



MINISTERIO DE AMBIENTE Y
DESARROLLO SOSTENIBLE

Cartilla didáctica del curso



Ciclo de Vida de Plásticos
con Retardantes de Llama
Bromados Clasificados
como Contaminantes
Orgánicos Persistentes

República de Colombia

Gustavo Francisco Petro Urrego
Presidente de la República

María Susana Muhamad González
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Sandra Patricia Vilarity Quiroga
Viceministra de Políticas y Normalización Ambiental

Andrea Corzo Álvarez
Directora de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana

Diego Escobar Ocampo
Coordinador del Grupo de Sustancias Químicas, Residuos Peligrosos y de la Unidad Técnica Ozono (UTO)

Jefe del Proyecto Contaminantes Orgánicos Persistentes
José Álvaro Rodríguez Castañeda

SGS Colombia S.A.S.
Alexander Hernández Muñoz
Harold Suárez Bocanegra

Equipo técnico
Andrés Ramírez Restrepo
Edwin Camelo Martínez

Concepto editorial
Consuelo Gauta
Grupo de Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Diseño y diagramación
Julieta Cruz
Luisa Monroy

Corrección de estilo
Nicole Bedoya Rodríguez

© Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia, 2022.

Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y divulgación de material contenido en este documento para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización del titular de los derechos de autor, siempre que se cite claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción total o parcial de este documento para fines comerciales.

No comercializable - Distribución gratuita



CATALOGACIÓN EN LA PUBLICACIÓN: Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Cartilla didáctica del curso Ciclo de Vida de Plásticos con Retardantes de Llama Bromados Clasificados como Contaminantes Orgánicos Persistentes /
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: Ramírez Restrepo, Andrés;
Camelo Martínez, Edwin; SGS: Hernández Muñoz, Alexander; Suárez Bocanegra,
Harold; coord. Rodríguez Castañeda, José Álvaro. ---- Bogotá D.C. Colombia:
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022.

123 p.: il.

ISBN electrónico: 978-958-5551-96-1

1. plásticos 2. sustancias peligrosas 3. gestión integral de residuos
4. salud 5. problemas medioambientales 6. contaminantes orgánicos
persistentes I. Tit. II. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

CDD: 363.7

TABLA DE CONTENIDO

1

Convenio de Estocolmo
sobre Contaminantes
Orgánicos Persistentes y
retardantes de llama

• Pág 07

1.1 Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes • Pág 08

1.1.1 Historia del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes

1.1.2 ¿Qué son los contaminantes orgánicos persistentes?

1.1.3 Algunos logros del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes

1.1.4 ¿Qué sustancias están incluidas en el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes?

1.2 Retardantes de llama • Pág 16

1.2.1 ¿Qué son los retardantes de llama?

1.2.2 Retardantes de llama clasificados como contaminantes orgánicos persistentes y no contaminantes orgánicos persistentes

1.2.3 Retardantes de llama bromados

1.3 Efectos de los retardantes de llama clasificados como contaminantes orgánicos persistentes • Pág 24

1.3.1 ¿Cuáles son los efectos en la salud que producen los retardantes de llama clasificados como contaminantes orgánicos persistentes?

1.3.2 ¿Cuáles son los efectos en el ambiente que producen los retardantes de llama clasificados como contaminantes orgánicos persistentes?

1.3.3 Efectos adversos sobre los seres vivos

1.3.4 Actividad 1. Emparejamiento de conceptos

1.4 Gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Colombia • Pág 28

1.4.1 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Colombia

1.4.2 Marco normativo en Colombia

1.4.3 Gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

1.5 Evaluación del capítulo • Pág 38

1.6 Bibliografía • Pág 41

2

Plástico y sus aplicaciones
en aparatos eléctricos y
electrónicos

• Pág 43

2.1 Tipos y propiedades básicas de los plásticos • Pág 44

2.1.1 Tipos de plásticos

2.1.2 Propiedades básicas de los plásticos

2.1.3 Ocurrencia en los aparatos eléctricos y electrónicos

2.2 Técnicas de identificación de plásticos • Pág 49

2.2.1 Etiquetas de la Organización Internacional de Normalización (ISO)

2.2.2 Pruebas fisicoquímicas

2.2.3 Análisis sistemático de materiales plásticos

2.2.4 Actividad 2. Análisis de materiales plásticos

2.3 Técnicas de separación de plásticos • Pág 56

2.3.1 Separación de materiales

2.3.2 Separación de tipos de plástico

2.3.3 Separación sistemática de materiales plásticos

2.3.4 Actividad 3. Separación de materiales en residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

2.4 Identificación y cuantificación de retardantes de llama bromados en plásticos • Pág 65

2.4.1 Prueba de densidad

2.4.2 Fluorescencia de rayos X

2.4.3 Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas

2.5 Evaluación del capítulo • Pág 70

2.6 Bibliografía • Pág 73

3

Reglas de decisión y herramientas para la identificación y separación de plásticos • Pág 74

3.1 Referentes técnicos internacionales • Pág 75

- 3.1.1 Normas y tratados internacionales
- 3.1.2 Estándares internacionales

3.2 Herramientas para la identificación y separación de plásticos • Pág 80

- 3.2.1 Aspectos clave de la herramienta
- 3.2.2 Estudio de caso SmartRAEE
- 3.2.3 Actividad 4. Conceptos clave

3.3 Procedimiento operativo para la identificación y separación de plásticos en Colombia • Pág 84

- 3.3.1 Mejorando el aspecto ambiental de la gestión de plástico de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Colombia
- 3.3.2 Mejorando el aspecto económico de la gestión de plástico de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Colombia

3.4 Evaluación del capítulo • Pág 87

3.5 Bibliografía • Pág 89

4

Aprovechamiento de plásticos • Pág 90

4.1 Procesamiento de plásticos y su recuperación • Pág 91

- 4.1.1 Aprovechamiento de materiales dentro del concepto de economía circular
- 4.1.2 Reciclaje de materiales plásticos

4.2 Control de calidad y propiedades de los materiales plásticos • Pág 92

- 4.2.1 Control de calidad
- 4.2.2 Propiedades generales de los materiales plásticos
- 4.2.3 Actividad 5. Proceso de economía circular

4.3 Técnicas para aumentar el valor agregado de los materiales plásticos • Pág 99

- 4.3.1 Técnicas de limpieza / filtración / peletización
- 4.3.2 Técnicas que hacen uso de aditivos
- 4.3.3 Técnica de elaboración de compuestos: *compounding*
- 4.3.4 Técnica de modificación por extrusión reactiva

4.4 Técnicas de eliminación de plásticos con retardantes de llama bromados clasificados como contaminantes orgánicos persistentes • Pág 103

- 4.4.1 Coprocesamiento de desechos peligrosos en hornos de cemento
- 4.4.2 Incineración de residuos peligrosos
- 4.4.3 Rellenos de seguridad para residuos peligrosos

4.5 Evaluación del capítulo • Pág 105

4.6 Bibliografía • Pág 108

TABLA DE CONTENIDO

5

Resultado de
las actividades
y evaluaciones
• **Pág 110**

5.1 Resultados capítulo 1 • Pág 111

- 5.1.1 Actividad 1. Emparejamiento de conceptos
- 5.1.2 Evaluación del capítulo

5.2 Resultados capítulo 2 • Pág 114

- 5.2.1 Actividad 2. Análisis de materiales plásticos
- 5.2.2 Actividad 3. Separación de materiales en residuos de aparatos eléctricos y electrónicos
- 5.2.3 Evaluación del capítulo

5.3 Resultados capítulo 3 • Pág 117

- 5.3.1 Actividad 4. Conceptos clave
- 5.3.2 Evaluación del capítulo

5.4 Resultados capítulo 4 • Pág 120

- 5.4.1 Actividad 5. Proceso de economía circular
- 5.4.2 Evaluación del capítulo

CAPÍTULO

Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes y retardantes de llama



Competencias a desarrollar:

Entender los efectos, ventajosos y adversos de los retardantes de llama sobre los plásticos, y su relación con el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP).

1.1 Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes

Competencias a desarrollar:

- Conocer cuáles son los compromisos pactados por Colombia en el marco del Convenio de Estocolmo sobre COP con relación a los PBDE.
- Comprender conceptos básicos sobre los COP.



1.1.1 Historia del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes

El Convenio de Estocolmo sobre COP es un acuerdo multilateral que fue auspiciado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y que tiene como objetivo adoptar medidas de control para eliminar la producción, utilización, exportación e importación de las sustancias denominadas COP. El Convenio fue publicado el **22 de mayo de 2001** en una conferencia de plenipotenciarios celebrada en **Estocolmo, Suecia**, en la que se adoptó el denominado **Convenio de Estocolmo sobre COP** (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s. f. b), el cual entró en vigor el **17 de mayo de 2004**, momento en el que 50 países lo habían ratificado, aceptado o aprobado.

El Convenio de Estocolmo sobre COP es el primer instrumento internacional jurídicamente vinculante para la aplicación de medidas internacionales respecto de los COP. Su página web de consulta se encuentra en el enlace <http://chm.pops.int>, y su objetivo principal es proteger a la salud humana y al medio ambiente de los COP (Stockholm Convention, s. f. b).

Las disposiciones principales del **Convenio de Estocolmo sobre COP** son:

- Prohibir o eliminar la producción y el uso, así como la importación y exportación, de los COP producidos intencionalmente que se enumeran en el anexo A del Convenio (art. 3).
- Restringir la producción y el uso, así como la importación y exportación, de los COP producidos intencionalmente que se enumeran en el anexo B del Convenio (art. 3).
- Reducir o eliminar las liberaciones de COP producidos involuntariamente que se enumeran en el anexo C del Convenio (art. 5).
- Garantizar que las existencias y los desechos consistentes que contengan o estén contaminados con COP se gestionen de forma segura y ambientalmente racional (art. 6).
- Para apuntar a los COP adicionales (art. 8), el Convenio establece procedimientos detallados para la inclusión de nuevos COP en los anexos A, B o C.

Otras disposiciones del Convenio de Estocolmo sobre COP se refieren al desarrollo de planes de aplicación y acción para su implementación:

Implementación (art. 7)

Intercambio de información
(art. 9)

Información pública, sensibilización
y educación (art. 10)

Investigación, desarrollo y seguimiento
(art. 11)

Asistencia técnica
(art. 12)

Recursos y mecanismos financieros
(art. 13)

Presentación de informes
(art. 15)

Evaluación de la eficacia
(art. 16)

Incumplimiento
(art. 17)

1.1.2 ¿Qué son los contaminantes orgánicos persistentes?

La química orgánica tuvo un desarrollo significativo a partir de la década de 1940 cuando se logró producir en el laboratorio una serie de moléculas sintéticas con propiedades que resultaron ser muy atractivas para diversos sectores industriales.

Lamentablemente, estas moléculas extrañas y no existentes previamente en la naturaleza resultaron no ser biodegradables, pero sí solubles en grasas, por lo que pueden atravesar fácilmente las membranas celulares y acumularse en los tejidos adiposos de los seres vivos. Puesto que no son biodegradables, llevan a un proceso en los organismos conocido como “bioacumulación”. Además, generan efectos tóxicos en los organismos.

Estas sustancias han sido utilizadas para realizar múltiples actividades, como control de insectos transmisores de enfermedades, mejora de la producción agrícola y eficiencia de algunos procesos industriales, lo cual ha llevado a que estén presentes en múltiples productos a lo largo de los últimos 80 años.

Los COP tienen las siguientes características:

1

Son altamente tóxicos y tienen el potencial de afectar de manera negativa al ambiente, la vida silvestre y los humanos.

2

Son persistentes y tardan años o décadas en degradarse en formas menos peligrosas. Esto se debe a que resisten los procesos de degradación fotolítica, química y biológica.

3

Usualmente se acumulan en los tejidos grasos de los organismos vivos.

4

Debido a lo anterior, su concentración se magnifica a través de las cadenas alimentarias.

5

Pueden viajar por todo el mundo a través del aire —por lo general son semivolátiles—, el agua y los seres vivos en los que se han acumulado o magnificado.

Los problemas generados por los COP motivaron su prohibición y restricción severa en muchos países, así como la implementación de acciones internacionales, dentro de las que se encuentra el Convenio de Estocolmo sobre COP (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010b). Para conocer más sobre este tema, se pueden consultar los siguientes documentos desarrollados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: *Aprendamos con Juan sobre los COP: contaminantes orgánicos persistentes* (2006) y *Lo que todos debemos saber sobre COP: contaminantes orgánicos persistentes* (2017).

1.1.3 Algunos logros del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes

Durante los años en los que el Convenio de Estocolmo sobre COP ha estado en vigor, los compromisos pactados se han ido cumpliendo. Los logros del Convenio se presentan en la tabla 1 (Stockholm Convention, s. f. c).

Tabla 1. Algunos logros del Convenio de Estocolmo sobre COP

Tema
El Convenio de Estocolmo sobre COP tiene 184 países firmantes al 2021.
184 países han desarrollado y transmitido sus planes nacionales de implementación al 2021.
Se ha establecido un mecanismo de intercambio de información alrededor de los COP, así como la creación de redes, y se ha proporcionado a las Partes la orientación pertinente y la creación de capacidad en apoyo de la aplicación del Convenio de Estocolmo sobre COP.
Han expirado exenciones específicas para sustancias como aldrina, clordano, dieldrina, heptacloro, hexaclorobenceno y mirex. No se pueden realizar más registros para estas exenciones.
El Convenio de Estocolmo sobre COP inició regulando 12 COP. Entre el 2009 y el 2020, 18 nuevos COP han sido incluidos en los anexos A, B y C.
Se han producido informes de seguimiento regionales y mundiales sobre los COP.
Se establecieron centros regionales para la creación de capacidad y la transferencia de tecnología.
Se estableció la Red de Eliminación de Bifenilos Policlorados (PCB).
Se estableció la Alianza Global del Dicloro Difenoil Tricloroetano (DDT).
Se logró una considerable sinergia entre los Convenios de Basilea, Rotterdam y Estocolmo sobre COP.
Se estableció el Plan de Monitoreo Global (GMP, por su sigla en inglés) para identificar cambios en las concentraciones de COP a lo largo del tiempo, así como en el transporte ambiental regional y global.

En principio, el Convenio de Estocolmo sobre COP fue firmado por **152 países**; hasta la fecha, la Secretaría del Convenio ha recibido 184 ratificaciones, aceptaciones o aprobaciones de los países miembro (Greenpeace y CC.OO., 2002).

En el caso específico de Colombia, el Convenio de Estocolmo sobre COP fue **firmado** por el Gobierno nacional el **22 de mayo del 2001** (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s. f. c). Posteriormente, el Convenio de Estocolmo sobre COP fue aprobado en Colombia mediante la **Ley 1196 de 2008** y se depositó el instrumento de ratificación el 22 de octubre del mismo año, razón por la que el Convenio entró en vigor para el país a partir del 20 de enero de 2009, declarado exequible mediante **Sentencia de la Corte Constitucional C-944/08** (Misión Permanente de Colombia, s. f.).

Respecto a los logros específicos de Colombia, en el 2010 se adoptó el *Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)*, el cual fue entregado a la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre COP en julio de ese año (Misión Permanente de Colombia, s. f.). Colombia ha hecho progresos sustanciales para alcanzar los objetivos del Convenio de Estocolmo sobre COP relacionados con la identificación, prevención, reducción y eliminación de los COP y sus residuos.

Dando cumplimiento al artículo 7 del Convenio, en el que el país está obligado a elaborar un plan para el cumplimiento de las obligaciones resultadas del Convenio, se han realizado las siguientes acciones:

- El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible adelantó durante el 2007 la formulación del primer *Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo (PNI)*. Para facilitar su implementación, desde finales del 2008 y parte del 2009 se llevó a cabo un proceso de divulgación y concertación del PNI con los sectores relacionados.
- A partir del PNI aprobado en el 2010, Colombia presentó ante la Secretaría del Convenio de Estocolmo sobre COP en el 2017 la actualización de este plan, así como de los planes de acción específicos para cuatro grupos de sustancias con COP: plaguicidas COP, PCB, COP no intencionales y COP de uso industrial. En este último grupo se encuentran incluidos los retardantes de llama bromados (BFR) clasificados como COP.

1.1.4 ¿Qué sustancias están incluidas en el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes?

Para cumplir su objetivo, el Convenio de Estocolmo sobre COP pretende la eliminación

o reducción de las liberaciones las siguientes sustancias consideradas como COP —28 sustancias al 2017—, las cuales están consignadas en los anexos A, B y C del Convenio hasta el 2020 (Stockholm Convention, s. f. e). En la tabla 2 se enlistan dichas sustancias.

