m^2):**_____	**Descripción de la zona de venta y atención al cliente:** Tamaño del área: _____ (m^2) Observaciones: _____ _____	**Descripción de la zona de reparación:** Tamaño del área: _____ (m^2) # sillas ___ / # mesas ___ **Tipo de herramientas:**_____ _____ **Tipo de equipos:** _____ _____
SEGURIDAD Y SALUD		
Botiquín de primeros auxilios Si ☐ No ☐ **Extintor de incendios** Si ☐ No ☐ **Detectores de Humo** Si ☐ No ☐ **Señales de seguridad:** Si ☐ No ☐	**Equipo de protección básico:** Guantes: Si ☐ No ☐ Gafas: Si ☐ No ☐ Pantalón de mezclilla: Si ☐ No ☐ Camisa de mezclilla: Si ☐ No ☐	**Manejo de sustancias peligrosas** Si ☐ No ☐ Indicar cuáles y cantidad: _____ _____ _____ _____
MANEJO DE RESIDUOS APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS (RAEE)		
Peso de RAE generados: _____(mes)	**Disposición Final:** 1) Empresa especializada en el manejo de RAE 2) Tirar basurero 3) Relleno sanitario	**Venta de residuos electrónicos** Si ☐ No ☐ **Venta de partes como:** ☐ Oro / ☐ Plata / ☐ Cobre ☐ cables / ☐ plásticos / ☐ Otros

Anexo D: Fotografías del proceso de desensamblado manual y balance de materiales de teléfonos celulares

1. Teléfonos celulares destinados para las pruebas de desensamblado

2. Herramientas necesarias para el desensamblado manual

3. Pesaje inicial del teléfono celular

4. Pesaje de componentes: tarjeta de circuitos impresos, carcaza delantera y posteior.

5. Pesaje de componentes: carcaza delantera y posterior.

6. Partes o componentes desensamblados.

ARTÍCULO PUBLICADO

Circular Economy in the Electronic Products Sector: Material Flow Analysis and Economic Impact of Cellphone E-waste in Mexico

Daniela Córdova-Pizarro [1], Ismael Aguilar-Barajas [2], David Romero [1] and Ciro A. Rodriguez [1,*]

[1] School of Engineering and Science, Tecnologico de Monterrey, 64849 Monterrey, Mexico; tec.danicordoba@gmail.com (D.C-P.); david.romero.diaz@gmail.com (D.R.)
[2] School of Social Sciences and Government, Tecnologico de Monterrey, 64849 Monterrey, Mexico; iaguilar@tec.mx
* Correspondence: ciro.rodriguez@itesm.mx and ciro.rodriguez@gmail.com; Tel.: +52-8183-58200

Received: 15 January 2019; Accepted: 27 February 2019; Published: date

Abstract: The circular economy (CE) model has become highly relevant in recent years, with the electronics industry being one of the sectors that has considered its application. Despite only a limited amount of literature being available on waste electrical and electronic equipment (e-waste) in Mexico, the Mexican Government, academic institutions, and electronics industry have coordinated efforts to implement CE in the country. This study evaluates the current technical and economic situation of cellphone e-waste generated in Mexico by surveying and analyzing the main actors that influence the management of this waste and using a material flow analysis. Extensive fieldwork was conducted in order to quantify the extent of cellphone e-waste processing in both formal and informal channels. The study of printed circuit boards in cellphones shows that the total value of cellphone e-waste materials ranges between $ 11.277 and $ 12.444 million USD per year in Mexico. However, only a value of $ 0.677 million USD is recycled through formal channels. After characterizing the remanufacturing and recycling CE loops, we conclude that the potential for improvement and advancing towards a CE model is significant

Keywords: circular economy; electronic products; material flow analysis; e-waste; cellphones; Mexico

---

1. Introduction

Circular economy (CE) is a concept that has been around for more than two decades and currently has many definitions. Some researchers state that CE should target the following dimensions of impact: environmental, economic and social [1]. Other leading groups emphasize the need for new business models that facilitate the transition from open production systems towards closed systems that reuse resources and reduce energy consumption [2].

A generally accepted definition of CE is still elusive, pushing academic research to analyze a wide range of related concepts and methods in search for such general definition [3]. In order to have a reference framework we on the definition formulated by Kirchherr et al. stating that "A circular economy describes an economic system that is based on business models which replace the 'end-of-life' concept with reducing, alternatively reusing, recycling and recovering materials in production/distribution and consumption processes, thus operating at the micro level (products, companies, consumers), meso level (eco-industrial parks) and macro level (city, region, nation and beyond), with the aim to accomplish sustainable development, which implies creating environmental quality, economic prosperity and social equity, to the benefit of current and future generations." [4].

In Latin America, particularly in Mexico, the concept of CE for electronic products is relatively new. Public policy, and supporting research, related to implementing a circular economy model is a recent consideration. Similarly, studies on e-waste generation, characterization of recycling facilities and repair stores are limited in

scope. Consequently, there is a need to analyze the different schemes and actors involved in Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE) management, in order to determine the degree of implementation in terms of a CE model for electronic products.

In 2006, the National Institute of Ecology of Mexico (INE for its acronym in Spanish) published a national e-waste management manual, which has since then been updated to 2010 through regional studies [5,6]. Subsequently, several studies on e-waste were published between 2012 and 2014, based on integral management guides and recycling programs [5–8]. The Federal Ministry of Environment and Natural Resources of Mexico (SEMARNAT), in cooperation with the United Nations Development Program (UNDP), currently carries out studies on integral e-waste management and in 2017, SEMARNAT-UNDP published an inventory of e-waste generation in Mexico with the base year 2015 [9]. Within this framework, CE is starting to be considered in the electronic products sector in Mexico and it is envisioned that the new e-waste law will include this new circular economic industrial model.

1.1. Literature Review

1.1.1. Circular Economy of Electronic Products

CE models for electronic products provide mechanisms for extending the life of the equipment and then recycling and recovering each material for reuse as a secondary raw material in another system. Several tools have been developed to identify, analyze, and evaluate these processes in a system [10]. Cellphone e-waste circulates through several processes and its materials can be used in different stages or industrial processes. Table 1 presents a comparative analysis of the methodology used in the research reported here and studies conducted by Yu et al. [11], Ghosh et al. [12], Baldé et al. [13], and Kumar et al. [14], who evaluated the processes in electronic waste circulation, such as the generation of e-waste (based on the GDP of a country), repair, recycling, and the composition and flow of waste materials, using their highest economic value in the international market.

The generation of e-waste is directly related to the GDP of a country. The studies of Yu et al. [11], Baldé et al. [13], and Kumar et al. [14] showed that the consumption of cellphone equipment is between 1 and 1.1 cellphones per person, and that as the GDP of a country increases, the waste generation increases at a similar rate. Similarly, Baldé et al., [13] correlated the total e-waste generated in 50 countries with their GDPs and the sizes of their populations and confirmed that these three factors are correlated.

Published CE models in the electronic products sector have analyzed the actors and scenarios involved in electrical and electronic equipment flow (Table 1). Different authors have evaluated the reparability and recycling of electronics to determine the feasibility of migrating toward a CE model [11–13]. Analyzing the generation, repair, management, and recycling processes for electronic equipment in a particular country, allows determining its technological capabilities to enable a CE model.

Most countries with emerging economies have basic recycling processes, such as manual separation of components, along with crushing machines, metal separators, and compactors, and very few recyclers recover valuable components such as gold, copper, cobalt and tin. Baldé et al. [13] and Ghosh et al. [12] analyzed the electronic recycling industry and its final processing through physical, chemical, and/or biological separation to determine the technological recycling level of a country and establish whether it is possible to recover materials locally by means of manual, mechanical, physical, chemical, and/or biotechnological processes (Table 1). This showed that emerging countries do not have the end-processing technologies to recover all the materials from printed circuit boards (PCBs).

Table 1. Analysis of the processes for e-waste material flow from cellphones (comparison of reported research in this work vs. selected international studies).

Process	Methodology	Current Study	Yu et al. [11]	Ghosh et al. [12]	Baldé et al. [13]	Kumar et al. [14]
Generation	Gross domestic product analysis of cellphone waste generation	✓	✓		✓	✓
Repair	Literature review and database analysis	✓	✓		✓	✓
	Field investigations and employee interviews	✓				
	Analysis of facilities, equipment, and tools	✓				
	Analysis of the academic level of the employees	✓				
	Analysis of environmental procedures and health and safety conditions	✓				
Recycling	Literature review and database analysis	✓	✓	✓	✓	✓
	Field investigations (interviews)	✓				
	Analysis of facilities, equipment, and tools	✓				
	Technical evaluation of the employees	✓				
	Determination of e-waste composition	✓	✓	✓	✓	✓
	Analysis of manual and mechanical separation processes	✓		✓	✓	
	Analysis of end-processing technologies: physical, chemical, and/or biological separation			✓	✓	
Material flow analysis	Cellphone manual disassembly tests	✓				
	Mass balance calculations	✓	✓			✓
	Commodities	✓	✓		✓	✓

Source: Prepared by the authors based on the fieldwork and a literature review [11–14].

