



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de los impactos ambientales asociados a la implementación de los planes posconsumo en Colombia

Juliana Vera Méndez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Bogotá, Colombia

2018

Análisis de los impactos ambientales asociados a la implementación de los planes posconsumo en Colombia

Juliana Vera Méndez

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Ambiental

Director:

MSc. Ingeniero Oscar Javier Suarez Medina

Línea de Investigación:

Manejo integral de residuos sólidos peligrosos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería

Bogotá, Colombia

2018

Resumen

La identificación de contaminantes persistentes, en residuos de pilas y luminarias es de gran importancia, ya que cuando no son aprovechados o dispuestos correctamente, pueden causar la contaminación de fuentes hídricas y/o afectaciones a la salud humana. A partir de información secundaria, se evidencia la presencia de cadmio, mercurio, plomo y arsénico en los residuos de estos productos. En consecuencia, se presentan los impactos ambientales asociados con la gestión inadecuada de estos residuos, y las tecnologías actuales utilizadas para su gestión. Además, se precisa la cantidad de contaminantes potenciales que van al ambiente generando impactos ambientales negativos. De este modo, y por colocar un ejemplo, se determinó tomando como base el contenido de contaminante en cada caso y el referente de límite de vertimiento del mismo, relacionado en la Resolución 631 de 2015 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS, que en una tonelada de pilas Zn-C contamina 2.900 m³ de agua, así como, una tonelada de luminarias vapor mercurio contamina 4.252 m³ de agua, lo que revela la necesidad de controlar la disposición de residuos mediante planes de gestión.

Palabras clave: Pilas, luminarias, posconsumo, impacto ambiental.

Abstract

Recognizing battery residue and light bulb pollutants are of great importance. When not used or disposed of properly, they can contaminate water sources and harm human health. Secondary sources have reported the presence of cadmium, mercury, lead, and arsenic in the residues of these products. Consequently, inadequate management of these wastes and handling of these products has negative environmental impacts. Moreover, the precise amount of each contaminant required to negatively impact the environment has been determined. In 2015, the Ministry of Environment and Sustainable Development – MADS performed an extensive case review and published their findings as Resolution 631. This report noted that one ton of Zn-C batteries could contaminate 2,900 m³ of water. In addition to this, the mercury vapor of one ton of light bulbs could contaminate 4,252 m³ of water, revealing the need to control disposal of waste through management plans.

Keywords: Batteries, lighting, post-consumption, environmental impact.

Contenido

1. Capítulo 1: Pilas Y Acumuladores.....	7
Caracterización.....	9
1.1.1 Pilas primarias	9
1.1.2 Pilas secundarias o acumuladores.....	19
1.1.3 Nomenclatura y tiempo de vida útil	26
1.1.4 Dimensiones y peso	29
1.1.5 Marco normativo del sector posconsumo de pilas.....	30
1.1.6 Impactos al ambiente y a la salud humana	33
1.1.7 Impactos al agua y al suelo	38
1.1.8 Gases de Efecto Invernadero (GEI)	43
1.1.9 Impactos a la salud humana	48
1.1.10 Infografía	51
2. Lámparas y luminarias.....	53
Caracterización.....	54
2.1.1 Lámparas incandescentes	55
2.1.2 Lámparas luminiscentes	57
2.1.3 Diodos emisores de luz (led, oled o lep).	67
2.1.4 Tiempo de vida útil.....	68
Marco normativo del sector posconsumo de luminarias.....	68
Impactos al ambiente y a la salud.....	72
2.1.5 Impactos al agua y al suelo	77
2.1.6 Gases de Efecto Invernadero (GEI)	79
2.1.7 Impactos a la salud humana	83
2.1.8 Infografía	85
3. Gestión de residuos posconsumo	91
Estudio de caso pilas	99
Estudio de caso de luminarias	105
Alternativas de aprovechamiento	111
4. Conclusiones y recomendaciones.....	117
Conclusiones	117
Recomendaciones	119
5. ANEXOS.....	131
Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores	131
Anexo B: Composiciones de lámparas.....	145
Anexo C: Gases de efecto invernadero.....	157
Anexo D: Impactos pilas y luminarias	163

Lista de Ilustraciones

	Pág.
Ilustración 1: Estructura general de una pila primaria.....	7
Ilustración 2: Avances en el desarrollo de pilas primarias.....	10
Ilustración 3: Avances en el desempeño de las baterías portátiles recargables.....	20
Ilustración 4: Toneladas recolectadas de pilas y/o acumuladores	37
Ilustración 5: Proceso de producción de hierro y acero	45
Ilustración 6: Infografía pilas Zn-C.....	51
Ilustración 7: Infografía pilas alcalinas	52
Ilustración 8: Diagrama de lámparas alimentadas por electricidad	54
Ilustración 9: Partes de una lámpara incandescente.....	55
Ilustración 10: Bombilla ESL.....	57
Ilustración 11: Lámpara de vapor de mercurio de alta presión.....	59
Ilustración 12: Lámpara de halogenuros metálicos.....	61
Ilustración 13: Toneladas recolectadas de bombillas.....	77
Ilustración 14: Proceso de producción del vidrio.....	81
Ilustración 15: Infografía luminarias vapor mercurio	85
Ilustración 16: Infografía luminaria HID.....	86
Ilustración 17: Infografía luminarias vapor sodio.....	87
Ilustración 18: Infografía luminarias fluorescentes compactas tubulares	88
Ilustración 19: Infografía fluorescente compacta integral	89
Ilustración 20: Toneladas recolectadas de pilas y luminarias.....	97
Ilustración 21: Cantidad de residuos aprovechados por Lúmina.....	110
Ilustración 22: Aprovechamiento de residuos con mercurio.....	112
Ilustración 23: Aprovechamiento de residuos de pilas alcalinas y salinas.....	114

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 0-1: Planes Posconsumo y sus respectivas resoluciones.....	5
Tabla 1-1: Nomenclatura para las pilas primarias.....	27
Tabla 1-2: Mínima duración media para pilas cilíndricas primarias.....	29
Tabla 1-3: Diámetro y altura de las pilas cilíndricas y de botón.....	29
Tabla 1-4: Peso promedio para pilas según tamaño.....	30
Tabla 1-5: Niveles máximos permisibles de mercurio, cadmio y plomo.....	31
Tabla 1-6: Subpartidas de los elementos contemplados en la Resolución de 1297 de 2010, con sus descripciones.....	32
Tabla 1-7: Estimación de desechos de pilas alcalinas en Colombia para el periodo 2013-2017.....	34
Tabla 1-8: Estimación de desechos de pilas Zn-C en Colombia para el periodo 2013-2017.....	34
Tabla 1-9: Cantidades en kg. de elementos que se desechan por 1 tonelada de pilas primarias.....	36
Tabla 1-10: Cantidades en kg. de elementos que se desechan por 1 tonelada de pilas secundarias.....	36
Tabla 1-11: Solubilidades del mercurio, plomo, cadmio y arsénico.....	39
Tabla 1-12: Coeficiente de absorción del suelo para mercurio, plomo, cadmio y arsénico.....	42
Tabla 1-13: PEG para metano y PFC.....	44
Tabla 1-14: Emisiones de Ton CO ₂ eq por tonelada de pilas primarias.....	47
Tabla 1-15: Emisiones de Ton CO ₂ eq por tonelada de pilas secundarias.....	47
Tabla 1-16: Límites para vertimientos en el tratamiento y disposición de residuos.....	50
Tabla 2-1: Potencia y eficacia luminosa permitida en Colombia, para las lámparas de vapor de mercurio de alta presión.....	60
Tabla 2-2: Valores mínimos de eficacia lumínica en bombillas de vapor de sodio.....	63
Tabla 2-3: Máximos contenidos permitidos de mercurio en lámparas fluorescentes.....	64
Tabla 2-4: Valores mínimos de eficacia lumínica en tubos fluorescentes.....	65
Tabla 2-5: Eficacia mínima bombillas fluorescentes compactas con balasto independiente.....	66
Tabla 2-6: Eficacia mínima bombillas fluorescentes compactas integrales.....	66
Tabla 2-7: Tiempo mínimo de vida útil y peso promedio de las luminarias.....	68

Tabla 2-8: Sub partidas de los elementos contemplados en la Resolución de 1511 de 2010, con sus descripciones	72
Tabla 2-9: Estimación de desechos de luminarias en Colombia para el periodo 2013-2016	73
Tabla 2-10: Duración y fallo de los diferentes tipos de lámparas según el modelo M.....	74
Tabla 2-11: Cantidades dispuestas en el ambiente para una tonelada de lámparas incandescentes, de vapor de mercurio de alta presión, de halogenuros metálicos y de vapor de sodio de alta presión (Kg.)	75
Tabla 2-12: Material dispuesto en el ambiente por cámara de amalgama o mercurio para una tonelada de lámparas de alta presión vapor de mercurio, de vapor de sodio y de halogenuros metálicos (Kg.)	75
Tabla 2-13: Cantidades dispuestas en el ambiente para lámparas fluorescentes tubulares, compactas y lámparas de inducción (Kg.)	76
Tabla 2-14: Cantidad en gramos de metales pesados para una tonelada de lámparas incandescentes, de vapor de mercurio de alta presión, de halogenuros metálicos y de vapor de sodio de alta presión.....	78
Tabla 2-15: Cantidad en gramos de metales pesados por tonelada de lámparas fluorescentes tubulares, compactas y lámparas de inducción	79
Tabla 2-16: Emisiones de GEI por metales para cada tonelada de bombillas	80
Tabla 2-17: Emisiones de CO ₂ eq por tonelada de vidrio producido para Colombia.....	82
Tabla 2-18: Emisiones totales de CO ₂ eq por tonelada producida de cada tipo de lámpara	82
Tabla 3-1: Listado de gestores de residuos peligrosos	91
Tabla 3-2: SRS para pilas en Colombia.....	94
Tabla 3-3: SRS para luminarias en Colombia.....	96
Tabla 3-4: Consideraciones para el cálculo de metas	101
Tabla 3-5: Metas de recolección y cumplimiento Recopila	102
Tabla 3-6: Empresas parte del SRS Pilas con el Ambiente en 2012	102
Tabla 3-7: Cantidades puestas en el mercado por el Colectivo Pilas con el Ambiente..	104
Tabla 3-8: Consideraciones para el cálculo de metas	106
Tabla 3-9: Empresas parte del SRS Lúmina	107
Tabla 5-1: Composición pila Zn-C Energizer.....	131
Tabla 5-2: Porcentaje en peso para pilas Zn-C.....	132
Tabla 5-3: Contenido de metales pesados en pilas Zn-C.....	132
Tabla 5-4: Contenido de metales pesados en ánodo y cátodo de pilas Zn-C.....	132
Tabla 5-5: Composición pila alcalina Duracell.....	133
Tabla 5-6: Composición pila alcalina cilíndrica Energizer.....	133
Tabla 5-7: Composición pila alcalina botón Energizer.....	134
Tabla 5-8: Porcentaje en peso para pilas alcalinas.....	134
Tabla 5-9: Contenido de metales pesados en pilas alcalinas.....	134
Tabla 5-10: Contenido de metales pesados en ánodo y cátodo de pilas alcalinas.....	135
Tabla 5-11: Composición pila óxido de mercurio botón.....	135
Tabla 5-12: Composición pila óxido de plata botón.....	136
Tabla 5-13: Composición pilas óxido de plata marca Duracell.....	136

Tabla 5-14: Composición pilas de litio Panasonic.....	137
Tabla 5-15: Composición pilas de litio Energizer.	137
Tabla 5-16: Metales pesados presentes en pilas primarias de litio.	138
Tabla 5-17: Composición pilas de zinc-aire marca Energizer.	138
Tabla 5-18: Composición pilas de zinc-aire marca Rayovac.....	139
Tabla 5-19: Composición pilas de níquel-cadmio marca SBS.....	139
Tabla 5-20: Composición pilas de níquel-cadmio marca Motorola Solutions Inc.....	140
Tabla 5-21: Composición pilas de litio marca Panasonic.	140
Tabla 5-22: Composición pilas de ion litio marca CiYi.	141
Tabla 5-23: Datos pilas de níquel-hierro marca CiYi.....	142
Tabla 5-24: Composición pilas de níquel - hidruro metálico marca GP.....	143
Tabla 5-25: Composición pilas de níquel-hidruro metálico marca Energizer.....	144
Tabla 5-26: Composición de lámparas incandescentes.....	145
Tabla 5-27: Porcentaje para residuos de lámparas incandescentes.....	145
Tabla 5-28: Datos de metales pesados para lámparas incandescentes.	146
Tabla 5-29: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas incandescentes	146
Tabla 5-30: Composiciones de los residuos de lámparas vapor de mercurio.....	146
Tabla 5-31: Datos de metales pesados para lámparas de vapor de mercurio	147
Tabla 5-32: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas de vapor de mercurio.....	147
Tabla 5-33: Composiciones de los residuos de lámparas de halogenuro metálico	147
Tabla 5-34: Datos de metales pesados para lámparas de halogenuro metálico	148
Tabla 5-35: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas de halogenuro metálico	148
Tabla 5-36: Composiciones de los residuos de lámparas vapor de sodio.....	148
Tabla 5-37: Datos de metales pesados para lámparas de halogenuro metálico.	149
Tabla 5-38: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas de vapor de sodio.....	149
Tabla 5-39: Composición de lámparas fluorescentes.	149
Tabla 5-40: Composiciones de los residuos de lámparas fluorescentes tubulares T8. .	149
Tabla 5-41: Composiciones de los residuos de lámparas fluorescentes tubulares T12.	150
Tabla 5-42: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas fluorescentes tubulares.....	150
Tabla 5-43: Composición de lámparas fluorescentes compactas.	151
Tabla 5-44: Composiciones de los residuos de lámparas fluorescentes compactas no integrales	151
Tabla 5-45: Composiciones de los residuos de lámparas fluorescentes compactas.	152
Tabla 5-46: Datos de metales pesados para lámparas fluorescentes compactas no integrales.....	152
Tabla 5-47: Datos de metales pesados para lámparas fluorescentes compactas integrales.....	152

Tabla 5-48: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas fluorescentes compactas no integrales.....	153
Tabla 5-49: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas fluorescentes compactas integrales.....	153
Tabla 5-50: Composiciones de las lámparas de inducción.....	154
Tabla 5-51: Composición de lámparas LED.....	155
Tabla 5-52: Factores de emisión de CO ₂ para la producción de acero.....	157
Tabla 5-53: Factores de emisión para la producción de hierro.....	158
Tabla 5-54: Factores de emisión de CO ₂ para la producción de aluminio.....	159
Tabla 5-55: Factores de emisión de PCF para la producción de aluminio.....	159
Tabla 5-56: Factores de emisión de CO ₂ para la producción de zinc.	160
Tabla 5-57: Resultados para pilas Zn-C	163
Tabla 5-58: Resultados para pilas alcalinas	164
Tabla 5-59: Resultados para pilas óxido de plata -zinc.....	165
Tabla 5-60: Resultados para pilas de litio	166
Tabla 5-61: Resultados para pilas de zinc-aire	167
Tabla 5-62: Resultados para bombillas incandescentes	168
Tabla 5-63: Resultados para bombillas de vapor de mercurio de alta presión	169
Tabla 5-64: Resultados para bombillas de halogenuros metálicos.....	170
Tabla 5-65: Resultados para bombillas de vapor de sodio de alta presión.....	171
Tabla 5-66: Resultados para bombillas fluorescentes tubulares	172
Tabla 5-67: Resultados para bombillas fluorescentes compactas	173

Objetivos

Objetivo general.

Determinar por medio de información secundaria los impactos ambientales asociados a las corrientes posconsumo de pilas, acumuladores y luminarias; y evaluar con base en un valor unitario, los impactos ambientales que se han evitado a partir de la implementación de los programas de gestión de residuos Posconsumo en Colombia.

Objetivos específicos.

1. Definir, partiendo de información secundaria, los impactos ambientales que se generan a partir de la gestión ambiental inadecuada de los residuos de pilas, acumuladores y luminarias.
2. Evaluar con base en un valor unitario, los impactos ambientales que se han evitado a partir de la implementación de estos programas posconsumo en Colombia.
3. Determinar los avances tecnológicos alcanzados en el país con la puesta en marcha de los programas posconsumo de pilas y luminarias.
4. Actualizar la información de la gestión de residuos posconsumo, partiendo del estudio de caso de los planes posconsumo más representativos.

Introducción

Los residuos sólidos se definen en Colombia¹ como “cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final”. Adicionalmente, desde la expedición de la reglamentación para el servicio público de aseo² en 2013, “se considera como residuo sólido, aquel proveniente del barrido y limpieza de áreas y vías públicas, corte de césped y poda de árboles. Los residuos sólidos que no tienen características de peligrosidad se dividen en aprovechables y no aprovechables”.

Partiendo de esta definición, la gestión integral de residuos sólidos (GIRS) se define como³ la administración y manejo de estos residuos de forma compatible con el medio ambiente considerando todas las actividades asociadas a los diversos flujos de residuos. La GIRS en Colombia se abordó para el sector industrial desde la Política Nacional de Producción Limpia en 1997 y se consolidó a partir de la creación de la Política para la Gestión Integral de Residuos en 1998 y la Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos en 2005.

Inicialmente, en la Política de producción limpia, se analizaron los instrumentos políticos y económicos para motivar la minimización de residuos. Posteriormente, en la Política para la Gestión Integral de Residuos y en la Política Ambiental para la Gestión Integral de

¹ Decreto 1713 de 2002 expedido por el Ministerio de ambiente. Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.

² Decreto 2981 de 2013 expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo.

³ Política para la Gestión Integral de Residuos.

Residuos o Desechos Peligrosos, se analizó el potencial de utilización de los residuos y se introdujeron algunos elementos conceptuales de la gestión integrada de residuos sólidos como la separación en la fuente, denominada en las Políticas como gestión diferenciada de residuos aprovechables y el establecimiento de responsabilidades en la gestión de dichos residuos.

En estas políticas se establece que para lograr una gestión adecuada de los residuos es necesario considerar una serie de etapas organizadas jerárquicamente: minimización en el origen, aprovechamiento y valorización, tratamiento y como última medida, disposición final. Para esto, es fundamental la caracterización de los residuos, ya que es necesario distinguir en tres categorías principales: residuo aprovechable, no aprovechable o residuo peligroso (RESPEL). La importancia de esta caracterización radica en que, cada uno de ellos tiene una gestión y un manejo de la responsabilidad diferente.

Para la segregación de los residuos, se estableció en la Política y en el Decreto 1713 de 2002 que la basura es el material, de los productos desechados, que no es aprovechado y por lo tanto no se retorna al ciclo económico. Por otra parte, los residuos aprovechables pueden pasar por un procesamiento para obtener un producto o subproducto con un valor comercial. Este aprovechamiento, como lo define el Decreto 1713, puede realizarse cuando es económicamente viable, técnicamente factible y ambientalmente conveniente.

Por su parte, los RESPEL, son aquellos residuos que por sus características intrínsecas (Corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, características patógeno-infecciosas o radiactividad) pueden causar riesgo o daño para la salud y/o el ambiente, de acuerdo con la legislación colombiana⁴, también se consideran RESPEL los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos.

Los planes posconsumo y los sistemas de recolección selectiva (SRS), son instrumentos de gestión ambiental enfocados principalmente a las etapas de tratamiento, reciclaje y disposición final de residuos que cumplan con ciertas características: residuos producidos

⁴ Decreto 4741 de 2005 expedido por el MADTV. por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.

por actividades de consumo masivo que cuentan con un alto volumen de generación, residuos que contienen sustancias peligrosas de interés ambiental o sanitario así sea en concentraciones pequeñas, componentes con poder de aprovechamiento y/o valorización, residuos con alto riesgo ambiental o sanitario para la sociedad, o residuos sobre los cuales los consumidores han manifestado una preocupación especial⁵.

Los planes devolución de productos posconsumo son fundamentales para la gestión diferenciada de estos ya que le asignan la responsabilidad de la gestión al productor, constituyéndose como una pieza clave para el control y manejo ambiental al contener los requisitos y condiciones para asegurar el cierre del ciclo de vida del producto. Adicionalmente, para los bienes que son producidos con sustancias químicas con características peligrosas, como es el caso del presente estudio: pilas, acumuladores y luminarias; insta a los productores a realizar la sustitución de dichas sustancias, por otras amigables con el ambiente. Así mismo, induce al uso de materiales reutilizables o reciclables, logrando salir de la gestión de residuo peligroso; y a la investigación y desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de estos materiales, obteniendo una mayor eficacia en su recuperación.

La gestión posconsumo inicia en los puntos de recolección, ubicados de tal forma que no generen costos ni obligación de compra de un nuevo elemento, y termina con diferentes alternativas de aprovechamiento. Por medio de estos sistemas de recolección, se busca disminuir los desechos y aumentar el uso de los residuos sólidos, partiendo de que, los productores, importadores y distribuidores brindan a los consumidores la información y las herramientas necesarias para devolver los diferentes elementos considerados en los planes.

Partiendo de lo anterior, la implementación de los SRS busca generar varios impactos positivos: la conservación de los recursos naturales al reducir la demanda de materias primas, la disminución en el consumo de energía, de vertimientos y de emisión de gases de efecto invernadero – GEI; derivando en el aumento en la vida útil de los rellenos sanitarios y celdas de seguridad y en la disminución de descargas de materiales peligrosos

⁵ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Normatividad sobre residuos posconsumo. Retos actuales y futuros.

al agua, aire y suelo. Adicionalmente, se busca incrementar la conciencia ambiental de productores e importadores, al responsabilizarse de la gestión de dichos residuos; así como la de los consumidores, al incluirlos dentro de dichos sistemas.

Al analizar el panorama regional, se evidencia que Colombia está muy adelantada en la normatividad e implementación de programas posconsumo⁶, como consecuencia de que en el país los sistemas de retorno de residuos llevaban varios años funcionando. En este contexto, los SRS se presentaron, como un marco normativo que sirve para garantizar que durante toda la gestión de residuos, se tomen las medidas necesarias para la mitigación de impactos ambientales, y a la salud, sin dejar de lado la oportunidad de negocio que puede generar la gestión de residuos.

Actualmente en Colombia existen siete corrientes de residuos, que deben cumplir con sus respectivos SRS, estos son: *envases de plaguicidas, medicamentos vencidos, baterías plomo-ácido, pilas y/o acumuladores, llantas usadas, bombillas usadas, computadores y periféricos*. Salvo por el caso de las llantas usadas, que fueron escogidas por su alto volumen, las corrientes de residuos posconsumo se escogieron por sus características intrínsecas de peligrosidad, que al estar acompañadas de una gestión inadecuada generan una serie de impactos negativos al medio ambiente y/o a la salud humana.

Dentro de las corrientes de residuos, destacan los producidos por lámparas y pilas, ya que ambas corrientes de residuos presentan características de toxicidad por metales pesados, principalmente mercurio y plomo, y la implementación de sus respectivos planes posconsumo, originó avances tecnológicos para la gestión, tratamiento y aprovechamiento de los mismos. En la Tabla 0-1, se muestran los valores mínimos de pilas y luminarias, establecidos por la legislación ambiental, desde los cuales los productores (fabricantes, importadores y comercializadores bajo su propio nombre), están obligados a implementar los planes posconsumo.

⁶ Cooperación Triangular Colombia - Chile – Alemania. Estudio de recopilación y análisis de experiencias de gestión público-privada relacionadas con la Responsabilidad Extendida del Productor desarrollados en Chile y Colombia.

Sin embargo, se percibe que, para mejorar el funcionamiento de estos, hacen falta medidas habilitantes⁷, por ejemplo, incentivos tributarios, mayor capital semilla, reglamentación de uso, entre otros. En adición, existen falencias en la cuantificación de los impactos ambientales asociados a las corrientes de residuos mencionadas, ya que no se cuenta con información acerca de los impactos que fueron evitados a partir de la puesta en marcha de los SRS, ni de la forma en que están siendo tratados estos residuos.

El presente proyecto busca actualizar la información que se tiene acerca del manejo que se le está dando a los residuos de pilas, acumuladores y luminarias, partiendo de información secundaria de la composición de los residuos, estudios de impacto ambiental y a la salud humana, y el tratamiento que reciben.

Tabla 0-1: Planes Posconsumo y sus respectivas resoluciones.⁸

RESIDUO	RESOLUCIÓN	CANTIDAD MÍNIMA
Pilas y acumuladores	1297 de 2010	3000 unidades
Bombillas usadas	1511 de 2010	3000 bombillas

Fuente: (MADS, 2010)

En el primer capítulo del trabajo se presentan los impactos ambientales asociados a los residuos posconsumo de pilas y acumuladores, en donde, después de comprobar la composición de los residuos, se identifican los contaminantes que representan algún tipo de peligrosidad, se determinan los impactos ambientales y se exponen las afectaciones que pueden generar a la salud.

De manera similar, en el siguiente apartado se presentan los impactos ambientales generados por lámparas y luminarias. Por otra parte, en el tercer capítulo se muestran los resultados de los programas posconsumo más relevantes en el País, para estas dos

⁷ Ibarra, 2018

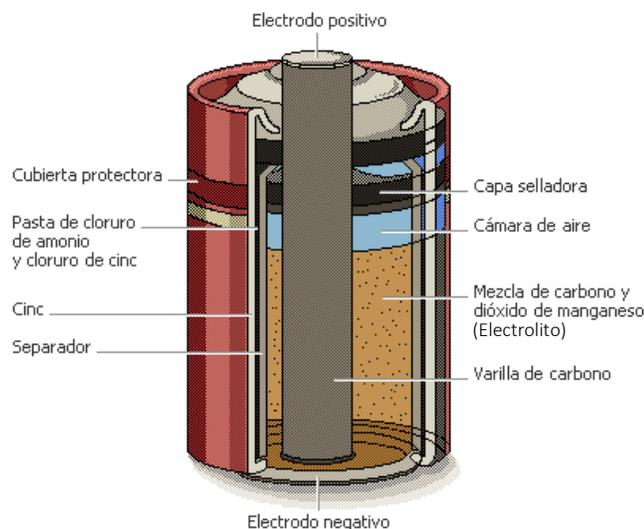
⁸ Elaboración propia, información obtenida del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS.

corrientes posconsumo, y se analizan los principales aspectos encontrados como, tipos de residuos gestionados, cantidades, tratamiento o disposición final. Por último, se muestra la importancia de los planes posconsumo en el País y se plantean algunas mejoras o recomendaciones.

1. Capítulo 1: Pilas Y Acumuladores

La pila es la versión industrial de una celda voltaica, en general, es el resultado de la aplicación de principios electroquímicos a las fuentes de voltaje portátiles. Es decir, producen energía eléctrica a través de una serie de reacciones entre dos sustancias químicas, denominadas electrodos (ánodo y cátodo), separadas por un electrolito que permite el traspaso de electrones entre los electrodos (Ver **Ilustración 1**).

Ilustración 1: Estructura general de una pila primaria.



Fuente: (López Fernández, 2018)

Al revisar el avance tecnológico de las pilas, se observa que este se ha visto afectado por dos factores principalmente. En primer lugar, por la construcción de sistemas más eficientes y económicos modificando su forma y estructura interna, incrementando la densidad de carga de la pila, y modificando la composición y forma del electrodo (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001). En segundo lugar, a causa de las implicaciones ambientales, como la prohibición de mercurio en las pilas de botón y la limitación de las concentraciones de cadmio en las pilas y los acumuladores portátiles en la Unión Europea, desde el 2015 (Parlamento europeo, 2006). Adicionalmente, se puede ver la necesidad

normativa en cuanto a la recolección, reciclado, tratamiento y eliminación de estos elementos.

En Colombia, la comercialización de pilas tipo zinc-carbón y alcalinas, es regulada por la Resolución 0172 del 23 de enero de 2012, en donde se encuentra lo concerniente a: rotulado, etiquetado y los límites máximos permisibles de mercurio, cadmio y plomo, en estas tecnologías. En este capítulo, se presentan los componentes principales de las pilas, los efectos a la salud humana y los impactos ambientales provocados por la disposición inadecuada de sus residuos. Lo anterior con el fin de sensibilizar a fabricantes, comerciantes y usuarios, sobre la responsabilidad ambiental en el uso de estos elementos.

El aprovechamiento y la disposición correcta de productos de consumo masivo que presentan características de peligrosidad, como las pilas, es trascendental, debido a que contaminantes bioacumulables, como metales pesados, hacen parte de su estructura. Al analizar las características fisicoquímicas de los residuos de pilas, se evidencia que son altamente contaminantes pues los residuos de estos bienes, dispuestos en rellenos sanitarios, sufren un proceso de degradación de su blindaje (PIRS, 2008), vertiendo todo su contenido de metales pesados al ambiente a través de los lixiviados que genera el relleno sanitario.

En los rellenos sanitarios de Colombia se maneja un rango de pH amplio, desde 4,5 siendo muy ácido a alcalino en 8,5; dependiendo de la etapa en la que se encuentra la degradación anaerobia de la materia orgánica en el relleno. En este intervalo de pH se puede disolver prácticamente cualquier metal pesado⁹; con el agravante de que, pueden transportados hacia suelos de cultivos o fuentes hídricas para consumo de ganado o consumo humano.

⁹ PIRS. Convenio de cooperación científica y tecnológica para desarrollar actividades relacionadas con la gestión de los residuos posconsumo de fuentes de iluminación, pilas primarias y secundarias.

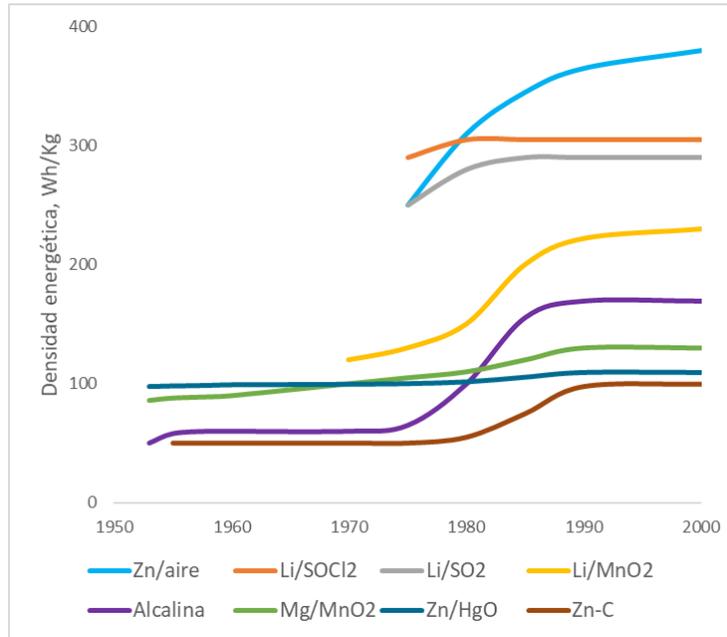
Caracterización

Las celdas electroquímicas se clasifican como primarias (no recargables) o secundarias (recargables), dependiendo de su capacidad para ser recargadas eléctricamente. Las pilas primarias poseen un único ciclo de descarga, ya que es difícil y poco eficiente recargarlas eléctricamente. Las ventajas de estas pilas están en su vida útil, su densidad energética a bajas o moderadas tasas de descarga, poco mantenimiento y facilidad de uso (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001). Las pilas primarias más comercializadas en Colombia son las pilas de Zinc-Carbón y las pilas alcalinas de dióxido de manganeso (PIRS, 2008). A las pilas primarias también pertenecen las “celdas secas”, que no tienen electrolito líquido, las cuales son baterías especiales de bajo consumo que tienen una vida útil de más de 20 años.

Las pilas secundarias, conocidas también como acumuladores, son aquellas que pueden ser recargadas eléctricamente, pasando corriente en la dirección opuesta a la de descarga. Estas pilas se caracterizan por su alta densidad de carga, alta tasa de descarga y buenas temperaturas de trabajo. Sus aplicaciones se enmarcan en dos categorías. La primera, en las que la batería secundaria es usada como un dispositivo para almacenar energía, generalmente conectado y cargado por una fuente primaria, transmitiéndola hacia la carga de acuerdo con la demanda. Y la segunda, en las que es usada como una pila primaria, pero es recargada luego de su uso, en vez de ser desechada (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001). Las pilas secundarias más comercializadas en el País son las de ion litio.

1.1.1 Pilas primarias

Las pilas primarias han experimentado avances tecnológicos principalmente en su capacidad, ver Ilustración 2, pasando de 50 Wh/kg, en las primeras pilas zinc-carbón (Zn-C), hasta cargas mayores que 400 Wh/kg. Los avances también se pueden evidenciar en su vida útil, pasando de 1 año en 1940, a 5 y 10 años hoy día; y en las temperaturas de funcionamiento, ya que actualmente se encuentran baterías funcionales desde -40°C hasta 70°C (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

Ilustración 2: Avances en el desarrollo de pilas primarias¹⁰.

Fuente: (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001)

El zinc ha sido el material más popular para el ánodo debido a su comportamiento electroquímico, compatibilidad con electrolitos acuosos, tiempo de vida útil y disponibilidad. El magnesio también tiene buenas propiedades eléctricas y bajo costo, por lo que se ha usado con éxito en este tipo de pilas (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

▪ Pilas Zinc-Carbón

Las pilas zinc-carbón están compuestas por un cátodo de carbono grafito, cubierto de dióxido de manganeso; un ánodo que es una aleación de zinc, con pequeñas cantidades de plomo, cadmio, mercurio; y un electrolito de cloruro de amonio (NH_4Cl). La reacción que se lleva a cabo dentro de la pila se encuentra a continuación:



¹⁰ Descarga continua a 20°C; tasa 40-60 h; AA o un tamaño similar.

A partir de la Segunda Guerra Mundial, se han alcanzado avances importantes relacionados con la capacidad y la vida útil de estas pilas. Los avances se deben al uso de nuevos materiales, como el dióxido de manganeso beneficiado, el electrolito de cloruro de zinc (que permitió que el sistema de separación ocupara menos espacio); y al diseño de la celda, como la celda revestida de papel, en donde se tienen separadores basados en papel laminado (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

Según su composición, estas pilas se pueden subdividir en dos categorías, de uso general e industrial o *heavy duty*. Las primeras construidas con dióxido de manganeso y un separador de almidón; las segundas cuentan con tres factores diferenciadores: dentro de su composición se utiliza cloruro de zinc y cloruro de amoníaco en mezcla, la calidad del dióxido de manganeso es superior y posee un diseño de celda optimizado (PIRS, 2008). En el mercado, estas pilas se encuentran en tamaños AA, AAA, 9V, tipo C y tipo D, debido a los diferentes usos que pueden tener.

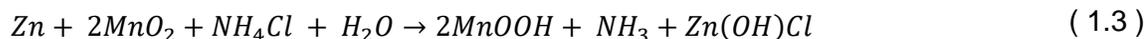
Para pilas que tienen como electrolito primario el cloruro de amonio se tienen las reacciones (1.2), para descarga liviana, (1.3), descarga pesada y (1.4), descarga prolongada. Las reacciones para aquellas que usan cloruro de zinc como electrolito son, la (1.5) para descarga liviana y pesada, y la (1.6) para prolongada (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

Cloruro de amonio

Descarga liviana



Descarga pesada

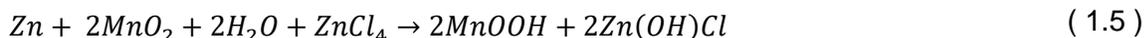


Descarga prolongada

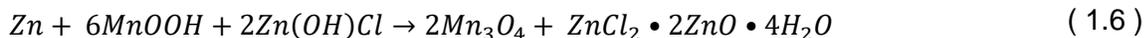


Cloruro de zinc

Descarga liviana y pesada



Descarga prolongada



En las hojas de seguridad de las pilas Zn-C se pueden encontrar generalmente concentraciones de carbón, dióxido de manganeso, zinc, componentes no peligrosos e información del electrolito (Energizer, 2017). Agregando a lo anterior, en el Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores, se muestran los resultados de un estudio realizado por el Programa de Investigación sobre Residuos de la Universidad Nacional de Colombia, el cual encontró que el porcentaje en peso del ánodo y cátodo varía con respecto al tamaño de la pila.

Adicionalmente, se analizaron las concentraciones de metales pesados en las pilas Zn-C, donde se comprueba que varían según su tamaño, y se hace la distinción del contenido de estos contaminantes en el ánodo y el cátodo (ver Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores).

En el ánodo de las pilas 9V se encuentran arsénico, cromo y plomo; para pilas AA, tanto en el ánodo como en el cátodo se encuentran arsénico, cadmio, cromo y plomo; las pilas AAA tienen arsénico, cadmio y plomo en el ánodo; las pilas C tienen en el ánodo presencia de cromo, plomo y níquel, y en el cátodo arsénico, cromo, plomo y níquel; en las pilas D se encuentra arsénico, cadmio, cromo y plomo en el ánodo, mientras que en el cátodo se tiene cromo, plomo y níquel (PIRS, 2008).