Tabla 2. Listado de sustancias reguladas por el Convenio de Estocolmo sobre COP*

Grupo	Anexo	Sustancia	Año de inclusión
Plaguicidas COP	A	Aldrina o aldrín	2001
		Dieldrina o dieldrín	2001
		Endrina o endrín	2001
		Clordano	2001
		Heptacloro	2001
		Hexaclorobenceno (HCB)	2001
		Mirex	2001
		Toxafeno o canfecloro	2001
		Clordecona	2009
		Pentaclorobenceno (PeCB)	2009
		Lindano	2009
		Alfa-hexaclorociclohexano	2009
		Beta-hexaclorociclohexano	2009
		Endosulfán	2011
	Dicofol	2011	
	B	Pentaclorofenol y sus sales y ésteres	2015
	Diclorodifeniltricloroetano (DDT)	2001	

Grupo	Anexo	Sustancia	Año de inclusión
PCB	A	Ácido perfluorooctano sulfónico (PFOS), como sulfluramida, sus sales y fluoruro de perfluorooctano sulfonilo (PFOSF)	2009
COP no intencionales	C	Bifenilos policlorados (PCB)	2001
		Dibenzoparadioxinas policloradas (PCDD)	2001
		Dibenzofuranos policlorados (PCDF)	2001
		Bifenilos policlorados (PCB) (<i>dioxin-like PCBs</i>)	2001
		Pentaclorobenceno (PeCB)	2009
		Hexaclorobenceno (HCB)	2001
COP de uso industrial	A	Naftalenos policlorados	2015
		Hexabromobifenilo	2009
		Éter de tetrabromodifenilo y éter de pentabromodifenilo (c-penta-BDE)	2009
		Éter de hexabromodifenilo y éter de heptabromodifenilo (c-octa-BDE)	2009
		Éter de decabromodifenilo (c-deca-BDE)	2017
		Pentaclorobenceno (PeCB)	2009
		Hexabromociclododecano (HBCD)	2013
		Hexaclorobutadieno	2015
		Hexaclorobenceno (HCB)	2001
		Ácido perfluorooctanoico (PFOA), sus sales y compuestos relacionados con PFOA	2012
		Naftalenos policlorados	2015
		Parafinas cloradas de cadena corta (SCCPs)	2017
	B	Ácido perfluorooctano sulfónico (PFOS), sus sales y fluoruro de perfluorooctano sulfonilo	2009

*Nota: hay que tener en cuenta que algunos COP pueden hacer parte de varios de los grupos y anexos del Convenio de Estocolmo sobre COP; A, B y C.

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017.

La tabla 3 ilustra las medidas jurídicas y administrativas adoptadas por Colombia para algunas de las sustancias clasificadas como COP, las cuales permiten dar cumplimiento a las restricciones en materia de prohibición, utilización, importación y exportación de los mismos, así como a las medidas para reducir

las liberaciones derivadas de fuentes antrópicas —es decir, emitidas por el hombre— de algunos de los COP no intencionales¹ en el marco de los artículos 3 y 5 de la Ley 196 de 2008, por la cual se aprueba el Convenio de Estocolmo sobre COP en Colombia dando cumplimiento a sus artículos 3 y 5 (literal g).

Tabla 3. Síntesis de normativa específica para COP en Colombia

Sustancia	Prohibición definitiva	Entidad que emite la norma	Resumen
Endrina o endrín	Resolución 1849 de 1985	Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)	Prohíbe su importación, producción y venta.
Aldrina o aldrín	Decreto 305 de 1988	Ministerio de Salud ⁽¹⁾ y Ministerio de Agricultura ⁽²⁾	Prohíbe su importación, producción y formulación.
Clordano	Resolución 10255 de 1993	Ministerio de Salud ⁽¹⁾	Prohíbe su importación, producción, formulación, comercialización, uso y manejo.
DDT	Resolución 10255 de 1993	Ministerio de Salud ⁽¹⁾	Prohíbe su importación, producción, formulación, comercialización, uso y manejo.
Dieldrina o Dieldrín	Resolución 10255 de 1993	Ministerio de Salud ⁽¹⁾	Prohíbe su importación, producción, formulación, comercialización, uso y manejo.
Heptacloro	Resolución 10255 de 1993	Ministerio de Salud ⁽¹⁾	Prohíbe su importación, producción, formulación, comercialización, uso y manejo.
Mírex	Resolución 10255 de 1993	Ministerio de Salud ⁽¹⁾	Prohíbe su importación, producción, formulación, comercialización, uso y manejo.
Lindano	Resolución 04166 de 1997	Ministerio de Salud ⁽¹⁾	Prohíbe su importación, fabricación, formulación, comercialización y uso.
Toxafeno o canfecloro	Resolución 02971 de 2000	Ministerio de Salud ⁽¹⁾	Prohíbe su importación, fabricación, formulación, comercialización y uso
Endosulfán	Resolución 01669 de 1997 ratificada por la Sentencia N°. 5483 de 2001	Ministerio de Salud ⁽¹⁾ y Consejo de Estado, respectivamente	Prohíbe la importación, fabricación, comercialización y el uso de productos formulados con mezclas que contengan este ingrediente activo.

1. "Una sustancia con COP no intencional es aquella que no ha sido producida y que se forma en incineraciones controladas y no controladas, quemas a cielo abierto, procesos químicos industriales y otros; por ejemplo, las dioxinas y furanos" (Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Sustancia	Prohibición definitiva	Entidad que emite la norma	Resumen
PCB	Resoluciones 222 de 2011 y 1741 de 2016	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial ⁽³⁾	Prohíbe la producción, el uso, la importación de PCB o equipos o desechos contaminados con estos. Prohíbe la exportación de PCB y desechos contaminados para fines distintos a su gestión ambientalmente adecuada. Adicionalmente, establece todos los requisitos para la gestión ambiental integral de equipos y desechos que consisten, contienen o están contaminados con PCB.
	Resolución 776 de 2008	Ministerio de la Protección Social ⁽¹⁾	Establece el reglamento técnico sobre los requisitos fisicoquímicos y microbiológicos que deben cumplir los productos de la pesca, en particular pescados, moluscos y crustáceos para consumo humano, incluidos umbrales para PCB (dl-PCB) en carne de pescado, productos de pesca y derivados, excepto la anguila.
Dioxinas	Resolución 909 de 2008	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial ⁽³⁾	Establece los estándares de emisión admisibles en fuentes fijas para dioxinas.
	Resolución 776 de 2008	Ministerio de la Protección Social ⁽¹⁾	Establece el reglamento técnico sobre los requisitos fisicoquímicos y microbiológicos que deben cumplir los productos de la pesca, en particular pescados, moluscos y crustáceos para consumo humano, incluidos umbrales para dioxinas en carne de pescado, productos de pesca y derivados, excepto la anguila.
Furanos	Resolución 909 de 2008	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial ⁽³⁾	Establece los estándares de emisión admisibles en fuentes fijas para furanos.
	Resolución 776 de 2008	Ministerio de la Protección Social ⁽¹⁾	Establece el reglamento técnico sobre los requisitos fisicoquímicos y microbiológicos que deben cumplir los productos de la pesca, en particular pescados, moluscos y crustáceos para consumo humano, incluidos umbrales para furanos en carne de pescado, productos de pesca y derivados, excepto la anguila.

⁽¹⁾ Actualmente denominado Ministerio de Salud y Protección Social.

⁽²⁾ Actualmente denominado Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

⁽³⁾ Actualmente denominado Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

En la siguiente lista se presentan las sustancias COP que no cuentan con reglamentación específica en Colombia, pero que su gestión se ampara, por ahora, en la Ley 1196 de 2008:

Hexaclorobenceno

Alfa-hexaclorociclohexano

Beta-hexaclorociclohexano

Clordecona

Pentaclorobenceno

PFOS y sus sales y PFOSF

Hexabromobifenilo

Éter de tetrabromodifenilo y éter de pentabromodifenilo (c-penta-BDE)

Éter de hexabromodifenilo y éter de heptabromodifenilo (c-octa-BDE)

Hexabromociclidodecano

Hexaclorobutadieno

Pentaclorofenol y sus sales y ésteres

Naftalenos policlorados

Parafinas cloradas de cadena corta

Dicofol

Ácido perfluorooctanoico (PFOA) y sus sales y compuestos relacionados con PFOA

1.2 Retardantes de llama

1.2.1 ¿Qué son los retardantes de llama?

Los retardantes de llama, o piroretardantes, son aditivos que previenen el inicio de una llama o el crecimiento de esta. Tienen varios modos de acción para lograr su objetivo, como prevenir el contacto del combustible con el aire o generar reacciones endotérmicas que retrasan los procesos de combustión modificando las propiedades de las matrices en las que se encuentran; por ejemplo, aumentando el punto de fuego.

Estos aditivos son usados en muchos materiales. Los polímeros son un gran campo de aplicación para estos aditivos; en especial, en ciertas aplicaciones en las que son requeridos, como las de elementos eléctricos, electrónicos o automotrices.

Hay cuatro grupos principales de productos químicos piroretardantes (Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, 2008):

Competencias a desarrollar:

- Comprender conceptos básicos sobre los retardantes de llama.
- Clasificar las sustancias utilizadas como retardantes de llama diferenciando aquellas que son clasificadas como COP y aquellas que no lo son.



A

Inorgánicos (minerales)

B

Halogenados

C

Organofosforados

D

Nitrogenados

Los mecanismos de acción de estos grupos se muestran en la tabla 4.



Tabla 4. Principales retardantes de llama y sus mecanismos de acción

Sistema de ignifugación	Mecanismos de actuación	Resumen
Minerales	<ul style="list-style-type: none"> • Se descomponen endotérmicamente absorbiendo energía y liberan moléculas no inflamables que diluyen los gases combustibles. • El residuo inorgánico restante forma una capa protectora. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidróxidos metálicos. Ej: $Al(OH)_3$ y $Mg(OH)_2$ • Hidroxicarbonatos. Ej: hidromagnetita. • Boratos. Ej: borato de zinc.
Halogenados	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminan los radicales libres muy reactivos ($H\bullet$ y $OH\bullet$) generados en la descomposición térmica de los polímeros durante la combustión, lo que frena dicha descomposición. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tetrabromobisphenol A (TBBPA), polibromodifenil éteres (PBDE)). • Monómeros y copolímeros halogenados.
Basados en fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Su descomposición produce ácido fosfórico que condensa para dar estructuras fosforiladas y desprender agua. Esto acaba dando lugar a una capa protectora carbonosa. • Pueden volatilizarse en la fase vapor formando radicales libres y actuando como “secuestradores” de radicales $H\bullet$ y $OH\bullet$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fósforo rojo. • Fosfatos inorgánicos. Ej: polifosfato de amonio (APP). • Compuestos basados en fósforo orgánico. Ej: ésteres fosfatos, fosfonatos y fosfinatos. • Sistemas intumescentes.
Basados en nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando la melamina sublima, absorbe una gran cantidad de energía, que disminuye la temperatura. Cuando descompone, libera amoníaco, que diluye el oxígeno y los gases combustibles. • Puede formar una capa carbonosa protectora en la fase condensada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ej: melamina.

1.2.2 Retardantes de llama clasificados como contaminantes orgánicos persistentes y no contaminantes orgánicos persistentes

Los retardantes de llama son un amplio conjunto de sustancias que, como se mencionó antes, tienen la función de mejorar la resistencia al fuego de los materiales en los que se encuentran. Por ejemplo, *The Index of Flame Retardants* (1997) de Ash y Ash es una guía internacional que incluye

más de 1.000 productos pirorretardantes — preparados y sustancias— enumerados por marca comercial, nombre químico, aplicación y fabricante; este catálogo describe unas 200 sustancias pirorretardantes utilizadas en productos pirorretardantes comerciales. Resulta útil en un conjunto tan amplio tener herramientas sencillas que permitan clasificar los pirorretardantes de manera que se entienda que estas son sustancias útiles en nuestra vida diaria y a las que no debemos temer, sino manejar de manera adecuada.

El concepto fundamental a desarrollar es que no todos los pirorretardantes son COP. Para clasificarlos como tal, sería necesario que:

- Fuesen contaminantes que cumplan con las condiciones previstas en el Convenio de Estocolmo sobre COP de toxicidad, bioacumulación y biomagnificación.
- Fuesen orgánicos. En ese orden de ideas, los pirorretardantes minerales o sustancias relacionadas quedan inmediatamente descartados de la lista de COP; ejemplo de esto son el trióxido de aluminio y el óxido de antimonio.

- Fuesen persistentes con bajas tasas de degradación ambiental y cumplieran con su consecuente transporte a largas distancias.

Aunque una sustancia sea sospechosa de cumplir con estos tres requisitos, es además indispensable que haya sido previamente estudiada por el Convenio de Estocolmo sobre COP y que se haya llegado a un acuerdo entre las partes de incluirla en algún anexo de acuerdo a un perfil de riesgo.

Retomando la tabla del capítulo anterior y aplicando lo visto hasta ahora sobre COP, es posible llegar a lo siguiente:

Sistema de ignifugación	Mecanismos de actuación	Resumen
Minerales	<ul style="list-style-type: none"> • Se descomponen endotérmicamente absorbiendo energía y liberan moléculas no inflamables que diluyen los gases combustibles. • El residuo inorgánico restante forma una capa protectora. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidróxidos metálicos. Ej: $Al(OH)_3$ y $Mg(OH)_2$. • Hidroxicarbonatos. Ej: hidromagnetita. • Boratos (p. ej. borato de zinc).
Halogenados	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminan los radicales libres muy reactivos ($H\bullet$ y $OH\bullet$) generados en la descomposición térmica de los polímeros durante la combustión, lo que frena dicha descomposición. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tetrabromobisphenol A (TBBPA), polibromodifenil éteres (PBDE)). • Monómeros y copolímeros halogenados.
Basados en fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Su descomposición produce ácido fosfórico que condensa para dar estructuras fosforiladas y desprender agua. Esto acaba dando lugar a una capa protectora carbonosa. • Pueden volatilizarse en la fase vapor formando radicales libres y actuando como "secuestradores" de radicales $H\bullet$ y $OH\bullet$. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fósforo rojo. • Fosfatos inorgánicos. Ej: polifosfato de amonio (APP). • Compuestos basados en fósforo orgánico. Ej: ésteres fosfatos, fosfonatos y fosfinatos. • Sistemas intumescentes.
Basados en nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando la melamina sublima, absorbe una gran cantidad de energía, que disminuye la temperatura. Cuando descompone, libera amoníaco, que diluye el oxígeno y los gases combustibles. • Puede formar una capa carbonosa protectora en la fase condensada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ej: melamina.

Inorgánicos. Ninguno es COP.

Orgánicos halogenados. Cumplen las características de toxicidad y persistencia. Algunos son COP.

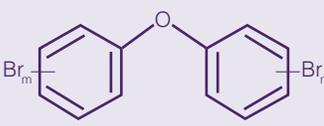
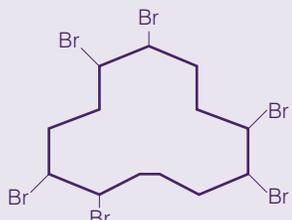
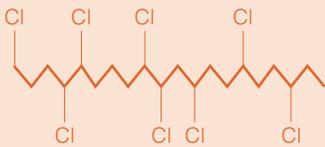
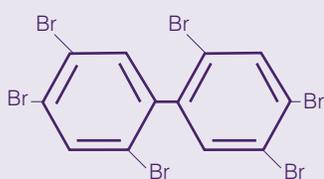
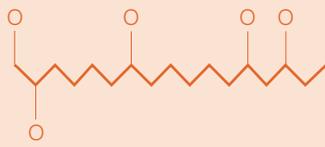
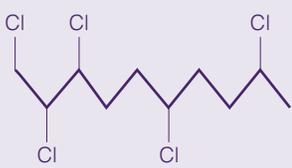
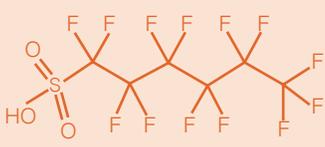
Orgánicos. Los basados en fósforo y nitrógeno se degradan fácilmente. Ninguno es COP.

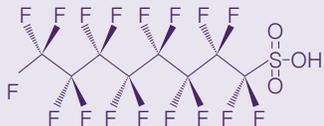
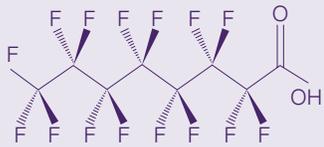
Dentro de las sustancias conocidas como retardantes de llama se tiene un grupo o familia constituido por elementos halogenados; es decir, compuestos que contienen cloro, bromo, flúor o yodo. Esta familia consiste en más de 70 sustancias químicas, cuyas aplicaciones más comunes se encuentran en equipos eléctricos y electrónicos, como televisores, computadores, radios, celulares, secadoras, refrigeradores y lavadoras; también se utilizan, en menor medida, en aplicaciones de muebles, automoción, transporte y construcción.