1.1.2. Waste Electric and Electronic Equipment Management Strategies

During the last decade, several studies have focused on e-waste management, with the purpose of mitigating social, environmental and economic problems involved in the rapid growth of WEEE [2,15]. These studies have developed several tools for a proper WEEE management, considering the evaluation of potential socio-environmental impact. Among the most relevant tools we can find the following:

Life cycle assessment (LCA) is a decision-making tool, which is widely used to evaluate economic aspects, in the design and development of a product, as well as energy and environmental impact, such as climate change, ozone layer, eco-toxicity, carcinogens, acidification, and eutrophication [11]. This tool has been use to determine impact of WEEE and evaluate strategies for a proper e-waste management, leading to economic benefits for material recovery of some materials such as glass, iron, copper, aluminum, and plastic [1,2,16–18].

Materials flow analysis (MFA) is a decision-making tool for an adequate environmental management of waste. It is used to study the route of the components/materials that flow through different processes (repair, re-conditioning, re-manufacture, recycling) until their final destinations, such as recovery of materials, landfills, incineration, among others [1,11,17]. MFA is applied on e-waste management to characterize electronic product stages and to develop an adequate management of e-waste, considering environmental, economic and social indicators [19,20].

Multi-criteria decision analysis (MCDA) is a strategic decision tool, which helps solve complex multiple criteria scenarios, which include qualitative and quantitative variables of the problem in question [20]. This tool has been applied on environmental management schemes, such as the development of e-waste management strategies, providing a positive socio-environmental impact [15,18].

Extended producer responsibility (EPR) is an environmental tool that assigns additional responsibilities to manufacturers [7]. These responsibilities extend until the product is collected at the end of its useful life and is based on the principles of United Nations Environment Programme that the polluter pays [21,22].

It is defined as an environmental policy approach, which includes the material and financial responsibility of the manufacturer about the product. This policy has two fundamental characteristics: a) transfer responsibility to the producer (collection, treatment, reuse and recycling) and b) provide incentives to producers for improving product design that facilitates treatment, reuse and recycling [8,23].

Electrical and electronic equipment (EEE) is composed of a combination of hazardous and non-hazardous materials, which require specialized separation processes. Depending on the purpose of the recycler, the end of the useful life of EEE can be divided into material recovery (repair, re-conditioning, disassembling) or power generation (incineration) [24]. Figure 1 shows the recovery processes of EEE [16,17]. It shows that the useful life of an EEE can be extended by means of the reuse, repair, updating its hardware and operating system or replacement of some of its parts (reconditioning). In case the equipment no longer works, the recycler will opt for manual/mechanical disassembly and will take advantage of the functional components and use them to remanufacture other products. Regarding to recycling, companies use almost all parts and materials of electronic waste, in order to sell them in local markets or abroad. If the materials cannot be recovered locally/abroad by end-processing technologies, they pass to destruction stage, either by means of incineration to generate energy or to final disposal (depending on national environmental laws) [8,22,24].

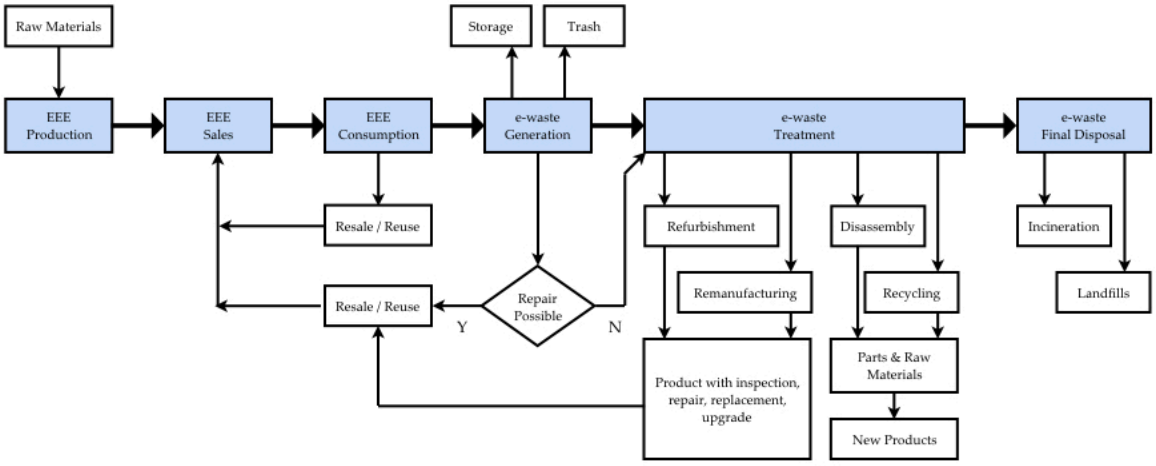


Figure 1. Life cycle of electrical and electronic equipment. Source: Prepared by the authors based on fieldwork and literature review [6,8,9,16,17].

1.2. Research Question and Objective

The literature review shows the lack of in depth information about the state of the circular economy of electronic products in Mexico. In this context, the research question is what are the processes and conditions that promote or limit the implementation of a circular economy model for cellphones in Mexico. Therefore, the objective of this study is to characterize the processes and conditions involving the generation and processing of e-waste in Mexico, with a particular focus on cellphones.

The research included the characterization and evaluation of the actors that are involved in the repair and recycling processes, examining the fate of each component out of cellphones. More particularly, the processes involved in e-waste generation and processing were characterized by fieldwork involving a survey of recycling facilities and a survey of repair stores for cellphones, as well as a detailed study of cellphone disassembly. In order to evaluate the conditions that promote or limit the implementation of a circular economy model for cellphones in Mexico, a material flow analysis and an economic impact analysis were conducted.

2. Materials and Methods

The materials and methods used in this research are derived from the most generally accepted definitions of CE. Urbinati et al. indicate that closed systems that reuse resources and reduce energy consumption are

fundamental elements of CE [2]. Kirchherr et al. and Homrich et al. are emphatic in considering environment quality, economic prosperity and social equity as the ultimate goals of CE [3,4]. In this context, the proposed materials and methods in this research aim at characterizing the maturity of the loops (closed systems) in regards to reuse, remanufacturing (repair) and recycling. In addition, the economic assessment of cellphone e-waste provides an indication of the current environmental, economic and social impact involving these products.

2.1. Outlook of Repair and Recycling

First, the field research reported here took place between the second half of 2015 and the first half of 2016, with a survey of twelve recycling companies involved in electrical and electronic waste recycling. The methodology for the characterization of these facilities was through personal interviews with the Chief Executive Officer or the Chief Operating Officer at each company.

A questionnaire was sent to each company before the personal interview. The questionnaire was developed based on previous research by the Federal Ministry of Environment [9,25] and the National Institute of Ecology of Mexico [5], and it covers factors such as company size (number of employees), presence in other countries, types and quantities of waste, recycling processes and technologies, quality and environmental certifications, health and safety, among other aspects. The twelve recycling facilities were classified by city and coded for confidentiality purposes (for example, C: Mexico City, M: Monterrey and G: Guadalajara). This field data was then compared with the findings of Yu et al. [11] in China, estimations of the gross domestic product (GDP) in China and Mexico, as well as data from SEMARNAT's studies on national e-waste generation in Mexico [9]. Subsequently, 66 formal and informal electronic repair stores were evaluated. The focus of the study was to understand their technical, academic, labor (child labor), as well as and environmental standards, and health and safety conditions.

2.2. Material Flow Analysis of Cellphone Waste

A material flow analysis of cellphone e-waste was conducted, considering the mass balance and disassembly efficiency in Mexican facilities. The recycling facility Proambi provided all of the logistical and technical support for this study and donated 80 cellphones. First, a cellphone data sheet was filled out, detailing materials, tools, and personal protection equipment. A technician supported the manual disassembly process. Each cellphone component was weighed using an analytical balance (Model PPN-40S, TecnoCor) and every disassembly step was timed. The following brands and models of cellphones were analyzed (with the number of units in parentheses): Alcatel 6045 (10), BTE (15), Huawei Y520-U03 (15), Huawei G527-U081 (15), BLU Star4.5 (2), BLU Life (2), ZTE Blade A475 (2), ZTE V6 (2), ZTE Blade L3 (2), Samsung SMJ1000MU (10), Samsung J1 (1), Samsung J3 (2), and Samsung Grand Prime (2). The number of disassembled parts ranged from 13 to 15 components, depending on the type of cellphone.