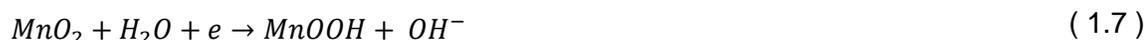
▪ Pilas alcalinas

Las pilas alcalinas (Zn/KOH/MnO₂), están constituidas por un ánodo compuesto por zinc amalgamado, y un cátodo fabricado a base de dióxido de manganeso, que en algunos casos contiene óxido de plata. El electrolito está compuesto por una mezcla de una solución de hidróxido de potasio y derivados de celulosa (PIRS, 2008).

La pila alcalina ha experimentado diferentes cambios desde su invención, entre ellos, el uso de plástico de ventilación para los sellos, inhibidores orgánicos para reducir la formación de gases causada por contaminantes en el ánodo de zinc, la introducción del acabado plástico de la etiqueta y la junta de perfil. Un cambio significativo se dio en la década de 1980 con la reducción gradual de mercurio en el ánodo, impulsado por la preocupación mundial del impacto de los materiales presentes en las pilas, una vez finalizada su vida útil (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

Los materiales activos de las pilas alcalinas son, el dióxido de manganeso producido electrolíticamente, un electrolito en fase acuosa con KOH concentrado en un rango entre el 35% y el 52%, y zinc metálico en polvo (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001). En la descarga se llevan a cabo las siguientes reacciones:

En el cátodo de dióxido de manganeso se experimenta en primer lugar la reducción de un electrón al oxihidróxido, como sigue:



A un voltaje muy bajo, el $MnOOH$ puede descargarse de acuerdo con la siguiente reacción:



La reacción de descarga en el ánodo se da de la siguiente forma:



Debido a los diferentes usos que pueden tener, estas pilas se encuentran en tamaños AA, AAA, 9V, C, D y botón (PIRS, 2008).

El sistema alcalino, se volvió popular debido a su densidad energética, desempeño superior a corrientes bajas, altas, continuas, intermitentes y bajas temperaturas; baja resistencia interna; mayor vida útil, resistencia a fugas y estabilidad dimensional. Por otra parte, estas pilas solo son más costo-eficientes frente a las Zn-C, para aplicaciones en donde se requieren altas tasas de transferencia, capacidad a baja temperatura, cuando están expuestas a condiciones de almacenamiento poco controladas, o cuando son usadas de forma intermitente, porque, a pesar de que su costo inicial es mayor, en estas condiciones la batería alcalina puede superar a la batería Zn-C por un factor de 2 a 10 (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001). En cuanto a las pilas de botón, las alcalinas son más económicas que otras tecnologías, ya que tienen menor resistencia interna y presentan un mejor comportamiento a bajas temperaturas. Sin embargo, la curva de descarga en pendiente no permite su uso en algunos dispositivos y tienen una menor densidad energética.

La información consignada en las hojas de seguridad de las pilas alcalinas muestra que están compuestas de grafito, dióxido de manganeso, mercurio, hidróxido de potasio, hidróxido de sodio, zinc y materiales no peligrosos como acero, papel, agua, plástico y demás (Vapormatic Co. Ltda, 2004); dependiendo de la marca, y del lugar de fabricación de las pilas. En la marca Duracell, por ejemplo, se reportan únicamente datos de dióxido de manganeso, hidróxido de potasio y zinc (ver Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores) mientras que en las pilas Energizer los datos presentados son más específicos.

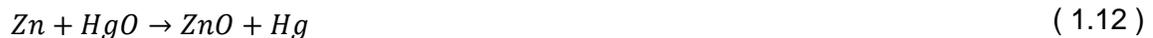
A su vez, se consideró el porcentaje en peso que representan el ánodo y el cátodo, para cada tamaño de pila. Además, se analizaron las concentraciones de los metales pesados en las pilas alcalinas, encontrando que, la mayoría de pilas contenían arsénico, cadmio, cromo, níquel, plomo y mercurio (PIRS, 2008).

La concentración de metales encontrados en las pilas alcalinas muestra que se tiene presencia de arsénico en el ánodo de las pilas AA y AAA; de cadmio en las pilas AA; cromo, plomo y níquel en todos los tamaños estudiados.

▪ Pilas de óxido de mercurio

Las pilas de óxido de mercurio constan de un ánodo de zinc y un cátodo de óxido de mercurio, su electrolito es de hidróxido de potasio en solución acuosa. El ánodo de estas pilas puede estar compuesto de cadmio, en dado caso, el electrolito puede ser de hidróxido de potasio o hidróxido de sodio. Estas pilas contienen en su interior un pequeño porcentaje de dióxido de manganeso en el cátodo (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001). Las baterías de óxido de mercurio se fabrican en tres geometrías básicas: botones, planas y cilíndricas.

La reacción química que permite el funcionamiento de una celda zinc/óxido de mercurio es la siguiente:



Para la celda cadmio/óxido de mercurio se tiene:



Cambiar del zinc al cadmio produce como resultado una batería muy estable, con excelente almacenamiento y rendimiento a temperaturas extremas, debido a la baja solubilidad del cadmio en el hidróxido, en un amplio rango de temperaturas. Sin embargo, el costo del material es alto y el voltaje es bajo, inferior a 1.0 V.

Como consecuencia de los problemas ambientales provocados por el mercurio y el cadmio, las pilas de óxido de mercurio fueron eliminadas de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) y del Instituto Americano de Estándares Nacionales (ANSI), quienes definen los estándares de fabricación, lo que provocó que el mercado de estas baterías decayera, (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001). Esta tecnología ha sido sustituida por las pilas alcalinas, zinc/aire, óxido de plata y baterías de litio.

La información consignada en las hojas de seguridad de las pilas de óxido de mercurio, presenta concentraciones aproximadas de mercurio, dióxido de manganeso, zinc, componentes no peligrosos e información del electrolito (ver Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores).

- **Pilas de óxido de plata**

Las pilas de óxido de plata están compuestas por un ánodo de zinc en polvo, un cátodo de óxido de plata comprimido y un electrolito en solución acuosa de hidróxido de sodio, o potasio, con zincato disuelto (PIRS, 2008). Este tipo de acumuladores, se caracterizan por tener una de las más altas densidades energéticas, un tiempo de almacenamiento largo y buen desempeño a bajas temperaturas entre los sistemas primarios, por lo cual, son ideales y fabricadas principalmente en tamaños pequeños como botón.

Estas baterías se pueden fabricar tanto en óxido de plata monovalente como divalente, sin embargo, la gran mayoría son fabricadas a partir de óxido de plata monovalente, debido a que se descarga con un voltaje uniforme y constante, tanto a corrientes altas como bajas. Las pilas elaboradas a partir de óxido de plata divalente, a pesar de tener una mayor capacidad teórica, tienen la desventaja de tener curvas de voltaje dual de descarga y una mayor inestabilidad en soluciones alcalinas (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001), esta última se solucionó con el uso de metales pesados, hasta que se restringió su uso por su potencial contaminante.

La celda zinc/óxido de plata monovalente funciona mediante la siguiente reacción:



La reacción electroquímica que se produce en una celda zinc/óxido de plata divalente cuenta con dos pasos, en primera instancia se pasa de plata divalente a monovalente y en segundo lugar se lleva a cabo la reacción para plata monovalente (Ecuación 1.14):



La información consignada en las hojas de seguridad de las pilas de óxido de plata muestra concentraciones aproximadas de grafito, dióxido de manganeso, óxido de plata, zinc, los electrolitos y materiales no peligrosos presentes en la pila (ver Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores). Es importante mencionar que, dadas las características de las

pilas de óxido de plata, este tipo de tecnología se comercializa casi exclusivamente en tamaño botón.

- **Pilas de litio**

Las baterías de litio están formadas por un ánodo de litio, un cátodo y un electrolito que varían, cambiando la química de la celda. Como cátodo se utilizan diferentes tipos de materiales como, dióxido de azufre, dióxido de manganeso, disulfuro de hierro y monofluoruro de carbono. Las baterías de litio utilizan solventes no acuosos como electrolito, por la alta reactividad que tiene en agua. Generalmente se utilizan solventes orgánicos como, acetonitrilo, carbonato de propileno y dimetoxietano; y solventes inorgánicos como cloruro de tionilo (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

Las principales ventajas del uso de litio como ánodo son su bajo peso, alto voltaje, alta equivalencia electroquímica y buena conductividad. No obstante, aún existen varios aspectos por mejorar en cuanto a costo y seguridad, pues, la extrema reactividad del metal con el agua aún es un reto para la industria (PIRS, 2008). Las pilas de litio se clasifican en las siguientes categorías principales (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001):

a) *Pilas de litio de cátodo soluble.* Usan como cátodo materiales líquidos o gaseosos como dióxido de azufre o cloruro de tionilo, que se disuelven en el electrolitos orgánicos o inorgánicos que son solventes del electrolito. El modo de funcionamiento, para evitar la descarga, consiste en la formación de una membrana de pasivación en el ánodo, como resultado de la reacción entre el litio y el material del cátodo.

Para altas velocidades de descarga, los diseños de estas pilas utilizan grandes áreas superficiales. Se caracterizan por su elevada densidad de potencia y su capacidad de proporcionar mayor densidad de corriente que cualquier otra celda primaria.

b) *Pilas de litio de cátodo sólido.* Utilizan materiales sólidos como cátodo, y electrolitos orgánicos. Los materiales típicos de fabricación son el óxido de vanadio (V), óxido de plata y vanadio, cromato de plata, dióxido de manganeso, oxifosfato de cobre, fluoruro de carbono, sulfuro de cobre, de hierro (II), de hierro (III) y óxido de cobre (II).

Estas pilas tienen la ventaja de no estar presurizadas o necesitar obligatoriamente una junta hermética. La desventaja se encuentra en que no tienen la misma capacidad de altas velocidades de descarga de los sistemas catódicos solubles.

c) *Pilas de litio de electrolito en estado sólido*. En el cátodo se utiliza generalmente yoduro de plomo/sulfuro de plomo/plomo yodo poli-2-vinilpiridina. Se caracterizan por soportar periodos de almacenamiento de más de 20 años, pero tienen una tasa de descarga muy baja, en el rango de microamperios.

Las informaciones consignadas en las hojas de seguridad de las pilas de litio presentan las concentraciones aproximadas de los electrodos, el electrolito y de materiales no peligrosos como el acero, que las conforman. Las pilas cilíndricas de litio pueden contener otros metales en proporciones importantes (PIRS, 2008), se tiene por ejemplo cromo en un orden de 9% a 10% en peso de la pila. Los contenidos en peso de metales pesados, para este tipo de pilas se observan en el Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores.

▪ **Pilas de zinc-aire**

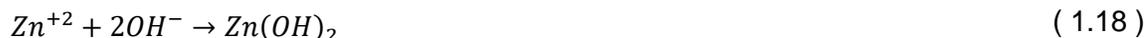
Las pilas con tecnología zinc-aire, están compuestas por un ánodo de zinc y un cátodo formado por oxígeno del ambiente. La batería se encuentra abierta, permitiendo que el oxígeno se difunda en la celda y pase a través del cátodo hacia la superficie activa del ánodo interior, que está en contacto con el electrolito de la celda, en donde el aire promueve la reducción del oxígeno en presencia de la solución alcalina del electrolito (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

Dado que un material activo de la celda se encuentra por fuera de la pila, la mayoría del volumen de ella está compuesta por zinc, derivando en una pila con una alta densidad energética. En la celda de zinc-aire, el aire actúa únicamente como espacio para la reacción y no es consumido. Las reacciones del cátodo de aire se pueden simplificar de la siguiente forma:

Cátodo:



Ánodo:



Reacción general:



La química de la reacción tiene un paso limitante en la reducción del oxígeno, en donde se forma el radical libre OH-, el cual afecta la cinética de la reacción y por lo tanto su desempeño. Estas pilas se caracterizan por tener una alta densidad energética, un voltaje de descarga constante, un tiempo de almacenamiento prolongado y beneficios de seguridad, económicos y ambientales. Sin embargo, el factor que limita el uso de estas baterías es la compensación entre una larga vida útil (alta tolerancia medioambiental) y la máxima capacidad de potencia (menor tolerancia medioambiental) (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

La información consignada en las hojas de seguridad de las pilas de zinc-aire, presentan las concentraciones aproximadas de dióxido de manganeso, hidróxido de potasio, zinc y materiales no peligrosos como acero y papel (ver Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores).

1.1.2 Pilas secundarias o acumuladores

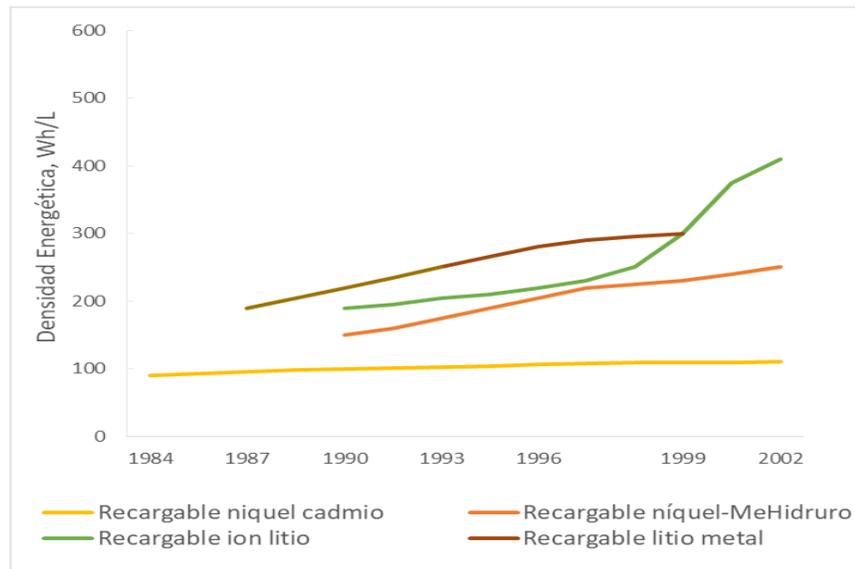
Las aplicaciones de las baterías secundarias, o recargables, son muy variadas, las más comunes son las automotrices de arranque, iluminación e ignición (SLI); equipos de control de camiones industriales; energía de emergencia y de reserva. También se utilizan para alimentar dispositivos portátiles como herramientas, juguetes, iluminación, cámaras,

videocámaras, computadoras, celulares y, recientemente, como fuente de energía para vehículos eléctricos e híbridos eléctricos (PIRS, 2008).

Así mismo, se caracterizan por su alta densidad de potencia, perfiles de descarga planos y buen comportamiento en bajas temperaturas. No obstante, sus densidades energéticas, energías específicas y su retención de carga son generalmente más bajas que las de los sistemas de primarios. A pesar de esto, algunas pilas recargables, como las de litio, tienen mayor densidad energética, mejor retención de carga y otras mejoras de rendimiento, resultado de la evolución de la ciencia y tecnología de materiales.

Este avance está registrado en la Ilustración 3, la cual permite inferir que las de ion-litio son las que más progreso han tenido, por lo que se han convertido en unas de las más utilizadas, por ejemplo, en dispositivos electrónicos.

Ilustración 3: Avances en el desempeño de las baterías portátiles recargables



Fuente: (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001)

En la década de 1990 y los años 2000, la densidad energética y la energía específica de las baterías portátiles recargables de níquel-cadmio no aumentó significativamente, encontrándose en 35 Wh/kg y 100 Wh/L, respectivamente. La tendencia que presenta el desarrollo de electrolitos más eficientes tiende a la consolidación de la pila níquel-hidruro

metálico (PIRS, 2008), en donde también se logró un avance en el rendimiento de las baterías a través del uso de nuevas aleaciones para el almacenamiento de hidrógeno, logrando 75 Wh/kg y 240 Wh/L (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

Al revisar la literatura, se evidencia que un aumento importante en el rendimiento de los sistemas de litio se dio por el uso de materiales de carbono en el electrodo negativo con una capacidad específica mucho mayor, con lo que se alcanzó una energía específica de 150 Wh/kg y una densidad energética de 400 Wh/L en tamaños cilíndricos pequeños (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

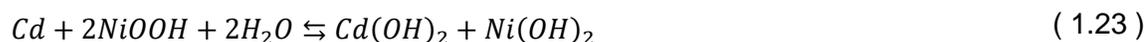
▪ Acumuladores de níquel-cadmio

Los acumuladores níquel-cadmio están compuestos por un electrolito de hidróxido de potasio, un electrodo negativo de cadmio y un electrodo positivo de oxihidróxido de níquel, cuando la pila está cargada (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001). Cuando la pila se descarga, los materiales activos de los electrodos cambian. Estos materiales durante la carga y descarga varían sus estados de oxidación, pero no su estado físico, permaneciendo sólidos.

Las reacciones durante la carga, (1.21), y descarga, (1.22), son las que siguen:



Donde el hidróxido de níquel pasa a un óxido de valencia superior y el hidróxido de cadmio del electrodo negativo se reduce a cadmio. La reacción general para carga y descarga es la siguiente:



Estas pilas incorporan un separador permeable al oxígeno, de tal forma que este elemento pueda pasar del cátodo positivo al negativo, permitiendo que en este electrodo se consuma

el gas, evitando un aumento de presión por la recarga (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

Sus aplicaciones van desde ser la fuente de energía de aparatos electrónicos, de potencia liviana y de alta potencia, como cámaras, juguetes, artículos para el hogar, teléfonos, computadoras, videocámaras y herramientas eléctricas; hasta de energía de reserva, en usos para iluminación de emergencia y alarmas.

Una de las principales ventajas de esta tecnología es que vienen selladas, previniendo que sus componentes internos se liberen al ambiente y causen lesiones a quienes las manipulan. Asimismo, cuentan con una larga vida útil (5 a 7 años); buen desempeño a bajas temperaturas (trabajan de -40 hasta 70°C); alto tiempo de almacenamiento en cualquier estado de carga y rápida capacidad de recarga (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

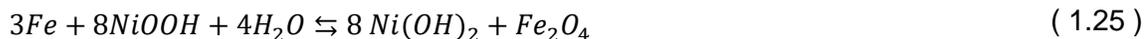
El principal reto en su fabricación consiste en la disminución de la capacidad de recarga al avanzar los ciclos de uso (PIRS, 2008), y en la preocupación por el uso de cadmio, debido a su impacto ambiental. La información consignada en las hojas de seguridad de los acumuladores de níquel-cadmio presentan las concentraciones aproximadas de hidróxido de potasio, hidróxido de litio, níquel y cadmio (ver Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores).

▪ Acumuladores de níquel-hierro

Las pilas secundarias de níquel-hierro están compuestas por hierro metálico en el electrodo negativo, óxido de níquel para el electrodo positivo e hidróxido de potasio con hidróxido de litio en el electrolito. En este sistema, se transfiere oxígeno en las reacciones globales de los electrodos. El electrolito aparentemente no juega un papel importante, sin embargo, al revisar las reacciones de cada electrodo, éste se ve involucrado en ellas (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).



Reacción global:



Algunas de las ventajas de esta tecnología son su resistencia física, no se dañan por mantenerlas descargadas durante periodos de tiempo prolongados, posee larga vida útil, permite múltiples ciclos de carga-descarga y resiste el abuso eléctrico por sobrecarga, sobre voltaje o cortocircuito. Sus principales desventajas están en la alta tasa de auto descarga, la evolución del hidrógeno en el ciclo de carga y descarga, la baja densidad de potencia, menor densidad energética frente a otros sistemas, se dañan por altas temperaturas y su bajo voltaje de celda. Este tipo de pilas se utilizan en vehículos de carga, vehículos mineros, lámparas, vagones de ferrocarril, sistemas de señalización e iluminación de emergencia (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

La información consignada en las hojas de seguridad de los acumuladores de níquel-hierro se encuentra en el Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores, las cuales presentan las concentraciones aproximadas de hierro, níquel, cadmio y del electrolito.

▪ **Acumuladores de litio**

Los acumuladores de litio están compuestos por litio en el electrodo negativo, y diferentes materiales para el electrodo positivo, como en el caso de las pilas primarias de litio, en donde se busca que éstos no sean afectados durante el proceso de recarga. Para el electrodo positivo se han usado óxidos de metales de transición (MnO_2 , $LiCoO_2$, $LiNiO_2$, VO_x), sulfuros (MoS_2 , TiS_2) y selenidas ($NbSe_3$) (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001). A su vez, entre los materiales más útiles para el uso como cátodos, se encuentran los compuestos de inserción o intercalación. En estos compuestos, una especie huésped, como el litio, se puede insertar intersticialmente en la red del material (durante la descarga) y posteriormente se extrae durante la recarga, con poca o ninguna modificación estructural del anfitrión. Como electrolito se utilizan líquidos apróticos orgánicos e inorgánicos, o electrolitos poliméricos sólidos (Reddy & Hossain, 2000).

Las reacciones que se llevan a cabo en la celda, para las reacciones individuales, (**1.26**) y (**1.27**), y la global (**1.28**), en donde (*Anf*) simboliza al anfitrión, son las siguientes:

Ánodo:



Cátodo:



Reacción global:



Las pilas recargables de litio ofrecen varias ventajas frente a las pilas convencionales acuosas: mayor densidad energética (hasta 150 Wh/kg, 400 Wh/L), mayor voltaje en la celda (hasta 4V) y mayor tiempo de almacenamiento (5 a 10 años) (Reddy & Hossain, 2000). El litio metálico cuenta con un alto potencial estándar y bajo peso electroquímico equivalente, no obstante, dentro de las principales desventajas están los problemas de seguridad, los cuales son mayores que en las pilas primarias debido a la cantidad de litio utilizado (3 a 5 veces de exceso de litio) para obtener una vida útil aceptable.

- *Ion litio*

En estas pilas el material del electrodo positivo generalmente es un óxido metálico, en un colector de corriente de aluminio, con una estructura en capas como el óxido de litio cobalto ($LiCoO_2$), o un material con una estructura de túnel como el óxido de litio manganeso ($LiMn_2O_4$). El material del electrodo negativo típicamente es un carbono grafitico, también en capas, en un colector de corriente de cobre. En el proceso de carga/descarga, los iones de litio se insertan o extraen del espacio intersticial entre capas atómicas dentro de los materiales activos (Reddy & Hossain, 2000).

La información consignada en las hojas de seguridad de los acumuladores de litio presenta las concentraciones aproximadas del colector de aluminio, grafito, cobre y el óxido de litio (ver Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores).

▪ Acumuladores de níquel-metal hidruro

El principio de funcionamiento de estos acumuladores es similar al de los acumuladores níquel-cadmio, la diferencia radica en que los acumuladores de níquel-metal hidruro (NiHM) utilizan hidrógeno como material del cátodo, en lugar del cadmio, el cual es absorbido en una aleación metálica (Linden & Magnussen, Portable sealed nickel-metal hydride batteries, 2000).

Cuando la pila está cargada, el material activo del electrodo positivo es el oxihidróxido de níquel y el del electrodo negativo es el hidrógeno en forma de hidruro metálico, el cual es capaz de experimentar una reacción reversible de absorción y desorción de hidrógeno a medida que la batería se carga y descarga.

En la celda, se llevan a cabo reacciones electroquímicas, en donde el oxihidróxido de níquel se reduce a hidróxido de níquel, y el hidruro metálico se oxida a la aleación metálica M, como se muestra a continuación.

Ánodo:



Cátodo:



Reacción global:



Estos acumuladores presentan en su composición los mismos materiales y separador que las pilas níquel-cadmio, con la diferencia en que las de níquel-metal hidruro cuentan con un 30% más de densidad de carga que se debe, entre otros, al uso de agentes hidrofóbicos como recubrimiento para los separadores, reduciendo la capacidad de transferencia de gas entre electrodos y la disminución del efecto de auto-descarga (PIRS, 2008).

La información correspondiente a las hojas de seguridad de los acumuladores NiHM, se encuentran en el Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores, en esta se presentan las concentraciones de aluminio, hidróxido de litio, potasio, sodio y níquel, y metales como hierro y cobalto.

1.1.3 Nomenclatura y tiempo de vida útil

Las características de las pilas como tamaño, tecnología y tipo de batería han sido estandarizadas por organizaciones como la International Electrotechnical Commission (IEC) y el American National Standards Institute (ANSI), que compilan las características técnicas de las pilas primarias. A continuación, se presentan las codificaciones emitidas por estas dos organizaciones

En la codificación IEC, las letras simbolizan el sistema químico de la pila, y el número el tamaño de esta. Para el caso de las pilas cilíndricas, a medida que aumenta el número, aumenta el tamaño, así, el código LR03 hace referencia a una pila alcalina tamaño AAA, y el código LR20, se refiere a una pila alcalina tamaño D.

Para las pilas de botón la codificación varía, ya que las letras representan el tipo de pila, y los números indican las dimensiones físicas de la celda cilíndrica. A las celdas de menos de un centímetro de altura se les asignan números de cuatro dígitos, donde los primeros dos dígitos son el diámetro en milímetros, mientras que los dos últimos dígitos son la altura en décimas de milímetros. De esta forma, se tiene el código LR1154, para las pilas alcalinas de 11 mm de diámetro por 5.4 mm de altura, y el SR1154 para las pilas de óxido de plata de las mismas dimensiones.

En Colombia existe la NTC 1152 de 2004, en donde se especifican, las dimensiones del producto, condiciones de descarga, mínima duración media (MAD) y sus aplicaciones. Con base en esta información y la del PIRS, se obtuvieron los valores promedio de duración dependiendo de la aplicación (Tabla 1-2).

Tabla 1-1).

En la codificación IEC, las letras simbolizan el sistema químico de la pila, y el número el tamaño de esta. Para el caso de las pilas cilíndricas, a medida que aumenta el número, aumenta el tamaño, así, el código LR03 hace referencia a una pila alcalina tamaño AAA, y el código LR20, se refiere a una pila alcalina tamaño D.

Para las pilas de botón la codificación varía, ya que las letras representan el tipo de pila, y los números indican las dimensiones físicas de la celda cilíndrica. A las celdas de menos de un centímetro de altura se les asignan números de cuatro dígitos, donde los primeros dos dígitos son el diámetro en milímetros, mientras que los dos últimos dígitos son la altura en décimas de milímetros. De esta forma, se tiene el código LR1154, para las pilas alcalinas de 11 mm de diámetro por 5.4 mm de altura, y el SR1154 para las pilas de óxido de plata de las mismas dimensiones (PowerStream Technology, 2017).

En Colombia existe la NTC 1152 de 2004, en donde se especifican, las dimensiones del producto, condiciones de descarga, mínima duración media (MAD) y sus aplicaciones. Con base en esta información y la del PIRS, se obtuvieron los valores promedio de duración dependiendo de la aplicación (Tabla 1-2).

Tabla 1-1: Nomenclatura para las pilas primarias

Tamaño	Tecnología	IEC	ANSI
AAAA	Alcalina	LR8D425; LR61	25A
AAA	Alcalina	LR03	24A
	Zn-C	R03	24D
	Ni-MeH	HR03	
	NiCd	KR03	
AA	Alcalina	LR6	15A
	Zn-C	R6	15D
	Ni-MeH	HR6	1,2H2
	NiCd	KR6	1,2K2
A	Alcalina	LR23	
	Zn-C	R23	
C	Alcalina	LR14	14A
	Zn-C	R14	14D
	Ni-MeH	HR14	
	NiCd	KR14	
D	Alcalina	LR20	13A
	Zn-C	R20	13D
	Ni-MeH	HR20	
	NiCd	KR20	
N	Alcalina	LR1	910A
	Zn-C	R1	910D
	Ni-MeH	HR1	
	NiCd	KR1	
E (9V)	Alcalina	6LR61	1604A
	Zn-C	6F22	1604D
	Ni-MeH	6HR61	7,2H5
	NiCd	6KR61	11604
	Hg		1604M
	Li		1604LC
Botón	Li-MnO ₂	CR: 1616, 1620, 2016, 2025, 2032, 2430, 2450	5033LC; 5034LC; 5012LC; 5020LC...
	Li-monofluoruro de carbono	BR: 1130; 2040	
	Óxido de plata	SR: 736; 1136; 1142; 1154	1135SO; 1134SO; 1139SO
	Alcalina	LR: 736; 1142; 1154; 754	1126A
	Hg	MR52	
	Zn-Aire	PR70; PR48; PR41	7005ZD; 7000ZD; 7002ZD

Fuente: (PowerStream Technology, 2017)

Tabla 1-2: Mínima duración media para pilas cilíndricas primarias¹¹

PILAS CILINDRICAS		APLICACIÓN							
		Alumbrado portátil	Control remoto	Magnetófonos y grabadoras de uso personal	Radio transistores	Juguetes	Estereo portátil	Grabadoras	Detectores de humo
ALCALINAS	AA	-	1860	690	3600				
	AAA	130	870	300	2640	240			
	TC	770	-	-	4620	720	480		
	TD	630	-	-	4860	900	660		
	PC				1980	720	-	-	40320
ZINC -CARBÓN	DA	-	657	228	1480	53			
	TA	45	240	84	1200				
	TC	223			1400	176		380	
	TD	170			1660	240		520	
	PC				1440	420			20160

Fuente: (PIRS, 2008).

Para las pilas secundarias, la información se obtuvo de las fichas técnicas, en donde se especifican los tiempos de vida para las diferentes tecnologías.

1.1.4 Dimensiones y peso

Si se requiere conocer los impactos ambientales causados por la disposición inadecuada de los residuos de pilas en rellenos sanitarios es necesario conocer las dimensiones y los pesos de estas. En la Tabla 1-3, se plasman los valores en milímetros (mm) del diámetro y la altura de cada uno de los tamaños disponibles, para las pilas cilíndricas y de botón.

Tabla 1-3: Diámetro y altura de las pilas cilíndricas y de botón

Nomenclatura	Dimensiones (mm.)		Volumen (cm ³)
	Diámetro	Altura	
AAAA	8,4	40,2	8,91
AAA	10,5	44,5	15,41
AA	14,2	50	31,67
A	17	50	45,40
C	26	46	97,69
D	33	58	198,43
G	32	105	337,78
CR2032	20	3,2	4,02
SR44	11,6	5,4	2,28
PR48	7,9	5,4	1,06

¹¹ Duración en minutos.

Fuente: (Linden & Reddy, Handbook of batteries, 2001).

Teniendo en cuenta los diferentes tamaños que se manejan comercialmente, las pilas de 9 voltios, la medida estándar de altura son 48,5 mm, 26,5 mm de longitud y 17,5 mm de ancho. Los pesos para las pilas cilíndricas y tipo botón se encuentran descritas a continuación en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4: Peso promedio para pilas según tamaño

Peso (g)	Tamaño					
	Botón	AAA	AA	C	D	9V
	2	11	21	57	111	39

Fuente: (MAVDT-UN, 2009).

1.1.5 Marco normativo del sector posconsumo de pilas

La normatividad colombiana para pilas implementa la Resolución 172 de 2012, expedida por el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MinCIT) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), “por la cual se expide el Reglamento Técnico aplicable a pilas de zinc-carbón y alcalinas que se importen o fabriquen para su comercialización en Colombia”. Esta Resolución se apoya en la NTC 1152; en donde se encuentran los sistemas normalizados, las especificaciones para las dimensiones, la designación, y los ensayos para tensión nominal y capacidad útil; y en la NTC 5769, que contiene los métodos de ensayo para determinar el contenido de mercurio, cadmio y plomo.

La Resolución se aplica a las pilas alcalinas con designaciones LR01, LR03, LR14, LR20, 4LR44, LR6, 6LR61 y 4LR25X, y a las pilas zinc-carbón (Zn-C) 4R25X, Zn-C con electrolito de cloruro de zinc o de amonio R03, R14, R20, R6; y las no cilíndricas con designación 6F22. De igual forma, establece los niveles máximos permisibles de mercurio, cadmio y plomo (ver Tabla 1-5).

Tabla 1-5: Niveles máximos permisibles de mercurio, cadmio y plomo

ELEMENTO QUÍMICO	NIVEL MÁXIMO PERMITIDO (% EN PESO)	NIVEL MÁXIMO PERMITIDO (PPM)
Mercurio (Hg)	0.0005	5
Cadmio (Cd)	0.002	20
Plomo (Pb)	0.2	2000

Fuente: (MinCIT, MADS, 2012)

Adicional a esta normatividad, el Decreto 4741 emitido por el MADS en 2005, “por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral”, reglamenta las características que confieren a un residuo o desecho la calidad de peligroso, las obligaciones y responsabilidades del generador, en este decreto se establece el límite máximo permisible para la concentración de metales pesados en el extracto TCLP, para arsénico 5,0 mg/L, bario 100 mg/L, cadmio 1,0 mg/L, cromo 5,0 mg/L, mercurio 0,2 mg/L, plomo 5,0 mg/L y plata 5,0 mg/L.

Por otra parte, la Resolución 1297 de 2010, expedida también por el MADS, “Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Pilas y/o Acumuladores y se adoptan otras disposiciones” establece que los productores de 3000 o más unidades tienen la obligación de “formular, presentar e implementar los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Pilas y/o Acumuladores, con el propósito de prevenir y controlar la degradación del ambiente”.

Los Sistemas de Recolección Selectiva (SRS) y los planes posconsumo contienen los requisitos y condiciones que deben cumplir los productores e importadores, para asegurar que se administren correctamente los elementos una vez han finalizado su vida útil, mitigando el riesgo ambiental. Los SRS en Colombia nacen a partir de la estrategia 4.4 planteada en la Política Nacional de Residuos Peligrosos, por la cual se buscaba promover la gestión y el manejo de los residuos peligrosos generados (MADTV, 2005).

Los productos con los que se debe cumplir esta normatividad son las pilas y/o baterías primarias clasificadas mediante la partida 8506 y los acumuladores eléctricos secundarios clasificados con las subpartidas 8507.30.00.0, 8507.40.00.00, 8507.80.00.10, 8507.80.00.20, y 8507.80.00.90 (ver

Tabla 1-6).

Es importante resaltar que en la Resolución 1297 de 2010, se especifica que los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental (SRS), deben tener tres características:

- Contar con puntos, o mecanismos, de recolección accesible y en las cantidades necesarias.
- No deben generar costos ni obligaciones de compra para el consumidor
- Deben incluir alternativas de aprovechamiento y/o valorización.

Adicionalmente, mediante los SRS se debe asegurar la recolección anual de al menos el 4% de los residuos, con incrementos anuales mínimos del 5% (hasta el 2016 el incremento era del 4%), hasta alcanzar como mínimo el 45%.

Tabla 1-6: Subpartidas de los elementos contemplados en la Resolución de 1297 de 2010, con sus descripciones.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
8506	Pilas y baterías de pilas, eléctricas.
8506.10	De dióxido de manganeso. Alcalinas.
8506.30	De óxido de mercurio
8506.40	De óxido de plata
8506.50	De litio
8506.60	De aire-zinc
8506.80	Las demás pilas y baterías de pilas.
8507.30.00.0	Acumuladores eléctricos, incluidos sus separadores, aunque sean cuadrados o rectangulares. De níquel-cadmio.
8507.40.00.00	Acumuladores eléctricos, incluidos sus separadores, aunque sean cuadrados o rectangulares. De níquel-hierro.
8507.80.00.10	Acumuladores eléctricos, incluidos sus separadores, aunque sean cuadrados o rectangulares. De ion de litio
8507.80.00.20	Acumuladores eléctricos, incluidos sus separadores, aunque sean cuadrados o rectangulares. De níquel-metal hidruro.
8507.80.00.20	Acumuladores eléctricos, incluidos sus separadores, aunque sean cuadrados o rectangulares. Los demás

Fuente: (MinCIT, 2006)

Para el cumplimiento de esta normatividad, los productores pueden optar por un sistema individual o colectivo, para el segundo tipo de programa posconsumo se puede constituir una figura jurídica específicamente para el cumplimiento de la normatividad, o se puede hacer un acuerdo en donde se obliga directamente a cada productor a ser responsable en la ejecución del sistema.

1.1.6 Impactos al ambiente y a la salud humana

Para la evaluación de los impactos a la salud humana y al ambiente, se determinó la carga potencial que sería emitida al ambiente por cada tonelada de pilas, partiendo de los compuestos y las cantidades que terminarían en un botadero a cielo abierto o en un relleno sanitario, al ser dispuestas de forma inadecuada.

De acuerdo con el Informe final del PIRS, para pilas primarias y secundarias, antes de la implementación de la Resolución 1297 de 2010, la mayor cantidad de pilas que se consumían en el País eran pilas Zn-C y alcalinas, en donde la sumatoria de estas dos tecnologías representaba más del 80% de las pilas usadas en el País. Con base en la

información de importaciones, exportaciones y producción, se calculó el consumo aparente.

Para la estimación de las unidades desechadas (en millones de unidades), así como los residuos (medidos en toneladas) de pilas alcalinas (Tabla 1-7) y zinc – carbón (

Tabla 1-8) en Colombia se utilizó la información del tiempo de vida útil de cada tipo de pila, especificado en la NTC 1152 de 2004¹² y la metodología planteada por el programa de investigación de residuos sólidos de la Universidad Nacional (PIRS, 2008). A partir de lo anterior, para pilas primarias en el año de compra (Año 0) se desechan el 80% de las pilas y después de un año (Año 1) se eliminan el 20% restante. Para acumuladores en el Año 1 se desechan el 80% de las pilas y en el Año 2 el 20% restante.