La tabla 5 muestra una relación de sustancias orgánicas halogenadas usadas comúnmente como pirorretardantes, entre las cuales se encuentran aquellas que están incluidas en el Convenio de Estocolmo sobre COP. La gráfica 1 presenta algunas de estas sustancias de acuerdo a su clasificación.

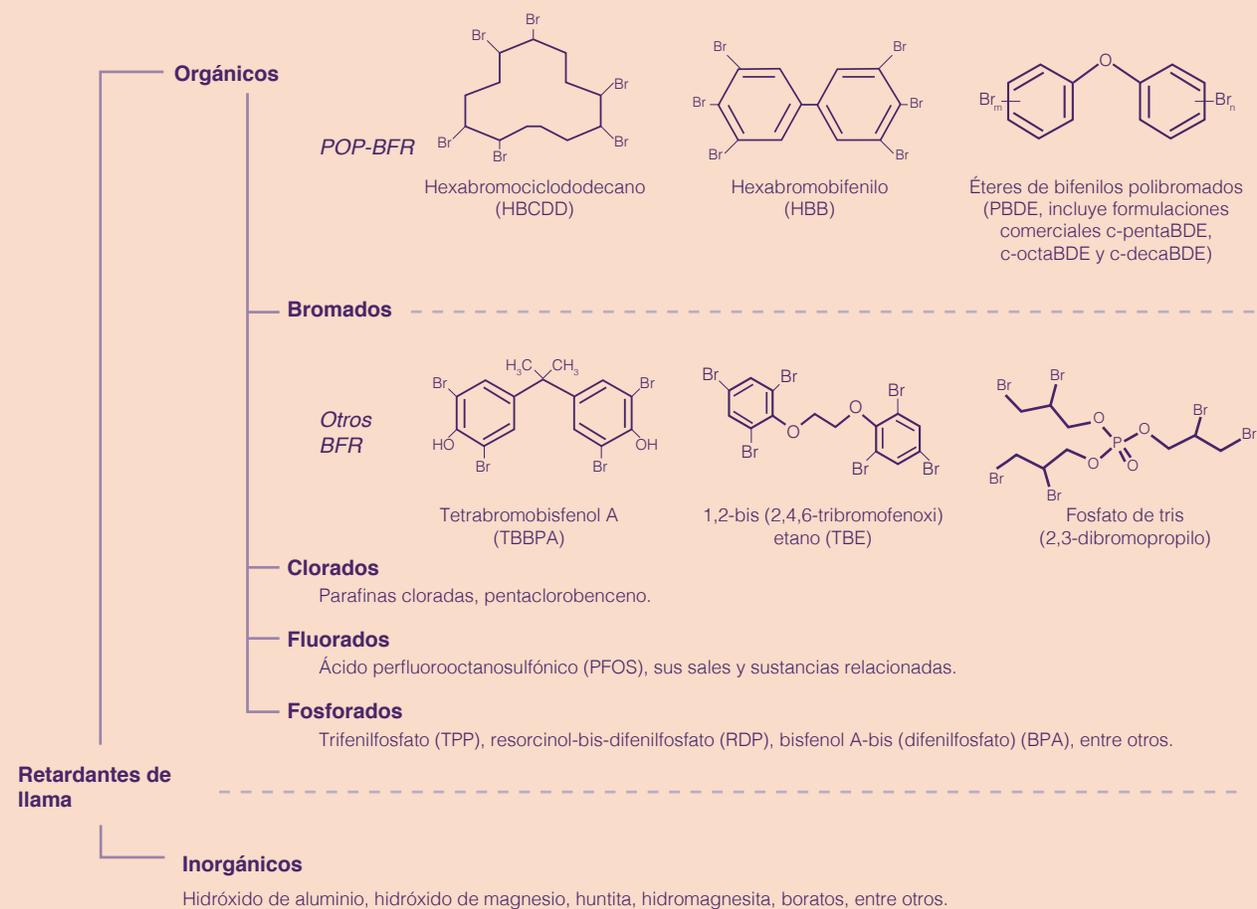
Dado el enfoque del curso, de ahora en adelante nos remitiremos solo a los retardantes halogenados utilizados en plásticos y listados como COP.

Tabla 5. Sustancias orgánicas halogenadas usadas comúnmente como pirorretardantes, entre las cuales se encuentran aquellas que están incluidas en el Convenio de Estocolmo sobre COP

Pirorretardantes COP			Pirorretardantes no COP		
Sustancia	Uso principal	Fórmula estructural	Sustancia	Uso principal	Fórmula estructural
Éteres debifenilo polibromados (PBDE)	Plásticos		Tetrabromo-bisfenol A (TBBPA)	Plásticos	
Hexabromociclododecano (HBCDD)	Plásticos		Parafinas cloradas de cadena larga (LCCP)	Varios	
Hexabromobifenilo (HBB)	Plásticos		Parafinas cloradas de cadena media (MCCP-PCCM)	Varios	
Parafinas cloradas de cadena corta (PCCC o SCCP, por sus siglas en inglés)	Varios		Ácido perfluorohexanosulfónico (PFHx)	Varios	

Pirorretardantes COP			Pirorretardantes no COP		
Sustancia	Uso principal	Fórmula estructural	Sustancia	Uso principal	Fórmula estructural
Ácido perfluorooctano sulfónico (PFOS)	Espumas contra incendios				
Ácido perfluorooctanoico (PFOA)	Varios				

Gráfica 1. Clasificación de los retardantes de llama



1.2.3 Retardantes de llama bromados

La entidad International Bromine Council (BSEF, s. f. b) define los BFR como “compuestos a base de bromo (Br) que tienen efecto inhibitor en la combustión siendo muy efectivos en plásticos y textiles”. El bromo no se encuentra en la naturaleza de forma elemental, sino en compuestos inorgánicos conocidos como bromuros y en compuestos órgano-brómicos naturales, lo cuales se encuentran naturalmente en suelos, sales, aire y agua del mar.

Desde que se descubrió el bromo en 1826, los compuestos bromados se han utilizado en campos como el tratamiento del agua, la reducción de las emisiones de mercurio, la seguridad contra incendios, el almacenamiento y la generación de energía, y la producción de productos farmacéuticos y artículos de caucho.

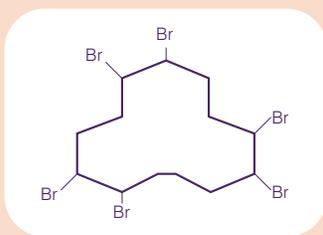
Su uso se considera muy eficiente como elemento constituyente, lo que significa que solo se necesita una pequeña cantidad para lograr la resistencia al fuego, razón por la cual han sido tan populares en la industria².

Como se mencionó antes, no todos los retardantes de llama son considerados COP. En la gráfica 2 se presentan aquellos que se encuentran clasificados en el Convenio de Estocolmo sobre COP como tal. Estos BFR clasificados como COP se encuentran listados en el anexo A del Convenio, por lo que los países firmantes deben tomar medidas para eliminar su producción y uso; más adelante se presentará un perfil general de estas sustancias.

Gráfica 2. BFR clasificados como COP de acuerdo con el anexo A del Convenio de Estocolmo sobre COP

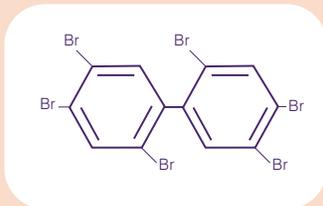
POP-BFR (Convención de Estocolmo, Anexo A)

Hexabromociclododecano (HBCDD)



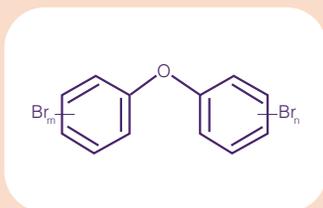
Espuma de poliestireno extruido (XPS)
Espuma de poliestireno expandido (EPS)
Poliestireno de alto impacto (HIPS)
Fibra textil

Hexabromobifenilo (HBB)



Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)
Espuma de poliuretano (PUR)
Firemaster®
HexaBB (60 - 80 %) HeptaBB (15 - 25 %)

Éteres de bifenilo polibromados (PBDE)



c-pentaBDE comercial tetraBDE y pentaBDE

Espuma de poliuretano (PUR)
Fibra textil

c-octaBDE comercial hexaBDE y heptaBDE

Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)
Poliestireno de alto impacto (HIPS)
Tereftarato de polibutileno (PBT)

c-decaBDE comercial decaBDE, nonaBDE, octaBDE

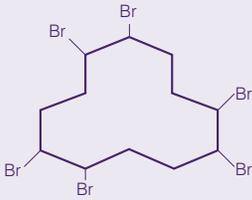
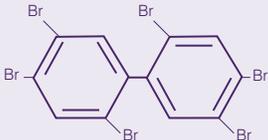
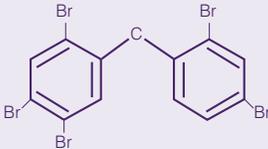
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)
Poliestireno de alto impacto (HIPS)
Polipropileno (PP)
Fibra Textil

Sb₂O₃

2. Para más información, consulte el video *Brominated Flame Retardants: It's Elementary* de BSEF (2013) en el enlace: <https://youtu.be/zqd1gZDNzcl>.

Las principales características, usos comunes y posibles sustitutos de los BFR clasificados como COP se presentan en la tabla 6.

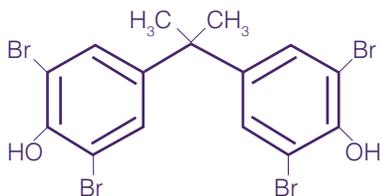
Tabla 6. Generalidades de los BFR clasificados como COP

Retardante de llama	Identidad y propiedad química	Fórmula estructural	Usos	Sustitución
<p>Hexabromociclododecano (HBCDD) N.º CAS 25637-99-4 1,2,5,6,9,10 hexabromociclododecano N.º CAS 3194-55-6</p>	<p>Es una sustancia sólida blanca. Su fórmula estructural es una estructura de anillo cíclico con átomos BR unidos.</p>		<ol style="list-style-type: none"> 1. Aislamiento de espuma de poliestireno expandido y extruido. 2. Aplicaciones textiles y electrodomésticos y electrónicos. 	<p>Alternativas químicas para reemplazar el HBCD en poliestireno de alto impacto (HIPS) y recubrimiento textil.</p>
<p>Hexabromobifenilo (HBB) N.º CAS 36355-01-8 Nombre comercial: FireMaster BP-6 y FireMaster FF-1</p>	<p>Hidrocarburos bromados formados por la sustitución de hidrógeno por bromo en el bifenilo.</p>		<ol style="list-style-type: none"> 1. Retardante de llama. 2. Ya no se produce ni se utiliza en la mayoría de los países. 	<p>Este producto químico ya está sujeto a varias regulaciones nacionales e internacionales, que restringen su uso y producción.</p>
<p>c-pentaBDE comercial tetraBDE y pentaBDE N.º CAS 5436-43-1 N.º CAS: 60348-60-9</p>	<p>El éter de tetrabromodifenilo y el éter de pentabromodifenilo son los principales componentes del éter de pentabromodifenilo comercial.</p>		<ol style="list-style-type: none"> 1. Espuma de poliuretano. 2. Muebles de hogar, uso casi eliminado. 3. Productos textiles, productos eléctricos y electrónicos, materiales para construcción, vehículos, trenes y aviones. 	<p>Hay alternativas disponibles que se utilizan para reemplazar estas sustancias en muchos países, aunque también podrían tener efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente. Es posible que las alternativas no estén disponibles para su uso en aviones militares. La identificación y el manejo de equipos y desechos que contienen éteres de difenilo bromados se considera un desafío.</p>
<p>c-octaBDE comercial hexaBDE y heptaBDE N.º CAS 68631-49-2 N.º CAS 207122-15-4 N.º CAS 446255-22-7 N.º CAS 207122-26-5</p>	<p>El éter hexabromodifenilo y el éter heptabromodifenilo son los principales componentes de éter comercial de octabromodifenilo</p>		<ol style="list-style-type: none"> 1. Fabricación de espuma de ABS para aparatos eléctricos y electrónicos. 	<p>Generalmente existen alternativas y no hay información sobre ninguna producción actual.</p>

Retardante de llama	Identidad y propiedad química	Fórmula estructural	Usos	Sustitución
decaBDE comercial decaBDE, nonaBDE, octaBDE N.º CAS: 1163-19-5	La mezcla comercial consiste principalmente en el congéner de decaBDE completamente bromado en un rango de concentración del 77,4 - 98 %, y cantidades más pequeñas de los congéneres de nonaBDE (0,3 - 21,8 %) y octaBDE (0 - 0,04 %).		1. Aditivo ignífugo. 2. Carcasas de computadoras y televisores, alambres y cables, tuberías y alfombras.	Ya hay en el mercado una serie de alternativas químicas no POP para la sustitución del c-decaBDE en plástico y textiles. Además, también están disponibles alternativas no químicas y soluciones técnicas como materiales no inflamables y barreras físicas, respectivamente.

Gráfica 3. Otras clases de BFR clasificados como COP

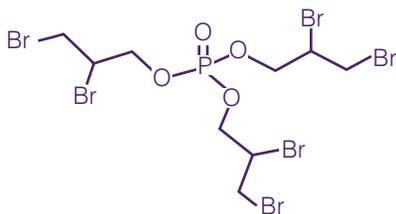
Otras clases de retardantes de llama (BFR)



TBBPA
Tetrabromobisfenol A



TBPE
1,2 - bis (tribromofenoxi) etano



Fosfato de Tris
(2,3 - dibromopropilo)

1.3 Efectos de los retardantes de llama clasificados como contaminantes orgánicos persistentes

Competencias a desarrollar:

- Entender los efectos en la salud y el medio ambiente de los retardantes de llama clasificados como COP.



1.3.1 ¿Cuáles son los efectos en la salud que producen los retardantes de llama clasificados como contaminantes orgánicos persistentes?

De acuerdo con la documentación disponible en la página web del Convenio de Estocolmo sobre COP, los informes científicos reportan que:

- El hexabromociclododecano (HBCDD) tiene un gran potencial de bioacumulación y biomagnificación, es persistente en el ambiente, es muy tóxico para los organismos acuáticos y en los humanos afecta el sistema endocrino (Persistent Organic Pollutants, 2010).
- El hexabromociclododecano (HBCD) produce irritación en los ojos, efectos en hígado y tiroides, y disminución en la fertilidad.
- El hexabromodifenileter (HBDE) y el pentabromodifenileter (PBDE) son igualmente bioacumulables y han reportado afectación al sistema endocrino, la capacidad de aprendizaje, la percepción espacial y la memoria, así como efectos neurotóxicos.

- El hexabromobifenilo (HBB) se absorbe rápido por la piel y se acumula en el tejido adiposo y en mujeres embarazadas se acumula en la leche materna. Además, se ha reportado que causa náuseas, cambios enzimáticos, dolor abdominal, fatiga, dolores articulares, acné y pérdida de cabello.
- En los seres humanos, la exposición al BDE-209³ (Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, 2014, p. 6) tiene lugar en las primeras fases de desarrollo en el útero por transmisión mediante la placenta y después del nacimiento mediante lactancia materna. Además, la carga de BDE-209 y otros PBDE en el organismo de los bebés y los niños pequeños es superior a la registrada en los adultos debido a una mayor exposición al polvo. En los seres humanos se ha informado de niveles elevados entre los trabajadores que desensamblan aparatos electrónicos, técnicos informáticos, operadores de inyectores en fábricas de aplicaciones eléctricas y personas que residen cerca de plantas de producción y reciclado (p. 13).

Los efectos en la salud son variados y requieren de una investigación científica rigurosa que en la actualidad continúa en curso.

3. En el presente documento se utiliza la abreviatura c-decaBDE en relación con los productos de decaBDE de calidad técnica o comercial. El éter de decabromodifenilo (BDE-209) se refiere al único PBDE totalmente bromado, el cual en otros documentos significa decaBDE.

1.3.2 ¿Cuáles son los efectos en el ambiente que producen los retardantes de llama clasificados como contaminantes orgánicos persistentes?

Debido a la alta estabilidad de las sustancias con COP en el ambiente, su permanencia en la naturaleza es sumamente prolongada; sumado a esto, su alta capacidad de ser absorbidos y bioacumulados en los tejidos grasos hace que estos compuestos pasen fácilmente a través de la cadena alimenticia de una especie a otra. Algunas fuentes de alimentos que se han identificado con alto contenido de sustancias COP son peces marinos, huevos de aves, entre otros, contenido que luego pasa a los seres humanos. Así mismo, el tamaño de estas sustancias cuando son liberadas al aire hace

que lleguen a lugares lejanos mediante las corrientes de aire, por lo que se ha encontrado presencia de estas en lugares tan distantes como la Antártica, el Ártico e islas remotas del Pacífico (Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, 2014, p. 35).