Once this information had been recorded, a mass balance analysis of each cellphone and its components was performed, based on the methodologies proposed by Yu et al. [11] and Badiru *et al.* [10]. The variation in material during the manual disassembly process (ΔM) was determined by calculating the difference between the initial weight of the cellphone (Σf_{in}) and the sum of the weight of all components that left the process (Σf_{out}) (Equation 1). In addition, the percentage variation of the material during disassembly (Em) was calculated to determine the efficiency of the process and the percentage of material losses (Equation 2).

$$\Delta M = \Sigma f_{\text{in}} - \Sigma f_{\text{out}} \text{ (Material balance equation)} \quad (1)$$

$$Em = \left[\left(\frac{\Sigma f_{\text{out}}}{\Sigma f_{\text{in}}}\right)\right] * 100 \text{ (Disassembly efficiency equation)} \quad (2)$$

2.3. Economic Impact of E-waste Materials in Printed Circuit Boards of Cellphones

For the economic calculation, the study focused only on the printed circuit boards (PCBs). Weight concentrations of metals, non-metals, and rare earths were calculated using information from Ogunniyi et al. [26], Oguchi et al. [27], Yamane et al. [28], Kumar et al. [14] and Holgersson et al. [29]. The economic value of the materials was calculated using national and international prices, the average price for the year 2015, through marketers such as Kitco [30], Trading Economics [31], and the Integral System on Mining Economics from Mexico [32].

2.4. Mass Analysis E-waste Materials in Cellphones

No material flow analyses or mapping data are currently available for the content of cellphone waste in Mexico. Consequently, published studies from other regions were used as a reference, such as that of Yu et al. [11], who analyzed the materials that are used in cellphones in China and determined the average contents of copper, aluminum, iron, lead, tin, gold, silver, and palladium, and Baldé et al. [13], who determined the contents of 18 materials that are used in cellphones in a study conducted at the United Nations University in Bonn, Germany. Based on the findings of these studies, the weight and percentage of cellphone waste materials generated in Mexico were calculated, with an emphasis on common metals (copper, aluminum, iron, lead, tin, and zinc), precious metals (gold, silver, and palladium), rare metals (cobalt and gallium), plastic, and glass.

3. Results

3.1. Outlook of Repair and Recycling

This section presents the results of the survey on recycling facilities and repair stores in Mexico, along with the analyses of e-waste generation and material flow. First, e-waste generation in recycling facilities is characterized and analyzed. Then, the generation of cellphone waste and its relationship with the GDP, as well as the findings of other studies carried out in China [11] and Mexico [9] are examined. This is followed by the analysis of formal and informal cellphone repair stores.

3.1.1. Waste Electrical and Electronic Equipment in Recycling Facilities

The field study of recycling facilities in Mexico showed that component separation was based on both manual operations and mechanical systems (see Table 2.) Additional detail is included in the Figure A1 of the Appendix. However, none of these facilities had end-processing technologies for recovering materials. The interviews showed that 42% of e-waste can be reused and enters a second-hand market, while the remaining 58% goes through manual separation. All of the facilities followed this procedure but only 67% of them had mechanical separation processes, which included crushers, magnetic separators, and metal compactors.

At all recycling companies, the disassembled parts of a piece of electrical and electronic equipment (e.g., plastic, steel, PCB, metals) are inspected for later reuse, local trade, or sale in international markets to recover precious metals. These results are consistent with findings reported by Namias [33] who analyzed the U.S. recycling industry and determined that, similarly in Mexico, the U.S. recyclers sell components to Europe or Asia to recover precious metals. Since the Mexican recycling facilities investigated here did not have the end-processing technologies to recover precious metals, PCBs were the main component they exported, being sold to countries such as China, Japan, and Belgium. The next section will provide more details about the material flow and disassembly of PCBs

National and international certifications for health and safety, quality, environmental impact, and social responsibility varied between recycling facilities, depending on their e-waste processing volume [8,15,34]. National permits are granted to all recycling facilities in Mexico (large, medium, and small) by government institutions such as SEMARNAT, Ministry of Health, and Ministry of Labor and Social Prevention. By contrast, international certifications, such as ISO 9001 and ISO 14001, are only given to medium and large recycling facilities that handle e-waste volumes of more than 500 tons per year. High-capacity recyclers also have

certifications that ensure correct e-waste recycling processes are in place, such as R2 (Responsible Recycling) and/or e-Stewards® (Responsible Recycling and Reuse of Electronic Equipment®).

Table 2. Characterization of the 12 recycling facilities surveyed in Mexico, 2015.

Surveyed Companies				Separation Processes		Reuse & Recycling		
Size	**Number of employees**	**Total E-waste Processed (ton / year)**	**Code: M: Mexico City G: Guadalajara M: Monterrey**	**Manual**	**Mechanical**	**Second Hand Sale**	**PCB Export**	**Local Materials Recycling**
Small	<35	<100	C2, C4	Y	N	Y	Y	Y
			C5, G3, M2	Y	N	Y	N	Y
Medium	35–59	100–499	G2, G4	Y	N	Y	Y	Y
Large	>60	500–1200	C1, C3, C6, G1, M1	Y	Y	Y	Y	Y

Source: Prepared by the authors based on fieldwork.

The 12 recycling facilities processed a total of 4488 tons of e-waste in 2015. Figure 2 shows the source of this e-waste, which mostly consisted of domestic appliances (or white goods) and printers (47%), followed by computers and televisions (12%–19%), and finally a small amount of cellphones, tablets, and smaller equipment (additional detail is included in Table A1 of the Appendix). The proportion of cellphones was found to be only 7%, equivalent to 301 tons/year.

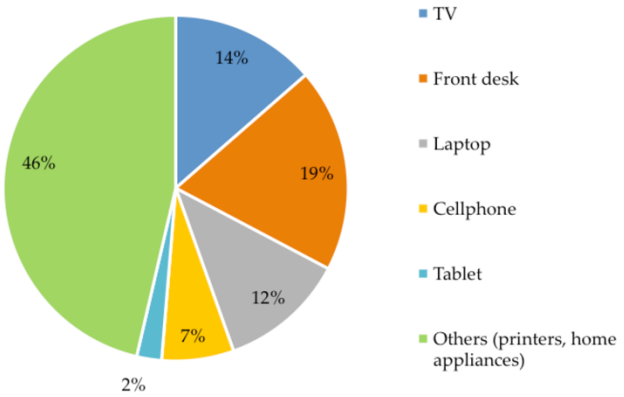


Figure 2. Sources of the e-waste generation processed by the 12 recycling facilities interviewed, 2015.

3.1.2. GDP-related Estimation of E-waste Generation in Mexico

Baldé et al. [13] showed that e-waste generation is directly related to the GDP and population size of a country, while Yu et al. [11] and Kumar et al. [14] demonstrated that the consumption of cellphone waste is between 1 and 1.1 cellphones per person and that the generation of e-waste in a country increases in a similar proportion to the increase in GDP. Based on this findings, and given that the last data set available is from 2010 [9], we proceed to estimate cellphone e-waste in Mexico.

First, the weight of cellphone e-waste generation was estimated based on the cellphone e-waste generated in China for 2008 ($N_{CH\text{-}2008}$), as reported by Yu et al. (77 million units) [11], and the average weight of the cellphones analyzed in the field research (W_{CH}: 150 grams/unit). We estimate 11,550 tons of cellphone e-waste was generated in China for 2008 ($CW_{CH\text{-}2008}$), as describe in Equation 3.

$$CW_{CH-2008} = W_{CH} * N_{CH-2008} \text{ (cellphone e-waste generation in China 2008, [ton/y])} \quad (3)$$

The growth of cellphone e-waste is assumed to be proportional to GDP. Therefore, we estimate that cellphone e-waste increases from $CW_{CH\text{-}2008}$ = 11,550 ton in 2008 to $CW_{CH\text{-}2015}$ = 27,795 ton in 2015, as indicated in Equation 4 and considering $GDP_{CH\text{-}2008}$ = $ 4,598 billion USD and $GDP_{CH\text{-}2015}$ = $ 11,065 billion USD [27].

$$CW_{CH-2015} = CW_{CH-2008} * \left(\frac{GDP_{CH-2015}}{GDP_{CH-2008}}\right) \text{(cellphone e-waste generation in China 2015, [ton/y])} \quad (4)$$

Following the same logic, we now estimate the cellphone e-waste generation in Mexico a proportion of GDP between China and Mexico. The reference data is $GDP_{CH-2015}$ = $ 11,065 billion USD (China), $GDP_{MX-2015}$ = $ 1,173 billion USD (Mexico) and 27,795 ton of cellphone e-waste in China for 2015 ($CW_{CH-2015}$), as indicated in Equation 5. Therefore, we estimate a generation of 2,947 ton of cellphone e-waste in Mexico. Table 3 summarizes these estimations.

$$CW_{MX-2015} = CW_{CH-2015} * \left(\frac{GDP_{MX-2015}}{GDP_{CH-2015}}\right) \text{(cellphone e-waste generation in Mexico 2015, [ton/y])} \quad (5)$$

According to studies carried out by SEMARNAT [25] and Cruz [8], the formal recycling market in Mexico only captures 10.8% of e-waste at a national level. Therefore, it was estimated that 316.85 tons of cellphone waste was formally recycled in Mexico in 2015 (Table 3). Finally, the proportion of cellphone waste from the total e-waste generated was estimated to be 0.3% for Mexico. The field study showed that only 7% of cellphone waste from 12 recycling facilities (301 tons of the 4,488 tons generated per year) stemmed from formal recycling. Therefore, we proceeded to analyze formal/informal electronics repair stores in Mexico in order to understand how these shops work and what do they do with their e-waste (see section 4.3).