Tabla 1-7: Estimación de desechos de pilas alcalinas en Colombia para el periodo 2013-2017

PILAS ALCALINAS					
Año	2013	2014	2015	2016	2017
Unidades consumidas (Millones)	60,934	56,257	57,550	38,419	
Unidades desechadas (Millones)	48,747	57,192	57,292	42,245	7,684
Residuos (Ton.)	2,330	2,734	2,739	2,019	0,367

Fuente: (ANDI, 2017).

Tabla 1-8: Estimación de desechos de pilas Zn-C en Colombia para el periodo 2013-2017.

¹² Norma Técnica Colombiana 1152. Baterías primarias (Pilas eléctricas).

PILAS Zn-C					
Año	2013	2014	2015	2016	2017
Unidades consumidas (Millones)	74,053	85,716	58,654	39,355	
Unidades desechadas (Millones)	14,811	83,384	64,066	43,214	7,871
Residuos (Ton.)	2,832	3,986	3,062	2,066	0,376

Fuente: (ANDI, 2017)

Dado que los datos suministrados por la ANDI están clasificados por algunas subpartidas arancelarias, y en estas no se especifica el tamaño de la pila (ANDI, 2017), se aplicó un peso promedio entre los tamaños A, AA, AAA, D, C y prismática, de 47,8 gramos, para calcular la cantidad residuos aproximados en toneladas. La estimación de las sustancias químicas emitidas al ambiente se realizó con base en las cantidades expuestas en la caracterización. Debido a que se cuenta con información limitada, para la estimación del impacto por las pilas de óxido de mercurio, de óxido de plata, pilas de litio y pilas de zinc-aire; así como para acumuladores de níquel-cadmio, de níquel-hierro, de litio y de níquel-metal hidruro, se utilizó la información contenida en las fichas técnicas de los productores.

A partir del volumen promedio de las pilas se determinó que por la inadecuada disposición de 1 tonelada de estos elementos, se llevan aproximadamente 1.51 m³ de residuos que se podrían aprovechar, tomando los datos de la Tabla 1-7 y de la

Tabla 1-8, se estima que por ejemplo, en el 2016, con la implementación de los planes posconsumo, se habrían podido aprovechar y disponer de una forma amigable con el ambiente cerca de 3.045 m³ de residuos de pilas zinc-carbón y 3.116 m³ de residuos de pilas alcalinas (ver Tabla 1-7 y

Tabla 1-8).

Dentro de los resultados de la caracterización se destacan las cantidades de acero, dióxido de manganeso y zinc que podrían ser recuperadas para ingresar nuevamente a la cadena productiva, o para ser utilizadas en coprocesamiento (Ver Tabla 1-9). Es necesario resaltar

que en las pilas de dióxido de mercurio se tienen cantidades elevadas de mercurio por ser un componente central para el funcionamiento de esta, si bien sólo están permitidas en Colombia para usos muy específicos, llevarlas a un relleno sanitario supone la descarga de una cantidad de este metal de hasta el 35% en peso de la pila (Ver Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores).

Tabla 1-9: Cantidades en kg. de elementos que se desechan por 1 tonelada de pilas primarias

MATERIA PRIMA	ZINC CARBÓN	ALCALINAS	DIÓXIDO DE MERCURIO	ÓXIDO DE PLATA ZINC	LITIO	ZINC AIRE
Acero	270	330	350	325	200	350
Negro de acetileno	60	30 *	-	15 *	20 *	20
Dióxido de manganeso	240	250	50	100	270	-
Zinc	260	80	125	100	-	350
Materiales no peligrosos (papel, agua, plástico y otros)	-	145	95	165	105	180
Hidróxido de potasio	-	80	30	35	-	20
Hidróxido de sodio	-	80	-	35	-	-

Fuente: Elaboración propia

De manera similar sobresale la cantidad de óxido de plata en las pilas de óxido de plata-zinc, el litio metálico o en aleación en las pilas de litio; y la cantidad de níquel y cobre en las pilas de zinc-aire (Ver Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores), que alcanzan valores de hasta 225 kg, 35 kg, 50 kg y 30 kg, respectivamente.

Tabla 1-10: Cantidades en kg. de elementos que se desechan por 1 tonelada de pilas secundarias

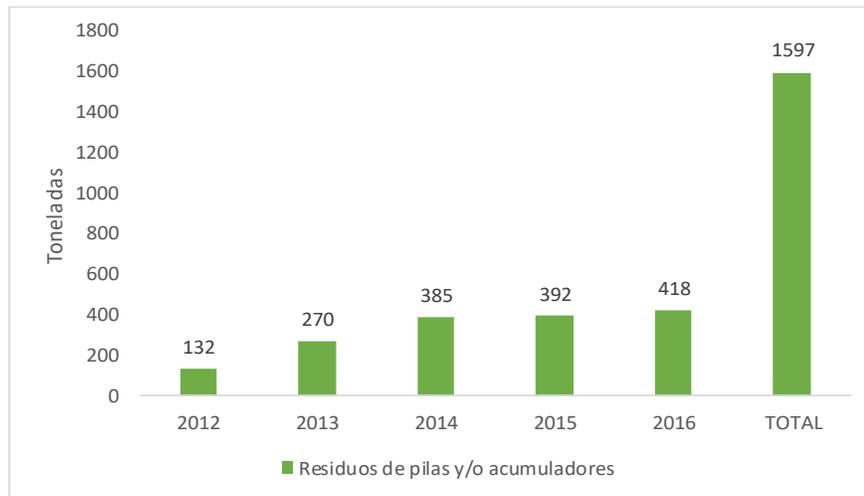
MATERIA PRIMA	NÍQUEL CADMIO	NÍQUEL HIERRO	LITIO	METAL HIDRURO
Negro de carbón	20,5	-	315,7 *	325
Hidróxido de potasio litio cadmio	150,0	122,1	105,2 *	75,0
Níquel	140,0	219,5	-	450,0 *
Cadmio	100,0	114,3	-	-
Acero	175,0	160,1	-	-
Plástico Polipropileno, PVC...	95,0	34,5	-	-
Aluminio	-	-	52,6	10,0
Hierro	-	283,6	-	175,0
Cobalto	-	6,4	-	42,5 *

Fuente: Elaboración propia

Al evaluar el material dispuesto en el relleno por tonelada, de cada tipo de acumuladores, se obtuvo los resultados presentados en la

Tabla 1-10, en donde se revelan las cantidades significativas de metales que no serían aprovechados. Un aspecto clave de los acumuladores, es que están compuestos no sólo por acero, sino por metales como hierro, aluminio y cobalto, lo que evidencia la importancia de la separación en la fuente de estos elementos.

Ilustración 4: Toneladas recolectadas de pilas y/o acumuladores



Fuente: (MADS, 2017)

De acuerdo con los datos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible presentados en la Ilustración 4, para el año 2016 se había logrado recolectar un total de 1.597 toneladas de pilas y/o acumuladores (MADS, 2017). Al relacionar esta cantidad de residuos con los resultados para metales pesados en pilas Zinc-carbón y en pilas alcalinas, se revela que se han dejado de llevar a un relleno sanitario 927 Kg de plomo, 12,39 Kg de cadmio, 11,78 Kg de mercurio, 3 Kg de níquel, 760 gramos de cromo y 152 gramos de arsénico.

1.1.7 Impactos al agua y al suelo

El aumento de la vida útil de los rellenos sanitarios es un aspecto significativo cuando se evalúan los impactos ambientales asociados con la disposición adecuada de los residuos de pilas usadas, ya que no tendrían esta carga. Para relacionar el tiempo de vida útil de un relleno sanitario con los residuos que se dejan de llevar, se parte de que en Colombia la generación per cápita de residuos ordinarios es de aproximadamente 0,45 kg/hab./día. Este indicador varía dependiendo de la ciudad o población, en Bogotá se estima alrededor de 0,74 kg/hab. /día., y para una población como la de Tunja, con 200.000 habitantes (Population.City, 2017), se generan 0,41 kg/hab. /día., cifra cercana al promedio de Colombia, por ello se toma como referente (IDEAM, 2016).

A partir de esta cifra, es posible relacionar la cantidad de residuos no dispuestos con el número diario de habitantes que se verían afectados al no poder botar sus residuos. Como

resultado de la estimación se determinó que la gestión cada tonelada de residuos de pilas, equivale a los residuos generados de 2.439 habitantes en un día. De acuerdo con los datos presentados por el MADS, ver la Ilustración 4, en el periodo 2012-2016 se gestionaron los residuos de pilas equivalentes a los residuos de 3'895.122 habitantes, lo que representa 19,4 días de un relleno como el de Pírgua en Tunja, Boyacá.

Adicionalmente, de acuerdo con el estudio del PIRS, se evidencia que cuando las pilas son dispuestas como residuos sólidos ordinarios, terminan en botaderos a cielo abierto, en cuerpos de agua superficiales o en rellenos sanitarios. Pese a que las pilas tienen un blindaje y son compactas, es necesario realizar una gestión diferenciada debido a las condiciones anaerobias de los rellenos sanitarios, a donde llega el grueso de las pilas gastadas.

Por un lado, el pH de los lixiviados que se generan depende del estado de descomposición de la materia orgánica, comenzando con un pH ácido alrededor de 4,5, y llegando a valores de pH alcalinos hasta de 8,5 en las etapas finales de descomposición, condición que hace que las pilas se deterioren rápidamente y todo el material que las compone sea vertido al medio. Por otra parte, se tienen temperaturas entre 30°C y 40°C, por la descomposición anaerobia de la materia orgánica, contribuyendo a la generación de un entorno muy agresivo y corrosivo para los diferentes materiales constituyentes de las pilas (PIRS, 2008).

Al analizar la composición de las pilas y acumuladores se evidencia la presencia de mercurio, plomo, cadmio, cromo, arsénico y níquel, en donde los compuestos solubles de estos elementos tienen la capacidad de movilizarse en el agua. Para evaluar la solubilidad, propiedad que influencia la partición de las sustancias químicas en el agua, se utilizó el software EPISUITE™, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 1-11.

Tabla 1-11: Solubilidades del mercurio, plomo, cadmio y arsénico.

Compuesto	Mercurio	Cadmio	Arsénico	Plomo
Solubilidad en agua (mg/L)	12840	122800	34710	9581

Elaboración propia, datos obtenidos del Software EPI SUITE™.

Al analizar los resultados, se evidencia que el plomo es soluble en agua (solubilidad entre 1000 y 10.000 ppm). Para mercurio, cadmio y arsénico las solubilidades son mayores a 10.000 ppm, por lo que se puede afirmar que estos metales son muy solubles (Allen & Shonnard, 2002) y representan un riesgo por su concentración potencial en el agua. En general, la solubilidad de estos elementos se ve influenciada por el pH, aunque para casos puntuales es necesario considerar otros factores como la dureza del agua, la presencia de sulfuros, para el cadmio, o la concentración y la forma de la isoterma de adsorción, para el arsénico (Sánchez Barrón, 2016).

A partir del programa *Chemical Equilibrium Diagrams* se analizaron los diagramas de distribución de especies (KTH Royal Institute of Technology, 2018), que muestran las formas predominantes según el pH del medio en que se encuentran. El plomo presenta una solubilidad elevada a pH menores que 7, encontrando sales de plomo II y compuestos orgánicos. Algo similar ocurre con el cadmio, que tiene una alta movilidad en ambientes ácidos a pH menor que 7, encontrando como especies solubles a los halogenuros, el sulfato y el nitrato.

Por su parte, el zinc se disuelve como $ZnOH^+_{(aq)}$ o $Zn^{2+}_{(aq)}$ (Lenntech, 2018), especies que se encuentran a pH menores que 6 y mayores que 12. Al analizar el comportamiento del cromo se evidencia que este elemento tiene la capacidad de movilizarse en sus formas Cromo (III) y Cromo (VI), las cuales están presentes a pH menores que 5.

En el caso del mercurio, la mayor parte de su presencia en el ambiente se da en forma de sales mercúricas inorgánicas y compuestos organomercúricos desde pH 5 (los cuales tienen dentro de su estructura un enlace Hg-C covalente). De estos últimos compuestos, los más comunes son los de metilmercurio, CH_3HgCl y CH_3HgOH (Gaona Martínez, 2004), que tienen la particularidad de ser muy solubles por la capacidad del grupo hidroxilo para formar puentes de hidrógeno.

Como resultado, factores como la temperatura y el esfuerzo mecánico de compresión por el uso de camiones compactadores en todo el proceso de disposición, conllevan a la degradación del blindaje y la liberación de los componentes de las pilas. Con el agravante

de que, en el intervalo de pH que se encuentra en los rellenos sanitarios, se puede disolver prácticamente cualquier metal pesado, los cuales pueden continuar con la ruta de los lixiviados, interfiriendo en la eficiencia de los tratamientos biológicos, ya que los metales pesados no son retenidos en su totalidad (PIRS, 2008), llegando a aguas subterráneas o superficiales.

Con el fin de determinar la cantidad de metales pesados que van al lixiviado y si se cumple o no la normatividad correspondiente, se analiza el resultado del Ensayo de Toxicidad Característica por Lixiviación (TCLP, por sus siglas en inglés), diseñado para simular la lixiviación que sufre un desecho cuando se dispone en un relleno sanitario (EPA, 2004).

Es importante mencionar que, al considerar el tiempo de permanencia y las condiciones reales de los rellenos sanitarios en Colombia, la cantidad puede variar de la simulada. Por ejemplo, en medios acuosos con las condiciones de pH especificadas para extracción TCLP, el mercurio metálico no es soluble; y por la presencia de metales como cobre o hierro, que reducen el mercurio que se encuentra como óxido soluble, la probabilidad de no ser cuantificado es alta (PIRS, 2008).

El análisis de los datos de TCLP obtenidos (ver Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores), permitió establecer que, pese a que no se sobrepasa la cantidad de metales pesados permitida en la normatividad¹³, la presencia de estos elementos en todas las tecnologías de pilas y acumuladores denota peligro, razón por la cual es necesario determinar la cantidad de contaminantes con potencial de migrar al ambiente.

Como resultado de la estimación de contaminantes, se puede establecer que, con una gestión adecuada, por cada tonelada de residuos de pilas zinc-carbón, se evita el vertimiento de hasta 580,5 gramos de plomo; 7,8 gramos de cadmio; 7,4 gramos de mercurio; 1,9 gramos de níquel; y 0,5 gramos de cromo. De manera similar, la adecuada gestión de cada tonelada de residuos de pilas alcalinas evita el vertimiento de hasta 14,8

¹³ Decreto 4741 emitido por el MADS en 2005, “por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral”

gramos de plomo; 2,4 gramos de níquel; 1,4 gramos de cromo; 1 gramo de cadmio; y 0,8 gramos de mercurio.

La toxicidad también se evalúa por medio de modelos biológicos, que caracterizan de forma más completa los residuos, ya que reúnen los efectos de la totalidad del elemento estudiado, en condiciones de extracción, en donde las sustancias químicas son solubles y biodisponibles. Para la evaluación de biotoxicidad en pilas se encontró, con un 95% de confiabilidad, que los niveles de inhibición en algas son cercanos al 100% y, por consiguiente, los residuos de pilas tienen característica eco tóxica (PIRS, 2008).

Para analizar la capacidad de desplazamiento del lixiviado a través del suelo, y, por ende, la capacidad que tiene para afectar su entorno se parte de que la movilidad depende fuertemente del pH y el potencial redox, aunque es necesario tener en cuenta factores locales como la cantidad de materia orgánica (Sánchez Barrón, 2016). Con el fin de evaluar la partición de los contaminantes en el suelo, se utiliza el coeficiente de absorción del suelo (K_{oc}). Este describe la razón entre la masa de un compuesto absorbido, por unidad de peso de carbón orgánico en un suelo, y la concentración del compuesto en una fase líquida. En la Tabla 1-12, se muestra el resultado de calcular el K_{oc} para el mercurio, cadmio, arsénico y plomo, los elementos con mayor potencial contaminante que están presentes en las pilas.

Tabla 1-12: Coeficiente de absorción del suelo para mercurio, plomo, cadmio y arsénico.

Compuesto	Mercurio	Cadmio	Arsénico	Plomo
K _{oc} (L/Kg)	3,449	0,868	3,88	4,297

Fuente: Elaboración propia, datos obtenidos del Software EPI SUITE TM.

Se puede deducir de los datos obtenidos que, según la escala de absorción propuesta por Allen & Shonnard en 2002, el arsénico y el plomo presentan una alta absorción en el suelo (K_{oc} entre 3,5 L/Kg y 4,5 L/Kg), el primero se encuentra en disolución de los suelos en forma inorgánica como arseniato o arsenito, y en condiciones reductoras como iones complejos de sulfuro y arsénico (Carbonell, Burló, & Mataix, 1995).

El mercurio presenta una absorción moderada, sin embargo, entre pH 5 y 7, la movilización de este metal es mayor, por lo que la concentración de mercurio en agua aumenta (Lenntech, 2018). De acuerdo con los resultados, el cadmio tiene una absorción despreciable pero la adición conjunta de cadmio y zinc (como en el caso de las pilas) favorecen la movilidad, ya que se presentan efectos sinérgicos entre estos metales (Sánchez Barrón, 2016). Por otra parte, la acidificación del suelo puede influir en la captación de cromo (III) por los cultivos, el cual puede acarrear efectos negativos al exceder los límites establecidos por la legislación ambiental.

Como resultado, cuando se disponen inadecuadamente los residuos de pilas, los lixiviados pueden migrar hacia los suelos contiguos y de este modo contaminarlos y afectar la flora y fauna, por su posible bioacumulación.

1.1.8 Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Las pilas y acumuladores incluyen en su composición materiales como acero y aluminio, cuyos procesos de producción emiten gases de efecto invernadero (GEI). Por esta razón, en este aparte se busca cuantificar las emisiones de GEI causadas por los procesos industriales asociados a la fabricación de los elementos que constituyen una tonelada de pilas, cantidad usada como base de cálculo del presente estudio.

Para determinar estas emisiones, se aplicaron los lineamientos propuestos por el Grupo de Expertos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático – IPCC (por sus siglas en inglés) de 2006, en los cuales se define la metodología de cálculo de los GEI generados a partir de las diferentes actividades antrópicas para la producción de dichos materiales. De modo que, se relacionaron las emisiones evitadas por los procesos de reciclaje de los componentes de una tonelada de pilas usadas, con las emisiones provocadas por la manufactura convencional de la misma cantidad de cada material.

Es importante mencionar que los GEI difieren en su influencia térmica positiva sobre el clima ya que presentan diferentes periodos de permanencia en la atmósfera y propiedades radiativas (Oficina Catalana del Cambio Climático, 2011). Estas influencias se presentan por medio de una métrica común basada en el forzamiento radiativo del dióxido de carbono

denominado CO₂ equivalente, que es la cantidad de emisiones de CO₂ que tendrían la misma intensidad que los GEI, tomando en consideración los tiempos de permanencia. Para los gases asociados a los metales presentes en las pilas se tienen los potenciales de calentamiento global (PEG) expuestos en la Tabla 1-13.

Tabla 1-13: PEG para metano y PFC

GAS	FÓRMULA	PEG
Metano	CH ₄	21
Perfluorometano	CF ₄	6500
Perfluoroetano	C ₂ F ₆	9200

Fuente: (GIECC, 1995)

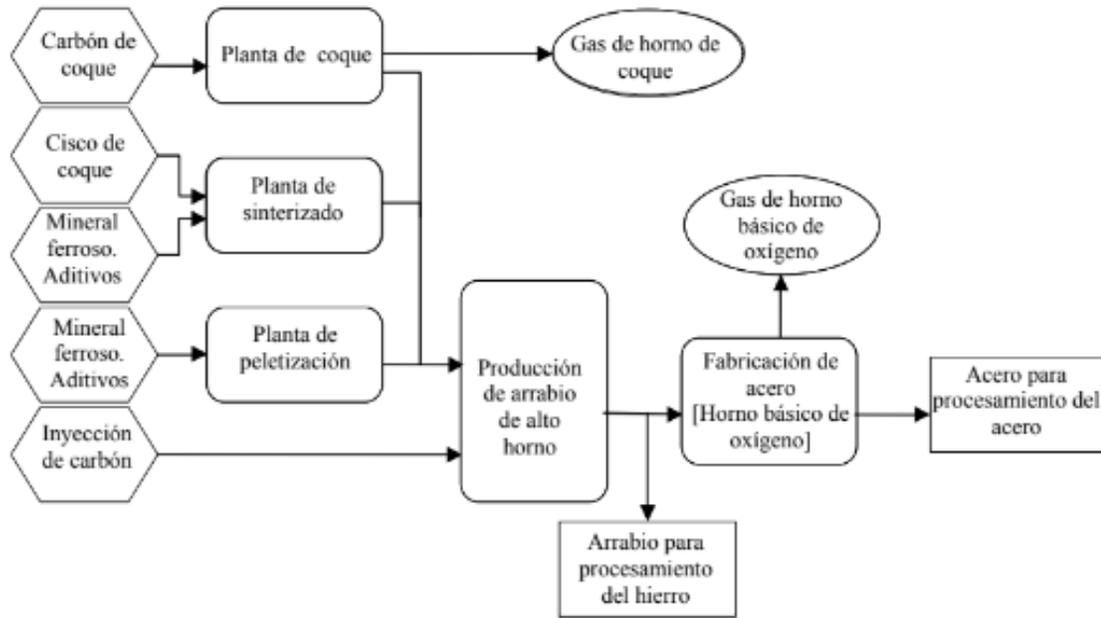
La producción del acero, componente mayoritario de las pilas, utiliza coque metalúrgico, que es el producto sólido de la carbonización del carbón a altas temperaturas (ver Ilustración 5). En el proceso de obtención de coque, el carbón metalúrgico ingresa al horno, generando gas que puede quemarse para calentar los hornos o usarse en la producción de sinterizado. De acuerdo con las directrices para el cálculo de GEI, este proceso produce emisiones de dióxido de carbono y metano, por el proceso de combustión, pero la mayor cantidad de estas se dan por la quema del gas (IPCC, 2006).

Por otra parte, en la operación de las plantas de sinterizado se producen emisiones dióxido de carbono por la oxidación del cisco (coque de baja gradación constituido por partículas de menos de 5 mm) y por las descargas gaseosas que contienen también metano y otros hidrocarburos (IPCC, 2006).

A pesar de que se tienen estas emisiones, la mayor cantidad de dióxido de carbono está asociado a la producción de hierro, ya que se usa carbono para convertir el mineral de hierro en hierro metálico. En este proceso, el carbono actúa como agente reductor para convertir los óxidos de hierro en hierro, y también sirve como fuente de energía para proporcionar calor en la reacción exotérmica del carbono y el oxígeno.

Conforme a los lineamientos establecidos por el IPCC, las emisiones de metano para la producción de acero se consideran insignificantes (IPCC, 2006), las emisiones de dióxido de carbono para la producción de este metal se determinan a partir de las cantidades producidas y el tipo de tecnología usada para este fin.

Ilustración 5: Proceso de producción de hierro y acero



Fuente: (IPCC, 2006).

Para el proceso de producción de hierro, las emisiones de dióxido de carbono se calculan a partir de la producción por reducción directa y por el proceso de sinterizado. Para este caso, el IPCC estableció las expresiones y factores de emisión para el cálculo de dióxido de carbono y de metano.



En la producción de aluminio, se consideran los datos para el proceso electrolítico *Hall-Heroult*, en el cual se tienen celdas electrolíticas de reducción, con un ánodo de carbono y un sistema de alimentación de la alúmina. Para el aluminio, la mayor parte de las emisiones de perfluorocarbonos (PFC) de CF₄ y de C₂F₆, se generan durante los efectos de ánodo,

mientras que el dióxido de carbono procede de la reacción de electrólisis del ánodo del carbono con la alúmina (Al_2O_3) (IPCC, 2006), como se describe en la siguiente ecuación:



En general, se cuenta con los siguientes tipos de tecnología: de ánodo pre cocido central (CWPB), de ánodo pre cocido lateral (SWPB), Søderberg a barra horizontal (HSS) y Søderberg a barra vertical (VSS).

En el cálculo de las emisiones por la producción de zinc, se consideran los procesos de destilación electro-térmica, proceso piro metalúrgico y el proceso electro térmico, que corresponde a una técnica hidrometalúrgica que no produce emisiones no energéticas de CO_2 . Los factores de emisión y las expresiones correspondientes para la producción de los elementos mencionados se encuentran en el Anexo C: Gases de efecto invernadero.

En este punto es importante mencionar que el aprovechamiento de las pilas y acumuladores usados con la aplicación de los planes posconsumo implica una reducción en las emisiones de GEI. Para dimensionar esta reducción se obtuvo como resultado el indicador unitario [Toneladas de CO_2 equivalente no emitido / Tonelada de pilas gastadas recicladas]. A la hora de analizar el ahorro de las emisiones de CO_2 por el aprovechamiento de metales, se debe atender el porcentaje de recuperación de estos en los procesos de aprovechamiento, ya que la posibilidad de recuperación varía con respecto al proceso utilizado. En la actualidad existen varios procesos que presentan diferentes eficiencias en la recuperación del material (Ministerio del Medio Ambiente de Chile, 2014), por lo que se tomó un porcentaje promedio de recuperación del 55%.

La estimación del CO_2 para una tonelada de pilas primarias arrojó los resultados presentados en la Tabla 1-14, donde se evidencia que la mayor cantidad de emisiones provienen de las pilas zinc aire y de las pilas zinc carbón, esto debido a la presencia de zinc, que sumadas a las del acero dan como resultado más de una tonelada de CO_2 equivalente.

Tabla 1-14: Emisiones de Ton CO₂eq por tonelada de pilas primarias

ELEMENTO GESTIONADO	ZINC	ACERO	TOTAL
Pilas Zn-C	0,246	0,236	0,482
Pilas Alcalinas	0,076	0,289	0,364
Pilas de dióxido de mercurio	0,118	0,306	0,424
Pilas de óxido de plata-zinc	0,095	0,284	0,379
Pilas de litio	n/a	0,175	0,175
Pilas de zinc-aire	0,331	0,306	0,637

Fuente: Elaboración propia

En los resultados de CO₂ equivalente para las pilas secundarias, mostrados en la Tabla 1-15, se revela que los acumuladores con mayor impacto por la emisión de gases de efecto invernadero son los de níquel hierro, seguidos por los acumuladores de litio. Comparándolos con las pilas primarias, aún sin tener en cuenta que la vida promedio de una pila secundaria es mucho mayor, se pone de manifiesto que la inadecuada disposición de las pilas primarias representa una afectación de hasta el doble en cuanto a los GEI asociados a su materia prima.

Tabla 1-15: Emisiones de Ton CO₂eq por tonelada de pilas secundarias

ELEMENTO GESTIONADO	HIERRO	ACERO	ALUMINIO	ZINC	TOTAL
Acumuladores Ni-Cd	n/a	0,153	n/a	n/a	0,153
Acumuladores Ni-Fe	0,109	0,140	n/a	n/a	0,249
Acumuladores de litio	n/a	n/a	0,232	n/a	0,232
Acumuladores Ni-MH	0,068	n/a	0,044	0,014	0,126

Fuente: Elaboración propia

Es necesario resaltar que para la estimación de GEI, el análisis de todo el ciclo de vida es fundamental, ya que en el proceso de producción de los materiales que componen la pila, se genera una gran cantidad de gases, como se puede notar en la Tabla 1-14 y en la Tabla 1-15. No obstante, la extracción de la materia prima, el transporte y el uso de energía eléctrica también genera una cantidad considerable de gases. Adicionalmente, el reciclaje

y valorización de estos materiales es primordial ya que, a nivel mundial, en la producción de metales se emiten el 10% de los GEI (Ministerio del Medio Ambiente de Chile, 2014).

1.1.9 Impactos a la salud humana

El impacto a salud humana por la disposición inadecuada de residuos de pilas se debe, principalmente, al consumo de agua contaminada con metales pesados evidenciados en su composición (Arsénico, plomo, mercurio y cadmio). Dentro de los principales efectos de estos metales se tiene que el arsénico presenta una alta solubilidad en el agua y su ingesta, desde 0,05 mg/L, acarrea efectos negativos y degenerativos en la salud humana, como melanosis difusa, leucomelanosis, melanosis mucosembrana, queratosis difusa, hiperqueratosis, gangrena, cáncer en piel, riñón, pulmón, hígado y vejiga (Madhavan & Subramanian , 2007). En Colombia, la concentración máxima aceptable para arsénico en agua potable es de 0.01 mg/L¹⁴.

La contaminación por arsénico de aguas subterráneas es importante, ya que este elemento es particularmente sensible a movilizarse al valor de pH de las aguas subterráneas (pH 6,5 a 8,5). Este elemento se encuentra en el agua principalmente en forma inorgánica, como oxianiones de arsénico trivalente (As III) o arsénico pentavalente (As V) (Smedley & KinniBurgh, 2002), siendo las formas de arsénico inorgánicos solubles más tóxicos que los orgánicos (Gonzales et. al., 2014).

El plomo puede dañar el sistema nervioso central, los riñones, el sistema cardiovascular, los órganos reproductores y el sistema hematológico (Nam-Soo et. al, 2017). Este elemento es particularmente peligroso para los niños porque su cuerpo en crecimiento absorbe más plomo que el de los adultos, su cerebro y sistema nervioso son más sensibles a los efectos dañinos del plomo, y aunque la OMS estableció que no existe un nivel de exposición al plomo que pueda considerarse seguro (OMS, 2016), desde 50 µg/L de plomo en la sangre se tiene riesgo para la salud (EPA, 2017). La concentración máxima permitida de plomo en agua potable en Colombia es de 0,01 mg/L (Ministerio de Protección Social, 2007)

¹⁴ Resolución 2115 de 2007 expedida por el Ministerio de Protección Social

La EPA definió como dosis de referencia para la ingesta de mercurio 0,1 µg/kg de peso corporal/día, y la ingesta semanal tolerable provisional de la Organización Mundial de la Salud (OMS) se encuentra en 1,6 µg/kg de peso corporal/día. No obstante, se ha sugerido disminuir esta dosis hasta 0,025 µg/kg de peso corporal/día (Zero Mercury Working Group, 2012). De acuerdo con la OMS, los adultos trabajadores expuestos por varios años a niveles atmosféricos, de al menos 20 µg/m³ de mercurio elemental, pueden presentar síntomas clínicos de toxicidad en el sistema nervioso central, observando trastornos neurológicos y de comportamiento, con síntomas como temblores, insomnio, pérdida de memoria, efectos neuromusculares, cefalea o disfunciones cognitivas y motoras (OMS, 2017).

La exposición acumulada al cadmio, puede aumentar el riesgo de mortalidad general, así como de enfermedades cardiovasculares, neurológicas, renales y de desarrollo, ya que este metal tiene una vida media biológica de más de 10 años en todo el cuerpo, y los niveles de cadmio en el cuerpo aumentan con la edad, porque sólo una pequeña parte de la carga corporal (0,01-0,02%) se excreta cada día (Nam-Soo et. al, 2017).

La legislación ambiental¹⁵ estableció los límites para actividades asociadas con servicios, específicamente el tratamiento y disposición de residuos, en la Tabla 1-16 se especifican los límites para los metales pesados que constituyen las pilas primarias y secundarias:

¹⁵ Resolución 631 de 2015 expedida por el MADS. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Tabla 1-16: Límites para vertimientos en el tratamiento y disposición de residuos

PARÁMETRO	LÍMITE (mg/L)
Arsénico	0,1
Cadmio	0,1
Zinc	3
Cobre	1
Cromo	0,5
Mercurio	0,01
Plomo	0,2
Níquel	0,5

Fuente: (MADS, 2015)

Para la estimación del volumen de agua contaminada por metales pesados, se usaron las concentraciones para digestión de metales pesados que se encuentran en la caracterización, los límites por norma y la siguiente expresión:

$$V = \frac{C_m}{Lím} \quad (1.34)$$

En donde V es el volumen de agua, en L , que puede ser contaminada; C_m es la cantidad, en mg de contaminante en una tonelada de residuo; y $Lím$ es el límite, en mg/L , establecido por la norma.

A partir de la estimación, se puede deducir que, con la disposición adecuada de cada tonelada de residuos de pilas zinc-carbón, es posible evitar la contaminación de 2.900 m^3 de agua por metales pesados. Ahora bien, este volumen de agua está relacionado con el metal pesado que estaría afectando el mayor volumen de agua, para este caso, el plomo. Lo que significa que, de retirar un elemento que contamina un menor volumen de agua, como el mercurio, que afecta más de 738 m^3 de agua, continuaría la misma cantidad de agua contaminada por plomo. De manera similar, para una tonelada residuos de pilas alcalinas, se contaminarían 76.188 litros de agua.

Al considerar un consumo de $125L/hab./día$, correspondiente a una población de clima frío o templado con un nivel medio alto de complejidad (IDEAM, 2015), se tendría la afectación

de 23.219 habitantes para pilas Zn-C y de 610 habitantes por tonelada de pilas dispuestas de forma inadecuada para pilas alcalinas.

1.1.10 Infografía

A continuación, se presentan las infografías de las pilas con mayor consumo en Colombia, se proponen como compilado de los impactos encontrados en el presente trabajo.

Ilustración 6: Infografía pilas Zn-C



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 7: Infografía pilas alcalinas



Fuente: Elaboración propia

2. Lámparas y luminarias

Las lámparas, fuentes de luz artificiales, y luminarias, aparatos de soporte y conexión a la electricidad; fueron introducidas comercialmente hace alrededor de 130 años con las lámparas incandescentes, y con el paso del tiempo se fueron desarrollando nuevas tecnologías de iluminación, siempre en busca de mejorar su eficiencia luminosa, ya que, por ejemplo, las lámparas incandescentes convierten solo entre el 5 y 10% de la energía que consumen. (A.A. Howarth & Rosenow, 2014).

La iluminación artificial, se convirtió en un elemento significativo, contribuyendo al desarrollo y calidad de la vida humana, permitiendo realizar todo tipo de tareas después del ocaso, ya que se dependía principalmente de la luz del sol. Debido a su importancia en el progreso humano, en la actualidad, el acceso a la energía eléctrica, y por ende a la iluminación artificial, puede ser considerado como un derecho fundamental (Chitnis, kalyani, Swart, & Dhoble, 2016).

Como consecuencia, el consumo de todo tipo de lámparas y luminarias se incrementó exponencialmente junto con el crecimiento poblacional humano, y con ello, los desperdicios asociados a su utilización y disposición final. Ante esta situación, es necesario precisar la cantidad de contaminantes potenciales contenidos en los diferentes tipos de lámparas y luminarias, que pueden llegar al ambiente por una mala disposición, generando impactos negativos debido a que son fabricados con metales pesados, como el plomo y el mercurio.

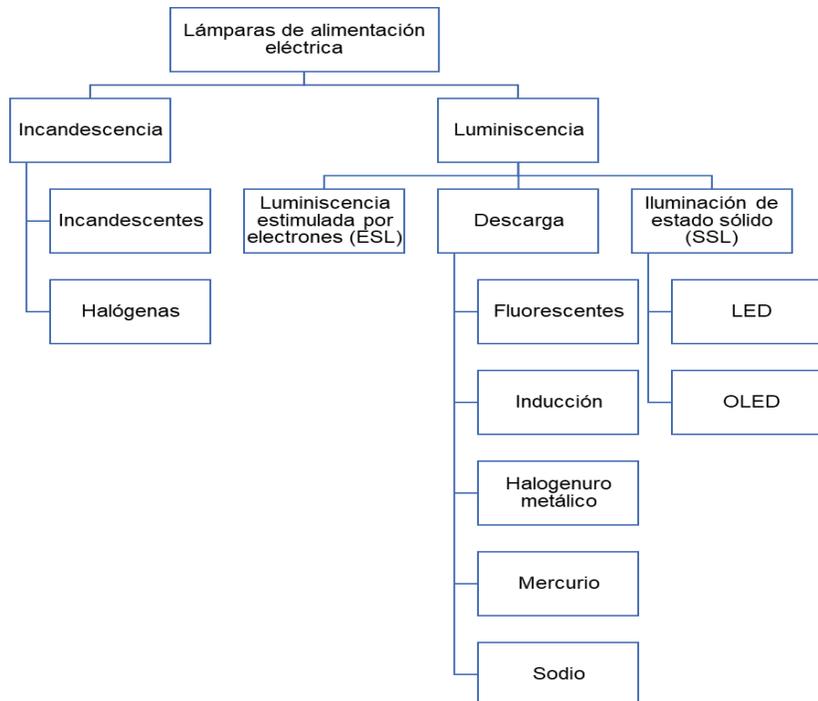
Mediante el convenio de cooperación científica del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MADTV) con la Universidad Nacional de Colombia (PIRS, 2008) y las hojas de Seguridad de algunos fabricantes, se identificaron los valores porcentuales de cada elemento que compone las diferentes fuentes de iluminación.