1.3.3 Efectos adversos sobre los seres vivos

Los retardantes de llama identificados como COP tienen efectos reproductivos, endocrinos, neurotóxicos y en el desarrollo de los organismos acuáticos, los mamíferos y las aves, así como problemas en el crecimiento, la supervivencia y la mortalidad. En la tabla 7 se presentan algunos hallazgos de investigaciones sobre el tema.

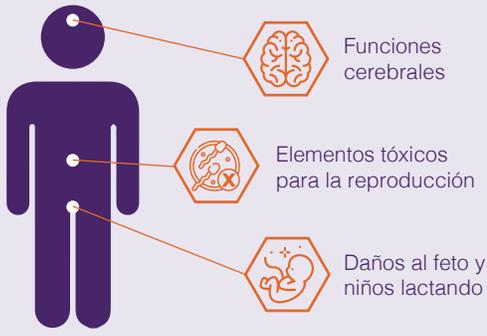
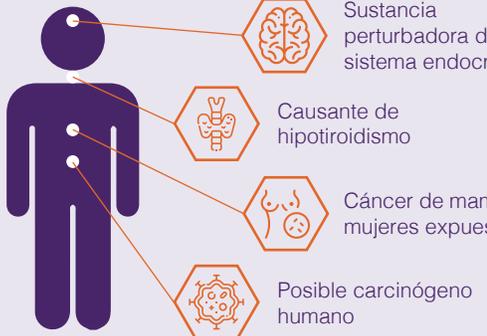
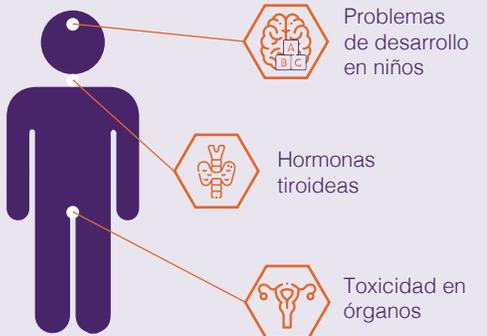
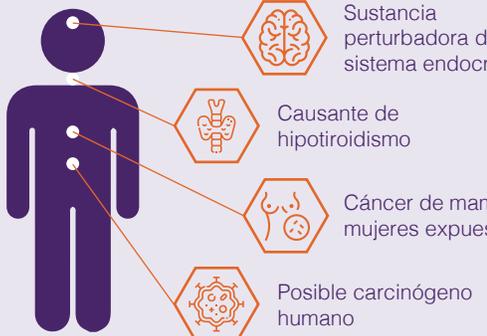
Tabla 7. Afectaciones al ambiente por parte de los retardantes de llama clasificados como COP

Alteraciones de la hormona tiroidea y mortalidad crónica del piscardo a un nivel mínimo con efecto observado de ~3 ng/g de BDE-209 por peso corporal por día o 0,41 ng/g de peso húmedo de los alimentos durante 28 días (Nosí, 2013).
Mortalidad de hasta 98 % de los embriones de pollo al cabo de 20 días tras una sola inyección de BDE-209 (LD50 de 44 µg/huevo o 740 µg/ kg de peso húmedo) (Sifleet, 2009 en ECHA, 2012a).
Neurotoxicidad del desarrollo en los roedores (Johansson, 2008; Viberg, 2003, 2007; Rice, 2009; Fujimoto, 2011; Heredia, 2012; Reverte, 2013, 2014; Buratovic, 2014). Asociación epidemiológica de efectos en el desarrollo cognitivo de los seres humanos con la exposición al decaBDE (Gascon, 2012; Chao, 2011).
Desbromación a PBDE bromados en menor grado con propiedades persistentes, bioacumulativas y tóxicas o muy persistentes y acumulativas, y de COP que surten efectos adversos importantes (ECHA, 2012a; POPRC, 2013a; POPRC6; POPRC7).
Posible riesgo para los seres humanos y la fauna y flora silvestre resultante de los efectos combinados entre el BDE-209 y otros PBDE en concentraciones ambientalmente significativas (Kortenkamp, 2014; Plourde, 2013).

Una vez comprendidas las posibles afectaciones a la salud y el ambiente de los retardantes de llama clasificados como COP, se comprende más fácilmente la necesidad

de dar una adecuada gestión a los materiales que contienen este tipo de residuos y de evitar las fugas de estos al ambiente o su contacto prolongado con las personas.

Tabla 8. Resumen de los efectos de los retardantes de llama en la salud y el medio ambiente

<p>Efectos del HBCD en la salud El HBCD tiene un fuerte potencial para bioacumular y biomagnificar. Aunque falta información sobre la toxicidad humana del HBCD, los grupos vulnerables podrían estar en riesgo de toxicidad neuroendocrina y para el desarrollo.</p>	
<p>Efectos del HBCD en el ambiente Es persistente en el medio ambiente y tiene un potencial para el transporte ambiental a largo plazo. Es muy tóxico para los organismos acuáticos.</p>	
<p>Efectos del HBB en la salud Dado que el HBB está clasificado como un posible carcinógeno humano y que tiene otros efectos tóxicos crónicos, el Comité recomendó su inclusión como COP.</p>	
<p>Efectos del HBB en el ambiente El producto químico es altamente persistente en el medio ambiente y bioacumulativo, y tiene una fuerte posibilidad de transporte ambiental a larga distancia.</p>	
<p>Efectos del tetraBDE y pentaBDE en la salud Estas sustancias químicas se han detectado en humanos en todas las regiones.</p>	
<p>Efectos del tetraBDE y pentaBDE en el ambiente La mezcla comercial de pentaBDE es altamente persistente en el medio ambiente y bioacumulativa, y tiene un alto potencial para el transporte ambiental a largo plazo. Hay evidencia de su potencial para producir efectos tóxicos en la vida silvestre, incluidos los mamíferos.</p>	
<p>Efectos del heptaBDE y octaBDE en la salud La mezcla comercial de octaBDE es altamente persistente y tiene un alto potencial para la bioacumulación. Reporta afectaciones al sistema endocrino, la capacidad de aprendizaje, la percepción espacial y la memoria, así como efectos neurotóxicos.</p>	
<p>Efectos del heptaBDE y octaBDE en el ambiente Alta capacidad de diseminación a larga distancia. La única vía de degradación es a través de la desbromación y la producción de otros PBDE.</p>	

Efectos del decaBDE en la salud

El decaBDE es altamente persistente y tiene un alto potencial para la bioacumulación y la biomagnificación de las redes alimentarias.

Efectos del decaBDE en el ambiente

Así como para transporte a largo plazo, reporta efectos adversos para organismos del suelo, aves, peces, ranas, ratas, ratones y humanos.



Neurotoxicidad e inmunotoxicidad



1.3.4 Actividad 1. Emparejamiento de conceptos

Empareje los conceptos enunciados en la columna izquierda con las definiciones propuestas en la columna derecha.

Convenio de Estocolmo sobre COP

Anexo A

COP

PBDE

Efecto en la salud humana

Sustancia tóxica y resistente a la degradación que se bioacumula, biomagnifica y puede transportarse largas distancias.

Protege la salud humana y el ambiente de los COP.

Los BFR clasificados como COP suelen afectar el sistema endocrino y algunos se han identificado como carcinogénicos

BFR clasificado como COP presente en algunos plásticos.

Establece la prohibición y eliminación del uso de sustancias como los BFR clasificados como COP.

1.4 Gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Colombia

1.4.1 Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Colombia

Hasta ahora se ha presentado el propósito del Convenio de Estocolmo sobre COP y su intención de eliminar y gestionar los COP por los peligros que estos representan para el ambiente y las personas. Dentro del Convenio se identificaron algunas sustancias que han sido utilizadas a lo largo de la historia reciente como aditivos retardantes de llama. Dentro de esta categoría, varios tienen aplicaciones como aditivos para materiales plásticos. A su vez, dentro de las aplicaciones que hacen uso de este tipo de aditivos se encuentran aplicaciones en aparatos eléctricos y electrónicos (AEE), dado que algunas de las partes eléctricas necesitan soportar altas temperaturas y eventuales descargas eléctricas, lo que genera riesgos de combustión, por lo que el uso de aditivos retardantes de llama es de gran utilidad y se ha convertido en un estándar en la industria de cumplimiento regulatorio.

Como se ha mencionado en los capítulos previos, antes del Convenio de Estocolmo sobre COP no existía el conocimiento con el que se cuenta en la actualidad sobre los aditivos retardantes de llama clasificados como COP, por lo que su uso antes del Convenio fue generalizado en la industria eléctrica y electrónica durante muchos años gracias a su efectividad y bajo costo. Los AEE, por lo general, han tenido una vida útil o vida media de varios años —se estima que un aparato eléctrico antes del 2000 tenía una vida media de 15 años—, la cual se ha hecho más corta en la última década gracias al mercadeo y los constantes avances y actualizaciones tecnológicas.

Competencias a desarrollar:

- Analizar la cadena de valor de la gestión de los plásticos derivados del desensamble de RAEE.



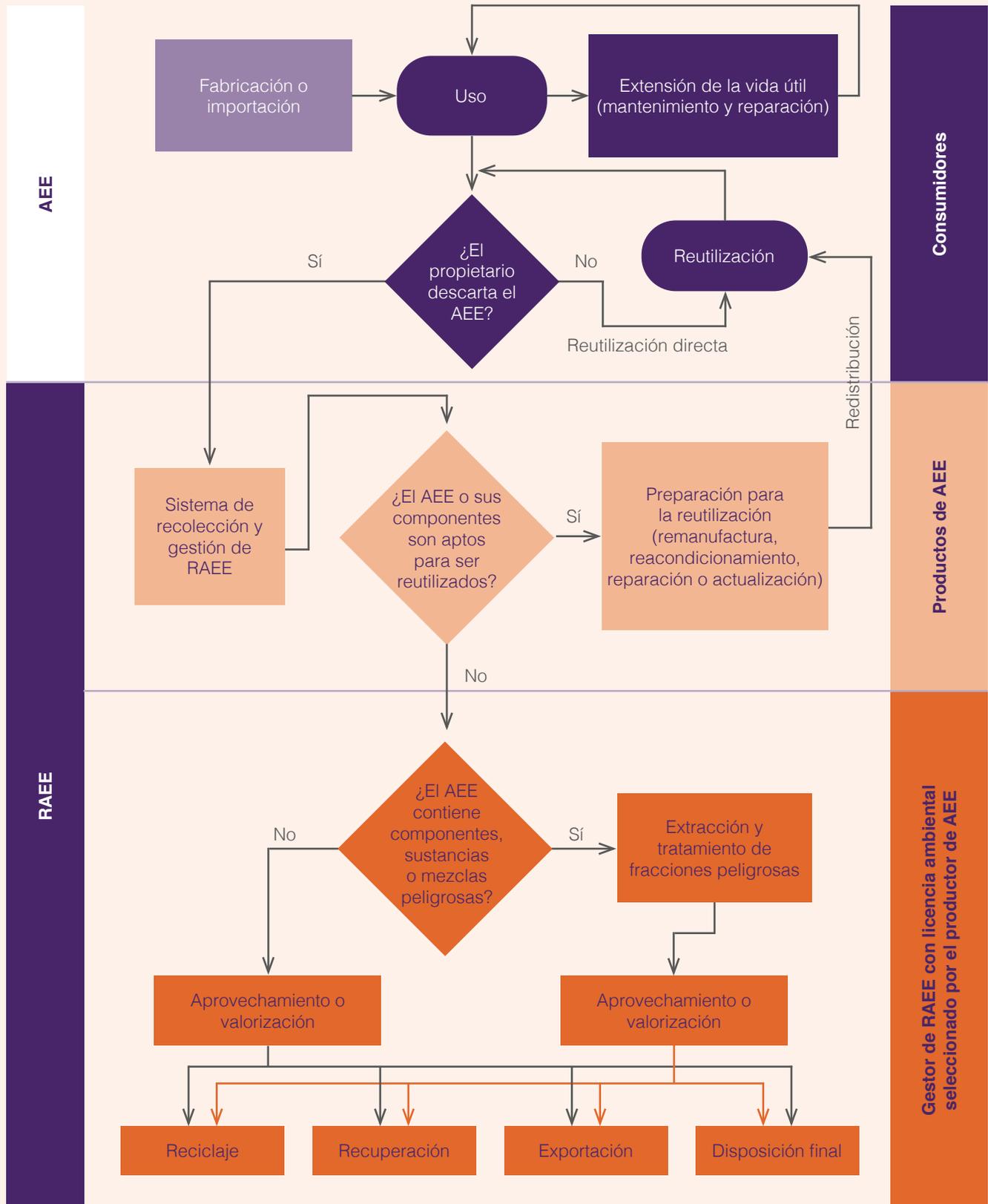
Así, a pesar de la entrada en vigencia del Convenio de Estocolmo sobre COP, existe una gran cantidad de AEE que aún contienen elementos fabricados con plásticos aditivados con retardantes de llama clasificados como COP o, en el peor de los casos, han sido fabricados en países que no han adherido al Convenio de Estocolmo sobre COP o no lo han implementado plenamente. En consecuencia, la gestión de RAEE exige el conocimiento de lo presentado antes, así como herramientas que ayuden a identificar cuáles de los elementos plásticos pueden contener aditivos COP para realizar su adecuada separación, gestionar debidamente los residuos contaminados y aprovechar aquellos materiales libres de COP en aplicaciones de valor agregado.

Según el reporte sobre el monitoreo global de los desechos electrónicos realizado por el Instituto para el Estudio Avanzado de la Sostenibilidad de la Universidad de las Naciones Unidas (Forti *et al.*, 2020), en 2019 Colombia generó 318.000 toneladas de RAEE equivalentes a un promedio de 4 a 7 kilogramos por habitante (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s. f. d)⁴.

En atención a los RAEE en Colombia, su gestión integral se realiza bajo la adopción de sistemas que han tenido como referencia el modelo de responsabilidad extendida del productor (REP), basado en el retorno de productos posconsumo a cargo de los usuarios y en la gestión de estos a cargo de los productores e importadores de AEE. Este modelo requiere de la conformación de sinergias entre fabricantes y gestores para lograr el manejo adecuado de los residuos provenientes de las actividades de consumo.

4. Para más información, consulte el video *Profesor Súper O Recargado (Capítulo 19. Residuos electrónicos)* de Señal Colombia (2012) en el enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=J02S8hKP94>.

Gráfica 4. Flujograma de decisiones y actores en la gestión de RAEE en Colombia



1.4.2 Marco normativo en Colombia

A continuación se describen las leyes, normas y políticas con las que cuenta Colombia, las

cuales forman el marco normativo para el tratamiento de estos materiales.

Ley 1672 de 2013 por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y se dictan otras disposiciones



2013

- Establece los lineamientos para la política pública de gestión integral de RAEE.
- Proporciona el carácter de manejo diferenciado de los RAEE.
- Prohíbe la disposición final de los RAEE en rellenos sanitarios.
- Promueve la retoma de los RAEE por los productores de AEE mediante sistemas de recolección y gestión ambientalmente segura.
- Permite la devolución de los RAEE por parte del consumidor sin ningún costo.
- Proporciona las directrices para la gestión de RAEE.



Licencias ambientales para las instalaciones gestoras de RAEE - Decreto 2041 de 2014 por el cual se reglamenta el título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales



2014

Establece el requisito de licenciamiento ambiental para la construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento (recuperación o reciclado) o disposición final de los RAEE.

*Del licenciamiento ambiental se excluyeron las actividades de reacondicionamiento y reparación de AEE usados.



Reglamentación de los programas posconsumo para algunas corrientes de RAEE - Resoluciones 1297, 1511 y 1512 de 2010 por las cuales se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos



2015

- Resolución 1511 de 2010 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) “por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de los residuos de bombillas y se adoptan otras disposiciones”.
- Resolución 1512 de 2010 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) “por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de los residuos de computadores y periféricos y se adoptan otras disposiciones”.
- Resolución 1297 de 2010 (Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) “por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de los residuos de pilas y acumuladores y se adoptan otras disposiciones”.

Política Nacional de Gestión Integral de RAEE, 2017

Objetivo general:

Promover la gestión integral de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) armonizando las acciones de

los diferentes actores involucrados y las políticas sectoriales, y fortaleciendo los espacios de coordinación interinstitucional y de participación ciudadana para contribuir así al desarrollo sostenible. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017b)

Gráfica 5. Plan de acción para la gestión integral de RAEE



Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017b.