Table 3. Relationship between the gross domestic product (GDP) and cellphone waste generation in China and Mexico in 2015.

Indicator / Calculated Data	Unit	China (2015)	Mexico (2015)
Population	(million)	1371.3	125.9
GDP	(billion USD)	11,065	1173
Total e-waste generation	(ton/year)	N/A	1,103,570 [25]
Total cellphone e-waste generation, CW	(ton/year)	27,794 ***	2947 ***
Cellphone e-waste formally recycled in Mexico (based on 10.8% [25])	(ton/year)	N/A	316.85 ***
Field survey of cellphone waste formally recycled in Mexico (7%)	(ton/year)	N/A	301 +++
Percentage of cellphone waste in total e-waste	(%)	N/A	0.3 ***

*** Estimated data +++ Field data. Source: Prepared by the author based on [8,11,13,25,35].

3.1.3. Repair store Characterization

The field study of 66 repair stores in Mexico focused on finding the main differences between formality and informality in working conditions, environmental standards, and health and safety conditions, among others. The results indicated that the formal repair market competes against the informal market in an uneven manner, with large differences in safety standards, environmental standards, and basic conditions of the employees between the two.

Employees in the formal market have higher levels of academic achievement than those in the informal market (see Table 4 and Figure 3 for more details). In addition, formal stores have almost double or even triple the number of workers compared with informal stores, while the presence of child labor was confirmed in the informal stores, with the ages of those involved ranging from 8 to 15 years old.

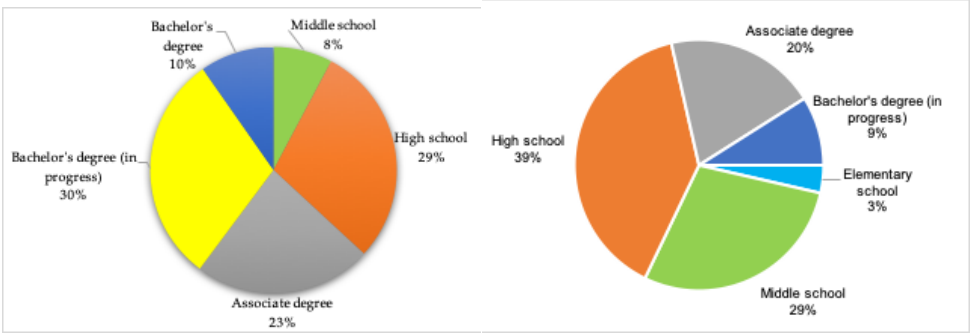
In terms of health and safety conditions, the formal repair stores fulfill the regulations of each municipality and the permits granted by the Civil Protection and Firefighters governmental office. Thus, formal stores have signage, smoke detectors, and fire extinguishers. By contrast, informal repair stores only partially fulfill these standards. The generation of e-waste is insignificant in both types of stores (in average less than 1 kilogram per year), with most components or electronic materials being reused. However, where e-waste is generated, it is

most likely to be thrown into the garbage in both types of stores (100% informal stores and 72% formal stores), 13% of formal stores donate, and 15% give it to recycling companies [8,9,25].

Table 4. Characteristics of formal and informal repairing stores in Mexico.

General Characteristics	Formal	Informal
Number of surveyed stores	33	33
Total number of employees	103	56
Percentage of child labor	0%	21%
Academic Level		
Elementary school	0	2
Middle school	8	16
High school	30	22
Associate degree	24	11
Bachelor's degree (in progress)	31	5
Bachelor's degree	10	0
Health and Safety Conditions		
First aid kit	67%	27%
Fire extinguishers	100%	52%
Smoke detectors	100%	18%
Safety signage	100%	42%

Source: Prepared by the authors based on fieldwork.



Formal Informal

Figure 3. Academic level of formal and informal employees of repair shops in Mexico, 2015 *Source*: prepared by the authors based on fieldwork.

3.2. Material Flow Analysis of Cellphone E-waste

The study of 80 cellphones in the field shows that the manual disassembly process was highly efficient (98 to 99%, see Table 5). The Huawei brand showed the highest efficiency for manual separation (99%), while all other brands had efficiencies of 98%. Separation time ranged from 3.24 to 4.22 minutes, with the Samsung brand requiring the shortest time for disassembly and the Blu brand requiring the longest. The weight of some components varied depending on the cellphone brand but most components had similar weights across all brands.

One of the most important components of cellphones is the PCB or motherboard. Studies worldwide have indicated that the PCB has the highest economic value and contains precious metals [8,14,26–29]. The field research showed that, on average, the PCB represented 9% of the total weight across the 80 cellphones analyzed, having the greatest weight in Huawei (16 grams), the lowest weight in Samsung (11 grams), and an intermediate weight in the remaining three brands (13 grams).

Table 5. Weight and efficiency of cellphone components obtained from manual disassembly.

Item	Cellphone Component	Average Weight of Cellphone Components [g]				
		Samsung (20 units)	Huawei (20 units)	Alcatel (15 units)	BLU (15 units)	ZTE (10 units)
1	Cover case	15.0	16.0	17.0	11.0	16.0
2	Speaker	2.0	1.0	1.4	2.0	2.0
3	Touch Pad	13.0	15.0	***	18.0	22.0
4	Display	21.0	20.0	33.0	21.0	24.0
5	Battery	42.0	35.0	44.0	30.0	44.0
6	Printed circuit board	11.0	16.0	13.0	13.0	13.0
7	Charging	5.0	5.0	6.0	5.0	1.0
8	Frontal camera	0.2	0.5	0.5	0.5	0.5
9	Rear camera	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
10	Horn	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
11	Buttons (home, vibrator)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
12	Audio	0.6	1.0	1.0	1.0	1.0
13	Case	18.0	20.0	18.0	20.0	16.0
14	SIM tray	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5
15	Other (screws, flexors, cables, buttons, plastics)	18.0	8.0	21.0	8.0	11.0
Initial weight (g)		150	140	160	133	155
Final weight (g)		147	138	156	130	152
Efficiency (%)		98	99	98	98	98
Disassembly time (min)		3.24	3.95	4.11	4.22	3.67

*** Touch pad attached to display. Source: Prepared by the authors based on field research.

The average percentage of materials that make up the printed circuit board (PCB) was also estimated from the literature. Table 6 shows the composition of the PCB, which contains 10 materials with high commercial value. Precious metals are present at concentrations of <0.1%, whereas there were higher concentrations of materials that provide structure to the PCB, such as copper (40.34%) and steel (3.5%). Other materials that are vital for the integration of all circuits in the PCB are also present at low concentrations, such as gallium (0.022%), which is a semiconductor metal that is used for the integrated network circuits, and neodymium, which is a rare earth that serves as a magnet [36]. The economic analysis presented next shows that although some of these elements are present at only small concentrations, they nonetheless have high commercial interest worldwide due to their unit cost. The PCB is the only component that is exported by most Mexican recycling facilities.

Table 6. Percentage of materials in the printed circuit boards (PCB's) of cellphones.

Item	Element	PCB (% by Weight)	Price (USD/ton)	Item	Element	PCB (% by Weight)	Price (USD/ton)
1	Copper	40.340	5490	6	Gold	0.0488	40,919,295
2	Tin	4.118	16,000	7	Silver	0.028	553,086
3	Steel	3.494	361	8	Gallium	0.022	317,000
4	Nickel	2.598	11,788	9	Neodymium	0.028	54,614
5	Titanium	0.350	55,556	10	Palladium	0.00564	24,395,944

Source: prepared by the authors based on [14,16,17,18,20,21,23,24].

3.3. Economic Impact of E-waste Materials in Printed Circuit Boards of Cellphones

The value of the materials that can be recovered from cellphone waste and are of commercial interest was calculated from the weight of each cellphone and its components. Table 7 shows the average percentage of materials contained in the PCB followed by the estimated cost per ton of each of these materials. The weight of each material was calculated from the cellphone waste generation calculated by SEMARNAT [9], Baldé et al. [13], and the field study of 12 recycling facilities for 2015.