En este capítulo se presenta una descripción breve del funcionamiento de cada tecnología, su aplicación, composición y posibles efectos en el ambiente y la salud humana, provocados por la mala disposición de sus residuos.

Caracterización

Las lámparas, desde las bombillas incandescentes hasta la tecnología LED, son alimentadas eléctricamente, y se pueden clasificar según su principio de funcionamiento (ver Ilustración 8), por incandescencia o luminiscencia. La incandescencia es el fenómeno mediante el cual la luz es emitida por energía térmica, por ejemplo, una barra de hierro que, calentada a una alta temperatura, empieza a brillar. La luminiscencia se aplica a todas las fuentes de iluminación, cuyo principio de funcionamiento es el movimiento de electrones dentro de una sustancia y no dependen de la energía térmica (Chitnis, kalyani, Swart, & Dhoble, 2016).

Ilustración 8: Diagrama de lámparas alimentadas por electricidad



Fuente: (Chitnis, kalyani, Swart, & Dhoble, 2016)

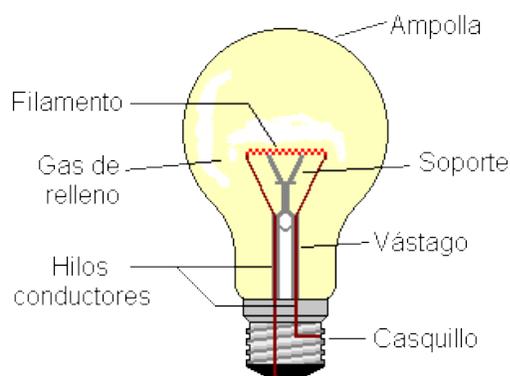
2.1.1 Lámparas incandescentes

Las bombillas incandescentes, también llamadas lámparas de filamento, se implementaron comercialmente para la iluminación de interiores hacia 1880, convirtiéndose en la principal tecnología de iluminación de la época. El éxito de estas bombillas continuó durante años a pesar de su baja eficiencia, ya que, solo entre el 5 y el 10% de la energía que consume se convierte en luz visible (A.A. Howarth & Rosenow, 2014).

Esto último se debe a que su principio de funcionamiento es el incremento de la temperatura en un filamento por el cual circula corriente eléctrica, y tiene como consecuencia la emisión de radiación electromagnética y calor. Mientras mayor sea la temperatura, más corta será la longitud de onda predominante, por lo tanto, una bombilla de filamento a bajas temperaturas emitirá su radiación en el espectro infrarrojo, no visible para el ojo humano (Montoya, Pena-García, Juaidi, & Manzano-Agugliaro, 2017).

Las lámparas incandescentes, se componen de una envoltura de vidrio termorresistente (ampolla), envolviendo un filamento de tungsteno sobre una base metálica con contenidos de soldadura y cemento. Adicionalmente, cuentan con un gas de relleno que evita que, al aumentar la presión, se evapore el filamento y se deposite en las paredes de la ampolla por las corrientes de convección existentes (MAVDT-UN, 2009); este gas está compuesto de nitrógeno, neón, argón y kriptón. La estructura general de una bombilla incandescente se muestra en la Ilustración 9.

Ilustración 9: Partes de una lámpara incandescente.



Fuente: (Fernandez, s.f.)

▪ Lámpara incandescente halógena

Hacia 1950 se agregó a las lámparas incandescentes, un gas halógeno de relleno que permitiese al filamento, el cual se evapora a altas temperaturas, reaccionar con el gas al tocar la pared interna del cristal de la bombilla, creando una función regenerativa en el filamento.

Cuando el producto de la reacción toca nuevamente el filamento caliente, esta se separa y el tungsteno vuelve nuevamente al filamento; con ello se reinicia el ciclo conocido como ciclo halógeno (Montoya, Pena-García, Juaidi, & Manzano-Agugliaro, 2017). La adición del gas permitió aumentar el tiempo de vida útil de las bombillas, sin embargo, el tungsteno no se deposita uniformemente y el filamento se quiebra cuando disminuye su calibre en algún tramo (PIRS, 2008).

A pesar de que durante décadas se estudió cómo mejorar la eficiencia de este tipo de bombillas, su eficiencia típica es extremadamente baja, entre el 10-15% de su emisión electromagnética se encuentra en el espectro visible, mientras que la mayor parte de la energía se transforma en calor (Montoya, Pena-García, Juaidi, & Manzano-Agugliaro, 2017).

En el estudio realizado por el convenio de cooperación científica (PIRS, 2008), se encontró que la aplicación de las lámparas incandescentes se suele dividir en tres grupos según su aspecto, y este se relaciona con su aplicación:

- *Grandes*. Alumbrado general en interiores, exteriores y sitios de trabajo.
- *Miniatura*. Algunos aparatos eléctricos, automóviles y aviación.
- *Fotográficas*. Fotografía y servicios de proyección.

Otra aplicación que se le da a este tipo de bombillas es como calefactor en ciertos espacios.

Los datos de la composición de las lámparas se recopilaron de estudios, en donde se llevó a cabo el desmontaje de todas las lámparas en sus componentes individuales, tanto para las bombillas nuevas (Kuldip Singh, Vikrant, Shilpa, & Sylvi Nazareth, 2014) como para

residuos de las mismas (PIRS, 2008). Para bombillas nuevas, se presentan los pesos y porcentajes de los componentes principales en el Anexo B: Composiciones de lámparas.

Adicionalmente, en el estudio realizado por el PIRS, se encontró la distribución de pesos y porcentajes correspondientes a la composición de los residuos de lámparas incandescentes. También se analizaron las concentraciones de metales pesados en las lámparas y los datos del extracto TCLP.

2.1.2 Lámparas luminiscentes

Dentro de esta categoría se encuentran las lámparas de luminiscencia estimulada por electrones (ESL) y las lámparas de iluminación de estado sólido (SSL). Es necesario resaltar que en las ESL se encuentran las lámparas de descarga en gas, dentro de las que se encuentran las lámparas de descarga de alta densidad (HID) como lámparas de sodio de alta presión, las luminarias de mercurio y de halogenuro metálico. Además, se encuentran las lámparas de baja presión como las fluorescentes lineares, tubulares y compactas, y las luminarias de inducción.

- **Lámpara de luminiscencia estimulada por electrones (ESL)**

Las lámparas ESL, Ilustración 10, producen luz por el principio de *catodoluminiscencia*. Estos dispositivos de iluminación tienen una cubierta con una cara transparente, un cátodo para emitir electrones, una capa de fósforo en el ánodo y una capa conductora. Cuando los electrones se estimulan, golpean la capa de fósforo fluorescente y este emite luz a través de la cubierta transparente (United States Patente nº 20080185970, 2010).

Ilustración 10: Bombilla ESL



Fuente: (Vu1© Corporation, s.f.)

Esta tecnología, crea la misma calidad de luz que una bombilla incandescente, pero consume un 70% menos de energía, además de alcanzar hasta 5 veces más tiempo de vida. Adicional a esto, el sistema no necesita mercurio para su funcionamiento (Vu1® Corporation, s.f.)

Las bombillas ESL se utilizan principalmente para reemplazar las bombillas incandescentes “grandes”. A diferencia de estas, las bombillas ESL permiten el uso de un *dimmer* (regulador de voltaje) para reducir la intensidad de luz que emiten, sin afectar la calidad de esta, dando más posibilidades de aplicación en los diversos espacios donde se utilicen (Vu1® Corporation, s.f.). Están construidas con vidrio reflectivo para la bombilla y una fuente de alimentación en la base. Generalmente no incluyen materiales peligrosos como mercurio.

- **Lámparas de descarga de alta densidad (HID)**

Estas lámparas se construyen con una cubierta de vidrio, que a su vez presenta tubos de vidrio internos que contienen electrodos de tungsteno, donde se produce un arco eléctrico. El tubo de vidrio interno está relleno de dos elementos, un gas y otro metálico. En esta clasificación se encuentran las lámparas de halogenuro metálico, vapor de mercurio y lámparas de sodio de alta presión. La luz se genera cuando se produce la vaporización del metal interno, al crearse un arco eléctrico entre los cátodos de tungsteno. Este tipo de lámparas representan el 1% del total de ventas del mundo, el 25% del consumo de energía por iluminación y provee el 29% de la luz utilizada (De Almeida, Santos, Bertoldi Paolo, & Quicheron, 2014).

Si se compara la cantidad de luz producida por las lámparas incandescentes y fluorescentes, las lámparas HID producen mayor cantidad de luz, por esta razón, se utilizan para alumbrado en grandes superficies donde se requiere una gran intensidad de luz, como parques, gimnasios, estadios, autopistas y parqueaderos (Chitnis, kalyani, Swart, & Dhoble, 2016). Este tipo de lámparas requieren de un balasto, el cual permite controlar la corriente y el voltaje que reciben y garantizar su funcionamiento (De Almeida, Santos, Bertoldi Paolo, & Quicheron, 2014).

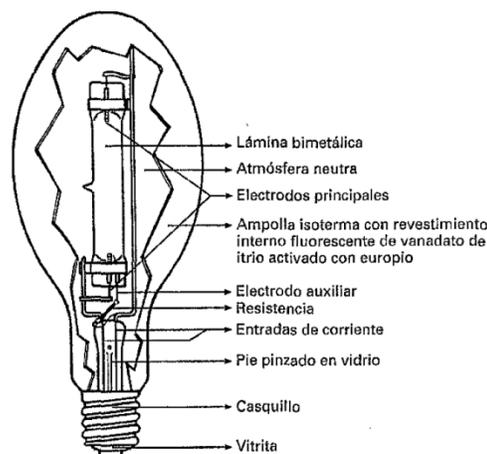
▪ *Lámparas de vapor de mercurio de alta presión (MAP)*

Estas lámparas generan un arco eléctrico que pasa a través de un tubo de alta presión que contiene vapor de mercurio, creando una luz muy brillante. Como se ve en la Ilustración 11, están formadas por un tubo de cuarzo fundido (tubo de descarga), en el que se confinan el mercurio, los electrodos, y una pequeña cantidad de argón; un bulbo exterior de vidrio de borosilicato, con una capa interna de polvos fluorescentes de vanadato de itrio, los cuales corrigen el color de la luz mediante la transformación de la radiación UV en radiación roja.

Sin embargo, es posible que una parte de la radiación UV logre pasar el recubrimiento, lo cual es dañino para la salud humana cuando se tiene una exposición prolongada. Entre los dos tubos, externo e interno, se crea una atmósfera neutra que generalmente se llena con nitrógeno, esto último con el objetivo de proteger el arco de descarga y regular la temperatura (Chitnis, kalyani, Swart, & Dhoble, 2016) (PIRS, 2008) (San Miguel, 2004).

Este tipo de lámparas se caracterizan por tener un tiempo de arranque entre 3 y 6 minutos y cuentan con un sistema de arranque para que funcione de manera adecuada. La vida útil de estas lámparas tenía un estimado de 8000 a 16000 horas (PIRS, 2008) (San Miguel, 2004), pero actualmente puede superar las 24000 horas de funcionamiento, manteniendo una luz blanca con buena calidad en la salida, sin perder su eficacia lumínica (relación entre el flujo luminoso emitido por la lámpara y la potencia consumida por ésta, se expresa en lúmenes/vatio), entre 35 y 65 Lm/W (Chitnis, kalyani, Swart, & Dhoble, 2016).

Ilustración 11: Lámpara de vapor de mercurio de alta presión



Fuente: (San Miguel, 2004)

En Colombia, el tiempo de vida mínimo aceptado para la aplicación de este tipo de iluminación está restringido a un tiempo no menor de 24000 horas (Ministerio de Minas y

Energía, 2010). En la Tabla 2-1, que se muestra a continuación, se presenta la mínima eficacia permitida en Colombia para las lámparas de vapor de mercurio, según su potencia de funcionamiento.

Tabla 2-1: Potencia y eficacia luminosa permitida en Colombia, para las lámparas de vapor de mercurio de alta presión.

Potencia (W)	Eficacia luminosa (lm/W)
> 50	35
> 50 y ≤ 80	36
> 80 y ≤ 125	47
> 125 y ≤ 250	50
> 250 y ≤ 400	52
> 400 y ≤ 700	55
> 700 y ≤ 1000	55
> 1000	57

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

En la información secundaria encontrada para este tipo de lámparas, se encontró la presencia de cromo, arsénico, mercurio, plomo y níquel (ver Anexo B: Composiciones de lámparas). Las cantidades de metales pesados se relacionan directamente con las partes de las luminarias, por lo tanto, a la hora de evaluar las cantidades que van al ambiente se descuentan estos metales de sus respectivas piezas.

En las concentraciones de metales pesados en las pilas y los datos del extracto TCLP, se encontró que, si bien el mercurio presentaba un valor promedio de 0,057 mg/L, el valor del TCLP del plomo era de 89,2 mg/L.

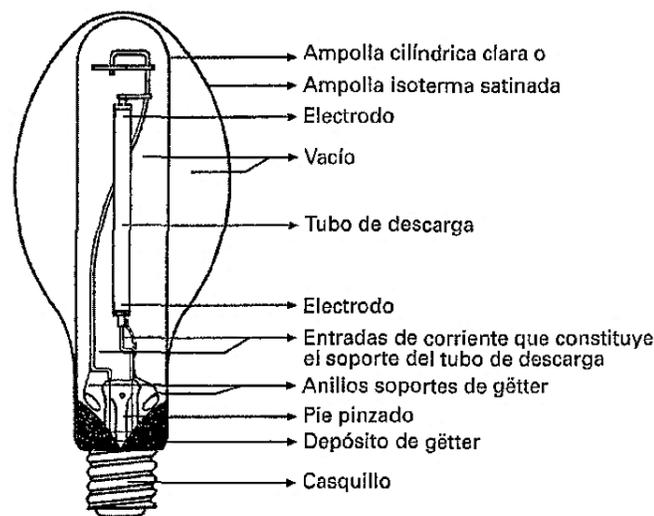
- *Lámparas de halogenuros metálicos*

Es un tipo de lámpara de descarga de alta densidad (HID), con un alto nivel de eficacia lumínica, entre 75 y 100 Lm/W, que funciona mediante un arco eléctrico que atraviesa una mezcla de vapor de mercurio con halogenuros metálicos, normalmente bromuros o yoduros, el más común es el yoduro de sodio. Están formadas por un tubo de cuarzo

fundido, o cerámica, que contiene los gases, y este a su vez, se encuentra dentro de un tubo más grande, normalmente con un revestimiento que filtra la luz ultravioleta, sus dos formas más comunes son ovoide y tubular, ver en la Tabla 5-30 del Anexo B: Composiciones de lámparas. Cuando el arco se forma y alcanza su temperatura de operación, el sodio se disocia del yoduro una vez que el metal se ioniza, produciendo luz en tonos rojos y naranjas, mejorando la reproducción de colores (Chitnis, kalyani, Swart, & Dhoble, 2016).

Para que funcionen de manera correcta, requieren de un balasto y un sistema de arranque que cumpla con las especificaciones de funcionamiento dadas por el fabricante. Requieren de un período de “calentamiento” de hasta 10 minutos para alcanzar todo su potencial luminoso de salida, por todo esto, su vida útil varía entre 6000 y 15000 horas (PIRS, 2008).

Ilustración 12: Lámpara de halogenuros metálicos.



Fuente: (San Miguel, 2004)

En Colombia, la vida útil promedio para estas lámparas no debe ser menor a 12.000 horas y su eficacia mayor de 72 lm/W. Existen excepciones que dependen principalmente de la eficacia de las lámparas. Se permite que tengan una vida mayor o igual a 6000 horas, si su eficacia lumínica es 85 Lm/W, o superior. También se aceptan algunas con una vida útil de 2500 horas o más, sí y solo sí, presentan una eficacia mayor de 90 Lm/W (Ministerio de Minas y Energía, 2010).

Las lámparas de halogenuros metálicos se utilizan principalmente en la iluminación de espacios grandes, como plazas públicas, parques, estadios, donde sea importante la reproducción del color, como los eventos que se transmiten por televisión, exposiciones, monumentos, etc. Existen algunas lámparas de halogenuros, diseñadas especialmente para iluminar objetos sensibles al calor, y en los que es importante una luz blanca para acentuar el color.

Para las lámparas de halogenuro metálico, los datos de la concentración de metales pesados y extracto TCLP, se encontraron datos en el estudio del Ministerio de Ambiente y la Universidad Nacional. En el Anexo B: Composiciones de lámparas se presentan los pesos y porcentajes de los componentes principales de los residuos de lámparas de halogenuro metálico.

- *Lámparas de vapor de sodio alta presión (SAP)*

Según (Chitnis, kalyani, Swart, & Dhoble, 2016), las lámparas de sodio son consideradas las más eficientes ya que producen luz amarilla monocromática, el color más sensible para la visión humana, transformando el 100% de la corriente que utiliza. Por esta razón, es de las fuentes de iluminación más utilizadas, y están presentes en la iluminación de las calles de todo el mundo.

Estas lámparas se constituyen de tubos de descarga fabricados de alúmina vitrificada policristalina, ya que otros materiales como vidrio o cuarzo no resisten el ataque del sodio a altas temperaturas (1000°C), y tienen un bulbo exterior. Dentro de su composición se encuentra, sodio como elemento radiante; mercurio, para mejorar el color; xenón y neón (SicaNews, 2017).

En Colombia, de acuerdo con la información del RETILAP, la vida promedio para bombillas de sodio de alta presión no puede ser menor a 24.000 horas. En la Tabla 2-2, se presentan los valores mínimos de eficacia lumínica para el País.

Tabla 2-2: Valores mínimos de eficacia lumínica en bombillas de vapor de sodio¹⁶.

Potencia (W)	Eficacia luminosa (lm/W)	
	Tubular	Ovoide
50	88	70
70	91	80
100	98	90
150	100	100
250	120	114
400	125	135
600	125	135
1000	150	135

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Para las lámparas de vapor de sodio de alta presión se analizó la información relacionada con concentración de metales pesados, pesos y porcentajes para los componentes principales de los residuos de lámparas de esta tecnología. En los análisis del extracto TCLP consultados en la literatura se encontraron concentraciones de mercurio y plomo, provenientes principalmente de la base metálica, el vidrio, y la cámara de amalgama (ver Anexo B: Composiciones de lámparas).

▪ Descarga en gas de baja presión

En este tipo de lámparas se tiene, un tubo de vidrio lleno de un gas noble a baja presión y mercurio o sodio, con un recubrimiento fluorescente y dos electrodos entre los que se desarrolla un campo magnético (Ledvance, 2018). Entre las principales ventajas de este tipo de tecnología se tiene el arranque instantáneo, la rentabilidad y el alto grado de eficiencia.

▪ Lámparas fluorescentes tubulares

Las lámparas fluorescentes tubulares constan de un bulbo tubular, sellado con un electrodo en cada extremo, el cual contiene en su interior mercurio líquido, que se vaporiza a baja presión; y gases que ayudan a la ignición, como argón, neón, xenón y kriptón. Las paredes

¹⁶ Valores tomados a temperatura ambiente entre 25°C +- 2°C

internas están revestidas con un polvo fluorescente, que determina el color de la luz producida y la eficacia de la lámpara, generalmente se utilizan compuestos de fósforo como halo fósforo, trifósforo de tierras raras o fósforos especiales (AF, 2017).

La luz en este tipo de lámparas se genera por la activación de la fluorescencia del fósforo del recubrimiento. Esta se da porque los filamentos en el interior de la lámpara se calientan desprendiendo electrones que ionizan el argón, creando un plasma capaz de conducir la electricidad, en consecuencia, el plasma excita los átomos de mercurio que emiten luz ultravioleta, activando la fluorescencia del fósforo. Estas bombillas tienen una mayor eficacia energética frente a las bombillas incandescentes, emitiendo entre 3 y 5 veces más luz (Greenpeace, 2008).

En Colombia, desde el 2013, en el RETILAP se estableció que la vida útil para lámparas tubulares fluorescentes no debe ser menor a 10.000 horas. Adicionalmente, el RETILAP estableció específicamente el contenido de mercurio máximo por unidad, discriminando entre el tipo de bombilla fluorescente. De acuerdo con este reglamento, se tienen los valores máximos presentados en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3: Máximos contenidos permitidos de mercurio en lámparas fluorescentes

Tipo de Lámpara	Máximo contenido de mercurio (mg)
Fluorescente compacta	5
Fluorescente tubular con Halofosfato	10
Fluorescente tubular con Trifosfato para vida normal	5
Fluorescente tubular con Trifosfato para vida alargada	8

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

A continuación, en la Tabla 2-4, se presentan los valores mínimos de eficacia lumínica establecidos por el RETILAP para este tipo de lámparas.

Tabla 2-4: Valores mínimos de eficacia lumínica en tubos fluorescentes¹⁷.

Tipo	Potencia (W)	Eficacia luminosa (lm/W)
*T5 (16 mm de diámetro). Y Tubos con diámetros menores al tipo T5	14 a 25	80
	26 a 30	83
	31 a 40	85
	41 a 50	87
	> de 50	90
*T8 (26 mm de diámetro). Y Tubos de diámetro mayor a T5 y menor a T10	14 a 25	68
	26 a 30	72
	31 a 40	78
	41 a 50	79
	> de 50	85
T 10 y T12	14 a 20	80
	20 a 40	83
	> de 40	85

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Se consideraron los pesos y porcentajes de los principales componentes de las lámparas fluorescentes nuevas. Para los residuos de bombillas fluorescentes, de tamaños T8 y T12, se tiene la información consignada en las tablas del Anexo B: Composiciones de lámparas, relacionada con la composición general, es decir, las tapas metálicas y el vidrio.

Es importante resaltar que, el componente principal de los residuos de lámparas fluorescentes es el vidrio, el cual se encuentra contaminado de mercurio. Para el extracto del ensayo TCLP se encontró que, para el año 2008, las concentraciones de mercurio y de plomo estaban entre 0,13 mg/L y 10,07 mg/L (PIRS, 2008). Cabe aclarar que, debido a la implementación del reglamento de luminarias en Colombia, es probable que las concentraciones hayan disminuido.

- *Lámparas fluorescentes compactas*

Este tipo de luminarias se desarrollaron para sustituir las bombillas incandescentes, ya que consumen aproximadamente 70% menos de energía frente a las incandescentes. Están

¹⁷ Valores tomados a temperatura ambiente entre 25°C +- 2°C

compuestas por los mismos elementos que las bombillas fluorescentes tubulares, pero con un tamaño más cómodo para el uso doméstico (Vapormatic Co. Ltda, 2004). Este tipo de lámparas pueden tener el balasto independiente o pueden tener el balasto incorporado (compactas integrales). El RETILAP estableció una vida promedio mayor de 8000 horas y los valores de eficacia luminosa mínima (Ver Tabla 2-5).

Tabla 2-5: Eficacia mínima bombillas fluorescentes compactas con balasto independiente.

Potencia (W)	Eficacia luminosa (lm/W)
≤ 8	50
> 8 y ≤ 15	57
> 15 y ≤ 25	66
> 25 y ≤ 45	69
> de 45	74

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

Para las lámparas fluorescentes compactas integrales, el RETILAP estableció los siguientes valores de eficacia luminosa (Ver Tabla 2-6):

Tabla 2-6: Eficacia mínima bombillas fluorescentes compactas integrales

Potencia (W)	Eficacia luminosa (lm/W)		Horas de vida útil (mín)
	Sin cubierta	Con cubierta	
≤ 8	43	40	3000
> 8 y ≤ 15	50	40	
> 15 y ≤ 25	55	44	6000
> 25 y ≤ 45	57	45	
> de 45	65	55	8000

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2010)

La composición de las lámparas fluorescentes compactas muestra que un 21% de su peso corresponde a componentes electrónicos, representando la principal diferencia entre estas lámparas y las fluorescentes tubulares. La información de la composición general de los residuos de bombillas fluorescentes compactas integrales y no integrales evidencia que la principal diferencia consiste en la inclusión de la tarjeta electrónica y los componentes electrónicos para su funcionamiento (ver Anexo B: Composiciones de lámparas).

Las concentraciones de metales pesados en las lámparas no integrales e integrales muestran una mayor concentración en las lámparas fluorescentes compactas integrales. La variación más significativa está en la concentración de plomo, la cual se debe principalmente a la soldadura de la tarjeta electrónica: 379 mg/unidad para integral frente a 0,42 mg/unidad para no integral (PIRS, 2008). En consecuencia, al analizar la información secundaria de los extractos TCLP para cada tipo de lámparas fluorescentes, se encuentra un mayor riesgo de contaminación por plomo en las luminarias fluorescentes compactas integrales, debido a la mayor concentración de plomo que se podría encontrar en su lixiviado.

- *Lámparas de inducción*

Son lámparas de descarga de gas de mercurio sin cátodos ni filamentos, operadas a altas frecuencias, que tienen la particularidad de una larga vida. Las que cuentan con balasto incorporado deben tener una vida útil superior a 50.000 horas, las de balasto independiente una vida útil superior a 80.000 horas, por lo que su uso es recomendado en lugares donde el reemplazo es difícil. La eficacia de estas fuentes es mayor a 60 lm/W, deben conservar al menos el 70% del flujo luminoso nominal al final de la vida útil, y deben operar a frecuencias acordes con normas internacionales o de reconocimiento internacional (RETILAP, 2010).

Para este tipo de lámparas no se cuenta con información más allá de las fichas técnicas y de seguridad de los fabricantes. En el Anexo B: Composiciones de lámparas se presenta un peso promedio de la luminaria, junto con los porcentajes de sus componentes principales, haciendo la claridad de que estas concentraciones corresponden a la luminaria sin uso.

2.1.3 Diodos emisores de luz (led, oled o lep).

Los LED son fuentes lumínicas con tecnologías prometedoras, que tienen gran dinámica de investigación (Ministerio de Minas y Energía, 2010). A la fecha se carece de normatividad técnica internacional, que permita establecer requisitos específicos obligatorios para estas tecnologías, pese a esto, su uso es admitido cuando el producto y

su aplicación cumplen los requisitos generales de iluminación eficiente y segura establecidos por el RETILAP.

Para este tipo de tecnología, no se encontró un detalle con las composiciones de los residuos, ni su comportamiento frente a un ensayo TCLP, por lo que en las lámparas se presentan los pesos y porcentajes de los componentes principales de los LED nuevos.

2.1.4 Tiempo de vida útil

El RETILAP establece los parámetros mínimos de vida útil de las lámparas incandescentes halógenas, fluorescentes tubulares y compactas, de vapor de mercurio, halogenuros metálicos y de vapor de sodio de alta presión. Los valores promedio de peso para cada tipo de luminaria, presentados en la Tabla 2-7, fueron extraídos del informe presentado por el PIRS.

Tabla 2-7: Tiempo mínimo de vida útil y peso promedio de las luminarias

TIPO DE LUMINARIA	VIDA ÚTIL MÍNIMA (Hr.)	PESO PROMEDIO (g.)
Incandescentes halógenas	2000	28,37
Fluorescentes tubulares	10000	181,78
Fluorescentes compactas	8000	80,62
Vapor de mercurio	24000	161,02
Halogenuros metálicos	12000	346,39
Vapor de sodio alta presión	24000	90,18
Inducción	50000	

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2010) (MAVDT-UN, 2009)

Marco normativo del sector posconsumo de luminarias

La normatividad colombiana para luminarias contempla la Resolución 180540 de 2010, “por la cual se modifica el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público-RETILAP, se establecen los requisitos de eficacia mínima y vida útil de las fuentes

lumínicas y se dictan otras disposiciones”, en donde se encuentra reglamentada la cantidad máxima de mercurio en lámparas fluorescentes compactas, tubulares con halo fosfato y tubulares con trifosfato tanto para vida normal, como para vida alargada.

Así mismo, establece que, desde enero del 2013, no puede haber presencia de plomo o mercurio en ningún tipo de bombillas a excepción del plomo presente en:

- Vidrios de tubos fluorescentes.
- Soldaduras de alta temperatura de fusión.
- Bombillas incandescentes tubulares con tubos recubiertos de silicato.
- Composiciones específicas como amalgama principal y con Pb Sn-Hg como amalgama auxiliar en lámparas de bajo consumo energético (ESL) muy compactas.

Esta resolución restringió el uso de bombillas incandescentes en los sistemas de iluminación desde diciembre de 2010, de conformidad con los decretos 3450 de 2008 “por el cual se dictan medidas tendientes al uso racional y eficiente de la energía eléctrica.”; y el 2331 de 2007 “por el cual se establece una medida tendiente al uso racional y eficiente de energía eléctrica”, que ordenan la sustitución de bombillas de baja eficiencia lumínica.

Así mismo, el uso de lámparas incandescentes halógenas no está permitido para iluminación general, debido a su baja eficiencia. Sólo están permitidas en aplicaciones de iluminación donde se requiere una alta reproducción del color CRI. Agregando a lo anterior, de acuerdo con el Decreto 3450 de 2008, el uso de las lámparas de mercurio de alta presión, y cualquier fuente de iluminación, está restringido a las aplicaciones donde los requisitos de iluminación no se puedan alcanzar con otra fuente de iluminación que presente mayor eficacia lumínica.

El RETILAP se apoya en diferentes normas técnicas como la NTC 2230; en donde se encuentran los sistemas normalizados y los métodos de ensayo para determinar el contenido de metales pesados, entre otros. Las NTC aplicables a luminarias son:

- NTC 900. Reglas generales y especificaciones para el alumbrado público.
- NTC 1000. Sistema internacional de unidades.
- NTC 1156. Productos metálicos y recubrimientos. Ensayos cámara salina.

-
- NTC 1470. Electrotecnia Casquillos y portalámparas roscados E27 y E40. Dimensiones y galgas de verificación.
 - NTC 2050. Código Eléctrico Nacional (conexiones internas).
 - NTC 2117 Balastos para bombillas de alta intensidad de descarga. Requisitos generales y de seguridad.
 - NTC 2118 Balastos para bombillas de alta intensidad de descarga. Requisitos de funcionamiento.
 - NTC 2119 Bombillas de vapor de mercurio a alta presión.
 - NTC 2154 Bloques terminales para uso industrial.
 - NTC 2230 Luminarias parte 1. Requisitos generales y ensayos.
 - NTC 2243 Electrotecnia Bombillas de vapor de sodio a alta presión.
 - NTC 2394 Bombillas eléctricas de haluro metálico de 1000 W.
 - NTC 2466 Equipos de control a baja tensión. Contactores.
 - NTC 2470 Dispositivos de foto control intercambiables para iluminación pública.
 - NTC 3200-1 3200-2 Arrancadores para bombillas de sodio alta presión.
 - NTC 3279 Grados de protección dado por encerramiento de equipo eléctrico [Grados IP].
 - NTC 3280 Equipo de control de baja tensión.
 - NTC 3281 Bombillas de vapor de mercurio. Métodos para medir sus características.
 - NTC 3547 Electrotecnia. Controles para sistemas de iluminación exterior.
 - NTC 3657 Pérdidas máximas en balastos, para bombillas de alta intensidad de descarga.
 - NTC 4545 Métodos de ensayo para la medición de pérdidas de potencia en balastos.

Dentro de la normatividad colombiana, también se encuentra la Resolución 90708 de 2013, por la cual se expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE, adicionalmente, por medio de las Resoluciones 90907 de 2013, 90795 de 2014 y 40492 de 2015, se corrigen y aclaran algunos artículos del Anexo General del RETIE de la Resolución 90708 de 2013 (Ministerio de Minas y Energía, 2018).

El objetivo de este reglamento es establecer las medidas necesarias para garantizar la seguridad de las personas involucradas en la ampliación, remodelación o creación de una

instalación eléctrica, y en todos los procesos relacionados con el uso de la energía eléctrica. Además, incluye la seguridad de la vida animal y vegetal y la preservación del medio ambiente, al prevenir, minimizar o eliminar los riesgos de origen eléctrico.

Es importante señalar que, similar al caso de pilas, el Decreto 4741 “por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral”, aplica para los residuos de luminarias, porque reglamenta las características que confieren a un residuo o desecho, la calidad de peligroso, las obligaciones y responsabilidades del generador

Como resultado de las características de peligrosidad encontradas en las lámparas, se expidió la Resolución 1511 de 2010 emitida por el MADS, la cual establece que los productores de 3000 o más unidades tienen la obligación de “formular, presentar e implementar los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Bombillas y se adoptan otras disposiciones” (MADTV, 2010). Los productos con los que se debe cumplir esta normatividad son las bombillas clasificadas mediante las subpartidas (código), presentados en la Tabla 2-8.

Destaca que, en esta Resolución al igual que en la de pilas, se especifica que los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental (SRS), deben tener tres características:

- ✓ Deben contar con puntos o mecanismos de recolección accesibles y en las cantidades necesarias;
- ✓ No deben generar costos ni obligaciones de compra para el consumidor;
- ✓ Deben incluir alternativas de aprovechamiento y/o valorización
- ✓ Deben considerar el tipo de consumidor:

Tabla 2-8: Sub partidas de los elementos contemplados en la Resolución de 1511 de 2010, con sus descripciones

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
8539.31.00.00	Lámparas y tubos de descarga, excepto los de rayos ultravioleta. Fluorescentes (de cátodo caliente)
8539.31.10.00	Lámparas y tubos de descarga, excepto los de rayos ultravioleta. Fluorescentes de cátodo caliente. Tubulares rectos.
8539.31.20.00	Lámparas y tubos de descarga, excepto los de rayos ultravioleta. Fluorescentes de cátodo caliente. Tubulares circulares.
8539.31.30.00	Lámparas y tubos de descarga, excepto los de rayos ultravioleta. Fluorescentes de cátodo caliente. Compactos integrados y no integrados.
8539.31.30.10	Lámparas y tubos de descarga, excepto los de rayos ultravioleta. Fluorescentes de cátodo caliente. Lámpara fluorescente integrada.
8539.31.90.00	Lámparas y tubos de descarga, excepto los de rayos ultravioleta. Las demás lámparas.
8539.32.00.00	Lámparas y tubos de descarga, excepto los de rayos ultravioleta. Lámparas de vapor de mercurio o sodio; lámparas de halogenuro metálico.
8539.39.90.00	Las demás lámparas y tubos de descarga, excepto los rayos ultravioletas. Las demás lámparas.

Fuente: (MinCIT, 2006)

Existen 4 tipos de consumidores, expuestos a continuación:

- ✓ Tipo 1: Residencial
- ✓ Tipo 2. Industrial, comercial, oficial, educativo y hospitalario.
- ✓ Tipo 3. Alumbrado público
- ✓ Tipo 4. Otros.

Adicionalmente, mediante los SRS, se debe asegurar la recolección anual de al menos el 5% de los residuos puestos en el mercado en los seis años anteriores, con incrementos anuales mínimos del 5%, hasta alcanzar como mínimo el 60%. A partir de enero de 2016, los residuos recolectados por los SRS solo pueden ser gestionados a través de actividades de aprovechamiento y/o valorización.

Impactos al ambiente y a la salud

De manera similar que, en la evaluación de los impactos de las pilas, se determinó la carga potencial que sería emitida al ambiente por cada tonelada de bombillas, partiendo de los

compuestos y las cantidades que terminarían en un botadero a cielo abierto o en un relleno sanitario, al ser dispuestas de forma inadecuada.

Partiendo de la información, entre 2013 y 2016, de importaciones y exportaciones en el país (ANDI, 2017), se calculó el consumo aparente de luminarias para este periodo de tiempo. Se realizó una estimación de la cantidad de residuos de estos productos con base en parámetros de vida útil y un peso promedio de 152 gramos, como se muestra en la

Tabla 2-9. De manera similar a las pilas, los datos suministrados por la ANDI están clasificados por subpartida arancelaria y en esta no se especifica el tamaño de la luminaria.

Tabla 2-9: Estimación de desechos de luminarias en Colombia para el periodo 2013-2016

	LUMINARIAS TOTALES							
AÑO	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Unidades consumidas (Millones)	108,84	72,50	95,62	47,38				
Unidades desechadas (Año 1, 10%; Año 2, 30%; Año 3, 30%; Año 4, 30%; Millones)		10,88	39,90	63,96	87,83	64,65	42,90	14,21
Toneladas desechadas		1.654	6.065	9.723	13.350	9.827	6.521	2.160

Fuente: (ANDI, 2017)

Para la estimación de las unidades desechadas, se utilizó la información del tiempo de vida útil y el modelo M, de alta duración de la bombilla, baja tasa de fallo y degradación del flujo luminoso al finalizar la vida útil; planteado por el programa de investigación de residuos sólidos de la Universidad Nacional (PIRS, 2008). De acuerdo con este modelo, la distribución de los residuos de los diferentes tipos de luminarias se da según se muestra en la Tabla 2-10. Por lo que, en promedio, para el año 1 se dispone el 10% del consumo; para el año 2 el 30%; para el año 3 el 30%; y para el año 4 el 30% restante.