Reglamento para la Gestión Integral de los RAEE - Decreto 284 de 2018 por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la Gestión Integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) y se dictan otras disposiciones

En la actualidad, el Gobierno de Colombia se encuentra trabajando en una nueva regulación para extender los sistemas de recolección selectiva a todas las categorías de RAEE y realizar ajustes en el Sistema de Gestión Integrado de RAEE, teniendo en cuenta las

lecciones aprendidas y los lineamientos establecidos por la Ley 1672 y la Política Nacional de Gestión de RAEE.

1.4.3 Gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Los modelos de gestión integral de RAEE parten del concepto de la jerarquía de residuos, el cual propone un orden de prioridad que busca generar el mejor resultado medioambiental global (Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo, 2008). En la gráfica 6 se presenta la jerarquía de residuos aplicada a RAEE y cómo esta contribuye a su gestión.

Gráfica 6. Gestión integral de RAEE mediante la jerarquización de residuos

En la gestión integral de RAEE es importante aplicar el concepto de jerarquía de residuos, el cual establece un orden de prioridad de lo que constituye el mejor resultado medioambiental global.



Sin embargo, como se puede intuir de este esquema, existen muchas fuerzas y dinámicas de mercado que dificultan esta jerarquización.

Algunas son:

- Estrategias de mercado de las grandes marcas productoras de AEE.
- Tendencias alrededor de los ciclos de vida de un producto cada vez más cortos.
- Balanza entre las capacidades del país de producción de AEE y las importaciones.
- Motivaciones de compra de los usuarios.

Por ello, se deben realizar grandes esfuerzos para la gestión de RAEE, razones por las cuales Colombia cuenta con el marco normativo presentado, herramienta que permite reglamentar los procesos de gestión e instrumentar a los entes de control. Una gestión ambientalmente adecuada de RAEE involucra los siguientes entes de control: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial; Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA); Ministerio de Comercio, Industria y Turismo; autoridades ambientales regionales; entre otros.

Prevención y minimización

Dentro de las actividades de la gestión integral, la prevención produce los cambios más importantes y se ubica jerárquicamente por encima de las alternativas de aprovechamiento, tratamiento y disposición final. En el caso de los RAEE, la prevención hace referencia principalmente a todas aquellas medidas orientadas a evitar, por un lado, que un aparato se convierta en un residuo, en especial con la promoción de prácticas de extensión de vida útil; y, por otro, a reducir o restringir el contenido de sustancias peligrosas presentes en los AEE; es decir, a promover la producción y el uso de aparatos más responsables con el ambiente y la salud.

La reutilización sirve para prolongar la vida útil de los AEE usados para que estos vuelvan a introducirse en el mercado. También reporta beneficios por la reventa de los productos a precios inferiores que los nuevos. Por esto, constituye un nuevo sector económico, con escasa armonización de las actividades existentes, en el que un nuevo tipo de industria tiene el potencial de generarse.

Existen diferentes formas de reutilización de AEE:

a. Reutilización directa

Consiste en la reutilización directa del equipo usado sin realizarle ninguna adecuación.

Los aparatos que están todavía en pleno funcionamiento pueden:

- Venderse a título particular a tiendas de segunda mano.
- Venderse entre consumidores mediante anuncios en periódicos o revistas.
- Donarse a familiares o amigos.

b. Reutilización de componentes sin pérdida funcional

Un equipo usado para el cual la restauración y reparación completa no sea económicamente viable puede contener uno o más componentes que sí puedan reutilizarse. Para este fin, los equipos deben desensamblarse con el mayor cuidado para evitar el daño de los componentes a reutilizar. Una manera de reutilizar consiste en desarmar los equipos, recuperar las partes en buen estado de funcionamiento y reemplazar las piezas desgastadas o averiadas. Las partes recuperadas pueden ser limpiadas o pintadas, ajustadas mecánicamente o electrónicamente, reconfiguradas y probadas para que cumplan con su función y con las expectativas estéticas similares a un modelo nuevo.

c. Reacondicionamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

El reacondicionamiento y la reparación son procesos técnicos de renovación y restauración en los cuales se restablecen por completo las condiciones funcionales y estéticas de un equipo en desuso de tal forma que el equipo pueda usarse en un nuevo ciclo de vida.

Recolección

La cadena de distribución y comercialización de los AEE brinda a los consumidores la opción de devolver RAEE mediante puntos de recolección y acopio permanentes, ubicados en los sitios de venta de los AEE, o mediante eventos especiales o campañas de recolección realizadas en fechas especiales o periódicas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017b).

Transporte

Los procedimientos de transporte de RAEE dependen de los tipos de residuos, el nivel de desensamble y las capacidades de reciclaje que se tengan, ya que se pueden transportar equipos enteros en desuso o sus componentes después de su desensamble.

Tabla 9. Requisitos técnicos y recomendaciones generales para el transporte de RAEE

Siempre se debe procurar protegerlos de la intemperie.
Durante el transporte se debe evitar que las personas no autorizadas tengan acceso a la carga para evitar la adición o pérdida de partes o piezas de los equipos sin supervisión.
La carga dentro del vehículo debe estar debidamente empacada, acomodada, estibada, apilada, sujeta y cubierta de tal forma que no presente peligro para la vida de las personas y el medio ambiente.
Para este fin se recomienda que todo transporte de RAEE de tamaño mediano o pequeño se realice en cajas de madera, de cartón grueso o de rejillas metálicas.
En caso de transportar RAEE en estibas, se debe envolver toda la estiba con una película plástica cuando esté cargada.
Es recomendable no poner más de tres capas de RAEE en las estibas y asegurarse de que la carga no sobresalga de las cajas.
Por lo general, no se requieren cartones o espumas entre las capas. Sin embargo, para algunas excepciones se recomienda colocarlos; por ejemplo, para el transporte de monitores en desuso.
En caso de ofrecer servicios de recolección y transporte de equipos de impresión y fotocopia en desuso, se debe tener un sistema de recolección de derrames de tinta para evitar la contaminación del medio ambiente y de los demás componentes conjuntamente transportados.
Portar como mínimo 2 extintores tipo multipropósito —uno en la cabina y los demás cerca de la carga— en un sitio de fácil acceso para que se pueda disponer de ellos rápidamente en caso de emergencia, y contar con personal preparado para su utilización.

Almacenamiento

Tabla 10. Requisitos técnicos para instalaciones de almacenamiento

Protección contra la intemperie: el almacenamiento debe realizarse a temperatura ambiente y protegido de la intemperie para evitar que agentes contaminantes puedan lixiviar al ambiente debido a los efectos del tiempo, así como para permitir posterior reacondicionamiento o reutilización de los equipos.
Pisos: impermeables para evitar infiltraciones y contaminación de los suelos.
Capacidad: adecuada para el manejo de todo el inventario.
Protección contra acceso no autorizado: el desecho electrónico se debe almacenar de manera tal que no se permita el ingreso de personas no autorizadas a las instalaciones para evitar que se agreguen o sean extraídos equipos en desuso o piezas sin supervisión.
Registros: mantener registros de inventarios tanto de equipos en desuso enteros como de piezas recuperadas.
Procedimientos: se deben documentar los procedimientos que se llevan a cabo en el sitio de almacenamiento.
Personal: el personal debe estar capacitado para cumplir con los procedimientos de almacenamiento.
Almacenamiento y empaque: en general, los RAEE se deben almacenar sobre estibas o en cajas de rejillas o de madera para facilitar su almacenamiento, carga y transporte hacia procesos posteriores.

Aprovechamiento

El aprovechamiento de RAEE parte de la necesidad de separar los diferentes elementos que componen el aparato —como metales ferrosos, metales no ferrosos, plásticos, entre otros— y de separar dentro de estas categorías los tipos de materiales; por ejemplo, entre los metales no ferrosos debe separarse el cobre del aluminio, pues cada uno tiene rutas de aprovechamiento diferentes. Así mismo, los materiales plásticos deben separarse por tipo de material para maximizar su aprovechamiento;

de lo contrario, estas mezclas de materiales tendrán pocas posibilidades de ser recicladas o los productos fabricados serán de muy bajo valor agregado.

Es importante recalcar que en el proceso de separación es necesario identificar aquellas partes o piezas que sean sospechosas de contener aditivos COP para su posterior verificación y gestión o descontaminación. A continuación se presenta el proceso de desensamble y descontaminación.



Consiste en separar los principales componentes o partes de componentes que conforman los RAEE (desensamble completo) o en el desensamble de los mismos en todos sus componentes y materiales (desensambles completos), los cuales serán clasificados de forma general en plásticos, vidrios, metales ferrosos, metales no ferrosos (como aluminio y cobre) y componentes peligrosos, como mercurio y plomo, entre otros.

Realiza la separación de los componentes peligrosos que pueden estar presentes en algunos AEE en desuso para evitar que los componentes contaminados terminen en las fracciones aprovechables para reciclar y así facilitar su manejo posterior. Este paso se debe realizar en particular cuando el proceso posterior sea el desensamble mecánico. Por lo general, los componentes que pueden contener sustancias peligrosas deben ser extraídos manualmente.

Los procesos futuros de manejo, tales como la incineración controlada o la refinación, pueden permitir el reciclaje de RAEE sin el retiro anterior de sustancias peligrosas. Los residuos peligrosos que se pueden generar en el desensamble de RAEE son: vidrio con plomo, pilas y baterías, sustancias refrigerantes, tintas, aceites, bombillas, condensadores que contengan bifenilos o trifenilos policlorados (PCB o PCT) y tarjetas de circuitos impresos con soldaduras de plomo.

a. Reciclaje como aprovechamiento

El reciclaje de los materiales puede realizarse mediante diversas técnicas o tecnologías como:

- **Reciclaje mecánico:** proceso físico en el cual los materiales a recuperar son procesados para convertirlos en materias primas sin que cambien de manera significativa sus propiedades.
- **Reciclaje químico:** proceso químico en el cual los materiales a recuperar son degradados hasta convertirlos en elementos más simples, los cuales podrán utilizarse como combustible o insumos para la fabricación de nuevas materias primas.
- **Reciclaje energético:** proceso que consiste en la recuperación de los materiales como fuente de energía para generar electricidad o calor.

Este curso se enfoca en la gestión de los materiales mediante el reciclaje mecánico. Teniendo en cuenta que los materiales a aprovechar deberán estar libres de aditivos clasificados como COP, aquellos que contengan niveles superiores a los sugeridos deberán separarse y disponerse de manera ambientalmente adecuada. De esta manera, se da cumplimiento con los compromisos alrededor de la Estrategia Nacional de Economía Circular.

b. Actores en la cadena de valor para el aprovechamiento o la valorización de los materiales

Dentro de la cadena de valor para el aprovechamiento de los materiales se encuentran los gestores, organizaciones que prestan de forma total o parcial servicios de recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento o disposición final de RAEE. Dentro del marco de la gestión integral y el cumplimiento con los requerimientos de la normativa ambiental vigente, lo principal es la obtención y el mantenimiento de la licencia ambiental —otorgada por las autoridades ambientales regionales y urbanas— para almacenar, aprovechar, recuperar o reciclar, tratar o disponer RAEE.

La información sobre materiales y componentes recuperados y exportados por gestores de RAEE dice que:

En cuanto a los materiales recuperados y exportados, el 78,8 % del peso total está representado por los metales ferrosos de cobre y aluminio, mientras que el de los aparatos, partes y componentes eléctricos y electrónicos es el 8,9 %.

Solo una cuarta parte de las empresas gestoras formales realiza actividades de desensamble, recuperación y aprovechamiento local de materiales valiosos, como metales ferrosos y no ferrosos, mientras que las demás corrientes altamente valorizables, como las tarjetas electrónicas, se exportan a mercados internacionales para la recuperación de metales preciosos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017b). Para algunos tipos de RAEE, el tratamiento ambiental seguro es sustancialmente costoso, lo que hace que las operaciones no sean rentables; mientras que, para otros tipos, la recuperación de materiales y el reprocesamiento para el suministro como nuevas materias primas generan rentabilidad al gestor.

Al operar sin vigilancia, control y sin estándares, el sector informal se ve abocado a generar valor de materiales recolectados para sobrevivir. Con ello, solo recupera las fracciones más valiosas aplicando prácticas de tratamiento inadecuadas para la recuperación de materiales riesgosos para el ambiente y la salud humana, y desechando las fracciones no valiosas sin ningún tipo de gestión.

Disposición final

Cuando los RAEE no tienen una adecuada gestión contribuyen de manera general a la

aparición de efectos negativos ambientales en los rellenos sanitarios comunes. Esto, debido a la presencia de metales pesados y sustancias halogenadas que lixivian hacia el subsuelo o que se evaporan en el aire. Además, la variedad de las sustancias contenidas en los RAEE obrará, a su vez, para ejercer efectos sinérgicos que aumentarán potencialmente y magnificarán sus efectos negativos.

Por lo tanto, se debe evitar la disposición final de RAEE en rellenos sanitarios, no solo por sus efectos negativos en el ambiente y la salud humana, sino por la pérdida de recursos secundarios valiosos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a). Además, según la ley y normativa vigente en el país está prohibida la disposición de RAEE en rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto.

Ahora bien, el desecho de fracciones o materiales sobrantes de los procesos de tratamiento o aprovechamiento de RAEE, según su composición y características de peligro, debe realizarse en rellenos de seguridad. Allí deberían enviarse los componentes con contenido de sustancias peligrosas que no cuenten con procesos de aprovechamiento adecuados, siempre y cuando cumplan con los requerimientos técnicos que exige un relleno de seguridad.



1.5 Evaluación del capítulo

1

¿Qué es el Convenio de Estocolmo sobre COP?

a. Una ley para eliminar los plásticos en el mundo.

b. Un tratado para reducir la contaminación.

c. Un acuerdo para proteger la salud humana y el ambiente.

d. Un manual de buenas prácticas alrededor de los COP.

2

¿Dónde se pueden consultar los países miembros del Convenio de Estocolmo sobre COP?

a. En la página web del Convenio de Estocolmo sobre COP.

b. En Google.

c. En la página web del Ministerio de Ambiente.

d. En la página web de la Cancillería.

3

¿Qué es un COP?

a. Es un policía americano.

b. Es una sustancia contaminante con ciertas características.

c. Es una sustancia controlada por convenios internacionales.

d. Es una sustancia que al degradarse contamina y daña la salud.

4

Si tengo una sustancia que considero sospechosa, ¿cómo valido que sí es un COP?

a. Consulto los anexos del Convenio de Estocolmo sobre COP.

b. Miro el número CAS de la ficha de seguridad y consulto en Google.

c. Hago una consulta oficial al Ministerio de Ambiente.

d. Reviso la ficha técnica que debe declararlo.

5

Con relación al PBDE, Colombia tiene el compromiso de:

a. Prohibir su uso y eliminar sus existencias en el país.

b. Restringir su uso de acuerdo con las exenciones específicas.

c. Evitar su producción no intencional.

d. Reportar su uso a los países del Convenio de Estocolmo sobre COP.

6

Un retardante de llama es:

a. Un tipo de plástico que es resistente al calor y la temperatura.

b. Una sustancia que hace que las llamas se retrasen.

c. Una sustancia orgánica halogenada contaminante.

d. Un aditivo para aumentar la resistencia a la llama de ciertos materiales.

7

¿Todos los plásticos tienen COP?

a. Verdadero.

b. Solo aquellos que contienen retardantes de llama.

c. Solo aquellos que contienen halógenos.

d. Falso.

10

Los efectos de los COP sobre el ambiente son:

a. Mínimos debido a su baja concentración.

b. Moderados, pues solo afectan a la vida acuática.

c. Graves debido a su toxicidad y capacidad de transporte.

d. Catastróficos, pues destruyen los ecosistemas.

8

¿Un retardante de llama es necesariamente un COP?

a. Verdadero, todos los retardantes son COP.

b. Falso, solo los retardantes inorgánicos son COP.

c. Falso, solo aquellos establecidos por el Convenio de Estocolmo sobre COP son COP.

d. Falso, solo los retardantes usados en plásticos son COP.

11

Los sistemas que los COP suelen afectar con mayores efectos nocivos sobre la salud son:

a. Nervioso, endocrino y reproductor.

b. Ocular, respiratorio y osteomuscular.

c. Circulatorio, nervioso y óseo.

d. Digestivo, endocrino y excretor.

9

Las siguientes sustancias son retardantes de llama clasificados como COP:

a. PBDE y trióxido de aluminio.

b. HBDC y TBBPA.

c. SCCP y PCB.

d. DecaBDE y PFOS.

12

De los RAEE se puede decir que:

a. Siempre se encuentran contaminados con COP.

b. Solo los equipos anteriores al Convenio de Estocolmo sobre COP se encuentran contaminados.

c. Pueden estar contaminados o no con COP y deben gestionarse de manera adecuada.

d. Representan una categoría importante de COP no intencionales.