Studies carried out by SEMARNAT indicated that 496.6 tons of PCBs were generated from cellphones in Mexico in 2015, representing 9% from 5,517.9 tons total e-waste, with an estimated total value of approximately $ 12.444 million USD. Similarly, values obtained from the studies conducted by the United Nations University [13], gave an estimated economic value of $ 11.277 million USD for Mexico. Finally, the field study conducted at 12 recycling facilities in the present study showed that 27 tons of PCBs were generated, equating to an estimated value of almost $ 676,596 USD for these companies.

Table 7. Economic value of materials in cellphone printed circuit boards in Mexico in 2015.

Item	Material	Composition	Market Price	Total Cellphones in Mexico				Formal Recycling in Mexico	
				Cellphones: 5517.9 ton/y (S)		Cellphones: 5000 ton/y (B)		Cellphones: 301 ton/y (F)	
				PCB: 496.6 ton/y (S)		PCB: 450 ton/y (B)		PCB: 27 ton/y (F)	
		(%) +++	(USD/ton) ***	W (ton/y)	Value (USD)	W (ton/y)	Value (USD)	W (ton/y)	Value (USD)
Metals									
1	Copper	40.340	5490	200.33	1,099,803	181.53	996,600	10.89	59,796
2	Nickel	2.598	11,788	12.90	152,085	11.69	137,814	0.70	8269
3	Steel	3.494	361	17.35	6264	15.72	5676	0.94	341
4	Tin	4.118	16,000	20.45	327,200	18.53	296,496	1.11	17,790
5	Titanium	0.350	55,556	1.74	96,562	1.58	87,501	0.09	5250
6	Gallium	0.022	317,000	0.11	34,633	0.10	31,383	0.01	1883
Precious Metals									
7	Palladium	0.006	24,395,944	0.030	726,902	0.027	658,690	0.002	39,521
8	Silver	0.028	553,086	0.139	76,906	0.126	69,689	0.008	4181
9	Gold	0.0488	40,919,295	0.243	9,916,415	0.221	8,985,877	0.013	539,153
Rare Earths									
10	Neodymium	0.028	54,614	0.139	7594	0.126	6881	0.008	413
	Total				12,444,362		11,276,607		676,596

S: SEMARNAT [9], B: Baldé et al. [13], F: Field study with 12 recycling facilities. +++ Estimated data from Table 6. *** Data from 2015. Source: Prepared by the authors based on fieldwork and literature [9,13].

3.4. Mass Analysis E-waste Materials in Cellphones

This section presents the results of the mass analysis of the materials that comprise cellphone waste, which used the e-waste generation data for 2015 provided by SEMARNAT [9] and the United Nations University [13], as a reference (1103.57 and 1000 kilotons, respectively). Studies carried out by Baldé et al. [13], indicated that only 0.5% of the total e-waste generated contained cellphone waste, giving weights of 5,517.9 and 5,000 ton in cellphones, respectively.

The data obtained in the present study from the field research in recycling facilities in Mexico was also used, which showed that the 12 companies recycled a total of 301 tons of cellphone waste. Focusing on the total e-waste generation from SEMARNAT [S], Baldé [B] and the fieldwork [F], each material was calculated based on the compilation of the cellphone composition from Kumar et al.[14], Zeng et al.[19], Ouguchi et al. [27], Yamane et al. [28] and Holgersson et al. [29]. For example: Aluminum with 2.35% of composition, represents 129.67 ton from the cellphone waste of SEMARNAT (5517.9 ton).

Cellphones are generally composed of 18 chemical elements and other materials that cannot be recovered, such as porcelains, flexors, plastic parts, and glue [13]. Table 8 presents the cellphone waste compositions that were determined by Baldé *et al*. [13] across 50 countries and the estimated weights of each element in cellphone

waste in Mexico based on the cellphone waste data calculated by SEMARNAT, Baldé et al., and the field research carried out at 12 Mexican recycling facilities in the present study [9,13].

The 18 elements that comprise cellphones were classified into metals, non-metals, precious metals, and rare earths. There were 11 elements in the metals category, among which copper had the highest representation (9.94%), followed by steel (9.74%), and cobalt (5%), while aluminum (2.35%), nickel (1.6%), zinc (0.4%), and lithium (0.35%) were present at lower levels. Precious metals, such as gold (0.02%), palladium (0.008%), and silver (0.24%), are mainly found in the PCBs and their recovery has great commercial importance. Rare earths, such as neodymium (0.04%) and praseodymium (0.0079%), serve as magnets in cellphones. Finally, plastic has the highest representation in cellphones (42.03%).

3.5. Interconnection of Research Results in the Context of Circular Economy

CE is normally represented by four loops: a) product-life extension, b) redistribution/reuse, c) remanufacturing (repair) and d) recycling [2]. The results shown in this section characterize the third (repair shops) and fourth loop (recycling facilities and material flow analysis) in order to assess their degree of development. In addition, the ultimate goal of CE is measured in terms of the associated environmental, economic and social impact [1,4]. On the one hand, the analysis of valuable materials in PCBs and cellphones provides a basis for appraisal of the economic and environmental impact of this type of e-waste. On the other hand, the survey of informal repair shows provides a unique look at the social impact of the remanufacturing loop. The following discussion section will provide more detail into all the aforementioned dimensions of CE.

Table 8. Weight estimation of the materials in cellphone e-waste in Mexico in 2015.

Item	Material	Cellphone Composition (%) ***	Weight of Materials in Cellphone Waste (Estimated Data) (ton/year)		
			Total E-waste in Mexico: 5517.9 ton/y (S)	Total E-waste in Mexico: 5000 ton/y (B)	Formal Recycling E-waste in Mexico 301 ton/y (F)
			Metals		
1	Aluminum	2.35	129.67	117.50	7.07
2	Cobalt	5.00	275.90	250.00	15.05
3	Copper	9.94	548.48	497.00	29.92
4	Indium	0.00006	0.003	0.003	0.00
5	Lead	0.004	0.22	0.20	0.01
6	Lithium	0.35	19.31	17.50	1.05
7	Nickel	1.6	88.29	80.00	4.82
8	Steel	9.74	537.44	487.00	29.32
9	Tantalum	0.018	0.99	0.90	0.05
10	Tungsten	0.31	17.11	15.50	0.93
11	Zinc	0.4	22.07	20.00	1.20
			Precious Metals		
12	Gold	0.02	1.10	1.00	0.06
13	Palladium	0.008	0.44	0.40	0.02
14	Silver	0.24	13.24	12.00	0.72
			Rare Earths		
15	Neodymium	0.04	2.21	2.00	0.12
16	Praseodymium	0.0079	0.44	0.40	0.02
			Non-metals		
17	Glass	3.8	209.68	190.00	11.44
18	Plastics	45.03	2484.71	2251.50	135.54
19	Other	21.15	1167.04	1057.50	63.66
	TOTAL	100	5518	5000	301

S: SEMARNAT [9], B: Baldé et al. [13], F: Field study with 12 recycling facilities, *** Hard data Baldé et al. [13].
Source: Prepared by the authors based on fieldwork and literature [9,13].

4. Discussion

4.1. Outlook of Repair and Recycling

The field study findings in regards to sources of e-waste in Mexico are consistent with that of Cucchiella et al. [37] who showed that the e-waste flow is primarily made up of household appliances. Similarly, the United Nations University determined that large equipment and cooling & freezing equipment have the represent the highest volume in the e-waste flow [13].

Furthermore, the reported finding that cellphone waste has one of the lowest representations at 7% (equivalent to 301 tons/year) is also consistent with the results of Baldé et al. [13], who confirmed that small and telecommunications equipment constitute the lowest proportion of e-waste flow. Given an estimation of cellphone e-waste in the order of $ 2633 tons/year, this outlook highlights the need for public policy incentives and further regulations in order to capture a higher proportion of cellphone e-waste through formal channels and therefore harness the potential economic benefits derived from valuable materials.

Fieldwork results in Mexico showed that recycling processes are basic, based on both manual operations and mechanical systems. This finding is consistent with studies by SEMARNAT [25], Cruz et al. [8], Ghosh et al. [12] and Kumar et al. [14], showing that recycling processes in Mexico and in emerging economies are elemental and simple, and do not include end-processing technologies. Similar work of Parajuly et al. [15] studied the processing techniques use on recycling companies in Europe, including medium and small recyclers used rudimentary tools and equipment, which pose significant health and safety risks to the workers. Nonetheless, the recovered material streams from manual disassembly are of high purity and cleanliness, and makes it possible to recover even small valuable components and material e-waste.