Tabla 2-10: Duración y fallo de los diferentes tipos de lámparas según el modelo M

TECNOLOGÍA	DURACIÓN (DÍAS)	FALLO
Incandescente	273	25% al inicio del primer año y el 75% restante al finalizar el mismo
Fluorescente compacta	1200	28% en el primer año, 30% en el segundo y 42% al finalizar el tercero
Fluorescente tubular	3030	10% en el primer y segundo año, 20% en los años 3, 4, 5 y 6
Haluro metálico	3670	10% en el primer año, 5% en los años 2 y 3, 10% en los años 4 y 5, y 60% en el año 6
Sodio	2167	10% en el primer año, 5% en los años 2 y 3, 10% en el año 4, y 70% en el año 5
Mercurio	1330	10% en los años 1, 2 y 3, y 70% en el año 4

Fuente: (MAVDT-UN, 2009)

En este punto, es importante resaltar la importancia de gestionar adecuadamente las luminarias, ya que al estimar las unidades desechadas (tomando en consideración datos entre 2013 y 2016), se evidencia que para el 2017 se desearían cerca de 87 millones de unidades. Partiendo de que cuando las lámparas no se gestionan adecuadamente, llegan a botaderos a cielo abierto, cuerpos de agua superficiales o, en el mejor escenario, a rellenos sanitarios, en donde el vidrio se quiebra fácilmente, liberando los compuestos tóxicos que se encuentran en su interior, se tendrían más de 13 kilo toneladas de residuos con potencial para contaminar el ambiente.

La estimación de las sustancias químicas que se emiten al ambiente se realizó con base en las cantidades presentadas en la caracterización. Debido a que se cuenta con información limitada, para la estimación del impacto por las lámparas de inducción, se utilizó la información contenida en fichas técnicas de los productores, obteniendo los resultados presentes en la Tabla 2-11.

Tabla 2-11: Cantidades dispuestas en el ambiente para una tonelada de lámparas incandescentes, de vapor de mercurio de alta presión, de halogenuros metálicos y de vapor de sodio de alta presión (Kg.).

MATERIA PRIMA	INCANDESCENTES	VAPOR DE MERCURIO ALTA PRESIÓN	HALOGENUROS METÁLICOS	VAPOR DE SODIO ALTA PRESIÓN
Vidrio	712,08	660,26	855,62	748,43
Base metálica (Aluminio)	113,69	67,25	86,95	54,37
Soldadura	21,64	3,10	16,09	18,55
Cemento	149,60	82,47	-	123,19

Fuente: Elaboración propia

Los resultados presentados revelan las grandes cantidades de vidrio y metales que no serían aprovechados. Para el caso del vidrio, este material puede ser tratado y aprovechado, aumentando la fracción de vidrio reciclado que va al horno de fundición. A su vez, los metales como aluminio y acero tienen la capacidad de retornar al ciclo de materiales (disminuyendo el consumo de energía en su proceso de fabricación hasta en un 70%). Un aspecto clave en las luminarias de alta presión, es la cámara de mercurio o amalgama, que, como se puede ver en la Tabla 2-12, representa un peso significativo y está compuesto principalmente por vidrio y metales pesados que podrían ser recuperados.

Tabla 2-12: Material dispuesto en el ambiente por cámara de amalgama o mercurio para una tonelada de lámparas de alta presión vapor de mercurio, de vapor de sodio y de halogenuros metálicos (Kg.)

MATERIA PRIMA	VAPOR DE MERCURIO ALTA PRESIÓN	HALOGENUROS METÁLICOS	VAPOR DE SODIO ALTA PRESIÓN
Cámara	86,13	40,78	50,18

Fuente: Elaboración propia

Los resultados expuestos en la Tabla 2-13, muestran la gran cantidad de vidrio asociado a los residuos de lámparas fluorescentes tubulares, y la cantidad de metales como acero, cobre, estaño y zinc que se puede recuperar de las lámparas de inducción, en donde, el montaje electrónico ocupa una fracción importante de la luminaria (más del 50%). Dentro

de estos resultados, resalta la cantidad de plomo que se debe, principalmente, a la soldadura de los componentes electrónicos de las luminarias.

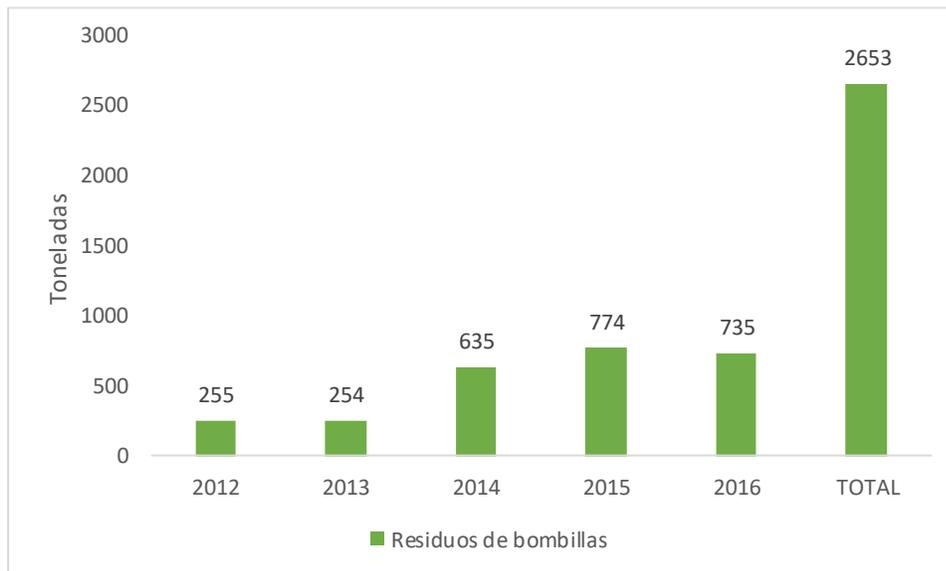
Tabla 2-13: Cantidades dispuestas en el ambiente para lámparas fluorescentes tubulares, compactas y lámparas de inducción (Kg.)

MATERIA PRIMA	FLUORESCENTES TUBULARES	FLUORESCENTES COMPACTAS	INDUCCIÓN
Vidrio	954,22	463,39	285,47
Metales	45,59	70,16	696,15
Plomo	0,0032	4,60	5,01

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se evidencia la importancia de la separación en la fuente de las luminarias fluorescentes compactas, ya que, en una tonelada de estos residuos, es posible recuperar 210,3 Kg de plástico, 50 Kg de la tarjeta electrónica y 200 kg de los componentes Eléctricos.

De acuerdo con los datos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible presentados en la Ilustración 13, para el año 2016 se había logrado recolectar un total de 2.653 toneladas de pilas y/o acumuladores (MADS, 2017). Al relacionar esta cantidad de residuos con los resultados para metales pesados en bombillas fluorescentes compactas, se revela que se han dejado de llevar a un relleno sanitario 12.213 Kg de plomo, 4.531 Kg de níquel, 31,6 Kg de mercurio, 14,82 Kg de cromo y 10,37 Kg de arsénico.

Ilustración 13: Toneladas recolectadas de bombillas

Fuente: (MADS, 2017)

2.1.5 Impactos al agua y al suelo

De la misma forma que en la evaluación de impactos para pilas, el aumento de la vida útil de los rellenos sanitarios es un aspecto significativo cuando se evalúan los impactos ambientales asociados a la disposición adecuada de los residuos de bombillas. Para relacionar el tiempo de vida útil de un relleno sanitario con los residuos que se dejan de llevarse tomó como referencia la población como de Tunja, con 200.000 habitantes (Population.City, 2017), en donde se generan 0,41 kg/hab./día (IDEAM, 2016). Como resultado de la estimación se determinó que la gestión cada tonelada de residuos de pilas, equivale a los residuos generados de 2.439 habitantes en un día.

De acuerdo con los datos presentados por el MADS, presentados en la Ilustración 13: Toneladas recolectadas de bombillas, en el periodo 2012-2016 se gestionaron los residuos de pilas equivalentes a los residuos de 6'470.732 habitantes, lo que representa 32,3 días de un relleno como el de Pírgua en Tunja, Boyacá.

Al revisar la composición de los residuos de lámparas, se evidencian, tal como ocurre con los residuos de pilas, concentraciones de metales pesados, como cromo, arsénico, mercurio, plomo y níquel. De estos metales, la mayor solubilidad en agua la presenta el

plomo, seguido de mercurio, cadmio y arsénico, por lo que estos residuos también representan un riesgo, por contaminación de agua con metales pesados, ya que tienen la capacidad de fluir con los lixiviados hacia las fuentes hídricas.

Como resultado de la estimación de contaminantes, se puede establecer que, con una disposición adecuada, por cada tonelada de residuos de lámparas incandescentes, de vapor de mercurio de alta presión, de halogenuros metálicos y de vapor de sodio de alta presión, se evita podría evitar el vertimiento de las cantidades de metales presentadas en la **Tabla 2-14**.

Tabla 2-14: Cantidad en gramos de metales pesados para una tonelada de lámparas incandescentes, de vapor de mercurio de alta presión, de halogenuros metálicos y de vapor de sodio de alta presión.

MATERIA PRIMA	INCANDESCENTES	VAPOR DE MERCURIO ALTA PRESIÓN	HALOGENUROS METÁLICOS	VAPOR DE SODIO ALTA PRESIÓN
Cromo	1848,37	36,07	0,58	1256,64
Plomo	118,47	263,47	127,04	310,02
Níquel	1026,48	88,16	420,56	3656,36
Mercurio	-	42,53	13,02	59,58
Arsénico	-	1,11	-	-

Fuente: Elaboración propia

De manera similar, la adecuada disposición de cada tonelada de residuos de lámparas fluorescentes tubulares, compactas y lámparas de inducción ahorraría la cantidad de metales referenciados en la Tabla 2-15. Los resultados muestran que, la presencia de elementos electrónicos en lámparas fluorescentes compactas y de inducción, afectan la cantidad de metales pesados presentes en los residuos de este tipo de luminarias, por lo que su separación y aprovechamiento es prioritario.

Tabla 2-15: Cantidad en gramos de metales pesados por tonelada de lámparas fluorescentes tubulares, compactas y lámparas de inducción

MATERIA PRIMA	FLUORESCENTES TUBULARES	FLUORESCENTES COMPACTAS	INDUCCIÓN
Plomo	3,1575	4603,5324	5008,2636
Níquel	181,7091	1707,9716	-
Mercurio	0,7142	11,9014	100,1653
Cromo	0,5263	5,5864	-

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos de Koc presentados en la sección de pilas y acumuladores (Tabla 1-12: Coeficiente de absorción del suelo para mercurio, plomo, cadmio y arsénico.) se puede concluir que, el plomo presente en los residuos y en los lixiviados de las luminarias, tiene la capacidad de migrar, lo que conlleva a la contaminación de suelos, a la afectación de la flora y fauna, y a una posible bioacumulación.

2.1.6 Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Para la fabricación de luminarias se utilizan metales como aluminio, acero y níquel, los cuales pueden ser retornados al ciclo de materiales al realizar la gestión adecuada de los residuos resultantes. Se utilizaron las expresiones para el cálculo de GEI por metales presentes en el apartado 1.1.8 *Gases de Efecto Invernadero (GEI)*, para pilas y acumuladores, ya que para su fabricación, tienen estos metales en común. A partir de las estimaciones realizadas, se llegó a los resultados presentados en la Tabla 2-16:

Tabla 2-16: Emisiones de GEI por metales para cada tonelada de bombillas

ELEMENTO GESTIONADO	MATERIA PRIMA	EMISIONES CO2 (Kg.)	EMISIONES CF4 (Kg.)	EMISIONES C2F6 (Kg.)	TOTAL CO2 eq (Kg.)
Lámparas incandescentes	Base metálica (Aluminio)	187,6	0,091	0,014	912,2
Lámparas de vapor de mercurio de alta presión	Fracción metálica (Aluminio)	111,0	0,054	0,0086	539,6
Lámparas de halogenuros metálicos	Fracción metálica (Aluminio)	143,5	0,070	0,011	697,6
Lámparas de vapor de sodio de alta presión	Base metálica (Aluminio)	89,7	0,043	0,0069	436,2
Lámparas fluorescentes tubulares	Tapas metálicas (Aluminio)	75,2	0,036	0,0058	365,8
Lámparas fluorescentes compactas	Base metálica (Aluminio)	115,8	0,056	0,0089	562,9
Lámparas de inducción	Zinc	172,3	n/a	n/a	952,7
	Acero	780,4	n/a	n/a	

Fuente: Elaboración propia

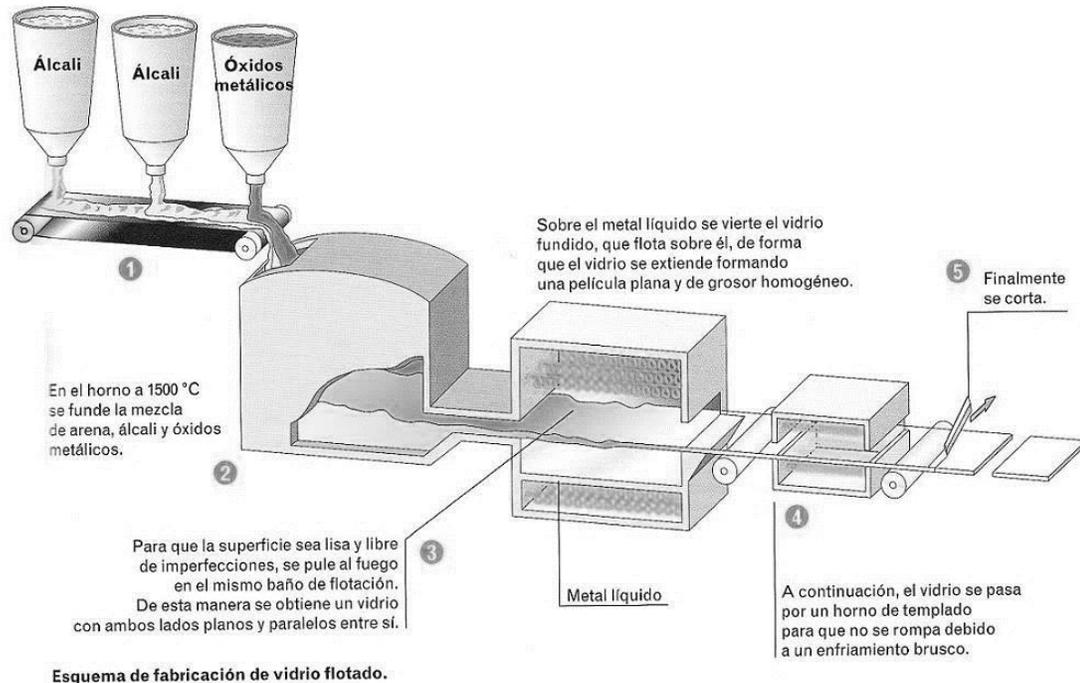
Adicionalmente, un componente fundamental de las luminarias es el vidrio, el cual constituye entre el 25 y el 95% de las mismas; para el cual, el IPCC definió la metodología de cálculo de los GEI generados por el proceso de fabricación que se puede visualizar en la Ilustración 14, en donde la principal materia prima es vidrio de cal sodada, compuesta de sílice (SiO_2), sosa (Na_2O) y cal (CaO), con pequeñas cantidades de alúmina (Al_2O_3) (IPCC, 2006).

De acuerdo con los lineamientos establecidos, en el proceso de fundición se generan la mayor cantidad de emisiones de CO_2 , principalmente por la piedra caliza (CaCO_3), la dolomita $\text{Ca, Mg}(\text{CO}_3)_2$ y la ceniza de sosa (Na_2CO_3). Materias primas como el carbonato de bario (BaCO_3), la ceniza de hueso ($3\text{CaO}_2\text{P}_2\text{O}_5 + \text{XCaCO}_3$), carbonato de potasio (K_2CO_3), el carbonato de estroncio (SrCO_3), el carbón pulverizado de antracita y otros materiales orgánicos que se agregan para crear condiciones reductoras (se combinan con el oxígeno disponible en el vidrio fundido para producir CO_2) (IPCC, 2006); generan cantidades menores de emisiones.

Para producir los moldes con forma de bombilla, se toman cintas de vidrio caliente, previamente espesado y se sopla en el molde correspondiente, luego de este

procedimiento son enfriados y recortados, generando dos pasos adicionales a los presentados en la Ilustración 14.

Ilustración 14: Proceso de producción del vidrio.



Fuente: (CC San Martín, 2018)

Las emisiones de dióxido de carbono para la producción del vidrio se determinan a partir de la cantidad producida y del factor de emisión de CO₂, para este cálculo se usaron los lineamientos de segundo nivel (poca información específica del proceso de producción). A partir de las estimaciones realizadas para dióxido de carbono, proveniente de la fabricación del vidrio, fueron obtenidos los resultados mostrados en la Tabla 2-17.

Por su parte, en los resultados de CO₂ equivalente para las luminarias, mostrados en la

Tabla **2-18** se revela que, las luminarias con mayor impacto potencial por la emisión de gases de efecto invernadero, al realizar una disposición inadecuada, son las incandescentes, seguidas de las lámparas de halogenuros metálicos y las lámparas fluorescentes compactas.

Tabla 2-17: Emisiones de CO₂eq por tonelada de vidrio producido para Colombia

ELEMENTO GESTIONADO	EMISIONES CO2 (Kg.)
Lámparas incandescentes	28,5
Lámparas de vapor de mercurio de alta presión	26,4
Lámparas de halogenuros metálicos	34,2
Lámparas de vapor de sodio de alta presión	29,9
Lámparas fluorescentes tubulares	38,2
Lámparas fluorescentes compactas	18,5
Lámparas de inducción	11,4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-18: Emisiones totales de CO₂eq por tonelada producida de cada tipo de lámpara¹⁸

ELEMENTO GESTIONADO	TOTAL CO2 eq (Kg.)
Lámparas incandescentes	940,6
Lámparas de vapor de mercurio de alta presión	566,0
Lámparas de halogenuros metálicos	731,8
Lámparas de vapor de sodio de alta presión	466,2
Lámparas fluorescentes tubulares	403,9
Lámparas fluorescentes compactas	581,4

Fuente: Elaboración propia

¹⁸ Emisiones al considerar todos los componentes de la bombilla

Para la estimación de GEI, no hay que olvidar la importancia del análisis de todo el ciclo de vida, ya que, en el proceso de producción de los materiales que componen la lámpara, se genera una gran cantidad de gases, como se puede notar en la Tabla 2-17. Aun así, en la extracción de la materia prima, en el transporte y el uso de energía eléctrica también se genera una cantidad considerable de gases (Owens-Illinois Inc, 2010), que la metodología usada por el IPCC no incluye.

2.1.7 Impactos a la salud humana

Para las luminarias, el impacto a salud humana por la disposición inadecuada de los residuos se deriva, en primer lugar, del mal manejo durante la recolección, debido a que la exposición a lámparas intactas no sugiere riesgo para la salud humana, mientras que, si la bombilla se rompe, se liberan algunos materiales que la componen (OSRAM SYLVANIA, 2012).

Entre de los materiales que se pueden liberar, el de mayor preocupación es el mercurio, puesto que, a niveles atmosféricos de al menos $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de mercurio elemental, se pueden presentar síntomas clínicos de toxicidad en el sistema nervioso central, observando trastornos neurológicos y de comportamiento, con síntomas como temblores, insomnio, pérdida de memoria, efectos neuromusculares, cefalea o disfunciones cognitivas y motoras (OMS, 2017). En este punto es importante recordar las altas concentraciones de mercurio que se presentan en las bombillas fluorescentes, en donde se regula una concentración máxima entre 5 – 10 mg. Sin embargo, en aplicaciones especiales, estas concentraciones alcanzan hasta 30 mg de mercurio.

En segunda instancia, se tiene la contaminación del agua, lo que representa un riesgo por la afectación al sistema nervioso, los riñones, el sistema cardiovascular, los órganos reproductores y el sistema hematológico asociada al plomo (Nam-Soo et. al, 2017), el metal que se encuentra en mayor cantidad en los residuos de lámparas. También son importantes los efectos nocivos del arsénico y del cadmio mencionados en el capítulo 1.

Del mismo modo que se estimó el volumen de agua contaminada por metales pesados para pilas, se tomaron los límites especificados en la Resolución 631 de 2015 para el

tratamiento y disposición de residuos, especificados en la Tabla 1-16. Del mismo modo, se usaron las concentraciones de metales pesados de la caracterización y la expresión:

$$V = \frac{C_m}{Lím} \quad (2.1)$$

En donde V es el volumen de agua, en L, que puede ser contaminada; C_m es la cantidad, en mg, de contaminante en una tonelada de residuo; y $Lím$ es el límite, en mg/L, establecido por la norma.

A partir de la estimación se puede deducir que, con la disposición adecuada de cada tonelada de residuos se evitaría la siguiente afectación al suministro de agua:

- Para luminarias incandescentes se evita la contaminación de hasta 3.696 m³ de agua. Al considerar un consumo promedio de agua de 125 L/hab., se puede concluir que se evitaría la afectación 29.574 personas.
- Para lámparas de vapor de mercurio de alta presión, se evitaría la contaminación de hasta 4.252 m³ de agua, correspondientes a 34.021 habitantes.
- Para lámparas de halogenuros metálicos, se evitaría la contaminación de hasta 1.300 m³ de agua, correspondientes a 10.413 habitantes.
- Para lámparas de vapor de sodio de alta presión, se evitaría la contaminación de hasta 7.312 m³ de agua, correspondientes a 58.502 habitantes.
- Para lámparas fluorescentes tubulares, se evitaría la contaminación de hasta 363 m³ de agua, correspondientes a 2.907 habitantes.
- Para lámparas fluorescentes compactas, se evitaría la contaminación de hasta 23.017 m³ de agua, correspondientes a 184.142 habitantes.

De manera similar a las pilas y acumuladores, el volumen de agua calculado está asociado al metal pesado que estaría afectando el mayor volumen de agua, por ejemplo, para las lámparas fluorescentes compactas sería el plomo. Lo que significa que, de retirar un elemento que contamina un menor volumen de agua, como el mercurio, que afecta más de 1.190 m³ de agua, continuaría la misma cantidad de agua contaminada por plomo.

2.1.8 Infografía

Ilustración 15: Infografía luminarias vapor mercurio



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 16: Infografía luminaria HID



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 17: Infografía luminarias vapor sodio



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 18: Infografía luminarias fluorescentes compactas tubulares



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 19: Infografía fluorescente compacta integral



Fuente: Elaboración propia

3. Gestión de residuos posconsumo

Con el fin de analizar los avances en cuanto a la gestión de los residuos posconsumo, desde una visión global de la gestión que se realiza actualmente, se examinó la información de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), de las empresas gestoras y de los programas posconsumo a evaluar en cada estudio de caso.

Las autoridades ambientales son las encargadas de otorgar licencias, de conformidad con lo establecido por la legislación colombiana¹⁹, con el fin de regular las empresas gestoras encargadas del tratamiento, aprovechamiento y disposición del RESPEL. El IDEAM presenta un listado de gestores autorizados, según el cual, actualmente 56 empresas cuentan con la capacidad para transportar, tratar, aprovechar o disponer los residuos de pilas y luminarias, las cuales se encuentran listadas con su respectiva ubicación en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Listado de gestores de residuos peligrosos

NOMBRE (RAZÓN SOCIAL)	UBICACIÓN	NOMBRE (RAZÓN SOCIAL)	UBICACIÓN
LITO S.A.S.	Girón, Santander Barranquilla, Atlántico Yumbo, Valle Bogotá, Cundinamarca	SERVICIOS AMBIENTALES ESPECIALES S.A.E.S.P.	Barranquilla, Atlántico
TECNOLOGIAS AMBIENTALES DE COLOMBIA TECNIAMSA S.A. E.S.P.	Mosquera, Cundinamarca Manizales, Caldas Barranquilla, Atlántico	RECITRAC S.A.S.	Barranquilla, Atlántico
ASESORÍAS Y SERVICIOS ECOLÓGICOS INDUSTRIALES ASEI S.A.S	Itagui, Antioquia Bello, Antioquia	PLANETA VERDE LTDA	Bogotá D.C.
DESCONT S.A. E.S.P.	Girón, Santander Bogotá, Cundinamarca	LASEA SOLUCIONES EU	Bogotá D.C.

Fuente: (IDEAM, 2018)

¹⁹ Decreto 1076 de 2015 expedido por MADS. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Tabla 3 1: Listado de gestores de residuos peligrosos (Continuación)

NOMBRE (RAZÓN SOCIAL)	UBICACIÓN	NOMBRE (RAZÓN SOCIAL)	UBICACIÓN
ECOEFICIENCIA S.A.S.	Girón, Santander Medellín, Antioquia	ESAPETROL S.A.	Bogotá D.C.
INDUSTRIA AMBIENTAL S.A.S.	Mosquera, Cundinamarca Palmira, Valle	INGEAMBIENTE S.A. E.S.P.	Cartagena, Bolívar
GAIA VITARE S.A.S	Candelaria, Valle Bogotá, Cundinamarca	C.I. RECYCLABLES S.A.S	Cartagena, Bolívar
BIOLÓGICOS Y CONTAMINADOS A.M. S.A.S	La estrella, Antioquia	RECUPERACIONES NARANJO RECICLING S.A.S.	Cartagena, Bolívar
CONSORCIO AMBIENTAL COAMBIENTAL E.S.P. S.A.	Bello, Antioquia	EXEDENTES Y METALES	Cartagena, Bolívar
EVAS ENVIAMBIENTALES S.A. E.S.P.	Heliconia, Antioquia	SOLUCIONES AMBIENTALES INTEGRALES DE LA AMAZONIA S.A.S.	San Vicente del Caguán, Caquetá
QUIMETALES	La Estrella, Antioquia	IMEC SA E.S.P.	Aguazul, Casanare
FUTURASEO RPHS S.A.S. E.S.P	Apartadó, Antioquia	SOLUCIONES AMBIENTALES DEL CARIBE	San Diego, Cesar
J.C.G. MANDALAY	San Antero, Córdoba	ALBEDO S.A.S. E.S.P.	Bucaramanga, Santander
JACOBS INTERNATIONAL SAS	Cota, Cundinamarca	SOCIEDAD MERQUIMICOS Y COMBUSTIBLES LTDA.	Floridablanca, Santander
BELMONT TRADING COLOMBIA	Cota, Cundinamarca	BIOTA S.A. E.S.P	San Vicente, Santander
ECOLOGÍA Y ENTORNO S.A. E.S.P. - ECOENTORNO	Mosquera, Cundinamarca	COMERCIALIZADORA MAPRES S.A.S.	Bucaramanga, Santander
PROTECCIÓN SERVICIOS AMBIENTALES RELLENOS DE COLOMBIA PROSARC S.A. E.S.P	Mosquera, Cundinamarca	FUNDACION SECOYA	Bucaramanga, Santander
VALCO CONSTRUCCIONES LTDA	Mosquera, Cundinamarca	GRUPO PLANETA AMBIENTAL E.U. Girón-Santander	Girón, Santander
BIOTRATAMIENTO DE RESIDUOS EL MUÑA S.A.S	Sibate, Cundinamarca	Proyectos Ambientales S.A.S. E.S.P	Ibagué, Tolima

Tabla 3 1: Listado de gestores de residuos peligrosos (Continuación)

NOMBRE (RAZÓN SOCIAL)	UBICACIÓN	NOMBRE (RAZÓN SOCIAL)	UBICACIÓN
OXIDOS Y METALES S.A.S- OXYMET S.A.S	Soacha, Cundinamarca	ASEO INTEGRAL DE RESIDUOS ASIRP S.A.S	Palmira, Valle
SERVIAMBIENTAL S.A. E.S.P.	Neiva, Huila	C.I METALES Y METALES DE OCCIDENTE S.A.	Yumbo, Valle
SERPRO INGENIERIA	Pasto, Nariño	ECO ACCIÓN S.A.S.	Palmira, Valle
EMAS PASTO S.A.E.S.P	Pasto, Nariño	INNOVACION AMBIENTAL INNOVA S.A. E.S.P.	Yumbo, Valle
SALVI LTDA	Pasto, Nariño	RAOC S.A.S.	Yumbo, Valle
CI METALES LA UNIÓN S.A.S	Dosquebradas, Risaralda	SOLUCIONES DE SANEAMIENTO AMBIENTAL SAAM S. A.	Yumbo, Valle
EDEPSA S.A. E.S.P.	Girón, Santander	TECNOLOGIAS ECOLOGICAS ECOTEC S.A.S.	Yumbo, Valle
SANDESOL S.A. E.S.P.	Bucaramanga, Santander	IPSA	Mitú, Vaupés

Fuente: (IDEAM, 2018)

La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), es la entidad encargada de revisar y autorizar las actividades sujetas de licenciamiento ambiental, garantizando que cumplan la normativa ambiental. Para dar cumplimiento a la normatividad posconsumo, en el país a la fecha se tiene vigentes 33 sistemas de recolección selectiva (SRS) para pilas (ANLA, 2017), listados en la Tabla 3-2.

Actualmente, para el manejo de los residuos posconsumo de pilas, la mayoría de los programas utilizan contenedores ubicados en tiendas y almacenes de grandes superficies, en donde se recolectan principalmente pilas cilíndricas domésticas (MADS, 2018). Adicionalmente, se tienen contenedores en tiendas especializadas y consultorios médicos, para la recolección de residuos de pilas de aplicaciones electrónicas relacionadas con prótesis o implantes, en donde se usan pilas de botón. Por otra parte, también se tienen

contenedores en los centros de servicio de computadores y demás aparatos que necesitan entregar y manejar estos residuos.

Tabla 3-2: SRS para pilas en Colombia

No. EXPEDIENTE	TITULAR DEL SISTEMA
SRS0008	HI – ENERGY SAS
SRS0010	INFOTRACK S.A.
SRS0014	PILAS CON EL AMBIENTE
SRS0018	NACIONAL DE PILAS CENTRAL S.A.
SRS0020	DELL COLOMBIA INC
SRS0023	RECOPILA - TRONEX S.A.S.
SRS0024	JUAN CARLOS MOJOCOA PARADA
SRS0027	VARTEC LTDA
SRS0029	MOTOROLA SOLUTIONS COLOMBIA LTDA
SRS0033	WIDEX COLOMBIA S.A.S.
SRS0036	IMCOTEL LTDA
SRS0037	CELULAR SUN 3 S.A.
SRS0038	GH IMPORTACIONES S.A.
SRS0057	EPCOM COLOMBIA
SRS0067	UNIVERSAL ACCESORIOS IMPORTACIONES LTDA
SRS0069	COVERS DESIGN S.A.S.
SRS0075	PCS FOR ALL S.A.S.
SRS0082-00	CI MADILANA S.A.S.
SRS0083-00	IMPORTADORA ELECTRÓNICA S.A. / IMPORTRONIC S.A.
SRS0085-00	REDES DE COMUNICACIÓN Y SISTEMAS NETCOM S.A.S.
SRS0093-00	INVESAKK LTDA
SRS0097-00	UPS Y REDES SAS
SRS0100-00	MAKING BUSINESS
SRS0109-00	FERREELECTRIC S.A.S.
SRS0132-00	AUDICOM IPS
SRS0137-00	TECNOQUALITY
SRS0138-00	COMERCIALIZADORA BRONKO S.A.S.
SRS0139-00	ALFAKIH KHALED
SRS141-00	MORE PRODUCTS S.A.
SRS0143-00	ELECTRONICA AVS S.A.
SRS0154-00	BELLBROOK COLOMBIA S.A.S.
SRS0159-00	STEREN-ELECTTRON COLOMBIA S.A.S.
SRS0004-00-2017	JUAN CAMILO MEJÍA QUINTERO

Fuente: (MADS, 2018)

Para luminarias se manejan contenedores para bombillas fluorescentes compactas y tubulares, que cuentan con sistemas de seguridad y antirroto. Las bombillas para alumbrado público por otra parte se entregan de acuerdo con los mecanismos establecidos por cada sistema (MADS, 2018). Se reporta la existencia de 25 SRS para bombillas usadas (ANLA, 2017), listados en la Tabla 3-3.

Es importante resaltar que desde el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) se han generado iniciativas interesantes para impulsar los planes posconsumo de los residuos de pilas, acumuladores y luminarias, como el proyecto iniciado en 2017 denominado “Reducción de las liberaciones de los COP²⁰ no intencionales y mercurio provenientes de la gestión de residuos hospitalarios, RAEE²¹, procesamiento de chatarra metálica y quemas de biomasa” (MADS, 2018), el cual tiene un tiempo de ejecución de cinco años. En este proyecto trabajarán, entre otros, los programas posconsumo más representativos de pilas o acumuladores y bombillas, buscando la implementación de Mejores Prácticas Ambientales (MPA) y Mejores tecnologías Disponibles (MTD) para prevenir y reducir las emisiones de COP y mercurio.

Otra iniciativa importante es el lanzamiento de la aplicación posconsumo para dispositivos móviles denominada “Red Posconsumo”, buscando que esta sea un medio de difusión de información de los mecanismos de recolección de residuos posconsumo como puntos, campañas y jornadas de recolección. Dentro de esta aplicación participan, para pilas y acumuladores, la Corporación Pilas con el Ambiente y Recopila, y para luminarias, la Corporación posconsumo de iluminación Lúmina y Francisco Murillo (SRS de residuos de bombillas). Esta iniciativa es importante ya que los usuarios pueden encontrar la información exacta de más de 6.000 puntos de recolección y centros de acopio (MADS, 2017).

²⁰ Compuestos orgánicos persistentes

²¹ Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Tabla 3-3: SRS para luminarias en Colombia

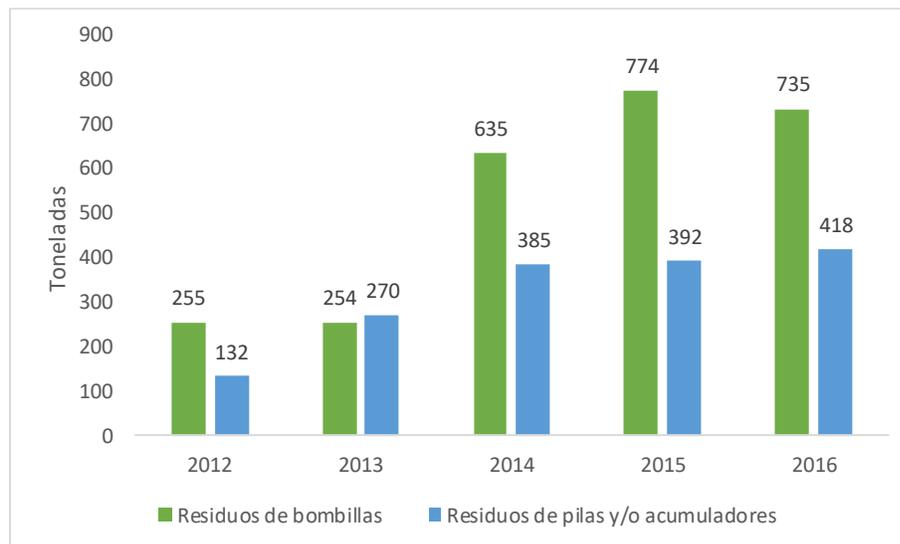
No. EXPEDIENTE	TITULAR DEL SISTEMA
SRS0002	ASOCIACIÓN DE EMPRESARIOS DE COLOMBIA - ANDI
SRS0026	NACIONAL DE PILAS CENTRAL S.A.
SRS0051	ESPECIALIDADES ELECTRICAS S.A.
SRS0056	DISREL S.A.S.
SRS0059	ELÉCTRICOS DEL RUÍZ S.A.S.
SRS0060	ELECTROMARKETING
SRS0061	SUMINISTROS INTEGRALES LTDA
SRS009100	IMPORTADORA TONIFA S.A.
SRS0107-00	REPRESENTACIONES GAJE S.A.S.
SRS0118-00	FERREELECTRIC S.A.S.
SRS0119-00	ALFA IMPORT & EXPORT S.A.S.
SRS0120-00	IMPORTADORA EL FARO ELECTRICO S.A.S.
SRS0121-00	INVESAKK LTDA
SRS0123-00	IRRADIA - POLUX S.A MAYORISTA DE TECNOLOGIA
SRS0127-00	J&S REPRESENTACIONES S.A.S.
SRS0128-00	MERCAELECTRICOS LTDA
SRS0135-00	FRANCISCO MURILLO S.A.S.
SRS0136-00	ELECTRO SUPER CHAPINERO
SRS0144-00	GRUPO EMPRESARIAL MERCURY S.A.S.
SRS0147-00	COAXESORIOS S.A.S.
SRS0152-00	TECNO LITE COLOMBIA
SRS0153-00	COMERCIALIZADORA CERFO LTDA
SRS0156-00	HOYOS GIRALDO GABRIEL ORLANDO
SRS0157-00	IMPORTADORA EURO S.A.S.
SRS0161-00	IMPORTADORA MASTER LIGHTS S.A.S.

Fuente: (MADS, 2018)

Los SRS tanto para pilas como para luminarias han tenido unos avances importantes en cuanto a las cantidades de residuos recolectadas, alcanzando para el año 2016 un total de 1.597 toneladas de pilas y/o acumuladores y 2.653 toneladas de luminarias (MADS, 2017). A pesar de los avances observados en la recolección de pilas, acumuladores y luminarias, se evidencia que no se han cumplido las metas de recolección de forma general, ya que para el caso de las luminarias sólo se ha cubierto cerca de un 21% de los residuos generados estimados y para pilas cerca del 40% de los mismos.