13

La gestión de RAEE en Colombia se realiza así:

a. Cualquier entidad puede gestionar RAEE.

b. Solo entidades con licencia ambiental pueden gestionar RAEE.

c. Las autoridades ambientales gestionan RAEE.

d. Los RAEE se exportan, ya que no existe capacidad nacional.

15

La mejor forma de gestionar los plásticos de RAEE es:

a. Generando estrategias de reciclaje para todos los plásticos.

b. Reciclando aquellos que son seguros para la salud humana y el ambiente.

c. Disponiendo el plástico contaminado en rellenos sanitarios.

d. Disponiendo todo el material en rellenos de seguridad.

14

La gestión integral de RAEE puede resumirse así:

a. Se promueve el reuso y reciclaje de RAEE desde una visión empresarial integral.

b. Todos los materiales se reutilizan en un sistema de economía circular y de cero residuos.

c. Los aspectos ambientales se integran al balance económico de las empresas de reciclaje.

d. Se previenen y minimizan los residuos que, de generarse, se aprovechan, tratan o disponen.

1.6. Bibliografía

- Ash, M. y Ash, I. (1997). *The Index of Flame Retardants*. Gower Publishing Ltd.
- Bill, A., Gasser, M., Haarman, A., y Heinz, B. (2019). *Procesamiento de plásticos de RAEE: manual práctico*. SRI, Step, Swiss Confederation, EMPA y World Resources Forum. https://www.step-initiative.org/files/_documents/other_publications/Manual%20Plásticos%20RAEE%20Español-min.pdf.
- BSEF. (2013, abril). *Brominated Flame Retardants: It's Elementary* [video]. <https://youtu.be/zqd1gZDNzcl>.
- BSEF. (2017). *Brominated Flame Retardants Recycling E-Waste Chart*. BSEF. https://www.bsef.com/wp-content/uploads/2019/06/BSEF-BFRetardantsRecyclingChart-POSTER_841x1189mmA0_V03_PRESS-3mmBleed.pdf.
- BSEF. (S. f. a). *FAQs* [página web]. <https://www.bsef.com/about-bromine/what-is-bromine/faqs/>.
- BSEF. (S. f. b). *What Is Bromine?* [página web]. <https://www.bsef.com/about-bromine/what-is-bromine/>.
- Forti, V., Blade, C. P., Kuehr, R., y Bel, G. (2020). *Observatorio mundial de los residuos electrónicos 2020: cantidades, flujos y potencial de la economía circular*. UNU-VIE SCYCLE, UNITAR, ITU, ISWA, WHO y Federal Ministry for Cooperation and Development. <https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Observatorio-mundial-de-los-RAEE-informe-UNU-2020.pdf>.
- Greenpeace y CC.OO. (2002). *Informe sobre el estado del Convenio de Estocolmo sobre los contaminantes orgánicos persistentes*. Greenpeace y CC.OO. <https://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/informe-sobre-el-estado-del-co.pdf>.
- Haarman, A. y Gasser, M. (2016). *Managing Hazardous Additives in WEEE Plastic From the Indian Informal Sector*. SRI, Swiss Confederation, EMPA, Ecoinvent Centre, World Resources Forum, CII y Toxics Links. https://www.sustainable-recycling.org/wp-content/uploads/2016/07/Haarman_2016_SRI-India.pdf.
- IPEN Toxics Free Future. (2011, junio). *IPEN Toxics-Free Future Film Spanish.mov* [video]. https://www.youtube.com/watch?v=-j6ex_bod0l&ab_channel=IPENToxicsFreeFuture.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y PNUD. (2017). *Lo que todos debemos saber sobre COP: contaminantes orgánicos persistentes*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, GEF y PNUD. https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/05/Cartilla_Conociendo_los_COP_2017.pdf.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017a). *Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes 2017*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/05/PNI_Actualizado_Colombia_2017_Espanol.pdf.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017b). *Política Nacional: gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Politica-Nacional-para-la-Gestion-Integral-de-los-RAEE.pdf>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (S. f. a). *Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)* [página web]. [https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminantes-organicos-persistentes/#:~:text=Los%20contaminantes%20org%C3%A1nicos%20persistentes%20\(COP\)%2C%20son%20sustancias%20qu%C3%ADmicas%20con,humana%20y%20el%20medio%20ambiente.](https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminantes-organicos-persistentes/#:~:text=Los%20contaminantes%20org%C3%A1nicos%20persistentes%20(COP)%2C%20son%20sustancias%20qu%C3%ADmicas%20con,humana%20y%20el%20medio%20ambiente.)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (S. f. b). *Contaminantes Orgánicos Persistentes* [página web]. <https://quimicos.minambiente.gov.co/cop/>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (S. f. c). *Plan Nacional*

Implementación de la Convención de Estocolmo [página web]. <https://quimicos.minambiente.gov.co/cop-pla-nacional-2/>.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (S. f. d). *Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)* [página web]. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/residuos-de-aparato-electricos-y-electronicos-raee/>.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). *Aprendamos con Juan sobre los COP: contaminantes orgánicos persistentes*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/05/Cartilla_Aprendamos_sobre_COP_2006.pdf.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Evaluación de las implicaciones sociales y económicas del uso y reducción de los COP*.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010a). *Lineamientos técnicos para el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. http://www.residuoselectronicos.net/wp-content/uploads/2012/03/Guia_RAEE_MADS_2011-reducida.pdf.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010b). *Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) en la República de Colombia (PNA)*. https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/05/PNI_inicial_Colombia_2010.pdf.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (S. f.). *Problemática asociada con los COP*.
- Misión Permanente de Colombia ante las Naciones Unidas en Ginebra. (S. f.). *Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (POPs)* [página web]. <https://ginebra-onu.mision.gov.co/convenio-estocolmo>.
- Persistent Organic Pollutants Review Committee. (2010). *Risk Profile on Hexabromocyclododecane: UNEP/POPS/POPRC.6/13/Add.2*.

- Señal Colombia. (2012, octubre). *Profesor Súper O Recargado (Capítulo 19. Residuos electrónicos)* [video]. <https://www.youtube.com/watch?v=J02S8lhKP94>.
- Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. (2008). *Guidance on Flame-Retardant Alternatives to Pentabromodiphenyl Ether (PentaBDE)*. UNEP. http://chm.pops.int/Portals/0/docs/POPRC4/intersession/Substitution/PentaBDE_comments/IPEN_090115.pdf.
- Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. (2014). *Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the Work of Its Tenth Meeting: Addendum, Risk Profile on Decabromodiphenyl Ether (Commercial Mixture, c-decaBDE)*. United Nations y UNEP. <http://chm.pops.int/TheConvention/POPsReviewCommittee/Reports/tabid/2301/Default.aspx>.
- Stockholm Convention. (S. f. a). *Home page* [página web]. <http://chm.pops.int>.
- Stockholm Convention. (S. f. b). *The Convention: Overview* [página web]. <http://chm.pops.int/TheConvention/Overview/tabid/3351/Default.aspx>.
- Stockholm Convention. (S. f. c). *The Convention: 10th Anniversary of the Adoption of the Stockholm Convention* [página web]. <http://chm.pops.int/Implementation/PublicAwareness/10thAnniversary/tabid/2231/Default.aspx>.
- Stockholm Convention. (S. f. d). *The Convention: History of the Negotiations of the Stockholm Convention* [página web]. <http://chm.pops.int/TheConvention/Overview/History/Overview/tabid/3549/Default.aspx>.
- Stockholm Convention. (S. f. e). *The POPs: All POPs Listed in the Stockholm Convention* [página web]. <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/ListingofPOPs/tabid/2509/Default.aspx>.
- Stockholm Convention. (S. f. f). *The POPs: What Are POPs?* [página web]. <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/tabid/673/Default.aspx>.

CAPÍTULO

Plástico y sus aplicaciones en aparatos eléctricos y electrónicos



Competencias a desarrollar:

Conocer métodos para la clasificación de plásticos y su uso adecuado.

2.1 Tipos y propiedades básicas de los plásticos

Los plásticos son materiales muy versátiles, pues pueden ser duros o blandos, rígidos o flexibles, transparentes u opacos, livianos o pesados, entre otras propiedades. Estas propiedades físicas dependen del tipo de plástico, pero también pueden estar influenciadas por productos químicos y otros aditivos⁵.

2.1.1 Tipos de plásticos

En general, se puede decir que existen dos tipos de polímeros de acuerdo a su reacción al calor: termoplásticos y termoestables.

Por una parte, los polímeros termoplásticos se ablandan o funden cuando se calientan y se endurecen nuevamente cuando se enfrían. Algunos termoplásticos son:

- Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)
- Policarbonato (PC)
- Polietileno (PE)
- Polipropileno (PP)
- Poliestireno (PS)
- Poliestireno expandido (EPS)
- Policloruro de vinilo (PVC)
- Politereftalato de etilenglicol (PET)

Competencias a desarrollar:

- Reconocer los diferentes tipos de plásticos, sus aplicaciones y ocurrencia en AEE y RAEE.



La estructura de los polímeros termoplásticos suele ser simple con moléculas que se mantienen unidas pero independientes; es decir, no enlazadas. Esto les permite moldearse cuando aumenta la temperatura y solidificarse nuevamente al enfriarse. Los ciclos de calentamiento y enfriamiento pueden repetirse muchas veces, lo que permite procesarlos y reciclarlos una y otra vez.

Algunos usos cotidianos de los polímeros termoplásticos son: ABS en material deportivo, juguetes y piezas de automóviles; PC en CD, DVD, botellas para bebidas, recipientes para alimentos y lentes para gafas; y PE en botes de champú, bolsas para tiendas de comestibles y chalecos antibalas. La tabla 11 muestra un resumen de los plásticos reciclables.



5. Para más información, consulte el video *Video Plásticos 101* de National Geographic España (2018) en el enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=3FeBXc13ROY&feature=youtu.be>.

Tabla 11. Plásticos reciclables

Símbolo	Tipo de plástico	Propiedades	Usos comunes
 PET	PET Polietileno tereftalato <i>(polyethylene Terephthalate)</i>	Contacto alimentario, resistencia física, propiedades térmicas, propiedades barreras, ligereza y resistencia química.	Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos (aderezos, mermeladas, jaleas, cremas, farmacéuticos, etc.).
 HDPE	HDPE Polietileno de alta densidad <i>(High Density Polyethylene)</i>	Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pigmentar, fabricar y manejar, y se suaviza a los 75 °C.	Algunas bolsas para supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, helados, jugos, champú, químicos y detergentes, cubetas, tapas, etc.
 PVC	PVC Policloruro de vinilo <i>(Plasticised Polyvinyl Chloride PCV-P)</i>	Duro, resistente, puede ser claro, puede ser utilizado con solventes, se suaviza a los 80 °C, y también puede ser flexible y elástico.	Envases para plomería, tuberías, <i>blister packs</i> , envases en general, mangueras, suelas para zapatos, cables, correas para reloj.
 LDPE	LDPE Polietileno en baja densidad <i>(Low Density Polyethylene)</i>	Suave, flexible, translucido, se suaviza a los 70 °C y se raya fácilmente.	Películas para empaque, bolsas para basura, envases para laboratorio.
 PP	PP Polipropileno <i>(Polypropylene)</i>	Dificil, pero flexible, se suaviza a los 140 °C, translucido, soporta solventes y es versátil.	Bolsa para frituras, popotes, equipo para jardinería, cajas para alimentos, cintas para empacar, envases para uso veterinario y farmacéutico.
 PS	Ps Poliestireno <i>(Polystyrene)</i>	Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad, se suaviza a los 95 °C, y se afecta con grasas y solventes.	Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases cosméticos.
 PS-E	PS-E Poliestireno expandido <i>(Expanded Polystyrene)</i>	Esponjoso, ligero, absorbe energía y mantiene temperaturas.	Tazas para bebidas calientes, recipientes de comida para llevar, envases de hielo seco, empaques para proteger mercancía frágil.
 OTHER	Otros SAN, ABS, PC y Nylon	Incluye muchas otras resinas y materiales, por lo que sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos.	Autopartes, hieleras, electrónicos, piezas para empaques.

Por otra parte, los polímeros termoestables no se funden ni se disuelven. Aunque son más difíciles de manipular, suelen tener propiedades que los hacen atractivos para usos particulares. Algunos termoestables son:

- Silicona
- Baquelita
- Poliéster
- Poliúrea
- Resinas epóxicas
- Politetrafluoroetileno (teflón, PTFE)

La estructura de los polímeros termoestables suele ser macromolecular con una red de moléculas todas enlazadas entre sí. Esto les permite resistir mayores condiciones adversas de temperatura y presión, ya que tienen mayor dureza y rigidez; no obstante, dificulta enormemente procesos de reuso y reciclaje.

Algunos usos cotidianos de los polímeros termoestables son: poliéster en fibras, microfibras y recubrimientos; teflón en aislamientos y recubrimientos antiadherentes; y silicona en rellenos y sellamientos.

2.1.2 Propiedades básicas de los plásticos

Los plásticos son apetecidos por ser materiales económicos que ofrecen una amplia gama de propiedades físicas y químicas que resultan útiles para diversas aplicaciones, tal y como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Propiedades de los plásticos

Propiedad	Aplicaciones	Plástico
Resistencia mecánica	Piñones, válvulas, aspas y pistones.	Acetales, PC, PE y PP.
Resistencia al desgaste	Engranajes, cintas transportadoras y llantas de patinaje.	Acetales, poliuretano y PE de alta densidad.
Alta fricción	Llantas, calzado y suelos.	Elastómeros y caucho.
Baja fricción	Antiadherentes y articulaciones artificiales.	Poliéster y PE.
Resistencia eléctrica	AEE.	ABS, polimetilmetacrilato (PMMA), nailon, PC, PP y caucho.
Resistencia química	Material de laboratorio, industria química, alimentos y bebidas.	ABS, PMMA, nailon, PC, PP y poliestireno de alto impacto (HIPS, por sus siglas en inglés).

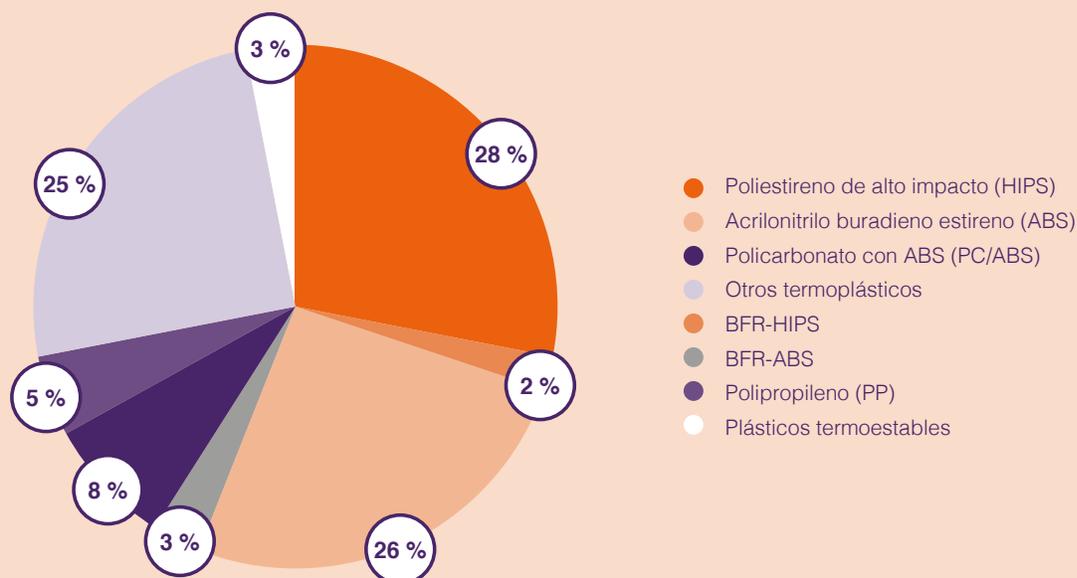
Propiedad	Aplicaciones	Plástico
Resistencia al calor	Electrodomésticos y AEE.	Siliconas, acetales y resinas epóxicas.
Elementos decorativos y funcionales	Manijas, tuberías y cajas.	ABS, PE, PP, PS y PVC.
Elementos decorativos y funcionales transparentes	Gafas, lentes y signos reflectivos.	Acrílico y PC.
Moldes y piezas huecas	Herramientas, cascos y carcazas	ABS, PC, PE, PP y PS.

Las propiedades de los plásticos se van degradando por el tiempo, por la cantidad de veces que este ha sido reciclado y por la mezcla con otros plásticos durante dicho proceso. Por lo tanto, es importante considerar tanto las propiedades que se desean como el manejo adecuado del plástico, lo cual se profundizará a lo largo de este capítulo.