In this study, we found that informal repair shops compete in an inequitable way, compared to formal shops. However, informality was identified as a self-organized workforce that offers the customer similar quality of work, in less time and at a lower price. In Mexico, it is clear that consumers prefer the most economic and efficient solution disregarding if it is a formal or informal shop. Studies undertaken by Atlason et al. [38] and Perez-Belis et al. [39], and Nduneseokwu et al. [40], showed that consumers look for formal repair stores based on the type and quality of customer service but often prefer the most economic and efficient solution in terms of repair time and price, regardless of the academic level or working conditions of the people working there.

4.2. Material Flow Analysis of Cellphone E-waste

After material flow analysis, the fieldwork reported here confirmed that recycling companies in Mexico export all PCBs extracted from cellphones. These findings are congruent with those of Ghosh et al. [12], who defined the different routes of recycling and end-processing technologies by analyzing more than 150 articles and confirmed that few countries have this type of recovery technology and that these materials are generally shipped to Asian and European countries. Similarly, Cucchiella et al. [37] determined that Europe has unresolved issues related to recycling processes, particularly in regards to materials recover from PCB components, because of incorrect disassembly.

In order to justify the installation of this kind of end-processing technology for materials discovery in Mexico, there has to be a solid case in terms of return on investment. Further, the economic impact study and mass analysis provide some elements for such a business case.

4.3. Economic Impact of E-waste Materials in Printed Circuit Boards of Cellphones

Figure 3 shows the relative value of cellphone PCB materials, based on the field data presented in Table 7. For this type of e-waste, it is clear that the most significant opportunity in terms of end-processing technologies centers on recovery of gold (with 79.7% of the total value in cellphone PCB materials). In terms of materials value, 97.0% is given by potential local recovery of gold, copper, palladium and tin.

Although the market value of copper and tin is not nearly as high as that of gold and palladium ($ 40.9 and $ 24.4 million USD per ton respectively), the relatively large proportion of these metals in cellphone PCBs makes them attractive in terms of value. Therefore, potential investment in end-processing technologies for recovery should be focused on those chemical elements.

Yu et al. [11] showed that in China, the economic benefit of recycling 1 ton of cellphone waste per year was $ 10,860 USD, while Baldé et al. [13] determined that the economic value of gold, silver, and palladium in e-waste was $ 15.12 million USD per year in Latin America. Furthermore, Cucchiella et al. [37] suggested that the recovery of critical materials and precious metals (particularly gold) would generate half of the profits within a recycling economy.

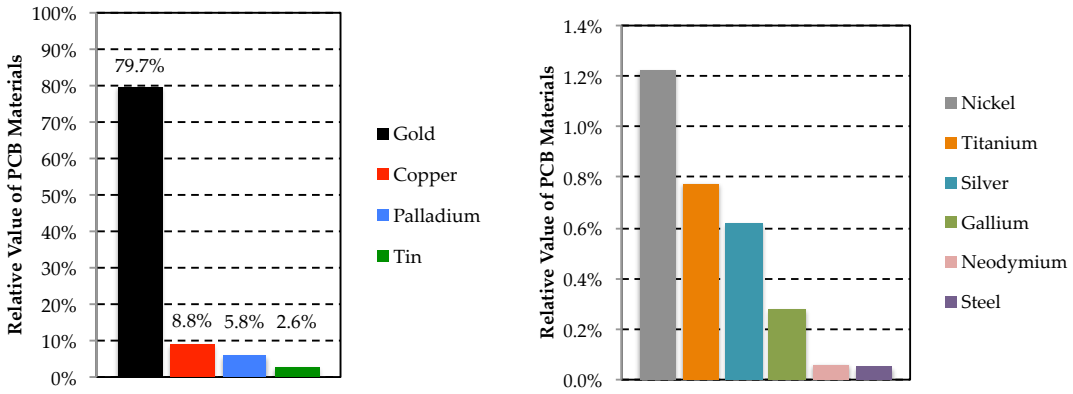


Figure 3. Relative value of cellphone PCB materials processed through formal channels in Mexico (source: based on filed data collected by authors and estimations reported in Table 8).

If e-waste is correctly recycled and the recovery of materials is carried out locally, there will be an immediate economic benefit to a country. Kumar et al. [14] explains that if electrical and electronic waste were recycled locally and efficiently, the recovery of materials in Europe such as gold, copper, silver, and palladium would be worth approximately $ 48 billion USD. Furthermore, Cucchiella et al. [37] concluded that such recycling of e-waste might generate income equivalent to $ 2.50 billion USD in 2015.

Based on the research reported here, we show that in Mexico there is a great potential for economic benefit from proper recycling and local processing of PCB materials from cellphones. Only an estimated value of $ 0.677 million USD in materials is recovered through formal means (see Table 7). However, the estimates show that the total value of cellphone PCB materials ranges between $ 11.277 and $ 12.444 million USD per year (see Table 7). These results highlight the importance of investing in end-processing technologies for materials recovery, as well as developing strategies for better and more efficient e-waste collection, preventing the informal channels and unsafe disposal from taking almost 90% of this e-waste. Furthermore, the analysis of the complete cellphone (as opposed to analyzing only the PCB), as shown before, highlights the significance of precious metals such as gold, palladium, lithium and nickel.

5. Conclusions

Circular economy is a relatively new concept for the electronic products sector in Mexico but has high potential for impact. There are limited investigations of e-waste in this country, so the present study provides useful and necessary insights for planning and establishing strategies that will benefit the society, environment, industry, and economy of Mexico. Some of these strategies should focus on improving the technological abilities of electronic waste recyclers, enhancing the repair and reuse of parts, as well as investing in end-processing technologies for materials recovery.

The material flow analysis indicates that Mexico captures a value of $ 0.679 million if materials for cellphone PCBs through formal recycling. The total value of these materials is estimated in the range of $ 12.485 million USD per year. Under these conditions, from the industry point of view, a proper case for return on

investment for end-processing technologies is difficult. Therefore, complete PCBs will probably continue to be exported, with the corresponding loss of national economic benefit.

On the other hand, the informal processing of cellphone e-waste provides another affordable channel for repair and reuse, with the associated reduction of environmental impact, advancing Mexico towards a circular economy model. However, this study has identified areas of improvement for the informal repair shops in terms of safety and compliance with labor regulations, especially in regard to working and health conditions for the workforce.

In terms of the circular economy paradigm, as related to e-waste of cellphones, our study shows some progress in terms of closing the loops of remanufacturing (repair) and material recycling. Therefore, we have addresses only 2 out the 4 loops involved in a complete CE scenario. Further research is necessary in order to look into the companies and their policies in terms of product design for extended use (related to the first loop of CE). Additional research is also envisioned regarding the social impact of informal repair shops. In this topic, there is much to discover given the fact that customers are satisfied with the service provided and this kind of repair shops also provides a source of employment.

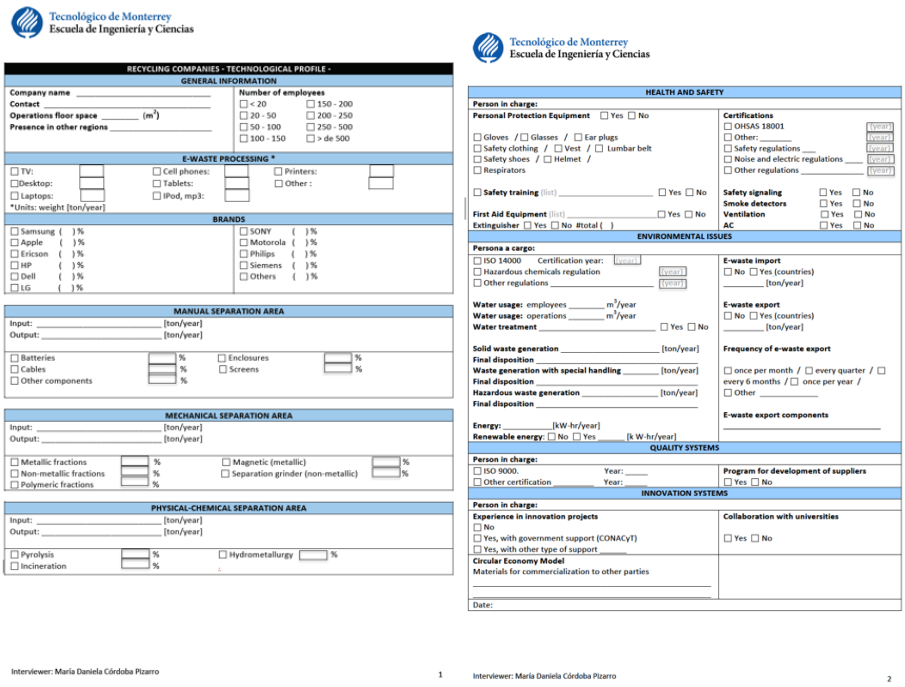
Author Contributions: Conceptualization, D.C.; Data curation, D.C.; Formal analysis, D.C.; Funding acquisition, C.A.R. and D.R.; Investigation, D.C.; Methodology, D.C., I.A., C.A.R. and D.R.; Project management, D.C., I.A., C.A.R. and D.R.; Supervision, D.C., I.A., C.A.R. and D.R; Validation, D.C., I.A., C.A.R. and D.R; Visualization, D.C.; Writing—original draft, D.C.; Writing—review and editing, D.C., I.A. and C.A.R.