Pese a que no se han cumplido las metas de recolección en el País, es importante resaltar que la adecuada disposición de pilas ha evitado llevar a rellenos sanitarios el equivalente a los residuos de 3'895.122 habitantes, lo que representa 19,4 días de un relleno como el de Pirgua en Tunja, Boyacá; la contaminación de 4'631.300 m³ de agua y tendría el potencial de evitar 769,7 toneladas de gases de efecto invernadero de realizar el aprovechamiento de los metales de todas las unidades.

Ilustración 20: Toneladas recolectadas de pilas y luminarias



Fuente: (MADS, 2017)

De manera similar, por la gestión de residuos de luminarias se pudo evitar la contaminación de aproximadamente 61'000.000 m³ de agua, se pudo evitar la emisión de 1.541 toneladas de GEI y ha evitado llevar a rellenos sanitarios el equivalente a los residuos de 6'470.732 habitantes, lo que representa 32,3 días de un relleno como el de Pirgua.

Desde otra perspectiva, para la Vicepresidencia de Desarrollo Sostenible de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), un programa posconsumo no es solamente el desarrollo de un instrumento ambiental, es un instrumento corporativo con gobernabilidad que termina impactando el medio ambiente. En ese sentido, nace la necesidad, desde los empresarios de los sectores regulados, de un apoyo institucional a los planes posconsumo, al cual responde la Asociación.

A partir de esta necesidad sectorial, la ANDI ha ayudado a las empresas a generar las estructuras necesarias para dar respuesta partiendo desde diferentes perspectivas como el presupuesto, la diferenciación de responsabilidades por empresa, las subpartidas arancelarias incluidas, el tipo de productor, entre otros. De esta forma, la unión de varias empresas que generan los mismos tipos de residuos ha servido, no sólo para darle escala no a la gestión de la logística inversa²², también para la implementación de modelos institucionales, que respondan a cuestionamientos, entre otros, de cómo organizar el sector privado para que un gran productor de un residuo posconsumo, tenga responsabilidades equivalentes pero diferenciadas de un pequeño productor.

En este contexto, la ANDI cobra una gran importancia, ya que se constituye como una plataforma en donde los sectores tienen espacios de representación, de vocería y de trabajo, y en donde se tiene la oportunidad de organización para el sector privado con el fin de responder a la norma de forma colectiva. Como consecuencia, las empresas privadas han creado figuras jurídicas para asumir la responsabilidad extendida y para darle respuesta a la norma, respondiendo a la ANLA a través de estas. En este punto es importante aclarar que, si bien los aspectos técnicos son fundamentales, también es importante tener en cuenta que existen otras aristas indispensables a la hora de abordar temas ambientales como una legislación acorde con los avances tecnológicos, la informalidad, el contrabando, etc. Al tener presentes estos aspectos, es posible brindar sostenibilidad en el aprovechamiento de los residuos posconsumo.

Es de resaltar que, para que los SRS sean viables, deben cumplirse condiciones como cantidades suficientes de residuos, un alto grado de retorno económico y de materiales, procesos con requerimientos energéticos justificables, bajo consumo de material adicional, bajas emisiones y residuos. Adicionalmente, los materiales recuperados deben tener un valor comercial significativo y se deben generar materiales secundarios reutilizables (Ministerio del Medio Ambiente de Chile, 2014).

²² La logística inversa es un proceso en el movimiento de bienes en donde, con el propósito de recuperar valor, desde el destino final se asegura su correcta eliminación o reciclaje.

Otro punto importante a la hora de analizar la gestión de residuos posconsumo está en los consumidores, ya que en el estudio denominado “¿Están Funcionando los Programas de Recolección Selectiva de Residuos Post-Consumo? Caso: Percepción en Bogotá” realizado por Luis David Gómez, se llegó a la conclusión de que, en el caso de Bogotá, para el año 2014 el grado de conocimiento de la norma de pilas y acumuladores, por parte de los consumidores, era de un 37% y para luminarias era de un 85% (Gómez Méndez, 2014). Del mismo modo, a pesar de conocer la norma y de realizar la separación, sólo el 57% de la población encuestada entrega los residuos de luminarias en los puntos de acopio, y el 22% lo hacía efectivo para pilas. Comparando los resultados de recolección de estos dos tipos de residuos en el periodo 2012-2016, se puede verificar que el grado de conocimiento de la norma y la educación ambiental frente a los residuos especiales es fundamental para que el programa posconsumo cumpla las metas de recolección, al evidenciar un mayor avance en la recolección de luminarias.

Para que las condiciones mencionadas se cumplan, es necesario contar con ciertas medidas habilitantes (Ibarra, 2018), generadas por el Gobierno Nacional, para que se cierre el ciclo de materiales. Dentro de estas medidas se tienen la generación de incentivos tributarios para negocios verdes, el apoyo en temas de innovación, que incluye el apoyo con un mayor porcentaje de capital semilla a este tipo de proyectos. En este sentido resulta necesario que los gestores de residuos posconsumo cuenten con garantías y facilidades para que sus productos entren en el mercado y realmente tengan un valor agregado, yendo más allá de la gestión del residuo.

Estudio de caso pilas

El programa posconsumo Recopila, presentado por la empresa Tronex S.A.S. inició su gestión en el 2012 como un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos individual, y para el 2013 su modalidad pasó a ser colectiva, con la participación de siete empresas productoras, un cubrimiento de 48 municipios y 71 puntos de recolección (ANLA, 2013), en donde la empresa Tronex continuó teniendo la vocería del mismo. Actualmente, el programa posconsumo está constituido por 6 empresas importadoras, contando con un cubrimiento geográfico de 235 municipios.

Este programa posconsumo, para el 2016, contaba con 8.488 contenedores instalados, y con un total de 116 clientes ingresados, los cuales corresponden a centros comerciales, conjuntos residenciales, instituciones educativas, fundaciones y demás, ubicados en Antioquia, Arauca, Atlántico, Bolívar, Córdoba, Cundinamarca, Caldas, Risaralda, Santander y Valle del Cauca (ANLA, 2017). Una vez los residuos son recolectados, los recogen los vehículos de TRONEX S.A.S., o los de los gestores autorizados, posteriormente se llevan a los 8 centros de acopio o a las bodegas de la compañía ubicadas en Medellín, Bogotá, Barranquilla, Cali, Pereira, Ibagué, Montería y Bucaramanga. Para concluir, se consolida la carga y se entrega a los gestores para su tratamiento y aprovechamiento.

Hoy día el programa cuenta con cuatro empresas encargadas del transporte: Interaseo S.A. E.S.P, Edepsa S.A. E.S.P, Biológicos Y Contaminados S.A.S E.S.P, y Proyectos Ambientales S.A.S E.S.P. Del almacenamiento, aprovechamiento y valorización están encargadas las empresas Interaseo S.A. E.S.P, Biológicos Y Contaminados S.A.S E.S.P, Proyectos Ambientales S.A.S E.S.P, y Soluambiente Integrales E.S.P S.A.S.

Para el funcionamiento adecuado de los SRS, el cumplimiento de las metas es fundamental, ya que este es un indicador de la eficiencia del programa posconsumo frente al cubrimiento geográfico, la logística y el avance en los procesos de educación ambiental de los consumidores. El cálculo de las metas de recolección se realiza teniendo en cuenta las consideraciones presentadas en la Tabla 3-4, en donde se muestran los porcentajes de avance frente a las unidades puestas en el mercado de los dos años inmediatamente anteriores.

Tabla 3-4: Consideraciones para el cálculo de metas

Periodo considerado para cálculo de la meta mínima (años)	Meta mínima de recolección (%)	Año de cumplimiento	Año de presentación de informe de actualización y avance
2009-2010	4	2012	2013
2010-2011	8	2013	2014
2011-2012	12	2014	2015
2012-2013	16	2015	2016
2013-2014	20	2016	2017
2014-2015	25	2017	2018
2015-2016	30	2018	2019

Fuente: (ANLA, 2013)

En la gestión de residuos de este programa se evidencia que para los años 2012 y 2013 se superó la meta establecida en un 50% y 27% respectivamente (ver Tabla 3-5), mientras que para los tres años posteriores no se alcanza la meta, pero se alcanza una recolección de más del 80% de las unidades propuestas. A pesar de esto, con el funcionamiento del programa se ha evitado la mala disposición de 358,3 toneladas de pilas al ambiente, por lo que se ha impedido llevar a relleno sanitario, botadero a cielo abierto o a una fuente hídrica, cerca de 10.7 toneladas de grafito, 89.5 toneladas de dióxido de manganeso, 28.6 toneladas de zinc, 118.2 toneladas de acero, 5 Kg. de plomo y 273 gramos de mercurio.

Lo anterior, representa cerca de 1'039.070 m³ de agua que no fue contaminada, cantidad que representa el agua que consumen 8'319.368 habitantes en un día, tomando como base un consumo perca pita promedio de 125 litros/hab. día, un ahorro en la emisión de 172,7 toneladas de GEI por el aprovechamiento de metales y 537.4 m³ de residuos que no van a un relleno sanitario. Estos últimos equivalen a los residuos generados por 873.900 habitantes en un día promedio Colombia, o lo que generarían los habitantes de Tunja en 4,4 días, ampliando la vida útil de un relleno como el de Tunja.

Tabla 3-5: Metas de recolección y cumplimiento Recopila

		2012	2013	2014	2015	2016
Meta de recolección	Unidades	885.169	1.591.471	2.776.340	3.986.571	5.062.780
	Peso (Kg.)	30.795	53.597	88.950	120.933	148.206
Cumplimiento de la meta	Unidades	1.328.377	2.023.476	2.293.654	3.221.621	n/a
	Peso (Kg.)	45.829	70.131	79.530	97.753,24	65.119,05 *

Fuente: (ANLA, 2017)

Por otra parte, el programa posconsumo Pilas con el Ambiente es el colectivo apoyado por la Cámara de Electrodomésticos de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), este es un programa colectivo conformado por las principales compañías del sector de pilas en Colombia. Este programa inició su fase piloto en julio del 2010 con dos puntos ubicados en Bogotá. Pasando a 60 puntos en 2011 (ANDI, 2011), y para el 2015 contaba con 3.000 puntos de recolección en 29 departamentos del País, dentro de los cuales se encuentran: Armenia, Barranquilla, Bogotá, Bucaramanga, Cali, Cartagena, Ibagué, Ipiales, Manizales, Medellín, Neiva, Pasto, Pereira, Popayán, San Andrés Islas, Santa Marta, Sucre, Yopal y Tolima. Hoy día el programa reúne a las 10 empresas productoras de pilas y acumuladores más grandes del País y cuenta con 5.700 puntos ubicados en 210 municipios, por los cuales ha sido posible recoger 1.200 toneladas de pilas domésticas entre los años de 2011 y 2017.

El programa nació como un sistema colectivo por acuerdo de 18 empresas productoras, entre fabricantes, importadores y responsables de marcas propias (ver Tabla 3-6). Para 2012, se proyectaba un cubrimiento geográfico en Bogotá, Cali, Medellín y Manizales, y contaba con una meta de recolección de 5'042.514 de unidades, correspondientes a 168.084 Kg (ANLA, 2012). En ese momento las empresas encargadas de las actividades de manejo de los residuos de pilas y/o acumuladores eran Outsourcing Del Embalaje S.A. para el acopio y la selección, Transportes Rápido Ochoa S.A. para el transporte, Rellenos De Colombia S.A. para la disposición final y Open Market LTDA para el monitoreo y recolección.

Tabla 3-6: Empresas parte del SRS Pilas con el Ambiente en 2012

NIT	RAZÓN SOCIAL DEL IMPORTADOR
890803029	RAYOVAC - VARTA S.A.
890.302.546-5	EVERREADY DE COLOMBIA S.A.
890.900.608-9	ALMACENES ÉXITO S.A
890.300.225-7	COEXITO S.A.S.
800.242.106-2	SODIMAC COLOMBIA S.A
800.127.132-2	HAVELLS SYLVARIA COLOMBIA S.A.
806.006.993-1	ENCLA S.A.
830.067.384-2	STARKEY LABORATORIES COLOMBIA LTDA
900.059.238-5	MAKRO SUPERMAYORISTA S.A
890.900.943-1	COLOMBIANA DE COMERCIO S.A. - ALKOSTO S.A.
890.316.171-8	CENTRO ELECTRO AUDITIVO NACIONAL AL SERVICIO DE LA REHABILITACIÓN LTDA CEAN
900.369.296-2	VIDAFON S.A.S.
860.040.705-5	CENTRO MÉDICO OTOLÓGICO JOSÉ A. RIVAS S.A.
830.500.163-9	TECH BIONICA S.A.
800.010.972-9	FOTO DEL ORIENTE LTDA
830.094.384-7	IMPORTADORA AMG S.A.S.
800.000.946-4	PROCTER & GAMBLE LTDA
900.141.177-4	ILUMINATY S.A.

Fuente: (ANLA, 2017)

En la actualidad el programa cuenta con tres mecanismos de recolección: doméstico, institucional y educativo. El doméstico está enfocado en las casas y apartamentos de los consumidores, allí los usuarios crean mini contenedores, difunden la campaña de recolección y recolectan las pilas de vecinos familiares y amigos. Para terminar, los usuarios depositan los residuos en los puntos de Pilas con el Ambiente.

En el mecanismo de recolección institucional las organizaciones se inscriben y pueden solicitar la recepción o recolección de sus pilas usadas. Para la primera, se entrega un peso mínimo de 1 Kg. en los residuos en los centros de acopio; para la segunda, se solicita la recolección de las pilas en Antioquia y Cali con más de 8 Kg. y en Bogotá y las demás ciudades con cobertura con más de 40 Kg (Pilas con el Ambiente, 2018). Pasados 45 días hábiles después de la entrega de las pilas, las organizaciones reciben su certificado de disposición.

Por último, el mecanismo de recolección educativo está enfocado a colegios oficiales, privados, universidades e instituciones como el Jardín Botánico José Celestino Mutis, en donde se realizan procesos de concientización. De manera similar al mecanismo doméstico, se construye un mini contenedor y al llenarlo, los usuarios depositan los residuos en los puntos de Pilas con el Ambiente. Por medio de este mecanismo en 2013 se capacitaron 16 colegios, 33 docentes y 171 estudiantes, en 2014 se capacitaron 55 colegios, 152 docentes y 2.425 estudiantes, y en 2015 se tuvo un alcance de 50 colegios, 1.768 docentes y 100 estudiantes (Pilas con el Ambiente, 2018). Estos procesos de capacitación se llevaron a cabo en Medellín, Envigado, Bello, Cali y Bogotá.

Con base en las cantidades ingresadas al país presentados por el colectivo, presentadas en la Tabla 3-7, se puede concluir que con la implementación de este programa posconsumo se ha evitado la mala disposición de más de 618,9 toneladas de residuos de pilas, evitando llevar a relleno sanitario, botadero a cielo abierto o a una fuente hídrica, 928,3 m³ de residuos, compuestos por cerca de 18.5 toneladas de grafito, 154.7 toneladas de dióxido de manganeso, 49.5 toneladas de zinc, 204.2 toneladas de acero, 9 Kg. de plomo y 471 gramos de mercurio. Lo que representa cerca de 1'794.810 m³ de agua que no fue contaminada, que sería el consumo de 14'000.000 habitantes en un día, y un ahorro en la emisión de 298,3 toneladas de GEI por el aprovechamiento de metales. Además, se evitó la disposición de residuos equivalente a lo que disponen 1'509.000 habitantes en un día promedio en Colombia, o a lo que se dispone en 7,5 días en un relleno como el de Pirgua en Tunja, tiempo que se alargaría la vida de este relleno.

Tabla 3-7: Cantidades puestas en el mercado por el Colectivo Pilas con el Ambiente

		2010	2011	2012	2013
Cantidad Reportada por el Colectivo	Unidades	10.016.231,0	131.948.250,0	126.159.584,0	133.922.137,0
	Kilogramos	177.014,0	1.258.250,0	2.399.000,0	2.546.000,0
REPORTE BACEX	Unidades	72.887.696,0	72.336.341,0	124.118.696,0	573.457.533,0
	Kilogramos	1.951.282,8	2.782.967,3	4.742.363,0	4.218.878,8

Fuente: (ANLA, 2017)

Los productores de pilas incluidos en los programas Pilas con el Ambiente y Recopila no producen pilas de mercurio, sin embargo existen varios importadores que ingresan este tipo de pilas al país, como se ha concluido en diferentes estudios al respecto (PIRS, 2008), ya que no tienen restricciones para el uso de mercurio en sus productos. Estas pilas llegan a los contenedores y el sistema de recolección selectiva se ve obligado a gestionarlo ya que no se puede poner una restricción al consumidor.

Estudio de caso de luminarias

El programa posconsumo Lúmina, antes de la ANDI y actualmente de la Corporación Posconsumo de Iluminación – Lúmina, inició su gestión en el año 2012, este sistema colectivo contemplaba 85 productores, entre importadores y productores. En su fase inicial el sistema se basaba en dos mecanismos de recolección, enfocados a la recolección de residuos de bombillas en establecimientos comerciales y de los consumidores de grandes volúmenes, directamente en sus instalaciones (ANLA, 2012).

La meta para su primer año de funcionamiento fue de 1'603.098 unidades de residuos de bombillas, lo cual equivaldría a un peso de 243.734 Kg, calculada a partir de las estimaciones presentadas en la Tabla 3-8. Para alcanzar esta meta de recolección, el programa estipuló que "La participación de cada productor en la meta de recolección se calcula de acuerdo con el porcentaje de productos puestos en el mercado, sobre la base del total de productos correspondientes al sistema colectivo". Así mismo, para el 2012 se planteó el cubrimiento de Bogotá, Cali, Medellín, Barranquilla, Pereira y Bucaramanga.

Tabla 3-8: Consideraciones para el cálculo de metas

Periodo considerado para cálculo de la meta mínima (años)	Meta mínima de recolección (%)	Año de cumplimiento	Año de presentación de informe de actualización y avance
2006-2011	5	2012	2013
2007-2012	10	2013	2014
2008-2013	15	2014	2015
2009-2014	20	2015	2016
2010-2015	25	2016	2017
2011-2016	30	2017	2018
2012-2017	35	2018	2019

Fuente: (MADTV, 2010)

Actualmente un total de 77 instituciones hacen parte de la Corporación Lúmina (ver . **Tabla 3-9** a y b), cuenta con puntos de recolección en 74 ciudades y municipios del País, y con 10 centros de acopio ubicados en Bogotá, Bucaramanga, Cali, Cartagena, Ibagué, Medellín, Pereira, Riohacha, Santa Marta y Sincelejo (Lúmina, 2018).

Lúmina cuenta con dos mecanismos de recolección principales: residencial e institucional. El primero está dirigido a los consumidores ubicados en conjuntos residenciales, edificios o urbanizaciones que desean entregar sus residuos de iluminación y que no requieran de un certificado de aprovechamiento. En este mecanismo los usuarios depositan sus residuos de bombillas en los puntos de recolección y Lúmina los transporta hasta el centro de acopio, para luego ser llevadas hasta la planta de aprovechamiento en Cali.

El mecanismo institucional está dirigido a personas naturales o jurídicas que fabrican, importan y/o ponen su marca en el mercado con más de 3.000 unidades al año, y que para dar cumplimiento a la Resolución 1511 de 2010, necesitan gestionar sus residuos de iluminación. Para el funcionamiento de este mecanismo, Lúmina ha implementado una aplicación, por medio de la cual las empresas se pueden registrar, solicitando el permiso para entregar sus residuos. Una vez autorizadas, las instituciones son las encargadas de llevar estos residuos hasta el punto de acopio y al finalizar el proceso de aprovechamiento, pueden descargar desde la aplicación el certificado de aprovechamiento (Lúmina, 2018).

Tabla 3-9: Empresas parte del SRS Lúmina

NIT	RAZÓN SOCIAL DEL IMPORTADOR	NIT	RAZÓN SOCIAL DEL IMPORTADOR
816.007.282-2	AD ELECTRONICS S.A.S	890.916.575-4	DISTRIBUIDORA DE VINOS Y LICORES SA
890.900.608-9	ALMACENES EXITO S A	900.482.757-9	ELECTRICAS DE MEDELLIN COMERCIAL S.A.
890914526	ALMACENES FLAMINGO S.A	800.186.332-0	ELECTRICOS H.R LTDA
900.343.963-4	BETANCOURTH ESQUIVEL S.A.S.	900.035.301-8	ELECTRICOS CUCHO E.U.
890.903.436-2	CACHARRERIA MUNDIAL S.A.S	802.011.276-2	ELECTRICOS DEL RUIZ S.A.S
900.092.537-1	CIGLA ELECTRICOS S.A.	811.038.173-2	ELECTRICOS Y TELECOMUNICACIONES CM S.A.
890.900.943-1	COLOMBIANA DE COMERCIO S.A.	900.144.025-7	ELECTRO ILUMINACIONES J.D. S.A.S
830.030.206-1	COMERCIALIZADORA E.M. LTDA	890.901.335-8	ELECTROCONTROL S.A.
830.118.498-3	COMERCIALIZADORA IMPORTADORA DE MATERIALES ELECTRICOS S.A.S	830.134.719-3	ELECTRONICA CHINA S.A.S
900.148.242-7	COMERCIALIZADORA INTERNACIONAL GRAN DISTRIBUIDORA DEL ORIENTE LTDA	900.112.171-7	ENERGIA ILUMINACION VANA LTDA
900.335.255-4	COMERCIALIZADORA INTERNACIONAL OPEN TRADE DE COLOMBIA LTDA	900.319.181-0	ENERGY SOLUTIONS GROUP S.A.S
900.161.569-3	COMERCIALIZADORA LOGISTIC AND SERVICES LTDA	800.081.512-8	EXCELL S.A.S.
830.119.720-9	COMERCIALIZADORA Y REPRESENTACIONES ELECTRICAS S.A.S	800.127.132-2	FEILO SYLVANIA COLOMBIA S.A
890.101.279-0	CONTINENTE S.A.	811.012.403-9	FERRETEROS Y ELECTRICOS S.A.
804.006.196-9	DISTRIBUCIONES ELECTRICAS J.E. S.A.S.	800.010.972-9	FOTO DEL ORIENTE LTDA EN REORGANIZACIÓN

Fuente: (Lúmina, 2018)

Tabla 3-9: Empresas parte del SRS Lúmina (Continuación)

NIT	RAZÓN SOCIAL DEL IMPORTADOR	NIT	RAZÓN SOCIAL DEL IMPORTADOR
800.152.823-9	GABARRA COMERCIALIZADORA SAS	890.101.176-0	MEICO S.A.
811.013.065-7	GENERAL ELECTRIC INTERNATIONAL INC SUCURSAL COLOMBIA	890.329.743-7	NACIONAL DE PILAS DE OCCIDENTE S.A.S
900.220.926-3	GREENLIGHT S.A.	900.484.473-1	OCEAN ELECTRIC INTERNATIONAL S.A.S.
900.225.518-4	GRUPO DAVANI S.A.S.	800.128.867-1	OPTION S A
19.124.057-1	HENRY ALBERTO CADENA SIERRA	830.112.986-9	ORGANIZACION C Y M S A S
800.058.195-1	HIGH LIGHTS S.A.	900.195.154-7	OSAKY S.A
900.053.261-8	ILUMAX S.A.	900.058.192-0	OSRAM DE COLOMBIA ILUMINACIONES S.A.
809.002.625-7	INTERNACIONAL DE ELÉCTRICOS S.A.S	830.122.365-8	PANASONIC DE COLOMBIA S.A.
830.087.721-7	ILUMINACION Y MATERIALES ELECTRICOS S.A.S	900.836.968-7	PHILIPS LIGHTING COLOMBIANA S.A.S.
900.481.780-4	IMPOGEM S.A.S	900319753	PRICESMART COLOMBIA S.A.S
830.039.485-9	IMPORTACIONES ENERGIA Y CIA LTDA	70.694.702-4	RAMIREZ GOMEZ WALTHER DAVID
800.254.335-4	IMPORTACIONES URIBER S.A.S	860.062.958-6	REDES ELECTRICAS S.A.
900.389.108-1	IMPORTACIONES Y EXPORTACIONES OSBLACK S.A.S	830.056.268-9	REPRESENTACIONES EL SOL NACIENTE S.A.S
900.173.452-2	IMPORTADORA MASTER LIGHTS SAS	800.115.720-1	RG DISTRIBUCIONES S.A
900.132.262-4	INTERLUCES Y ELECTRICOS S A S	800.242.106-2	SODIMAC COLOMBIA S A
900.544.932-9	INVERSCOL M&S S.A.S	900.284.821-3	SOLUCIONES EN FERRETERIA Y BRICOLAJE S.A.S.
900.405.807-0	INVERSIONES CALEP S.A.S.	800.189.010-8	SOPORTE A LA INGENIERÍA LTDA
900.502.091-1	INVERSIONES DALIZ SOCIEDAD POR ACCIONES SIMPLIFICADA	890.803.029-9	SPECTRUM BRANDS COLOMBIA S.A
860.514.680-5	JANA LIMITADA	890.933.713-6	SU ELECTRICO Y CIA S.A.S
860.001.386-2	JEN S.A.	890.107.487-3	SUPERTIENDAS Y DROGUERIAS OLIMPICA S.A.
830.087.085-0	LUMICOM S.A.S	830.077.641-3	T&C COLOMBIA S.A
800.228.260-0	MACROELEC LTDA	890.922.586-1	TEXCOMERCIAL - TEXCO S.A.S
900.059.238-5	MAKRO SUPERMAYORISTA S.A.S	811.025.446-1	TRONEX S.A.S
860.001.584-4	MECANELECTRO S. A.		

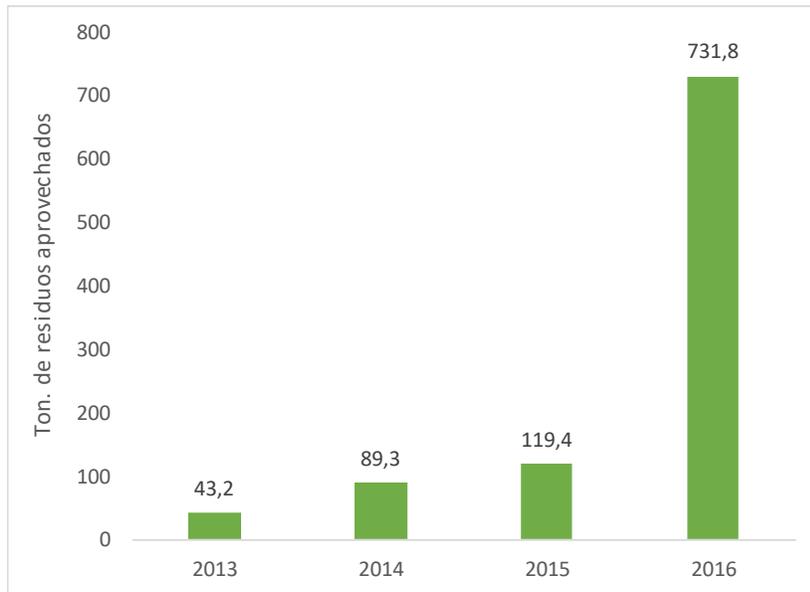
Fuente: (Lúmina, 2018)

Adicional a estos mecanismos de recolección, desde el 2015, la Corporación inició un programa de talleres denominado “Lúmina al colegio” con colegios públicos y privados en Bogotá, el cual abarcó 60 colegios y capacitó a 1.842 personas. A raíz de los resultados obtenidos, el programa se extendió a Gachetá, Gama, Gachalá, Ubalá, Junin, Guasca e Ibagué, fomentando la educación ambiental de 2.343 niños en 1.159 colegios (Lúmina, 2017). Este programa está enfocado a estudiantes y profesores, buscando que estos últimos sean multiplicadores de la iniciativa al capacitarlos por medio de foros.

Para este plan posconsumo se tienen como operadores logísticos Ecoindustria SAS, Asesoría Servicios Ecológicos e Industriales ASEI, CI Recyclables SAS, Descont SA ESP, Innova SAS ESP y Quimetales. Como gestores se tienen a Tecnologías Ambientales de Colombia SA ESP Sede Mosquera y Sede Barranquilla, Innova SAS ESP, Biológicos y Contaminados AM SAS; e Ingeambiente del Caribe (ANLA, 2016).

Desde la implementación de este programa posconsumo, se han alcanzado cifras de recolección importantes: hasta el año 2015 se habían recolectado más de 1.148 toneladas de residuos de iluminación (ANLA, 2016), entre tubos fluorescentes, lámparas compactas integradas, compactas no integradas y bombillas HDI; cifra que aumento hasta 2.566 toneladas para julio de 2016 y alcanzó 3.427 toneladas de luminarias recolectadas para el 2017 (Lúmina, 2018).

En este punto es importante señalar que el aprovechamiento de los residuos por la Corporación Lúmina ha tenido un aumento sostenido desde el año 2013. Los residuos aprovechados por este programa aumentaron significativamente desde 2016, año desde el cual los residuos sólo se podían gestionar a través de aprovechamiento y/o valorización. Como se ve en la Ilustración 21, la cantidad de residuos aprovechados fue 6 veces mayor que la cantidad del año 2015.

Ilustración 21: Cantidad de residuos aprovechados por Lúmina

Fuente: (Lúmina, 2017)

El aprovechamiento de estos residuos evitó, para el año 2016, llevar a relleno sanitario, botadero a cielo abierto o a una fuente hídrica, cerca de 339 toneladas de vidrio, 51 toneladas de aluminio y latón, 180 toneladas de componentes eléctricos, 8 Kg de mercurio y 4 Kg. de cromo. Lo que representa cerca de 7 millones m³ de agua que no fue contaminada y un ahorro en la emisión de 424,4 toneladas de CO₂ equivalentes por el aprovechamiento de metales y vidrio.

Para el periodo 2013-2016 se gestionaron 983,7 toneladas de residuos de bombillas equivalentes a los residuos de 2'399.000 habitantes, lo que representa 12 días de un relleno como el de Pigua en Tunja, Boyacá. En total, por el aprovechamiento de los residuos de bombillas cerca de 22 millones de m³ de agua que no fue contaminada y un ahorro en la emisión de 570,5 toneladas de CO₂ equivalentes por el aprovechamiento de metales y vidrio.

Alternativas de aprovechamiento

Innovación Ambiental – Innova SAS ESP es el primer operador que realiza procesos de aprovechamiento. Esta empresa se encuentra ubicada en Acopi, Yumbo y opera el programa Lúmina en los departamentos del Valle, Cauca y Nariño (Innova SAS ESP, 2018), generando materiales reciclables como aluminio, bronce, cartón, vidrio (para uso en materiales de construcción y fabricación de nuevas lámparas) y mercurio (ANLA, 2016).

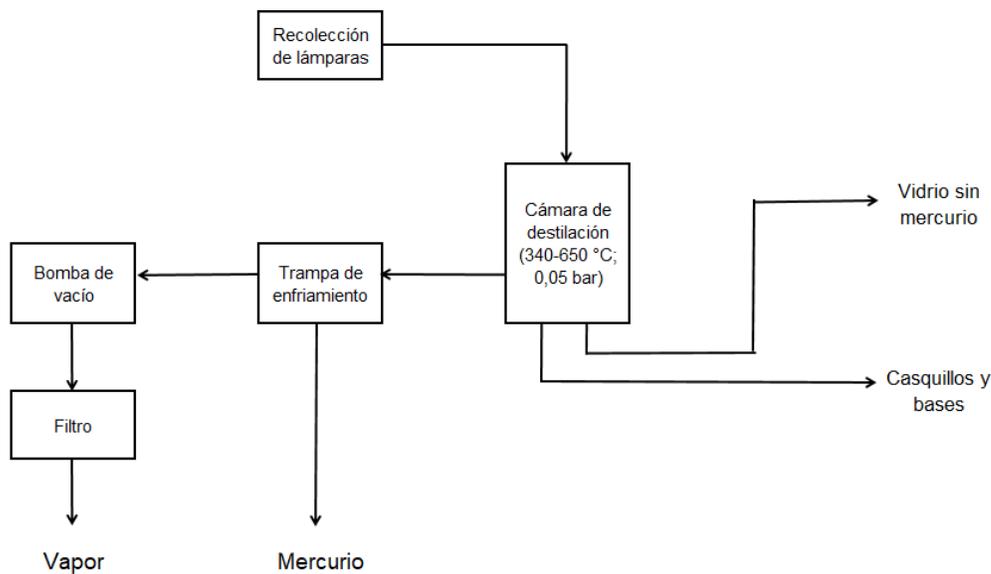
El servicio de tratamiento aplica a residuos mercuriales de origen inorgánico como lámparas, amalgamas, pilas de botón, mercurio metálico residual en estado sólido, semisólido y gaseoso. El proceso de aprovechamiento de la empresa incluye la recuperación del mercurio, y la descontaminación y separación de fracciones valorizables del residuo. Para la recuperación del residuo utilizan el sistema de alto vacío “*vacuum thermal recycling*”, en donde la temperatura y el tiempo de destilación dependen de factores como la cantidad de mercurio y el tipo de residuo (Innova SAS ESP, 2018).

El equipo de destilación tiene una capacidad de 1 m³ y en términos generales el proceso y consiste en la recepción de los tubos y bombillas embaladas para evitar su quiebre. En primer lugar, se depositan en canecas y se ubican en bandejas para el proceso de demercurización. A continuación, se introducen en una cámara de destilación hermética, en donde un sistema neumático realiza la ruptura (C.V. Lamps, 2018). Posteriormente se produce la evaporación del mercurio en un cámara con control de tiempo, presión y temperatura que opera a aproximadamente 550°C, al finalizar este proceso, se lleva a cabo un choque térmico a -196°C con nitrógeno líquido para condensar el mercurio (Innova SAS ESP, 2018), este proceso se observa en la Ilustración 22.

Los residuos libres de mercurio se trituran y seguidamente, se separan el vidrio y el metal por medio de tamices. Los casquillos y las bases de las lámparas se separan para ser llevados a fundición, y el vidrio procesado se certifica como residuo no peligroso. Este vidrio se tritura en un molino de martillos y pasa por un horno rotatorio, obteniendo una arenisca fina que se adiciona como base a productos como estuco, cementos y elementos de mampostería a base de geo polímeros (ANLA, 2016).

Gracias a la puesta en marcha de los planes posconsumo, se creó la necesidad de tener procesos de aprovechamiento y valorización en el País para luminarias, ya que desde 2016, esta es la única forma en que se pueden gestionar los residuos posconsumo. En este contexto, los programas posconsumo Lúmina y Recopila, apoyaron el desarrollo de la única planta de aprovechamiento de residuos de pilas de la sociedad Ecotec Tecnologías Ecológicas S.A.S., la cual cuenta con licencia ambiental para el almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento, recuperación y/o disposición final de pilas, baterías y residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEES). La tecnología de esta planta para procesar residuos aprovecha el 96% de materiales que los componen, como metales de chaqueta, plástico de envoltura, grafito pulverizado, óxidos de zinc y manganeso, convirtiéndolos en materias primas (Ecotec S.A.S., 2017). Es importante mencionar que con este tipo de proyectos no solo se incentiva el desarrollo de nuevas tecnologías en el país, también se constituye una fuente de empleo.