2.1.3 Ocurrencia en los aparatos eléctricos y electrónicos

La mayoría de los plásticos encontrados en AEE y RAEE son termoplásticos y pueden reciclarse. En general, se evidencia que más del 70 % de la masa total de plásticos en AEE corresponde a cuatro tipos principales que se pueden separar y reciclar con facilidad: ABS, HIPS, PC y PP (ver gráfica 7).

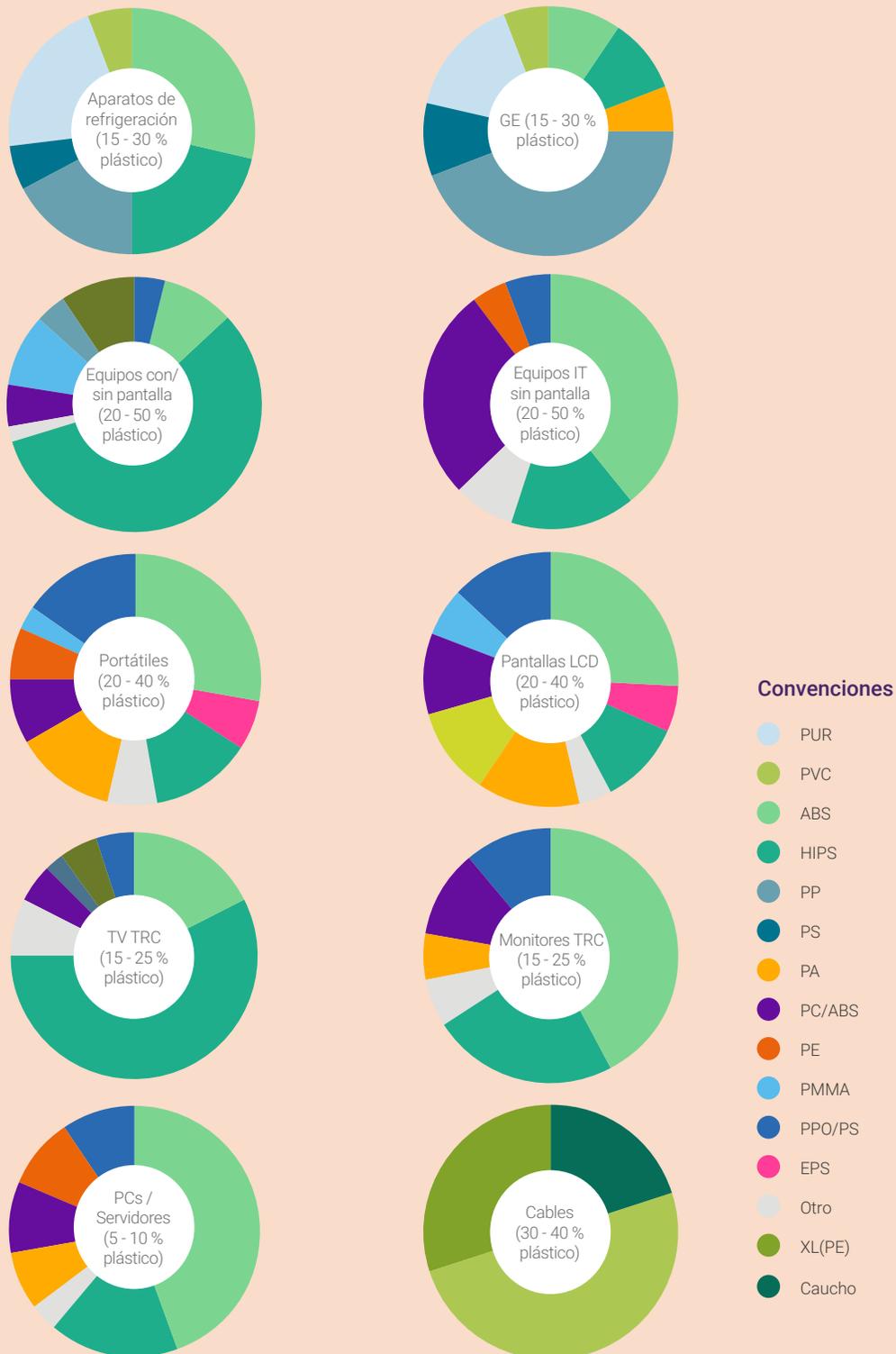
Gráfica 7. Distribución general del plástico en AEE



Al analizar los tipos de plástico por tipo de aparato, se puede observar que, además de una composición general, cada aparato sigue una tendencia de composición que se

debe a las propiedades de manufactura que cada aparato requiere, la cual puede brindar pistas para futuras etapas de identificación y separación de plásticos.

Gráfica 8. Composición de AEE específicos por tipos de plástico



2.2 Técnicas de identificación de plásticos

Competencias a desarrollar:

- Planear el uso de técnicas de identificación de plásticos aplicadas en la gestión de RAEE.



Un adecuado proceso de reciclaje requiere identificar y separar correctamente los plásticos por su tipo. Para ello se requieren métodos que puedan aplicarse de forma sistemática. Ya que son aplicados en planta, se requiere que estos métodos sean sencillos, puedan hacerse manualmente y resulten entendibles y accesibles.

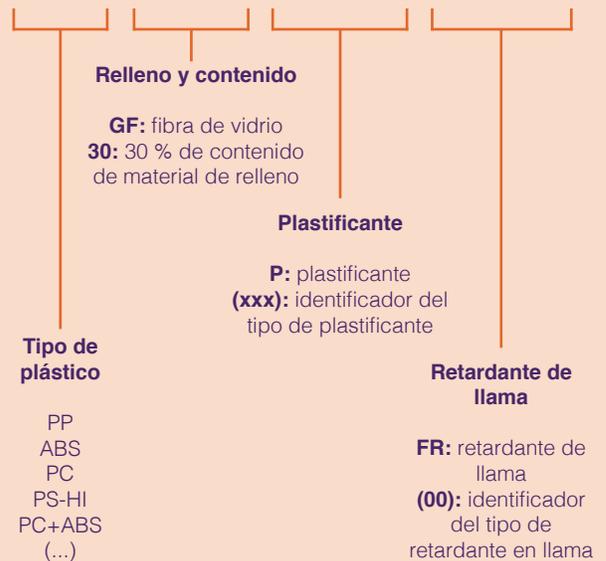
A continuación se discutirán dos métodos: etiquetas de la Organización Internacional de Normalización (ISO) y pruebas fisicoquímicas. Estos procesos se encuentran ampliamente explicados en el documento *Procesamiento de plásticos de RAEE: manual práctico* (2019) y en el material bibliográfico complementario.

2.2.1 Etiquetas de la Organización Internacional de Normalización (ISO)

De acuerdo con la Norma ISO 11469, las partes de plástico que pesen más de 100 gramos deben estar marcadas de forma visual de acuerdo con la gráfica 9.

Gráfica 9. Etiquetado según Norma ISO 11469

> **PP - GF30 - P(xxx) - FR(00)** <



Una marcación completa consta de cuatro términos que indican: tipo de plástico, materiales de relleno (cargas), plastificantes y retardantes de llama. El detalle del código del retardante de llama puede verse en la tabla 13.

Tabla 13. Códigos de BFR

Type	Code	Description
Halogenated compounds	14	Aliphatic/alicyclic brominated compounds.
	15	Aliphatic/alicyclic brominated compounds in combination with antimony compound.
	16	Aromatic brominated compounds (excluding brominated diphenyl ether and biphenyls).
	17	Aromatic brominated compounds (excluding brominated diphenyl ether and biphenyls) in combination with antimony compounds.
	18	Polybrominated diphenyl ether.
	19	Polybrominated diphenyl ether in combination with antimony compounds.
	20	Polybrominated biphenyls.
	21	Polybrominated biphenyls in combination with antimony compounds.
	22	Aliphatic/alicyclic chlorinated and brominated compounds.
	25	Aliphatic fluorinated compounds.
Nitrogen compounds	30	Nitrogen compounds (confined to melamine, melamine cyanurate, urea).
Organic phosphorus compounds	40	Halogen-free organic phosphorus compounds.
	41	Chlorinated organic phosphorus compounds.
	42	Brominated organic phosphorus compounds.
Inorganic phosphorus compounds	50	Ammonium orthophosphates.
	51	Ammonium polyphosphates.
	52	Red phosphorus.
Metal oxides, metal hydroxides, metal salts	60	Aluminium hydroxide.
	61	Magnesium hydroxide.
	62	Antimony (III) oxide.

Estas marcaciones a veces son difíciles de encontrar e interpretar. Además, no siempre están presentes y no siempre corresponden al material; por lo cual, aunque pueden proporcionar información útil, no son una fuente confiable en un proceso cuidadoso de reciclaje de plástico.

2.2.2 Pruebas fisicoquímicas

Estas consisten en la determinación de alguna cualidad del material, como densidad, dureza o resistencia química, entre otras. Las aplicadas más comúnmente se observan en la tabla 14.

Tabla 14. Pruebas fisicoquímicas para identificación de plásticos

Prueba	Principio	Consideraciones
Prueba con acetona	<p>El solvente disuelve los polímeros termoplásticos, cada uno de ellos con una reacción distintiva.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sin reacción: PVC, PP, PE y otros. • Depósito blanco: PC. • Pegajoso sin depósito: ABS. • Pegajoso con depósito: PC+ABS. 	<ul style="list-style-type: none"> • La acetona es un solvente controlado y debe utilizarse en cantidades mínimas y con precaución. • Requiere un nivel mínimo de experticia por parte del operario identificar las reacciones. • Algunas reacciones pueden ser poco claras.
Prueba con limoneno	<p>El solvente disuelve los polímeros termoplásticos, cada uno de ellos con una reacción distintiva.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sin reacción: otros. • Pegajoso: HIPS y PS. 	<ul style="list-style-type: none"> • El limoneno es un compuesto no tan disponible en el mercado. Puede reemplazarse por xilol. • Requiere un nivel mínimo de experticia por parte del operario identificar las reacciones. • Algunas reacciones pueden ser poco claras.
Flexibilidad	<p>Se somete el material a tensión mecánica. Su flexibilidad es indicativa.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se dobla dejando marca blanca: HIPS. • Se rompe: PS y PC. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser difícil de observar en piezas muy pequeñas o grandes. • Puede generar riesgos al operario, como cortes.
Dureza	<p>Se somete el material a rayado. Su dureza es indicativa.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se raya: PE. • No se raya: PP. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ser difícil de observar en piezas muy pequeñas. • Depende del material usado para rayar el polímero.
Densidad (Flota/se hunde)	<p>Se prepara una solución de 150 g de sal en un litro de agua logrando una densidad de 1,1 kg/L. Los plásticos sin cargas suelen ser menos densos y flotan mientras aquellos con cargas, como BFR, se hunden.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flota: plástico sin FR. • Se hunde: plástico con FR. 	<ul style="list-style-type: none"> • Funciona mejor con plástico homogéneo y molido, libre de piezas metálicas. • Requiere contenedores y gasta una cantidad considerable de agua y sal por cada kilogramo de plástico a probar.
Test de llama	<p>Se somete el material a una llama para evidenciar la presencia de retardantes de llama.</p> <ul style="list-style-type: none"> • No se inflama: contiene retardantes. • Se inflama: no contiene retardantes. <p>Se puede complementar al incluir un filamento de cobre. El cambio en la coloración de la llama a verde es indicativo de BFR (prueba de Beilstein).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • No se recomienda esta prueba. Somete a riesgos físicos y químicos al operario. • Depende de la llama, su intensidad y el tiempo de exposición. • Es propensa a reportar falsos positivos o negativos en un ambiente no controlado, como una planta, lo que reduce su confiabilidad.

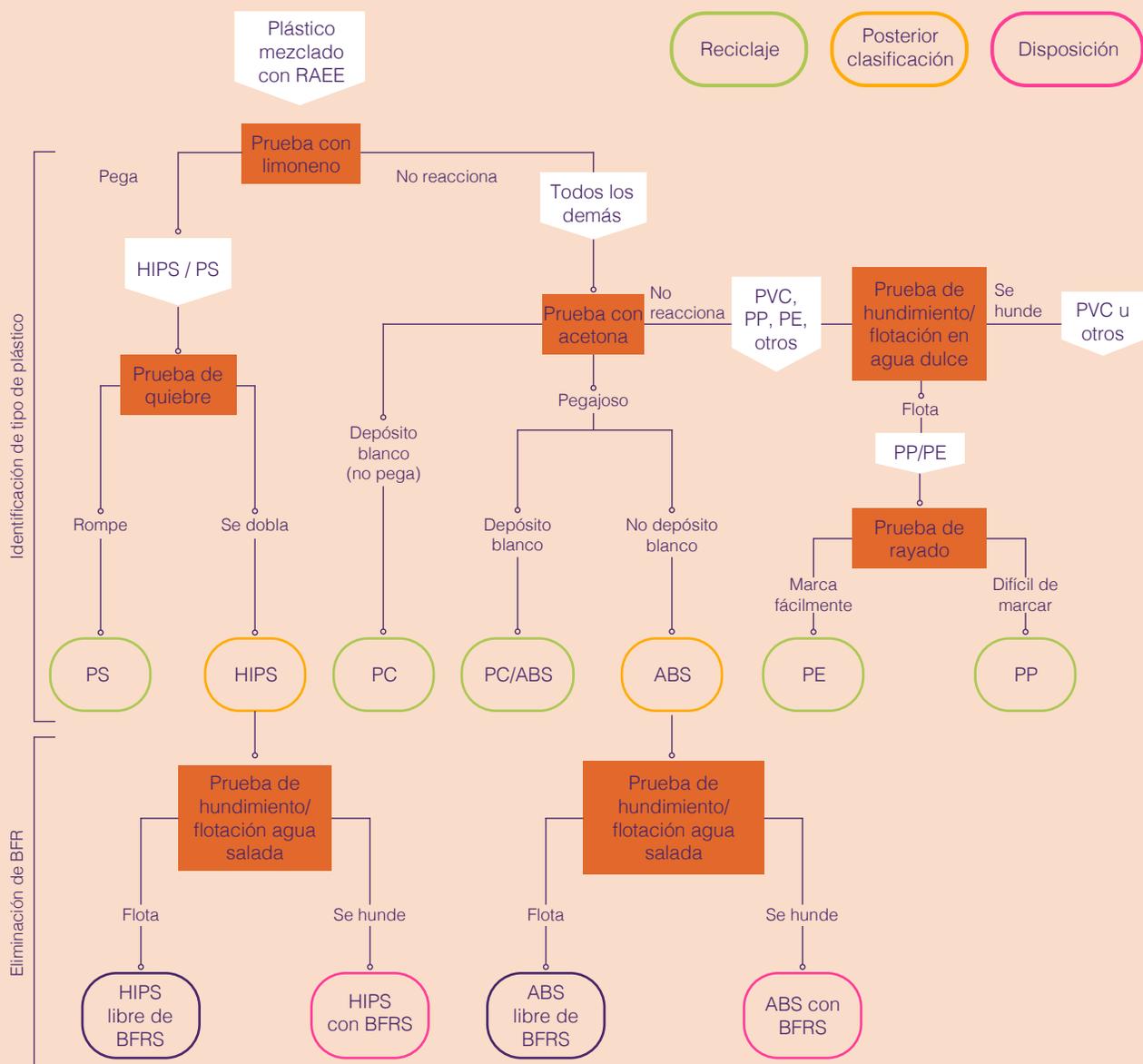
La prueba de densidad se incluye en este momento porque es una técnica adecuada para la separación de plásticos por tipo y para la determinación cualitativa del contenido de retardantes de llama. Así, a pesar de ser del mismo material, un ABS sin retardantes de llama es de un tipo diferente que un ABS con retardantes de llama. Esto también surge de las exigencias técnicas en posteriores etapas del reciclaje, ya que es indispensable tener en cuenta las cargas del material para una correcta formulación. Así mismo, se sabe que el reciclaje

de plástico sin cargas suele ser mucho más sencillo y eficiente que el de plástico cargado.

2.2.3 Análisis sistemático de materiales plásticos

La aplicación ordenada de las pruebas fisicoquímicas descritas antes permite dilucidar el tipo de un material plástico; en especial, si este no es identificable a simple vista en una pieza completa o si forma parte de un conjunto de piezas mezcladas.