Funding: Tecnologico de Monterrey supported this research through its research group in Advanced Manufacturing.

Acknowledgments: The authors would like to acknowledge the recycling facility Proambi (Indigo Proambiental S.A.P.I. de C.V.) of the Estado de Mexico. Its valuable technical team, particularly Mr. Salvador Álvarez and Ms. Alma García, supported and facilitated this investigation.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

Appendix


Tecnológico de Monterrey
Escuela de Ingeniería y Ciencias

RECYCLING COMPANIES - TECHNOLOGICAL PROFILE -

GENERAL INFORMATION

Company name
Contact
Operations floor space (m²)
Presence in other regions

Number of employees
☐ < 20 ☐ 20 - 50 ☐ 50 - 100 ☐ 100 - 150 ☐ 150 - 200 ☐ 200 - 250 ☐ 250 - 500 ☐ > de 500

E-WASTE PROCESSING *
☐ TV: ☐ Desktop: ☐ Laptops: ☐ Cell phones: ☐ Tablets: ☐ IPod, mp3: ☐ Printers: ☐ Other :
*Units: weight [ton/year]

BRANDS
☐ Samsung ( )% ☐ Apple ( )% ☐ Ericson ( )% ☐ HP ( )% ☐ Dell ( )% ☐ LG ( )%
☐ SONY ( )% ☐ Motorola ( )% ☐ Philips ( )% ☐ Siemens ( )% ☐ Others ( )%

MANUAL SEPARATION AREA
Input: [ton/year]
Output: [ton/year]
☐ Batteries % ☐ Cables % ☐ Other components % ☐ Enclosures % ☐ Screens %

MECHANICAL SEPARATION AREA
Input: [ton/year]
Output: [ton/year]
☐ Metallic fractions % ☐ Non-metallic fractions % ☐ Polymeric fractions % ☐ Magnetic (metallic) % ☐ Separation grinder (non-metallic) %

PHYSICAL-CHEMICAL SEPARATION AREA
Input: [ton/year]
Output: [ton/year]
☐ Pyrolysis % ☐ Incineration % ☐ Hydrometallurgy %

Interviewer: María Daniela Córdoba Pizarro 1

Tecnológico de Monterrey
Escuela de Ingeniería y Ciencias

HEALTH AND SAFETY
Person in charge:
Personal Protection Equipment ☐ Yes ☐ No
☐ Gloves / ☐ Glasses / ☐ Ear plugs
☐ Safety clothing / ☐ Vest / ☐ Lumbar belt
☐ Safety shoes / ☐ Helmet /
☐ Respirators
☐ Safety training (list) ☐ Yes ☐ No
First Aid Equipment (list) ☐ Yes ☐ No
Extinguisher ☐ Yes ☐ No #total ( )
Certifications
☐ OHSAS 18001 [year]
☐ Other: [year]
☐ Safety regulations [year]
☐ Noise and electric regulations [year]
☐ Other regulations [year]
Safety signaling ☐ Yes ☐ No
Smoke detectors ☐ Yes ☐ No
Ventilation ☐ Yes ☐ No
AC ☐ Yes ☐ No

ENVIRONMENTAL ISSUES
Persona a cargo:
☐ ISO 14000 Certification year: [year]
☐ Hazardous chemicals regulation [year]
☐ Other regulations [year]
Water usage: employees m³/year
Water usage: operations m³/year
Water treatment ☐ Yes ☐ No
Solid waste generation [ton/year]
Final disposition
Waste generation with special handling [ton/year]
Final disposition
Hazardous waste generation [ton/year]
Final disposition
Energy: [kW-hr/year]
Renewable energy: ☐ No ☐ Yes [k W-hr/year]
E-waste import
☐ No ☐ Yes (countries) [ton/year]
E-waste export
☐ No ☐ Yes (countries) [ton/year]
Frequency of e-waste export
☐ once per month / ☐ every quarter / ☐ every 6 months / ☐ once per year / ☐ Other
E-waste export components

QUALITY SYSTEMS
Person in charge:
☐ ISO 9000. Year:
☐ Other certification Year:
Program for development of suppliers
☐ Yes ☐ No

INNOVATION SYSTEMS
Person in charge:
Experience in innovation projects
☐ No
☐ Yes, with government support (CONACyT)
☐ Yes, with other type of support
Collaboration with universities
☐ Yes ☐ No
Circular Economy Model
Materials for commercialization to other parties
Date:

Interviewer: María Daniela Córdoba Pizarro 2

Figure A1. Questionnaire used for the survey of recycling companies.

Table A1. E-waste collection of electrical and electronic equipment by each recycling facility interviewed, 2015.

Company	Total E-waste	TV	Desktop Computer	Laptop Computer	Cellphone	Tablet	Others
	(ton/year)	Percentage (%) & Weight (ton/year)					
Small							
C2	60	6%	2%	2%	3%	0%	87%
		3.6	1.2	1.2	1.8	0	52.2
C4	96	24%	18%	15%	9%	2%	32%
		23.0	17.3	14.4	8.6	1.9	30.7
C5	60	17%	18%	12%	10%	5%	38%
		10.2	10.8	7.2	6.0	3.0	22.8
G3	72	20%	25%	17%	12%	1%	25%
		14.4	18.0	12.2	8.6	0.7	18
M2	84	4%	28%	21%	7%	1%	39%
		3.4	23.5	17.6	5.9	0.8	32.76
Medium							
G2	120	19%	30%	16%	9%	0%	26%
		22.8	36.0	19.2	10.8	0.0	31.2
G4	360	7%	18%	21%	4%	5%	45%
		25.2	64.8	75.6	14.4	18.0	162
Large							
C1	540	15%	24%	8%	6%	1%	46%
		81.0	129.6	43.2	32.4	5.4	248
C3	636	2%	18%	2%	2%	0%	76%
		12.7	114.5	12.7	12.7	0.0	483.36
C6	720	15%	17%	15%	6%	3%	44%
		108.0	122.4	108.0	43.2	21.6	316.8
G1	600	15%	16%	10%	10%	3%	46%
		90.0	96.0	60.0	60.0	18.0	276.0
M1	1140	20%	18%	10%	5%	3%	44%
		228.0	205.2	114.0	57.0	34.2	501.6
Total	4488	14%	19%	12%	7%	2%	46%
		622	839	485	261	104	2176

Source: prepared by the authors based on field work.

References

1. Korhonen, J.; Honkasalo, A.; Seppälä, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics* **2018**, *143*, 37–46. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041
2. Urbinati, A.; Chiaroni, D.; Chiesa, V. Towards a new taxonomy of circular economy business models. *Journal of Cleaner Production* **2017**, *168*, 487–498. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.047
3. Homrich, A. S.; Galvao, G.; Abadia, L. G.; Carvalho, M. M. The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. *Journal of Cleaner Production* **2018**, 175, 525-543.
4. Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling* **2017**, 127, 221–232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005
5. National Institute of Ecology (INE). Diagnosis on e-waste generation in Mexico (Diagnóstico sobre la generación de residuos electrónicos en México). Mexico, **2007**. http://www2.inecc.gob.mx/descargas/sqre/res_electronicos_borrador_final.pdf [access date: 3 May 2018]
6. National Institute of Ecology and Climate Change (INECC). Electronical and electronic waste in Mexico and the world. General Directorate of Research on Urban and Regional Pollution. (Los residuos electrónicos en México y el mundo. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional). Mexico, **2012**. https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf [access date: 21 May. 2018]