Ilustración 22: Aprovechamiento de residuos con mercurio



Fuente: (C.V. Lamps, 2018)

La planta de Ecotec S.A.S. cuenta con una capacidad de procesamiento de 100 toneladas al mes de RAEES y de 80 toneladas por mes de pilas y baterías. El proceso inicia en el punto de carga, que funciona con rodillos, que alimenta un molino de cuchillas que logra la apertura de la chaqueta metálica. A continuación, la masa de la primera molienda pasa

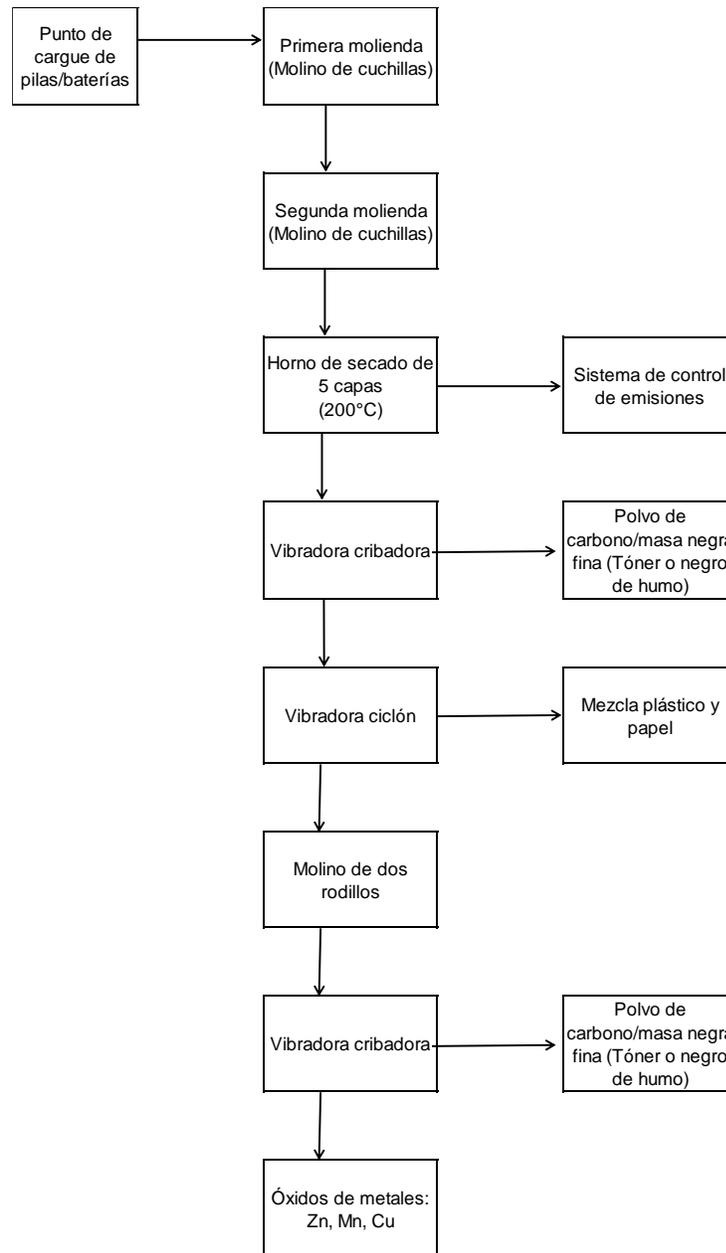
un segundo molino para una molienda más fina, y una vez finalizado el proceso pasa a un horno de secado de cinco capas a 200°C, en el cual se facilita la posterior separación de los materiales (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2016).

Una vez finalizado este proceso, la mezcla de polvo y barra de carbono, celulosa, plástico, hierro, óxidos de zinc, manganeso y cobre pasan a la cribadora, en donde se separa el polvo de carbono. Para la separación de la mezcla de plástico y papel, se utiliza un ciclón y más adelante la masa resultante se conduce a una vibradora cribadora, la cual separa la mezcla del polvo de carbono. Como resultado, se obtiene una mezcla de óxidos de zinc, manganeso y cobre (ver Ilustración 23)

Como sistema de control de emisiones, de acuerdo con la licencia ambiental, se utiliza un filtro de ozono, un filtro de carbón activado y una chimenea de gases. Se tiene un generador de nitrógeno para prevenir los incendios en el proceso de molienda, y seis unidades colectoras de polvo de carbón fino.

De acuerdo con la licencia ambiental de la empresa, los metales no ferrosos se entregan para aprovechamiento a las empresas Cobre de Colombia y Alúmina, los materiales ferrosos son aprovechados por las empresas SIDOC o SIDELPA y los residuos peligrosos como pilas de botón y las bombillas usadas se gestionan con la empresa Innova SAS ESP.

Adicionalmente, la ANDI apoya el círculo de innovación, el cual es un espacio para determinar la viabilidad de apoyar nuevos proveedores en aprovechamiento de residuos posconsumo. En este círculo, Quimetales S.A.S., que cuenta con Licencia Ambiental otorgada por CORANTIOQUIA en la Resolución No 130 AS-1410- 8722 de octubre de 2014, para las actividades de almacenamiento, gestión del tratamiento y aprovechamiento de residuos peligrosos; se presentó con el prototipo de la separación de los componentes de la pila, y actualmente cuentan con el servicio de aprovechamiento luminarias, pilas y baterías y chatarra electrónica (Quimetales S.A.S., 2018).

Ilustración 23: Aprovechamiento de residuos de pilas alcalinas y salinas

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2016)

Actualmente en el País se están adelantando procesos para incluir más tecnologías de aprovechamiento dentro de las opciones de valorización de los productores. Una de las empresas es Shinytya Química, ubicada en Cota, Cundinamarca, la cual está adelantando un proceso de patente y licenciamiento para el aprovechamiento de pilas.

El aprovechamiento de pilas usadas a nivel mundial se da principalmente por procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos. Para el primero las pilas se envían como chatarra a un alto horno (Co-procesamiento), en donde la materia orgánica, el papel, el cartón y el plástico son incinerados, el carbón hace combustión y los metales salen como producto. En el proceso hidrometalúrgico las pilas se disuelven en baños de digestión ácidos o básicos, y el lixiviado con los metales pesados es llevado a procesos de recuperación (MAVDT-UN, 2009).

A pesar de la existencia de estos procesos de aprovechamiento, en Colombia, de acuerdo con la información de gestores y SRS, no se aprovecha el acero de las pilas, ya que no se cuenta con los términos de referencia para el uso de pilas en la fabricación de barras de acero (Ibarra, 2018). Se hace evidente la importancia de generar soluciones no sólo tecnológicas o económicas, sino de carácter regulatorio, ya que cuando lo regulatorio no apoya la gestión de los residuos las soluciones ambientales, técnicamente viables, no se implementan.

4. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Se determinaron los impactos ambientales asociados a la gestión adecuada de los residuos de pilas, acumuladores y luminarias presentes en los capítulos 1 y 2 y el Anexo D: Impactos pilas y luminarias, encontrando que a partir de la implementación de los programas posconsumo en Colombia, entre los años 2012 y 2016, se han aprovechado 1.597 toneladas de residuos de pilas, lo que representa más de 2.395 toneladas de residuos que no han ido a rellenos sanitarios, botaderos a cielo abierto o fuentes hídricas. A pesar de que se evidencian avances en la recolección de pilas, acumuladores y luminarias, de forma general, no se han cumplido las metas de recolección, ya que para el caso de las luminarias se ha cubierto un 21% de los residuos estimados y para pilas cerca del 40% de los mismos.

Esta cantidad de residuos representan 927 Kg de plomo, 12,39 Kg de cadmio, 11,78 Kg de mercurio, 3 Kg de níquel, 760 gramos de cromo y 152 gramos de arsénico que se han dispuesto de forma adecuada, evitando la afectación del medio ambiente y de la salud humana.

Al revisar las características y cantidades de pilas gestionadas por los SRS se evidenció que, a pesar de que las pilas con mercurio están prohibidas en el país y sólo se permiten en usos específicos, estas llegan a los contenedores de los Sistemas de Recolección Selectiva, lo que pone en evidencia la posible contaminación por este metal pesado en municipios en donde no tienen alcance los programas posconsumo.

Al analizar las emisiones generadas por los procesos de producción se estableció que, por cada tonelada gestionada de pilas, se dejan de emitir en promedio 410 Kg de gases de

efecto invernadero para pilas primarias y 0.19 Kg de GEI para pilas secundarias, asociados al aprovechamiento de metales como acero y zinc para pilas primarias, y aluminio para pilas secundarias. Del examen anterior se advierte que el uso de pilas secundarias no sólo evita impactos negativos al ambiente por la generación de una mayor cantidad de residuos sino que evita la generación de una mayor cantidad de GEI. De manera similar se encontró que, por cada tonelada gestionada de luminarias, se dejan de emitir, en promedio, 549,6 Kg de CO₂ equivalente, asociadas al aprovechamiento de metales y vidrio.

A partir de las estimaciones realizadas se pudo evidenciar el gran potencial de reciclaje de los residuos posconsumo, en donde las pilas y acumuladores contienen compuestos como el acero, dióxido de manganeso, zinc y grafito, y en las luminarias se tiene la capacidad de reciclar grandes porcentajes de vidrio, aluminio y latón. Como resultado de la implementación de los sistemas de recolección selectiva (SRS), se han alcanzado avances tecnológicos para el aprovechamiento de residuos de pilas, acumuladores y luminarias a partir de la normatividad posconsumo, ya que se estimuló la instalación de dos plantas de separación y valorización de vidrio, metales, mercurio, óxidos de zinc y de manganeso, promoviendo la transferencia tecnológica de maquinaria para el aprovechamiento de residuos mercuriales.

Pese a las dificultades a la hora de implementar los planes posconsumo, se ha demostrado la importancia de los mismos en la prevención de impactos ambientales, en el aumento de gestores de residuos de pilas y luminarias, y en la incorporación de los fabricantes e importadores en el modelo de responsabilidad extendida del productor. En efecto, las normas posconsumo han motivado la creación de un mercado para los residuos de lámparas, pilas y acumuladores, en especial cuando hoy día se han alcanzado volúmenes considerables. Sin embargo, al analizar el funcionamiento de los planes posconsumo, se evidencia que para mejorar su gestión y aumentar el alcance de estos, son necesarias algunas medidas gubernamentales (normatividad, incentivos tributarios, capital semilla y demás) para promover la creación de más empresas de aprovechamiento y asegurar la permanencia de estas en el mercado.

Al recopilar y analizar la información de recolección y gestión de los residuos posconsumo se advierte la falta de información disponible para el análisis de los datos tanto de las

características y cantidades de los residuos recolectados, como del tipo de gestión que se da a los mismos, lo cual dificulta el análisis de los impactos ambientales y económicos asociados a la implementación de los SRS.

Recomendaciones

La información asociada a la generación de residuos peligrosos, su gestión y aprovechamiento es limitada, por lo que se sugiere un registro con datos más específicos, con el fin de evaluar de forma más detallada los impactos ambientales positivos que han tenido los planes posconsumo tanto de las corrientes evaluadas en el presente estudio, como de las demás corrientes de residuos.

El cumplimiento de las metas de recolección está ligado al retorno de los residuos posconsumo por parte de los consumidores, por lo que las campañas informativas y los procesos de educación ambiental son fundamentales para alcanzar las metas de dichos programas, ya que permiten orientar al consumidor en el manejo adecuado de estos residuos, generando conciencia acerca de la importancia de su devolución, de los mecanismos de recolección y de los impactos ambientales negativos que se derivan de una mala disposición.

Con el fin de lograr un mayor porcentaje de separación y aprovechamiento de los residuos posconsumo se identificó la necesidad de generar medidas gubernamentales acordes con el contexto nacional para la generación y consolidación de empresas gestoras, en donde se impulse la transferencia tecnológica y la investigación de nuevas y mejores formas de recuperar los materiales.

Bibliografía

- A.A. Howarth, N., & Rosenow, J. (2014). Banning the bulb: Institutional evolution and the phased ban of incandescent lighting in Germany. *Energy Policy*(67), 737–746.
- AF. (03 de 2017). *Así funciona*. Obtenido de Así funcionan las lámparas fluorescentes: http://www.asifunciona.com/electrotecnia/af_fluorescentes/af_fluorescentes_2.htm
- Allen, D., & Shonnard, D. (2002). *Green Engineering. Environmental Conscious Design of Chemical Processes*. New Jersey: Prentice Hall.
- ANDI. (2011). *Inicia campaña para proteger el medio ambiente. Colombia es pionera en recolección de pilas usadas*. Bogotá.
- ANDI. (2017). *Asociación Nacional de Empresarios de Colombia*. Obtenido de Informes y estadísticas comercio exterior.: http://www.andi.com.co/cse/Paginas/Estudios_y_Estad%C3%ADsticas.aspx
- ANLA. (05 de 2012). Resolución 0308 de 2012. *Por la cual se aprueba un sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Pilas y/o Acumuladores y se adoptan otras determinaciones*. Bogotá.
- ANLA. (07 de 05 de 2012). Resolución No. 0307 de 2012. *"Por la cual se aprueba un sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Bombillas y se adoptan otras determinaciones"*. Bogotá.
- ANLA. (13 de 12 de 2013). Resolución 1287 de 2013. *Por la cual se modifica la Resolución No. 498 del 22 de junio de 2012, y se adopta otras disposiciones*. Bogotá.
- ANLA. (30 de 09 de 2016). Resolución No. 01134 de 2016. *"Por la cual se modifica la Resolución 307 del 7 de mayo de 2012, que aprueba un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Bombillas"*. Bogotá.
- ANLA. (05 de 04 de 2017). Auto No. 01156. *Por el cual se efectúa un seguimiento y control ambiental a un Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Pilas y/o Acumuladores*. Bogotá.
- ANLA. (13 de 12 de 2017). Resolución No. 01620. *Por la cual se resuelve una solicitud de Revocatoria Directa contra la Resolución No. 68 del 13 de enero de 2017 y los Autos Nos. 5029 del 18 de octubre de 2017 y 347 del 13 de febrero de 2017*. Bogotá.
- ANLA. (2017). *SRS Autorizados en Colombia*.
- C.V. Lamps. (03 de 2018). *Tratamiento y reciclaje de lámparas*. Obtenido de <http://www.cvlamps.com/reciclaje.htm>

- Carbonell, C. A., Burló, C. E., & Mataix, B. J. (1995). *Arsénico en el sistema suelo-planta Significado ambiental*. Universidad de Alicante.
- CC San Martín. (03 de 2018). *TecnoBlogSanMartin*. Obtenido de <https://tecnoblogsanmartin.wordpress.com/2013/01/24/4-ceramicas-y-vidrios/>
- Chitnis, D., kalyani, N., Swart, H., & Dhoble, S. (2016). Escalating opportunities in the field of lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 727-748.
- Ciyi Group Limited. (09 de 2017). *MSDS of Nickel Iron Battery*. Obtenido de <http://www.ciyibattery.com/index/technical/id/151>
- Cooperación Triangular Colombia - Chile - Alemania. (Septiembre de 2014). Estudio de recopilación y análisis de experiencias de gestión público-privada relacionadas con la Responsabilidad Extendida del Productor desarrollados en Chile y Colombia,. GIZ Deutsche Gaselischaf für Internationale Zusammenarbeit.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (26 de 12 de 2016). Por la cual se otorga una licencia ambiental. Valle del Cauca.
- De Almeida, A., Santos, B., Bertoldi Paolo, & Quicheron, M. (2014). Solid state lighting review – Potential and challenges in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 30 - 48.
- Ecotec S.A.S. (12 de 2017). *Ecotec*. Recuperado el 02 de 2018, de <http://ecotecsas.com/aprovechamiento-de-pilas-y-baterias/>
- Energizer. (05 de 2015). *Energizer Data Safety Data Sheet*. Obtenido de http://data.energizer.com/pdfs/silveroxidezinc0hg_psd_es.pdf
- Energizer. (01 de 2017). *Energizer technical information*. Obtenido de <http://data.energizer.com/sds>
- EPA. (11 de 2004). *Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods. Chapter Seven: Characteristics Introduction and Regulatory Definitions*. Recuperado el 04 de 2017, de U.S. Environmental Protection Agency: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/chap7_0.pdf
- EPA. (03 de 2017). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 05 de 2017, de Lead: <https://www.epa.gov/lead/learn-about-lead>
- Fernandez, J. G. (s.f.). *Lámparas incandescentes*. Obtenido de <http://recursos.citcea.upc.edu/llum/lamparas/lincan.html>
- Gaona Martínez, X. (03 de 2004). El mercurio como contaminante global. Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente. Barcelona.

- GIECC. (1995). *Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático*.
- Gómez Méndez, L. (2014). ¿Están Funcionando los Programas de Recolección Selectiva de Residuos Post-Consumo? Caso: Percepción en Bogotá. *TEKNOS*, 13–16 .
- Gonzales et. al., G. (2014). Contaminación ambiental, variabilidad climática y cambio climático: una revisión del impacto en la salud de la población peruana. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, 547-56.
- GP Batteries. (04 de 01 de 2016). *Safety Data Sheet for Nickel Metal Hydride Battery*. Obtenido de http://www.violetta.com/japanese/oem/components/gp_msds.pdf
- Greenpeace. (2008). *Eficiencia energética: Primer paso. Eliminación total de lámparas incandescentes para 2010*. Argentina.
- Hunt, Charles E., Z., Regan Andrew, H., & N., R. (2010). *United States Patente nº 20080185970*. Obtenido de <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnetahtml%2FPTO%2Fsrchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=7834553.PN.&OS=PN/7834553&RS=PN/7834553>
- Ibarra, N. (03 de 2018). Programas posconsumo apoyados por la ANDI. (J. Vera, Entrevistador)
- IDEAM. (2011). *Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos*. Bogotá.
- IDEAM. (2013). *Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia*. Bogotá.
- IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá: MinAmbiente.
- IDEAM. (2016). *Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia*. Bogotá.
- IDEAM. (2016). Inventario nacional y departamental de gases efecto invernadero - Colombia. *Tercera comunicación nacional de gases de efecto invernadero 2016*.
- IDEAM. (03 de 2018). *Listado de gestores de residuos peligrosos*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/registro-de-generadores-respel>
- Inda-gro. (07 de 2010). Material safety data sheet. *Induction Grow Lamps Designated*. San Diego.
- Innova SAS ESP. (03 de 2018). *Innovación Ambiental INNOVA SAS ESP*. Obtenido de <http://www.innovaambiental.com.co/programa-de-posconsumo-lumina/>

- IPCC. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. IGES.
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. IGES.
- KTH Royal Institute of Technology. (03 de 2018). *Chemical Equilibrium Diagrams*. Obtenido de <https://www.kth.se/che/medusa/chemeq-1.369367>
- Kuldip Singh, S., Vikrant, B., Shilpa, N., & Sylvi Nazareth, A. (2014). Life cycle assessment of incandescent, fluorescent, compact fluorescent and light emitting diode lamps in an indian scenario. *Procedia CIRP*, 467-472.
- Ledvance. (03 de 2018). *Ledvance*. Obtenido de Descarga de gas a baja presión: <https://www.ledvance.es/productos/conocimiento-del-producto/lamparas-fluorescentes/conocimiento-profesional/principio-de-funcionamiento-de-la-descarga-de-gas-a-baja-presion/index.jsp>
- Lenntech. (03 de 2018). *Lenntech Water Treatment*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/cinc-y-agua.htm>
- Linden, D., & Magnusen, D. (2000). Portable sealed nickel-metal hydride batteries. En *Handbook of batteries*.
- Linden, D., & Reddy, T. (2001). *Handbook of batteries*. McGraw-Hill.
- López Fernández, M. I. (03 de 2018). *Eureka: Ciencia más allá de la tiza*. Obtenido de <http://blog.educastur.es/eureka/2%C2%BA-bac-quim/oxidacion-y-reduccion/>
- Lúmina. (2017). *Lúmina con la educación ambiental*.
- Lúmina. (04 de 2017). *Newsletter Marzo 2017*.
- Lúmina. (04 de 2018). *Lúmina Buena idea usarlas/ Mejor idea recolectarlas*. Obtenido de http://lumina.com.co/recolectar/puntos_recoleccion?institucional
- Madhavan, N., & Subramanian, V. (2007). *Environmental Impact Assessment, Remediation and Evolution of Fluoride and Arsenic Contamination Process in Groundwater* (Vol. Chapter 6). India: National Geophysical Research Institute Hyderabad.
- MADS. (17 de 03 de 2015). Resolución 631 de 2015. *Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*.
- MADS. (11 de 2017). *Boletín Residuos Posconsumo*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf>

/Programa_y_consumo_sostenible/programas_posconumo_2017/Boletin_posconsumo_2017/003.pdf

MADS. (2017). *Posconsumo Avances y logros 2010-2016*.

MADS. (03 de 2018). *Asuntos ambientales sectorial y urbana*. Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/programas-posconsumo-existent/pilas-usadas>

MADTV. (30 de Diciembre de 2005). Decreto 4741. Colombia.

MADTV. (12 de 2005). Política ambiental para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos.

MADTV. (08 de 07 de 2010). Resolución 1297 de 2010. *Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Pilas y/o Acumuladores y se adoptan otras disposiciones*". Colombia.

MADTV. (08 de 07 de 2010). Resolución 1511 de 2010. *Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Bombillas y se adoptan otras disposiciones*". Colombia.

MAVDT-UN. (2009). *Convenio de cooperación científica y tecnológica para desarrollar actividades relacionadas con la gestión de los residuos posconsumo de fuentes de iluminación, pilas primarias y secundarias*. Universidad nacional de colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Universidad Nacional de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Teritorial. Bogotá: MAVDT-UN.

MinCIT. (27 de 12 de 2006). Decreto 4589 de 2006. *Por el cual se adopta el Arancel de Aduanas y otras disposiciones*. Colombia.

MinCIT, MADS. (23 de 01 de 2012). Resolución 172 de 2012. *Por la cual se expide el Reglamento Técnico aplicable a pilas de zinc-carbón y alcalinas que se importen o fabriquen para su comercialización en Colombia*. Colombia.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial . (24 de Abril de 2007). RESOLUCION 693 DE 2007. *Por la cual se establecen criterios y requisitos que deben ser considerados para los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Plaguicidas*. Bogotá.

Ministerio de Medio Ambiente. (7 de Agosto de 2002). Decreto 1713 de 2002.

Ministerio de Minas y Energía. (2010). *Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público RETILAP*.

- Ministerio de Minas y Energía. (03 de 2018). *Ministerio de Minas y Energía*. Obtenido de <https://www.minminas.gov.co/retie>
- Ministerio de Protección Social. (04 de 07 de 2007). Resolución 2115 de 2007.
- Ministerio del Medio Ambiente. (1998). Política para la Gestión Integral de Residuos. *Política para la Gestión Integral de Residuos*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente.
- Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2014). *Evaluación de los Impactos Ambientales, Sociales y Económicos de la Implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor en Chile aplicadas a Pilas y Acumuladores*. Santiago de Chile.
- Montoya, F. G., Pena-García, A., Juaidi, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2017). Indoor lighting techniques: An overview of evolution and new trends for energy saving. *Energy and Buildings* 140, 50-60.
- Motorola Solutions Inc. (08 de 02 de 2012). *Hoja de datos del producto*. Obtenido de <http://arbam.co/documentacion/7-niquel-cadmio-hoja-producto/file>.
- Nam-Soo et. al, K. (2017). Environmental exposures to lead, mercury, and cadmium among South Korean teenagers (KNHANES 2010–2013): Body burden and risk factors. *Environmental Research*, 468-476.
- Oficina Catalana del Cambio Climático. (2011). *Metodología de inventario de gases de efecto invernadero (GEI)*. Departamento de Territorio y Sostenibilidad.
- OMS. (09 de 2016). *Organización Mundial de la Salud*. Recuperado el 05 de 2017, de Intoxicación por plomo y salud: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs379/es/>
- OMS. (03 de 2017). *Organización Mundial de la Salud*. Recuperado el 05 de 2017, de El mercurio y la salud: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs361/es/>
- OSRAM SYLVANIA. (2012). *PRODUCT SAFETY DATASHEET Incandescent Lamps*.
- Owens-Illinois Inc. (2010). *When it comes to carbon footprint, are you getting the full picture?* Owens-Illinois Inc.
- P&G. (18 de 09 de 2012). *Product Safety Data Sheet (PSDS) P & G*. Recuperado el 10 de 2017, de http://www.pgproductsafety.com/productsafety/msds/fabric_and_homecare/duracell/Duracell_Silver_Oxide_Batteries_%28North_America_MSDS%29.pdf
- Panasonic Corporation. (01 de 2017). *Panasonic Corporation PSDS*. Recuperado el 10 de 2017, de https://industrial.panasonic.com/content/data/BT/docs/psds/ww/CCR-PSDS-01_e.pdf

- Parlamento europeo. (06 de 09 de 2006). Directiva 2006/66/ce. *Relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores*. Estrasburgo.
- Pilas con el Ambiente. (03 de 2018). *Pilas con el Ambiente*. Obtenido de <https://www.pilascolombia.com/institucional>
- PIRS. (2008). *Convenio de cooperación científica y tecnológica para desarrollar actividades relacionadas con la gestión de los residuos posconsumo de fuentes de iluminación, pilas primarias y secundarias*. Bogotá.
- PIRS. (2008). *Convenio de cooperación científica y tecnológica para desarrollar actividades relacionadas con la gestión de los residuos posconsumo de fuentes de iluminación, pilas primarias y secundarias*. Bogotá.
- PIRS. (2008). *Informe de caracterización de residuos de pilas y luminarias*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- PNUMA. (2014). *Convenio de Basilea. Sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación*. Geneva: United Nations.
- Population.City. (2017). *Tunja · Población*. Obtenido de <http://poblacion.population.city/colombia/tunja/>
- PowerStream Technology. (10 de 2017). *PowerStream Technology Inc*. Obtenido de <https://www.powerstream.com/Size.htm>
- Quimetales S.A.S. (04 de 2018). *Quimetales Soluciones Responsables S.A.S*. Obtenido de <https://quimetales.com.co/servicios/>
- Rayovac. (06 de 01 de 2014). *Tektronix. Inc*. Obtenido de <https://www.tek.com/msds-material-safety-data-sheets/mercuric-oxide-batteries>
- Reddy, T. B., & Hossain, S. (2000). *Rechargeable lithium batteries (Ambient temperature)*.
- San Miguel, P. A. (2004). *Electrotecnia*. Madrid: Thomson - Paraninfo.
- Sánchez Barrón, G. (06 de 2016). *Ecotoxicología del cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio*. Universidad Complutense. Facultad de farmacia.
- SicaNews. (03 de 2017). *Lámparas de sodio de baja y alta presión*. Obtenido de <http://www.paginadigital.com.ar/articulos/2002rest/2002terc/tecnologia/sica93.html>
- Smedley, P., & KinniBurgh, D. (2002). *A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters*. Applied Geochemistry.

Storage Battery Systems (SBS). (2015). *Safety Data Sheet for Nickel Cadmium Batteries*.

Universidad Pontificia Bolivariana. (2012). *Matriz de clasificación de RESPEL*. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Vapormatic Co. Ltda. (08 de 11 de 2004). *Ficha de Datos de Seguridad Vapormatic*. Recuperado el 10 de 2017, de <http://www.vapormatic.com/images/pdf/SPANISH/VLC75.pdf>

Vu1® Corporation. (s.f.). *Vu1 - LIGHT WITHOUT COMPROMISE*. Obtenido de <http://www.vu1corporation.com/esl-technology/index.html>

Zero Mercury Working Group. (2012). *Mercury Contamination, Exposures and Risk: A New Global Picture Emerges*. Zero Mercury Working Group.

5. ANEXOS

Anexo A: Composiciones de pilas y acumuladores

A continuación, se presentan las tablas con las composiciones de las pilas zinc-carbón, alcalinas, de óxido de mercurio, óxido de plata, litio y zinc-aire; y acumuladores de níquel-cadmio, níquel-hierro, litio y níquel-metal hidruro.

- Pilas Zinc-Carbón

Tabla 5-1: Composición pila Zn-C Energizer

MARCA	Energizer	
DESCRIPCIÓN	Batería para trabajo pesado Hércules	
SISTEMA QUÍMICO	Cloruro de zinc	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Negro de acetileno	3-7	3,5 mg/m ³ (Como carbón)
Cloruro de amonio	0-10	10 mg/m ³ (Humo)
Dioxido de manganeso	15-31	0,2 mg/m ³ (Como Mn)
Zinc	7-42	10 mg/m ³ (Particulado inhalable)
Cloruro de zinc	2-10	1 mg/m ³ (Humo)
Materiales no peligrosos (acero)	23-28	No establecido
Materiales no peligrosos (papel, agua, plástico y otros)	Balance	No establecido

Fuente: (Energizer, 2017)

Tabla 5-2: Porcentaje en peso para pilas Zn-C.

TAMAÑO	ÁNODO DE ZINC (%)	CÁTODO DE MANGANESO (%)
9V	53,01	11,5
AA	46,14	22,13
AAA	46,73	27,57
C	50,09	17,61
D	56,67	14,96

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-3: Contenido de metales pesados en pilas Zn-C.

TAMAÑO	ARSÉNICO (mg/unidad)	CADMIO (mg/unidad)	CROMO (mg/unidad)	NÍQUEL (mg/unidad)	PLOMO (mg/unidad)	MERCURIO (mg/unidad)
9V	0,03	0,003	0,31	0,07	7,7	0,361
AA	0,002	0,163	0,01	0,04	12,19	0,155
AAA	0,014	0,008	0	0	5,68	0,037
C	0,009	0,006	0,11	0,32	28,1	0,724
D	0,004	0,846	0,04	0,13	33,64	0,284

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-4: Contenido de metales pesados en ánodo y cátodo de pilas Zn-C²³

TAMAÑO		ARSÉNICO (ppm)	CADMIO (ppm)	CROMO (ppm)	PLOMO (ppm)	NIQUEL (ppm)
9V	ÁNODO	7,53	ILD	81,74	1721,1	14
	CÁTODO	ILD	ILD	ILD	29,2	2,09
AA	ÁNODO	0,28	5,53	0,9	3579,2	1,33
	CÁTODO	0,21	0,52	4	25,1	11,34
AAA	ÁNODO	5,76	2,75	ILD	2320,2	ILD
	CÁTODO	ILD	ILD	ILD	ILD	ILD
C	ÁNODO	ILD	ILD	2,5	3591,9	6,32
	CÁTODO	0,95	ILD	9,96	36,4	29,02
D	ÁNODO	0,2	5,64	0,89	2391,1	ILD
	CÁTODO	ILD	ILD	1,93	23,2	9,59

Fuente: (PIRS, 2008)

²³ ILD: Inferior al Límite de Detección

- Pilas alcalinas

Tabla 5-5: Composición pila alcalina Duracell.

MARCA	Duracell	
DESCRIPCIÓN	Pila alcalina (Básica, ultra y plus)	
SISTEMA QUÍMICO	Alcalina MnO ₂ -Zn	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Dioxido de manganeso	35 - 40	0,2 mg/m ³ (Como Mn)
Hidróxido de potasio (35%)	5 - 10	2 mg/m ³
Zinc	10 - 25	10 mg/m ³ (Particulado inhalable)

Fuente: (Vapormatic Co. Ltda, 2004)

Tabla 5-6: Composición pila alcalina cilíndrica Energizer.

MARCA	Energizer	
DESCRIPCIÓN	Batería alcalina Eveready cilíndrica	
SISTEMA QUÍMICO	Alcalina MnO ₂ -Zn	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Grafito	2-6	2 mg/m ³ (Fracción respirable)
Dioxido de manganeso	30-45	0,2 mg/m ³ (Como Mn)
Hidróxido de potasio	4-8	2 mg/m ³
Zinc	12-25	10 mg/m ³ (Particulado inhalable)
Materiales no peligrosos (acero)	18-22	No establecido
Materiales no peligrosos (papel, agua, plástico y otros)	Balance	No establecido

Fuente: (Energizer, 2017)

Tabla 5-7: Composición pila alcalina botón Energizer.

MARCA	Energizer	
DESCRIPCIÓN	Batería alcalina botón	
SISTEMA QUÍMICO	Alcalina MnO ₂ -Zn	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Grafito	1-3	2 mg/m ³ (Fracción respirable)
Dioxido de manganeso	15-30	0,2 mg/m ³ (Como Mn)
Mercurio	0,1-0,9	0,025 mg/m ³ (como Hg elemental y compuestos inorgánicos)
Hidróxido de potasio	0-12	2 mg/m ³
Hidroxido de sodio	0-12	2 mg/m ³
Zinc	0-12	10 mg/m ³ (Particulado inhalable)
Materiales no peligrosos (acero)	30-35	No establecido
Materiales no peligrosos (papel, agua, plástico y otros)	Balance	No establecido

Fuente: (Energizer, 2017)

Tabla 5-8: Porcentaje en peso para pilas alcalinas.

TAMAÑO	ÁNODO DE ZINC (%)	CÁTODO DE MANGANESO (%)
AA	50,75	21,47
AAA	47,6	15,19
C	52,94	21,21
D	59,76	19,39

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-9: Contenido de metales pesados en pilas alcalinas.

TAMAÑO	ARSÉNICO (mg/unidad)	CADMIO (mg/unidad)	CROMO (mg/unidad)	NÍQUEL (mg/unidad)	PLOMO (mg/unidad)	MERCURIO (mg/unidad)
AA	0,004	0,02	0,03	0,05	0,31	0,016
AAA	0	0,002	0,01	0,02	0,12	0,022
C	0,003	0,012	0,02	0,14	2,81	0,007
D	0,005	0,021	0,17	0,11	10,46	

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-10: Contenido de metales pesados en ánodo y cátodo de pilas alcalinas.

TAMAÑO		ARSÉNICO (ppm)	CADMIO (ppm)	CROMO (ppm)	PLOMO (ppm)	NIQUEL (ppm)
AA	ÁNODO	0,64	0,48	5,26	62,1	ILD
	CÁTODO	ILD	4,27	1,21	ILD	8,92
AAA	ÁNODO	0,2	ILD	6,13	113,9	ILD
	CÁTODO	ILD	ILD	1,41	ILD	10,8
C	ÁNODO	ILD	ILD	ILD	186	ILD
	CÁTODO	ILD	ILD	0,94	ILD	8,58
D	ÁNODO	ILD	ILD	4,3	401,4	ILD
	CÁTODO	ILD	ILD	1,86	ILD	3,53

Fuente: (PIRS, 2008)

- Pilas de óxido de mercurio

Tabla 5-11: Composición pila oxido de mercurio botón.

MARCA	Rayovac	
DESCRIPCIÓN	Batería de óxido de mercurio tamaño botón	
SISTEMA QUÍMICO	Zn-HgO	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (OSHA 29 CFR 1910.1000)
Mercurio	30-40	1mg/10 m3
Materiales no peligrosos (acero)	30-40	No establecido
Zinc	10-15	10 mg/m3 (ZnO, humo)
Dioxido de manganeso	3-7	0,2 mg/m3 (Como Mn)
Hidróxido de potasio	1-5	2 mg/m3

Fuente: (Rayovac, 2014)

- Pila de óxido de plata

Tabla 5-12: Composición pila óxido de plata botón.

MARCA	Energizer	
DESCRIPCIÓN	Batería energizer 1,5 V	
SISTEMA QUÍMICO	Óxido de plata-zinc	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Grafito	0-3	2 mg/m ³ (Fracción respirable)
Dioxido de manganeso	0-20	0,2 mg/m ³ (Como Mn)
Óxido de plata	10-35	0,1 mg/m ³ TWA (Como Ag)
Hidróxido de potasio	0-7	2 mg/m ³
Hidroxido de sodio	0-7	2 mg/m ³
Zinc	6-14	10 mg/m ³ (Particulado inhalable)
Materiales no peligrosos (acero)	30-35	No establecido
Materiales no peligrosos (papel, agua, plástico y otros)	Compensación	No establecido

Fuente: (Energizer, 2015)

Tabla 5-13: Composición pilas óxido de plata marca Duracell.

MARCA	Duracell	
DESCRIPCIÓN	Duracell 303/357 (0% mercurio)	
SISTEMA QUÍMICO	Óxido de plata-zinc	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Óxido de plata	< 47	0,1 mg/m ³ TWA (Como Ag)
Mezcla Hidróxido de potasio y de sodio (32,6%)	<11%	2 mg/m ³
Zinc	<14%	10 mg/m ³ (Particulado inhalable)

Fuente: (P&G, 2012)

- Pila de litio

Tabla 5-14: Composición pilas de litio Panasonic.

MARCA	Panasonic	
DESCRIPCIÓN	Batería de litio	
SISTEMA QUÍMICO	Litio - Dióxido de manganeso	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Dioxido de manganeso (Electrodo positivo)	12 - 50	0,2 mg/m ³ (Como Mn)
Litio metálico (Electrodo negativo)	0,5 - 6	No establecido
1,2-dimetoxietano (Electrolito)	1,5 - 3,5	No establecido
Perclorato de litio (Electrolito)	0,2 - 0,7	No establecido
Electrolito orgánico (Electrolito)	2,5 - 7	No establecido
Materiales no peligrosos (acero)	30 - 85	No establecido
Materiales no peligrosos (polipropileno)	0,5 - 10	No establecido

Fuente: (Panasonic Corporation, 2017)

Tabla 5-15: Composición pilas de litio Energizer.

MARCA	Energizer	
DESCRIPCIÓN	Baterías cilíndricas de litio y dióxido de manganeso	
SISTEMA QUÍMICO	Litio - Dióxido de manganeso	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Negro de carbón	0 - 1	3,5 mg/m ³ (Promedio ponderado total)
Dioxido de manganeso	12 - 42	0,2 mg/m ³ (Como Mn)
Litio metálico o aleación de litio	1 - 6	No establecido
1,2-dimetoxietano (Electrolito)	0 - 6	No establecido
1,3-dioxolano	0 - 8	No establecido
Trifluorometanosulfonato de litio	0 - 3	No establecido
Trifluorometanosulfonamida de litio	0 - 3	No establecido
Carbonato de propileno	12 - 42	No establecido
Grafito	0 - 3	15 mg/m ³ (Polvo total)
Materiales no peligrosos (acero)	20	No establecido
Materiales no peligrosos (plástico y otros)	Compensación	No establecido

Fuente: (Energizer, 2015)

Tabla 5-16: Metales pesados presentes en pilas primarias de litio.