7. Alcántara-Concepción, V.; Gavilán-García, A.; Gavilán-García, I.C. Environmental impacts at the end of life of computers and their management alternatives in México. *J. Clean. Prod.* **2016**, 131, 615 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.125
8. Cruz, S.E.; Ojeda, S.; Jáuregui, J.; Velázquez, K.; Santillán, N.; García, R.; Alcántara, V.; Alcántara, C. E-Waste Supply Chain in Mexico: Challenges and Opportunities for Sustainable Management. *Sustainability* **2017**, 9, 503. https://doi.org/10.3390/su9040503.
9. Federal Ministry of Environment and Natural Resources (SEMARNAT). Inventory of E-waste generation in Mexico. National and state scale for Jalisco, Baja California, and Mexico City. (Inventario de generación de residuos electrónicos en México. Escala nacional y estatal para Jalisco, Baja California, y Ciudad de México). Mexico, **2017**. http://www.residuoscop.org/wp-content/uploads/2017/04/Resumen_-Ejecutivo_Inventario_RAEE_FINAL.pdf [access date: 4 May 2018].
10. Badiru F., Begianpuye D., Giwa A., Argungu S., Amen C. Material flow analysis of electronic wastes (e-Wastes) in Lagos, Nigeria. *J. Env. Prot.* **2013**, 4, 1011–1017. http://dx.doi.org/10.4236/jep.2013.49117.
11. Yu J., Williams E., Meiting J. Analysis of material and energy consumption of mobile phones in China. *J. Ener. Pol,* **2010** 38, 4135–4141. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.03.041
12. Ghosh, B., Ghosh, M.K., Parhi, P., Mukherjee, P.S., Mishra, B.K. Waste Printed Circuit Boards recycling: an extensive assessment of current status. *J. Clean. Prod.* **2015**, 94, 5–19. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.024.
13. Baldé, CP., Kuehr, R., Blumenthal, K., Fondeur G., Kern, M., Micheli, P., Magpantay E., Huisman, J. E-waste statistics - Guidelines on classification, reporting and indicators. United Nations University, IAS - SCYCLE, Bonn (Germany), **2015**, 51 pages. http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/partnership/E-waste_Guidelines_Partnership_2015.pdf [access date: 5 May 2018].
14. Kumar, A., Holuszko, M., Espinosa, D. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *J. Res. Cons. Recyc.* **2017**, 122, 32–42. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.018.
15. Parajuly, K., Wenzel, H. Product Family Approach in E-Waste Management- A Conceptual Framework for Circular Economy. *Sustainability* **2017**, 9 (5), 768; https://doi.org/10.3390/su9050768.
16. Navazo, V., J.M., Villalba Méndez, G. & Talens Peiró, L. Int J Life Cycle Assess. **2014.** 19: 567. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0653-6.
17. Turner, A., Williams, I., Kemp, S. Combined material flow analysis and life cycle assessment as a support tool for solid waste management decision making. J Clean Prod **2016** http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.077.
18. Guilherme, M., Cherubini, E., Soares, S. How Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) is aiding Life Cycle Assessment (LCA) in results interpretation. J. Clean Prod. **2018**, Vol 172, Pp. 609-622 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.230
19. Zeng, X., Song, Q., Li J., Yuan, W., Duan, H., Liu, L. 2014. Solving e-waste problem using an integrated mobile recycling plant. *J. Clean. Prod.* **2014** 90, 55–59. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.026
20. Kiddee, P., Naidu, R., Wong, M. Electronic waste management approaches: An overview. J. Waste Mang, **2013**, Vol 33,, Pp. 1237-1250. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.006
21. Khan, M. Polluter-Pays-Principle: The Cardinal Instrument for Addressing Climate Change. J. Laws **2015**, Vol 4, Pp. 638–653; https://doi:10.3390/laws4030638

22. Gough, M. Australian Laws Lag on Electronic Waste Management, **2016**, from http://newsroom.unsw.edu.au/news/science-tech/australian-laws-lag-electronic-waste-management [access date: 2 Feb. 2019]
23. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Material case study 1: critical metals and mobile devices—working document. In: Sustainable metals management. **2010**. OECD, Mechelen. http://www.oecd.org/env/resourceproductivityandwaste/46132634.pdf [access date: 30 Jan. 2019]
24. Garlapati, V.K., E-waste in India and developed countries: management,recycling, business and biotechnological initiatives. J. Renew. Sustain. EnergyRev. **2016**. 54, 874–881, http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.106.
25. Federal Ministry of Environment and Natural Resources (SEMARNAT). Characterization of the formal and informal e-waste recycling industry in Mexico. (Caracterización de la industria formal e informal del reciclaje de residuos electrónicos en México). Mexico, **2017**. http://www.residuoscop.org/wp-content/uploads/2017/04/Caracterización_de_la-Industria_Formal_e_Informal_del_Reciclaje_de_RAEE_en_México_FINAL_feb.pdf [access date: 4 May 2018].
26. Ogunniyi, I.O., Vermaak, M.K.G., Groot, D.R. Chemical composition and liberation characterization of printed circuit board comminution fines for beneficiation investigations. *J. Waste Manag*, **2009**, 29, 2140–2146. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.004.
27. Oguchi M, Murakami S, Sakanakura H, Kida A, Kameya T. A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. *J. Waste Manag.*, **2011**, 2150–-2160. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.009.
28. Yamane, L.H., De Moraes, V.T., Espinosa, D.C.R., Tenório, J.A.S. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile. *J. Waste Manag.* **2011** 31, 2553–2558. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.006
29. Holgersson S., Britt-Marie S., Björkman M., Cullbrand K. Analysis of the metal content of small-size Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE) printed circuit boards—part 1: Internet routers, mobile phones and smartphones. *J. Res. Cons. Recyc.* **2017**, 133, 300—308. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.011.
30. Kitco 2018 Estrategic metals. https://www.kitco.com/strategic-metals/ [access date: 25 Aug. 2018].
31. Trading Economics. Commodities prices–Spot–Futures. Historical data 2015, **2018**. https://tradingeconomics.com/commodity [access date: 28 Aug. 2018].
32. Integral System on Mining Economics of Mexico. International price of metals, **2018**. https://www.sgm.gob.mx/SINEMGobMx/precio_metales.jsp [access date: 1 Sep 2018].
33. Namias, J. The Future of Electronic Waste Recycling in the United States: Obstacles and Domestic Solutions (Ph.D. thesis). Columbia University, New York, United States. http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/newwtert/Research/sofos/Namias_Thesis_07-08-13.pdf **2013** [access date: 27 Jul. 2018].
34. Barletta, I.; Larborn, J.; Mani, M.; Johannson, B. Decision Making for Sustainable Electronic Waste Management Systems: Automatic Sorting Technology. *Sustainability* **2016**, *8*(1), 84; https://doi.org/10.3390/su8010084
35. World Bank. Gross Domestic Product of China and Mexico, Washington, D.C. 2018 https://datos.bancomundial.org/?locations=CN-MX [access date: 11 Jun. 2018]

36. Chancerel, P., Meskers, C.E.M., Hagelüken, C., Rotter, V.S. Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. *J. Indus. Ecol.* **2009**, 13, 791–810. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00171.x
37. Cucchiella, F., D'Adamo, I., Lenny Koh, S.C., Rosa, P. Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *J. Renew. Sust. Ener.* **2015,** 51, 263–272. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.010.
38. Atlason, R., Giacalone, D., Parajuly, K. Product design in the circular economy: Users' perception of end-of-life scenarios for electrical and electronic appliances. *J Clean. Prod.* **2017** 168, 1059–1069. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.082.
39. Perez-Belis, V., Braulio-Gonzalo, M., Bove, M. Consumer attitude towards the repair and the second-hand purchase of small household electrical and electronic equipment. A Spanish case study. *J. Clean. Prod.*, 2017, 158, 261–275. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.143
40. Nduneseokwu, C.K.; Qu, Y.; Appolloni, A. Factors Influencing Consumers' Intentions to Participate in a Formal E-Waste Collection System: A Case Study of Onitsha, Nigeria. *Sustainability* **2017**, 9, 881; https://doi.org/10.3390/su9060881

© 2019 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Curriculum Vitae

María Daniela Córdova Pizarro, nacida en Quito-Ecuador el 11 de enero de 1986. Ingeniera en Biotecnología por la Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador, en el año 2009. Tiene experiencia en la industria de productos electrónicos, petróleo y minería; ha desarrollado proyectos ambientales, de biorremediación, sostenibilidad y economía circular. En el año 2013 realizó su Maestría en Desarrollo Sostenible en el Tecnológico de Monterrey, donde tuvo la oportunidad de asesorar a una de las empresas mineras más grande de México para implementar indicadores de sostenibilidad en todos sus procesos. Finalizada su maestría regresó a trabajar en Ecuador como consultora en sostenibilidad, pero a los pocos meses fue acreedora de una beca doctoral por el Tecnológico de Monterrey y una de las mejores empresas de electrónicos a nivel mundial, para investigar un nuevo proyecto de innovación ambiental y economía circular. Su vida académica ha ido de la mano con su trabajo profesional y ha tenido la oportunidad de asesorar, en el área de legislación y políticas públicas, a países como México, Ecuador y Perú formando parte de grupos de análisis para el desarrollo de nuevas leyes en tema de residuos, reciclaje, sostenibilidad y economía circular.

Este documento fue editado en Word de Microsoft en su totalidad por María Daniela Córdova