ELEMENTO	PILA CILÍNDRICA, % EN PESO	PILA BOTÓN, % EN PESO
Litio	1,5	1,8
Manganeso	9,6	16,4
Cobalto	0,1	0,1
Hierro	34	41,3
Níquel	5,4	3
Cromo	9,6	9,6
Molibdeno	0,8	0,1

Fuente: (PIRS, 2008)

- Pilas Zinc - aire

Tabla 5-17: Composición pilas de zinc-aire marca Energizer.

MARCA	Energizer	
DESCRIPCIÓN	Batería Zinc- aire	
SISTEMA QUÍMICO	Zinc- aire (Libre de mercurio)	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Dioxido de manganeso	< 1,0	0,2 mg/m ³ (Como Mn)
Hidróxido de potasio	3 - 4	2 mg/m ³
Zinc	31-44	10 mg/m ³ (Particulado inhalable)
Materiales no peligrosos (acero)	40 - 50	No establecido
Materiales no peligrosos (agua, papel y demás)	Balance	No establecido

Fuente: (Energizer, 2017)

Tabla 5-18: Composición pilas de zinc-aire marca Rayovac.

MARCA	Rayovac	
DESCRIPCIÓN	Batería Zinc- aire	
SISTEMA QUÍMICO	Zinc- aire (Libre de mercurio)	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Negro de carbón	1 - 3	No establecido
Hidróxido de potasio	1 - 3	2 mg/m3
Zinc	30 - 40	5 mg/m3 (Particulado inhalable)
Níquel	3 - 7	1 mg/m3 (Elemental)
Cobre	1 - 5	1 mg/m3
Materiales no peligrosos (acero)	30 - 40	No establecido
Materiales no peligrosos (agua, papel y demás)	Balance	No establecido

Fuente: (Rayovac, 2014)

- Acumuladores
- Acumuladores de níquel- cadmio

Tabla 5-19: Composición pilas de níquel-cadmio marca SBS.

MARCA	Storage Battery Systems (SBS)	
DESCRIPCIÓN	Batería recargable níquel - cadmio	
SISTEMA QUÍMICO	Electrodo positivo hidróxido de níquel e hidróxido de cobalto en sustrato blindado de níquel; Electrodo negativo Hidróxido de cadmio y óxido de hierro en sustrato blindado de níquel	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Negro de carbón	0,1 - 4	No establecido
Hidróxido de potasio	5,5 - 6,2	2 mg/m3
Hidróxido de litio	0,5 - 1	
Agua	28 - 35	
Níquel	3 - 25	1 mg/m3 (Elemental)
Cadmio	3 - 17	
Acero	10 - 25	No establecido
Polipropileno	8 - 11	No establecido

Fuente: (Storage Battery Systems (SBS), 2015)

Tabla 5-20: Composición pilas de níquel-cadmio marca Motorola Solutions Inc.

MARCA	Motorola Solutions Inc	
DESCRIPCIÓN	Batería recargable níquel - cadmio	
SISTEMA QUÍMICO	Electrodo positivo de níquel e hidróxido de níquel; Electrodo negativo de cadmio e hidróxido de cadmio	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Hidróxido de potasio	< 5	2 mg/m3
Hidróxido de litio		
Níquel	8 - 20	1 mg/m3 (Elemental)
Hidróxido de níquel	5 - 15	
Cadmio	10 - 27	
Hidróxido de cadmio	10 - 27	
Acero	10 - 25	No establecido
Polipropileno	< 3	No establecido

Fuente: (Motorola Solutions Inc, 2012)

- Acumuladores de litio

Tabla 5-21: Composición pilas de litio marca Panasonic.

MARCA	Panasonic	
DESCRIPCIÓN	Batería de litio poli-monofluoruro de carbono	
SISTEMA QUÍMICO	Electrodo positivo poli-monofluoruro de carbono; Electrodo negativo litio metálico	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Poli-monofluoruro de carbono	5 - 15	No establecido
Litio metálico	0,9 - 4	No establecido
1,2 dimetoxietano	2 - 4	No establecido
Electrolito orgánico	4 - 10	No establecido
Acero	60 - 90	No establecido
Polipropileno	1 - 10	No establecido

Fuente: (Panasonic Corporation, 2017)

Tabla 5-22: Composición pilas de ion litio marca CiYi.

MARCA	Ciyi Batteries	
DESCRIPCIÓN	Batería recargable ion de litio	
SISTEMA QUÍMICO	Ion litio	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Ferrosfato de litio	40	No establecido
Grafito	30	2,5 mg/m ² (Como polvo)
Electrolito orgánico	10	No establecido
Fluoruro de polivinilideno	5	No establecido
Aluminio	5	No establecido
Cobre	5	No establecido

Fuente: (Ciyi Group Limited, 2017)

- Acumuladores de níquel – hierro

Tabla 5-23: Datos pilas de níquel-hierro marca CiYi.

MARCA	Ciyi Batteries	
DESCRIPCIÓN	Batería recargable níquel - hierro	
SISTEMA QUÍMICO	Electrodo positivo hidróxido de níquel; Electrodo negativo Hidróxido de hierro	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Hierro	25 - 37	
Níquel	20 - 28	1 mg/m3 (Elemental)
Cadmio	10 - 15	
Cobalto	0,4 - 1	
Potasio, sodio, litio	1,8 - 2,9	
OH	8 - 14	
Agua	4 - 9	No establecido
Acero	10 - 25	No establecido
Poliamida	2,5 - 3,5	No establecido
Caucho (Terpolímero de etileno propileno dieno)	< 0,05	No establecido
PVC	0,2 - 0,7	No establecido
Polipropileno	0,2 - 0,4	No establecido

Fuente: (Ciyi Group Limited, 2017)

- Acumuladores de níquel – hidruro metálico

Tabla 5-24: Composición pilas de níquel - hidruro metálico marca GP.

MARCA	GP Batteries	
DESCRIPCIÓN	Batería de níquel hidruro metálico	
SISTEMA QUÍMICO	Níquel - Hidruro metálico	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Aluminio	< 2	10 mg/m ³
Cobalto metálico, Óxido de cobalto, Hidróxido de cobalto	2,5 - 6	0,02 mg/m ³ TWA (Como Co)
Hidróxido de litio	0 - 4	No establecido
Manganeso	0 - 4	0,2 mg/m ³
Lantano, Cerio, Neodimio, Praseodimio	< 13	10 mg / m ³ TWA (partículas no clasificadas como inhalables)
Hidróxido de níquel, óxido de níquel y polvo de níquel	35 - 55	1.5 mg/m ³ TWA (Como níquel inhalable)
Hidróxido de potasio	< 7	2 mg/m ³
Hidróxido de sodio	0 - 4	2 mg/m ³
Zinc metálico, óxido de zinc, hidróxido de zinc	< 3	10 mg/m ³ (Particulado inhalable)
Hierro	10 - 25	No establecido
Materiales no peligrosos (agua, papel y demás)	Balance	No establecido

Fuente: (GP Batteries, 2016)

Tabla 5-25: Composición pilas de níquel-hidruro metálico marca Energizer.

MARCA	Energizer	
DESCRIPCIÓN	Batería de níquel hidruro metálico	
SISTEMA QUÍMICO	Níquel - Hidruro metálico	
MATERIAL	% EN PESO	LÍMITE OCUPACIONAL (ACGIH)
Aluminio	< 2	10 mg/m ³
Cobalto metálico, Óxido de cobalto, Hidróxido de cobalto	2,5 - 6	0,02 mg/m ³ TWA (Como Co)
Hidróxido de litio	0 - 4	No establecido
Manganeso	< 3	0,2 mg/m ³
Lantano, Cerio, Neodimio, Praseodimio	< 13	10 mg / m ³ TWA (partículas no clasificadas como inhalables)
Hidróxido de níquel, óxido de níquel y polvo de níquel	30 - 50	1.5 mg/m ³ TWA (Como níquel inhalable)
Hidróxido de potasio	< 7	2 mg/m ³
Hidróxido de sodio	0 - 4	2 mg/m ³
Zinc metálico, óxido de zinc, hidróxido de zinc	< 3	10 mg/m ³ (Particulado inhalable)
Acero	14 - 18	No establecido
Materiales no peligrosos (agua, papel y demás)	Balance	No establecido

Fuente: (Energizer, 2017)

Anexo B: Composiciones de lámparas

- Lámparas incandescentes

Tabla 5-26: Composición de lámparas incandescentes.

DESCRIPCIÓN	Lámpara incandescente (ICL)	
	PESO (g.)	%
Vidrio	30,69	77,34%
Plástico	0	0%
Aluminio	1,69	4,26%
Cables de cobre	0,18	0,45%
PWB & Electrónicos	0	0%
Misceláneos (Adhesivos, cables de plomo, filamento de tungsteno, etc)	1,12	2,82%
Empaque	6	15%
Total	39,68	100%

Fuente: (Kuldip Singh, Vikrant, Shilpa, & Sylvi Nazareth, 2014)

Tabla 5-27: Porcentaje para residuos de lámparas incandescentes.

DESCRIPCIÓN	Lámpara incandescente	
	PESO (g.)	%
Vidrio	20,26	71%
Base metálica	3,23	11%
Soldadura	0,62	2%
Cemento	4,26	15%
Total	28,37	100%

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-28: Datos de metales pesados para lámparas incandescentes.

TIPO	DATOS (mg/unidad)	CROMO	ARSÉNICO	PLOMO	NÍQUEL
Lámparas incandescentes	Máximo	0,2	0,072	69,84	19,19
	Mínimo	0,08	0,031	8,79	0,41
	Promedio	0,14	0,052	42,44	6,68
Lámparas halógenas	Promedio	52,58	-	3,37	29,2

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-29: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas incandescentes

TECNOLOGÍA	VALOR (mg/L)	MERCURIO	PLOMO
Decorativas	Máximo	0,154	0,58
	Promedio	0,099	0,19
Incandescentes	Máximo	0,025	62,34
	Mínimo	ILQ	10,21
	Promedio	0,013	36,32

Fuente: (PIRS, 2008)

- Lámparas de vapor de mercurio:

Tabla 5-30: Composiciones de los residuos de lámparas vapor de mercurio.

DESCRIPCIÓN	Lámpara de vapor de mercurio	
	PESO (g.)	%
Vidrio	106,4	66,05%
Cámara de Mercurio	13,9	8,62%
Filamentos metálicos	16,2	10,04%
Soldadura	0,5	0,31%
Cemento	13,3	8,25%
Fracción metálica	10,9	6,74%
Total	161,02	100%

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-31: Datos de metales pesados para lámparas de vapor de mercurio

TIPO	DATOS (mg/unidad)	CROMO	ARSÉNICO	MERCURIO	PLOMO	NÍQUEL
Mercurio	Máximo	-	-	15.764	-	-
	Mínimo	-	-	1.050	-	-
	Promedio	5,81	0,178	6.850	42,44	14,2

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-32: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas de vapor de mercurio

TECNOLOGÍA	VALOR (mg/L)	MERCURIO	PLOMO
Mercurio	Máximo	0,104	98,24
	Mínimo	0,026	80,45
	Promedio	0,057	89,22

Fuente: (PIRS, 2008)

- Lámparas de halogenuro metálico

Tabla 5-33: Composiciones de los residuos de lámparas de halogenuro metálico

DESCRIPCIÓN	Lámpara de haluro metálico	
MATERIAL	PESO (g.)	%
Vidrio	296,5	85,61%
Cámara de Mercurio	14,1	4,08%
Soldadura	5,6	1,61%
Fracción metálica	30,1	8,70%
Total	346,39	100%

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-34: Datos de metales pesados para lámparas de halogenuro metálico

TIPO	DATOS (mg/unidad)	CROMO	MERCURIO	PLOMO	NÍQUEL
Haluro metálico	Máximo	-	7.792	87,87	-
	Mínimo	-	1.231	0,19	-
	Promedio	0,2	4.511	44,03	145,76

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-35: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas de halogenuro metálico

TECNOLOGÍA	VALOR (mg/L)	MERCURIO	PLOMO
Haluro metálico	Máximo	0,212	30,36
	Mínimo	0,079	11,69
	Promedio	0,128	18,37

Fuente: (PIRS, 2008)

- Lámparas de vapor de sodio de alta presión

Tabla 5-36: Composiciones de los residuos de lámparas vapor de sodio

DESCRIPCIÓN	Lámpara de vapor de sodio	
MATERIAL	PESO (g.)	%
Vidrio	69,1	76,67%
Base metálica	5,0	5,57%
Cámara de amalgama	4,6	5,14%
Soldadura	1,7	1,90%
Cemento	11,4	12,62%
Total	90,18	102%

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-37: Datos de metales pesados para lámparas de halogenuro metálico.

TIPO	DATOS (mg/unidad)	CROMO	MERCURIO	PLOMO	NÍQUEL
Sodio	Máximo	-	-	40,68	-
	Mínimo	-	-	6,7	-
	Promedio	116,09	5.504	28,64	337,78

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-38: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas de vapor de sodio.

TECNOLOGÍA	VALOR (mg/L)	MERCURIO	PLOMO
Sodio	Máximo	0,055	136,82
	Mínimo	0,003	ILQ
	Promedio	0,016	45,51

Fuente: (PIRS, 2008)

- Lámparas fluorescentes tubulares

Tabla 5-39: Composición de lámparas fluorescentes.

DESCRIPCIÓN	Lámpara fluorescente (FFL)	
	PESO (g.)	%
Vidrio	134	83,34%
Plástico	0	0%
Aluminio	2,59	1,61%
Cables de cobre	0,36	0,22%
PWB & Electrónicos	0	0%
Misceláneos (Adhesivos, cables de plomo, filamento de tungsteno, etc)	1,83	1,14%
Empaque	22	14%
Total	160,78	100%

Fuente: (Kuldip Singh, Vikrant, Shilpa, & Sylvi Nazareth, 2014)

Tabla 5-40: Composiciones de los residuos de lámparas fluorescentes tubulares T8.

DESCRIPCIÓN	Lámpara fluorescente tubular (T8)	
MATERIAL	PESO (g.)	%
Tapas metálicas	6,06	4,56%
Vidrio	126,93	95,44%
Total	132,99	100%

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-41: Composiciones de los residuos de lámparas fluorescentes tubulares T12.

DESCRIPCIÓN	Lámpara fluorescente tubular (T12)	
MATERIAL	PESO (g.)	%
Tapas metálicas	13,72	4,62%
Vidrio	283,21	95,38%
Total	296,93	100%

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-42: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas fluorescentes tubulares.

TIPO	VALOR (mg/L)	MERCURIO	PLOMO
T12	Máximo	0,285	10,07
	Mínimo	0,003	ILQ
	Promedio	0,066	1,31
T8	Máximo	0,194	0,59
	Mínimo	0,009	ILQ
	Promedio	0,079	0,13
T5	Máximo	0,18	ILQ
	Mínimo	0,12	ILQ
	Promedio	0,15	ILQ

Fuente: (PIRS, 2008)

- Lámparas fluorescentes compactas

Tabla 5-43: Composición de lámparas fluorescentes compactas.

DESCRIPCIÓN	Lámpara fluorescente compacta (CFL)	
	MATERIAL	PESO (g.)
Vidrio	43,44	26,63%
Plástico	32	20%
Aluminio	1,92	1,18%
Cables de cobre	0,61	0,37%
PWB & Electrónicos	34,87	21%
Misceláneos (Adhesivos, cables de plomo, filamento de tungsteno, etc)	0,31	0,19%
Empaque	50	31%
Total	163,15	100%

Fuente: (C.V. Lamps, 2018)

Tabla 5-44: Composiciones de los residuos de lámparas fluorescentes compactas no integrales

DESCRIPCIÓN	Lámpara fluorescente	
	MATERIAL	PESO (g.)
Vidrio	69,77	85,26%
Metálicos	3,41	4,17%
Plástico y cemento	8,66	10,58%
Total	81,83	100%

Fuente: (PIRS, 2008).

Tabla 5-45: Composiciones de los residuos de lámparas fluorescentes compactas.

DESCRIPCIÓN	Lámpara fluorescente compacta	
	PESO (g.)	%
Vidrio	38,16	46,63%
Base metálica	5,78	7,06%
Plástico	17,32	21,16%
Tarjeta electrónica	4,11	5,02%
Componentes Eléctricos	16,46	20,12%
Total	81,83	100%

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-46: Datos de metales pesados para lámparas fluorescentes compactas no integrales.

TIPO	DATOS (mg/unidad)	CROMO	ARSÉNICO	MERCURIO	PLOMO	NÍQUEL
Fluorescente compacta no integral	Máximo	-	-	0,228	0,44	70,46
	Mínimo	-	-	0,027	0,4	0,53
	Promedio	0,07	0,079	0,095	0,42	24,17

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-47: Datos de metales pesados para lámparas fluorescentes compactas integrales.

TIPO	DATOS (mg/unidad)	CROMO	ARSÉNICO	MERCURIO	PLOMO	NÍQUEL
Fluorescente compacta integral	Máximo	-	-	1.844	-	-
	Mínimo	-	-	0,116	-	-
	Promedio	0,46	0,322	0,98	379,07	140,64

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-48: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas fluorescentes compactas no integrales.

TIPO	VALOR (mg/L)	MERCURIO	PLOMO
No integrales	Máximo	0,017	0,178
	Mínimo	ILQ	ILQ
	Promedio	0,005	0,09

Fuente: (PIRS, 2008)

Tabla 5-49: Datos de mercurio y plomo en extracto TCLP para lámparas fluorescentes compactas integrales.

TIPO	VALOR (mg/L)	MERCURIO	PLOMO
Integrales	Máximo	0,406	74,3
	Mínimo	ILQ	18,35
	Promedio	0,109	42,98

Fuente: (PIRS, 2008)

- Lámparas de inducción

Tabla 5-50: Composiciones de las lámparas de inducción.

DESCRIPCIÓN		Lámparas de inducción	
MONTAJE DE LA LÁMPARA			
MATERIAL	PESO (g.)	%	
Zinc	70,00	20,00%	
Materiales inertes (vidrio, plástico, metales)	199,50	57,00%	
Fósforo en polvo	2,10	0,60%	
Óxido de itrio	0,70	0,20%	
Aluminato de bario	0,53	0,15%	
Aluminato de magnesio	0,70	0,20%	
Aluminato de tierras raras	0,70	0,20%	
Indio	1,05	0,30%	
Bismuto	1,05	0,30%	
Mercurio	0,07	0,02%	
Cobre	70,00	20,00%	
Manganeso	1,05	0,30%	
Terbio	0,70	0,20%	
Europio	0,70	0,20%	
Total		100%	
MONTAJE ELECTRÓNICO			
MATERIAL	PESO (g.)	%	
Materiales inertes (Acero)	343,00	98%	
Plomo	3,50	1%	
Estaño	3,50	1%	
Total	700	100%	

Fuente: (Inda-gro, 2010)

- LED

Tabla 5-51: Composición de lámparas LED.

DESCRIPCIÓN	Diodos emisores de luz (LED)	
	PESO (g.)	%
Vidrio	4,58	3,99%
Plástico	39,86	35%
Aluminio	13,62	11,86%
Cables de cobre	1,8	1,57%
PWB & Electrónicos	14,29	12%
Misceláneos (Adhesivos, cables de plomo, filamento de tungsteno, etc)	1,69	1,47%
Empaque	39	34%
Total	114,84	100%

Fuente: (Kuldip Singh, Vikrant, Shilpa, & Sylvi Nazareth, 2014)

Anexo C: Gases de efecto invernadero

- Producción de acero:

Las toneladas de CO2 generado a partir de la producción de acero se obtienen a partir de la siguiente expresión:

$$E_{CO2,no-energía} = BOF * EF_{BOF} + EAF * EF_{EAF} + OHF * EF_{OHF} \quad (5.1)$$

En donde *BOF* son las toneladas de acero crudo producido en hornos básicos de oxígeno, *EAF* son las toneladas de acero crudo producido en hornos de arco eléctrico, *OHF* son las toneladas de acero crudo producido en hornos de solera y EF_x factor de emisión en toneladas de CO2/toneladas de x producido.

En la Tabla 5-52 se especifican los factores de emisión para los tres tipos de tecnologías, sin embargo, como el factor de emisión del horno de arco eléctrico no incluye las emisiones originadas por el uso de arrabio, sino chatarra como materia prima, la cual no aplica para el cálculo, este no se tiene en cuenta para hacer la estimación.

Tabla 5-52: Factores de emisión de CO2 para la producción de acero

ACERO	
EF BOF	1,46
EF EAF	0,08
EF OHF	1,72

Fuente: (IPCC, 2006)

- Producción de hierro

Para el proceso de producción de hierro se utilizan las expresiones para el cálculo de dióxido de carbono y de metano a partir de los factores de emisión presentados en la Tabla 5-53. Para las emisiones de dióxido de carbono:

$$E_{CO2,no-energía} = DRI * EF_{DRI} \quad (5.2)$$

En donde, *DRI* es la cantidad de hierro reducido directo, en toneladas. Durante la producción de hierro se calientan materiales que contienen carbono, liberando compuestos volátiles, incluido el metano. El cálculo de este GEI se realiza a partir de:

$$E_{CH4,no-energía} = SI * EF_{SI} \quad (5.3)$$

En donde, *SI* es la cantidad de sinterizado producido nacionalmente, toneladas y EF_x es el factor de emisión en kg. por tonelada de sinterizado producido.

Tabla 5-53: Factores de emisión para la producción de hierro.

HIERRO	
EF (CO2) DRI	0,7
EF(CH4) SI	0,07

Fuente: (IPCC, 2006)

- Producción de aluminio

Para la estimación de emisiones de dióxido de carbono de primer nivel, se cuenta con factores de emisión para las tecnologías de ánodos precocidos y Søderberg (ver **Tabla 5-54**); las cuales aportan cerca del 90% de las emisiones. El cálculo de las emisiones por estas tecnologías está directamente vinculado al tonelaje de aluminio producido, de acuerdo con la siguiente ecuación (**5.4**), establecida por el IPCC:

$$E_{CO2} = MP_P * EF_P + MP_S * EF_S \quad (5.4)$$

En donde, MP_P es la producción de aluminio a partir del proceso de ánodos precocidos, EF_P es el factor de emisión específico de la tecnología de precocidos, MP_S es la producción de aluminio del proceso Søderberg y EF_S es el factor de emisión específico de la tecnología Søderberg.

Tabla 5-54: Factores de emisión de CO2 para la producción de aluminio

ALUMINIO	
EF P	1,6
EF S	1,7

Fuente: (IPCC, 2006)

La estimación de emisiones de perfluorocarbonos de primer nivel cuenta con factores de emisión para las tecnologías CWPB, SWPB, VSS y HSS (ver Tabla 5-55). La estimación de las emisiones de PFC se realiza a partir de las siguientes expresiones:

$$E_{CF4} = \sum (EF_{CF4,i} * MP_i) \quad (5.5)$$

$$E_{C2F6} = \sum (EF_{CF246i} * MP_i) \quad (5.6)$$

En donde, EF_{PCF} es el factor de emisión de CF4 y C2F6, generado por la producción de aluminio, expresado en kg de PCF; y MP_i es la producción de metal por tipo de tecnología de celda i, en toneladas de Al.

Tabla 5-55: Factores de emisión de PCF para la producción de aluminio

ALUMINIO			
EF (CF4) CWPB	0,4	EF (C2F6) CWPB	0,04
EF (CF4) SWPB	1,6	EF (C2F6) SWPB	0,4
EF (CF4) VSS	0,8	EF (C2F6) VSS	0,04
EF (CF4) HSS	0,4	EF (C2F6) HSS	0,03

Fuente: (IPCC, 2006)

- Producción de zinc

Para esta estimación el IPP, se estableció que se puede utilizar un factor de emisión por defecto (ver Tabla 5-56) y la siguiente expresión:

$$E_{CO_2} = Zn * EF_{Por\ defecto} \quad (5.7)$$

En donde, Zn es la cantidad de zinc producido en toneladas y $EF_{Por\ defecto}$ es el factor de emisión por defecto, en toneladas de CO₂/ toneladas de zinc producido, basado en una ponderación de factores de emisión conocidos.

Tabla 5-56: Factores de emisión de CO₂ para la producción de zinc.

ZINC	
EF Waelz Kiln	3,66
EF pirometalúrgico	0,43
EF electro-térmico	Desconocido
EF defecto	1,72

Fuente: (IPCC, 2006)

- Producción de vidrio

Para el nivel de estimaciones 2 se establece que el factor de emisión es de 0,2 Kg de CO₂/tonelada de vidrio producido. La cantidad de CO₂ generado se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$E_{CO_2} = \sum_i [M_{g,i} \cdot EF_i \cdot (1 - CR_i)] \quad (5.8)$$

En donde E_{CO_2} son las toneladas de CO₂ proveniente de la producción de vidrio, $M_{g,i}$ es la cantidad en toneladas de vidrio fundido, y EF_x factor de emisión en toneladas de CO₂/tonelada de vidrio producido y CR_i es la proporción de cullet.

La fracción de vidrio reciclada o *cullet*, proviene de la recirculación de material al interior de la planta, y del vidrio proveniente de programas de reciclaje, en donde, este último es

significativo en países con economías desarrolladas. En un país como Colombia, el *cullet* proveniente de programas de reciclaje de lámparas, depende principalmente del que se obtiene por los programas posconsumo.

Con el fin de determinar los GEI asociados al procesamiento del vidrio para la fabricación de luminarias, es importante aclarar que el impacto ambiental asociado está relacionado con la proporción CR_i , ya que esta define la cantidad de vidrio reciclado que se utiliza en el horno. De esta forma, la implementación del plan posconsumo para luminarias, asegura que las mismas son procesadas para su aprovechamiento, separando el vidrio de los materiales peligrosos, para que retorne al ciclo de materiales, logrando un aumento en la proporción de vidrio reciclado que ingresa al proceso.

En consecuencia, el impacto ambiental positivo que se da por la disminución de los GEI, al retornar los residuos de luminarias, se estima como: la diferencia entre una cantidad de GEI calculada con una CR_{l1} menor (sin plan posconsumo), y la que se calcula con una CR_{l2} mayor, es decir, con una mayor cantidad de vidrio reciclado. Para la estimación de GEI se utilizó la siguiente expresión:

$$E_{CO2} = M_{g,l} \cdot EF_l \cdot (1 - CR_{l1}) - (M_{g,l} \cdot EF_l \cdot (1 - CR_{l2})) \quad (5.9)$$

En donde $M_{g,l}$ es la cantidad en toneladas de vidrio fundido para uso en iluminación, EF_l es el factor de emisión en toneladas de CO₂/tonelada de vidrio producido para iluminación, CR_{l1} es la proporción de *cullet* para el escenario en que las luminarias no se gestionan con un plan posconsumo y CR_{l2} en la proporción cuando sí se cuenta con plan posconsumo.

Anexo D: Impactos pilas y luminarias

A continuación, se presentan los resultados para pilas:

Tabla 5-57: Resultados para pilas Zn-C

Elemento gestionado	Descripción	Componente	% promedio	Cantidad de material (g.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Agua contaminada (L)
Pilas Zinc/Carbono (Zn-C)	Pila primaria compuesta por un cátodo de carbono grafito cubierto de dióxido de manganeso. El ánodo es una aleación de zinc, con pequeñas cantidades de plomo, cadmio, mercurio y un electrolito de cloruro de amonio (NH4Cl). Se encuentran en tamaños AA, AAA, 9V, C, D	Acero	27,0%	270.000	429,3	
		Zinc	26,0%	260.000	447,2	
		Dióxido de manganeso	24,0%	240.000		
		Negro de acetileno	6,0%	60.000		
		Cloruro de zinc	7,0%	70.000		
		Cloruro de amonio	6,0%	60.000		
		Mercurio	0,00074%	7,38		738.095
		Plomo	0,058%	580,5		2.902.381
		Cadmio	0,00078%	7,76		77.619
		Cromo	0,00005%	0,48		952
		Arsénico	0,00001%	0,10		952
Níquel	0,00019%	1,90		3.810		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-58: Resultados para pilas alcalinas

Elemento gestionado	Descripción	Componente	% promedio	Cantidad de material (g.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Agua contaminada (L)
Pilas Alcalinas	Pila denominada también de zinc – dióxido de manganeso. Su ánodo está compuesto por zinc amalgamado y el cátodo, a base de dióxido de manganeso. En algunos casos el cátodo contiene óxido de plata. El electrolito está compuesto por una mezcla de una solución de hidróxido de potasio y derivados de celulosa.	Acero	33,0%	330.000	524,7	
		Zinc	8,0%	80.000	137,6	
		Dióxido de manganeso	25,0%	250.000		
		Materiales no peligrosos (papel, agua, plástico y otros)	14,5%	145.000		
		Hidróxido de potasio	8,0%	80.000		
		Hidróxido de sodio	8,0%	80.000		
		Grafito	3,0%	30.000		
		Mercurio	0,000076%	0,76		76.189
		Plomo	0,001476%	14,76		73.808
		Cadmio	0,000095%	0,95		9.524
		Cromo	0,000143%	1,43		2.857
		Arsénico	0,000019%	0,19		1.905
Níquel	0,000238%	2,38		4.762		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-59: Resultados para pilas óxido de plata -zinc

Elemento gestionado	Descripción	Componente	% promedio	Cantidad de material (g.)	Emisiones CO2 (Kg.)
Pilas de óxido de plata-zinc	Están compuestas por un ánodo de zinc en polvo, un cátodo de óxido de plata comprimido y un electrolito en solución acuosa de hidróxido de sodio o potasio con zincato disuelto.	Acero	32,5%	325.000	516,8
		Zinc	10,0%	100.000	172,0
		Dióxido de manganeso	10,0%	100.000	
		Óxido de plata	22,5%	225.000	
		Materiales no peligrosos (papel, agua, plástico y otros)	16,5%	165.000	
		Hidróxido de potasio	3,5%	35.000	
		Hidróxido de sodio	3,5%	35.000	
		Grafito	1,5%	15.000	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-60: Resultados para pilas de litio

Elemento gestionado	Descripción	Componente	% promedio	Cantidad de material (g.)	Emisiones CO2 (Kg.)
Pilas de litio	Están conformadas por un ánodo de litio, como cátodo se utilizan dióxido de azufre, dióxido de manganeso, di sulfuro de hierro ó mono fluoruro de carbono. Utilizan solventes no acuosos como electrolito por la alta reactividad de éste en agua.	Acero	20,0%	200.000	318,0
		Dioxido de manganeso	27,0%	270.000	
		Carbonato de propileno	27,0%	270.000	
		Materiales no peligrosos (plástico y otros)	10,5%	105.000	
		1,3-dioxolano	4,0%	40.000	
		Litio metálico o aleación de litio	3,5%	35.000	
		1,2-dimetoxietano (Electrolito)	3,0%	30.000	
		Trifluorometanosulfonato de litio	1,5%	15.000	
		Trifluorometanosulfonamida de litio	1,5%	15.000	
		Grafito	1,5%	15.000	
		Negro de carbón	0,5%	5.000	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-61: Resultados para pilas de zinc-aire

Elemento gestionado	Descripción	Componente	% promedio	Cantidad de material (t)	Emisiones CO2 (Kg.)
Pilas de zinc-aire	Están compuestas por un ánodo de zinc y un cátodo que consiste en oxígeno del ambiente. El electrolito es una solución alcalina	Acero	35,0%	350.000	556,5
		Zinc	35,0%	350.000	602,0
		Materiales no peligrosos (agua, papel y demás)	18,0%	180.000	
		Níquel	5,0%	50.000	
		Cobre	3,0%	30.000	
		Negro de carbón	2,0%	20.000	
		Hidróxido de potasio	2,0%	20.000	

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados para bombillas:

Tabla 5-62: Resultados para bombillas incandescentes

Elemento gestionado	Descripción	Componente	% promedio	Cantidad de material (g.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CF4 (Kg.)	Emisiones C2F6 (Kg.)	Agua contaminada (L)
Lámparas incandescentes	Se componen de una envoltura de vidrio termorresistente, envolviendo un filamento de tungsteno sobre una base metálica con contenidos de soldadura y cemento.	Vidrio	71,2%	712.076		28.483			
		Base metálica (Aluminio)	11,4%	113.693	187,59		0,09	0,01	
		Cemento	15,0%	149.596					
		Soldadura	2,2%	21.642					
		Cromo	0,2%	1.848					3.696.746
		Plomo	0,012%	118					592.337
		Níquel	0,10%	1.026					2.052.967

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-63: Resultados para bombillas de vapor de mercurio de alta presión

Elemento gestionado	Descripción	Componente	% promedio	Cantidad de material (g.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CF4 (Kg.)	Emisiones C2F6 (Kg.)	Agua contaminada (L)
Lámparas de vapor de mercurio alta presión	Están formadas por un tubo de cuarzo fundido (tubo de descarga), en el que se confinan el mercurio, los electrodos, y una pequeña cantidad de argón; un bulbo exterior de vidrio de borosilicato, con una capa interna de polvos fluorescentes de vandato de itrio, los cuales corrigen el color de la luz.	Vidrio	66,03%	660.259		26.410,37			
		Fracción metálica	6,73%	67.251	110,96		0,05	0,01	
		Filamentos metálicos	10,04%	100.363					
		Cámara de Mercurio	8,61%	86.126					
		Cemento	8,25%	82.470					
		Soldadura	0,31%	3.099					
		Mercurio	0,00425%	42,5					4.252.579
		Plomo	0,03%	263,5					1.317.368
		Cromo	0,00361%	36,1					72.139
		Arsénico	0,0001111%	1,1					11.050
Níquel	0,0088%	88,2					176.311		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-64: Resultados para bombillas de halogenuros metálicos

Elemento gestionado	Descripción	Componente	% promedio	Cantidad de material (g.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CF4 (Kg.)	Emisiones C2F6 (Kg.)	Agua contaminada (L)
Lámparas de halogenuros metálicos	Están formadas por un tubo de cuarzo fundido, o cerámica, que contiene los gases, y este a su vez, se encuentra dentro de un tubo más grande, normalmente con un revestimiento que filtra la luz ultravioleta	Vidrio	85,56%	855.620		34.225			
		Fracción metálica	8,70%	86.951	143,47		0,07	0,01	
		Cámara de Mercurio	4,08%	40.777					
		Soldadura	1,61%	16.091					
		Mercurio	0,0013%	13,0					1.301.558
		Plomo	0,0127%	127,0					635.199
		Cromo	0,000058%	0,6					1.154
		Níquel	0,0421%	420,6					841.122

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-65: Resultados para bombillas de vapor de sodio de alta presión

Elemento gestionado	Descripción	Materia prima	% promedio	Cantidad de material (g.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CF4 (Kg.)	Emisiones C2F6 (Kg.)	Agua contaminada (L)
Lámparas de vapor de sodio de alta presión	Están constituidas por tubos de descarga fabricados de alúmina vitrificada policristalina y tienen un bulbo exterior. Dentro de su composición se encuentra sodio como elemento radiante; mercurio, para mejorar el color; xenón y neón	Vidrio	74,8%	748.430		29.937			
		Base metálica	5,4%	54.373	89,71		0,04	0,01	
		Cemento	12,3%	123.193					
		Cámara de amalgama	5,0%	50.175					
		Soldadura	1,9%	18.547					
		Mercurio	0,0060%	59,6					5.957.907
		Cromo	0,126%	1.256,6					2.513.276
		Plomo	0,031%	310,0					1.550.095
		Níquel	0,366%	3.656,4					7.312.725

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-66: Resultados para bombillas fluorescentes tubulares

Elemento gestionado	Descripción	Componente	% promedio	Cantidad de material (g.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CF4 (Kg.)	Emisiones C2F6 (Kg.)	Agua contaminada (L)
Lámparas fluorescentes tubulares	Constan de un bulbo tubular, sellado con un electrodo en cada extremo. Contiene en su interior mercurio líquido, que se vaporiza a baja presión. Las paredes internas están revestidas con un polvo fluorescente.	Vidrio	95,42%	954.222		38.169			
		Tapas metálicas	4,56%	45.591	75,23		0,04	0,01	
		Mercurio	0,000071%	0,7					71.421
		Plomo	0,000316%	3,2					15.788
		Cromo	0,000053%	0,5					1.053
		Arsénico	0,000059%	0,6					5.939
		Níquel	0,0182%	181,7					363.418

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-67: Resultados para bombillas fluorescentes compactas

Elemento gestionado	Descripción	Componente	% promedio	Cantidad de material (g.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CO2 (Kg.)	Emisiones CF4 (Kg.)	Emisiones C2F6 (Kg.)	Agua contaminada (L)
Lámparas fluorescentes compactas	Están compuestas por los mismos elementos que las bombillas fluorescentes tubulares, pero con un tamaño más cómodo para el uso doméstico.	Vidrio	46,3%	463.393		18.536			
		Base metálica	7,0%	70.160	115,76		0,06	0,01	
		Plástico	21,0%	210.281					
		Componentes Eléctricos	20,0%	199.946					
		Tarjeta electrónica	5,0%	49.887					
		Plomo	0,5%	4.604					23.017.662
		Mercurio	0,00119%	11,9					1.190.139
		Cromo	0,00056%	5,6					11.173
		Arsénico	0,00039%	3,9					39.105
		Níquel	0,2%	1.708					3.415.943

Fuente: Elaboración propia