Gráfica 10. Aplicación ordenada de pruebas fisicoquímicas para identificación de tipos de plásticos

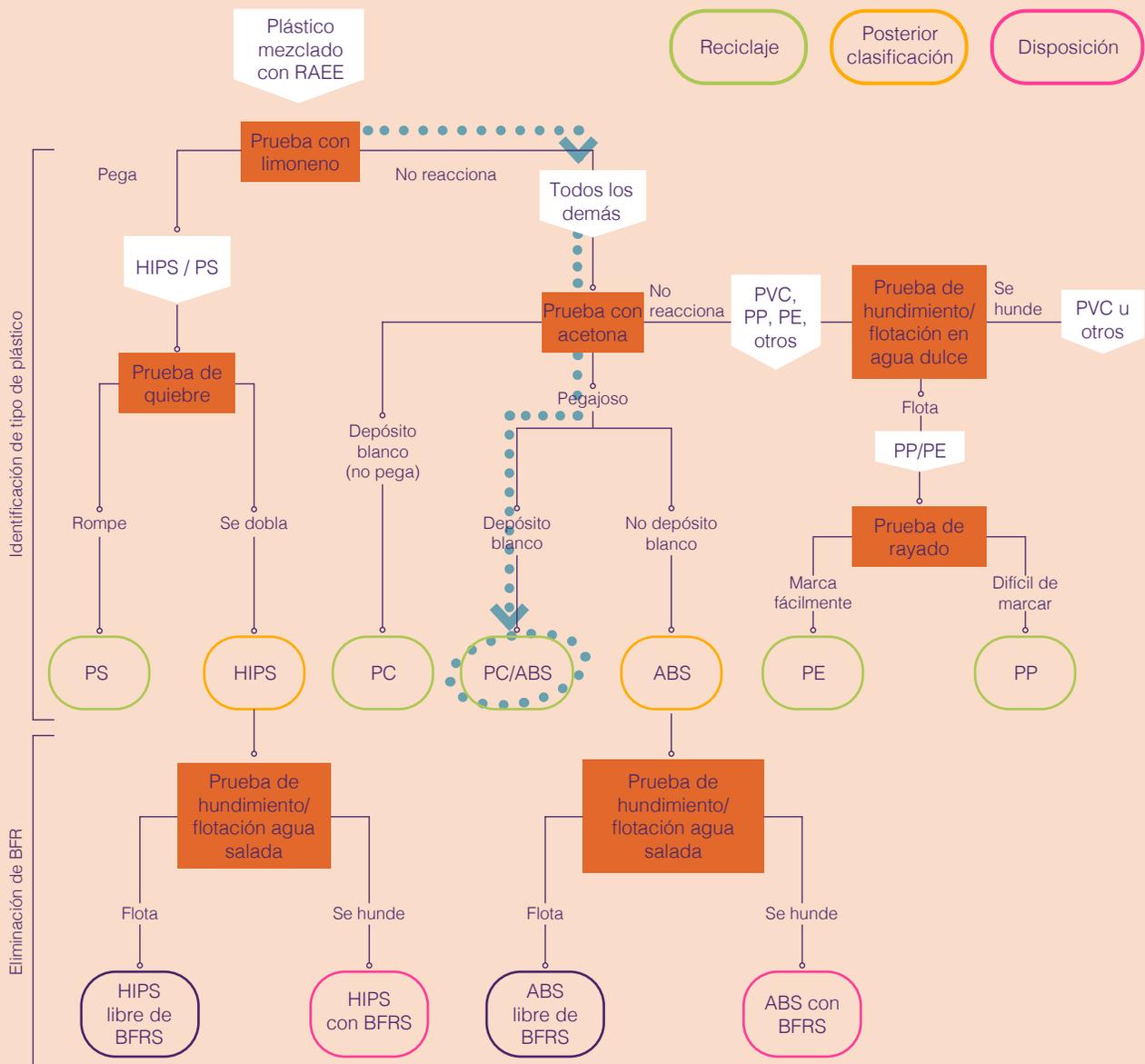


Entendámoslo mejor a través de ejemplos:

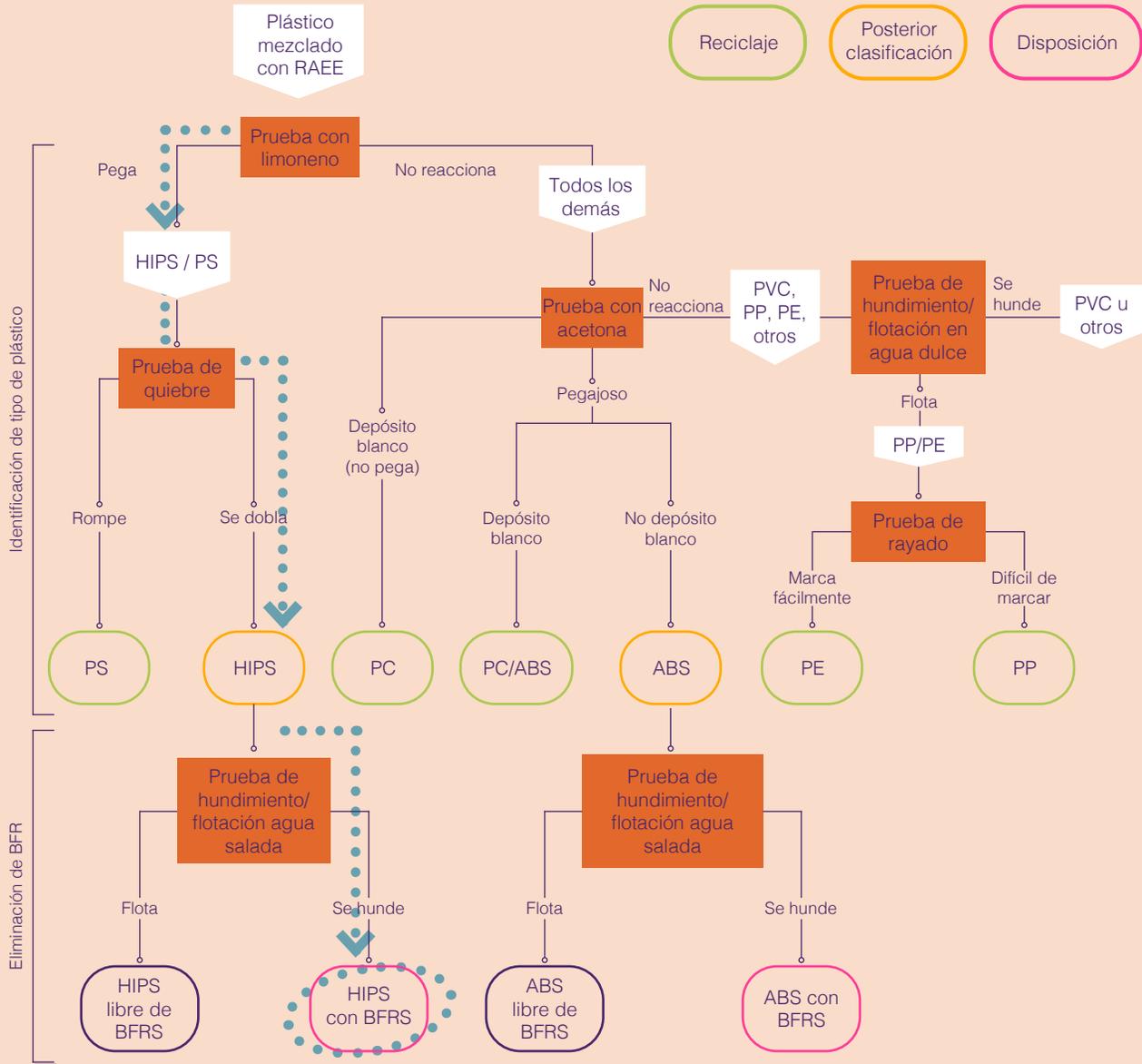
Ejemplo #1. Se tiene una pieza de plástico sin ningún tipo de marcación. La pieza no reaccionó con el limoneno, pero al agregarle acetona produjo un depósito blanco y pegajoso. Por ende, es muy probable que la pieza sea de PC+ABS.

Ejemplo #2. Se tiene una pieza de plástico sin ningún tipo de marcación. La pieza se puso pegajosa al contacto con el limoneno. Además, se dobló, pero no se quebró al forzarla mecánicamente. Luego, al ponerla en agua salada, se hundió. Por ende, es muy probable que la pieza sea de HIPS con una carga importante de retardantes de llama.

Gráfica 11. Aplicación ordenada de pruebas fisicoquímicas para PC+ABS (ejemplo #1)



Gráfica 12. Aplicación ordenada de pruebas fisicoquímicas para HIPS con BFRS (ejemplo #2)



El Instituto de Capacitación e Investigación en Plástico y Caucho (ICIPC), con el apoyo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, desarrolló una aplicación para dispositivos móviles que a través de los resultados de pruebas fisicoquímicas simples permite determinar, con una probabilidad conocida, el tipo de plástico al que corresponde un material. Es decir, la aplicación automatiza y amplía el diagrama de flujo estudiado antes.



Esta aplicación está disponible para uso gratuito en el enlace:

https://play.google.com/store/apps/details?id=org.icipc.polyguess&hl=es_419&gl=US

Adicionalmente, en esta aplicación se encuentra como material de apoyo un documento titulado *Directrices técnicas para el manejo de materiales plásticos recuperados de RAEE y vehículos desintegrados* que puede servir de apoyo al usuario de la aplicación.



El documento puede descargarse en el enlace: <https://economiecircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/directrices-tecnicas-para-el-manejo-de-materiales-plasticos-recuperados-de-raee-opt.pdf>.



2.2.4 Actividad 2. Análisis de materiales plásticos

Asigne a las siguientes frases un número del 1 al 6 de manera que el proceso siga un orden lógico de acuerdo a un análisis sistemático de materiales plásticos.

.....

Al sumergir el plástico en agua salada, este flota.

.....

El plástico es negro, liso y opaco. No se evidencia ningún tipo de marcación.

.....

El resultado de la prueba anterior fue negativo así que se aplica acetona. El plástico parece derretirse y ponerse pegajoso, y su color sigue siendo negro.

.....

Además del tipo de plástico, ahora se sabe que es poco probable que este tenga retardantes de llama.

.....

Es posible concluir que el plástico es ABS de color negro.

.....

Se aplica limoneno. Ahora el plástico se ve brillante y tiene un aroma cítrico. Su textura sigue siendo lisa.

2.3 Técnicas de separación de plásticos

Competencias a desarrollar:

- Planear el uso de alternativas para la separación de plásticos aplicadas en la gestión de RAEE.



El adecuado aprovechamiento de materiales plásticos requiere su correcta separación, ya que en los RAEE se encuentra una gran variedad de materiales —como metales, cristales, tarjetas electrónicas, plásticos, entre otros— y, como se vio antes, varios tipos de plástico —por lo general, ABS, PC, HIPS, PP y POM—.

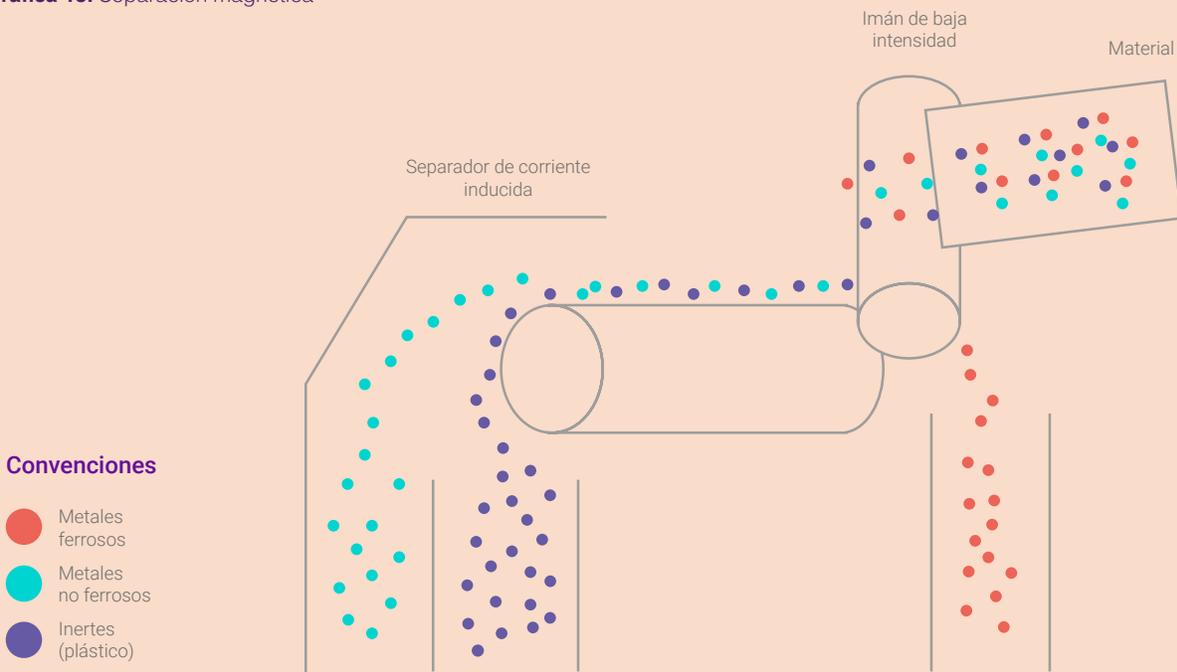
2.3.1 Separación de materiales

Estas técnicas permiten separar los distintos tipos de materiales que se encuentran en RAEE; los cuales, por lo general, son metales ferrosos, como hierro y sus aleaciones; metales

no ferrosos, como cobre, níquel, aluminio, zinc, entre otros; y plástico.

Por una parte, la separación de metales ferrosos se realiza usando separadores magnéticos que se ubican en bandas transportadoras. Así, los metales ferrosos se unen a los imanes mientras los demás materiales prosiguen un rumbo distinto y se logra la separación. Por otra parte, la separación de metales no ferrosos requiere la inclusión de un separador por corriente inducida que atrae, por lo general, los materiales que pueden ser conductores. Así, los materiales no conductores, como el plástico, no son atraídos.

Gráfica 13. Separación magnética



2.3.2 Separación de tipos de plástico

Estas técnicas permiten separar los plásticos mezclados de acuerdo a su tipo. Cada técnica de separación suele tener un fin específico, así como ventajas y desventajas. Es importante separar el plástico por tipos por dos razones fundamentales:

primero, la compatibilidad entre polímeros es limitada o nula en procesos de reciclaje (ver gráfica 14); segundo, es indispensable separar el plástico que debe eliminarse debido a su contenido de COP, como algunos BFR.

Gráfica 14. Matriz de compatibilidad de plásticos

		Contaminante																
		ABS	EP	HIPS	PA	PBT	PC	PE	PET	PMMA	POM	PP	PS	PUR	PVC	SAN	PC+ABS	PC+PBT
Plástico principal	ABS	G	O	Y	R	O	G	R	O	O	O	R	R	Y	Y	R	G	Y
	EP	Y	G	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	HIPS	Y	Y	G	R	R	R	R	R	R	R	R	O	R	R	R	R	R
	PA	R	R	O	G	O	R	R	O	R	R	R	O	O	R	R	R	R
	PBT	O	R	R	O	G	G	R	R	R	R	R	R	O	R	R	O	G
	PC	G	O	O	R	G	G	R	G	G	R	R	R	O	O	G	G	G
	PE	R	R	R	R	R	R	G	R	R	R	G	R	R	R	R	R	R
	PET	O	R	O	O	R	G	R	G	R	R	R	O	O	R	R	O	R
	PMMA	O	R	O	R	R	G	R	Y	G	O	R	O	O	G	G	G	R
	POM	R	R	R	R	O	R	R	R	R	G	R	R	R	R	R	R	R
	PP	R	R	R	R	R	R	O	R	R	R	G	R	R	R	R	R	R
	PS(HI)	R	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R	G	R	R	R	R	R
	PUR	Y	R	O	Y	O	O	O	O	O	O	O	O	G	Y	O	O	O
	PVC	Y	R	R	R	R	R	R	R	G	R	R	R	O	G	G	O	R
	SAN	G	O	R	R	R	G	R	R	G	R	R	R	Y	G	G	G	O
	PC+ABS	G	O	G	R	G	G	R	Y	G	R	R	G	Y	O	G	G	G
	PC+PBT	G	O	R	O	G	G	R	Y	R	R	R	R	O	R	G	G	G

G	Buena compatibilidad: las propiedades se mantienen aun con contaminación mayor al 5 %.
Y	Compatibilidad razonable: las propiedades se mantienen solo si la contaminación es menor al 5 %.
O	Compatibilidad limitada: las propiedades se mantienen solo si la contaminación es menor al 2 %.
R	Incompatibilidad: las propiedades se pierden aun con contaminaciones del 1 %.

Separación manual

El personal entrenado puede clasificar las piezas plásticas por tipo de forma manual durante el proceso de desensamble de aparatos siguiendo, por ejemplo, el análisis sistemático visto en el tema anterior. Aplicada adecuadamente esta es una técnica muy eficiente, pues permite discriminar desde el principio los materiales de interés por tipos específicos y es equivalente a la separación en la fuente para otros residuos. Además, es una técnica indispensable si se desea realizar un adecuado aprovechamiento de plásticos, ya que las demás técnicas parten de materiales previamente seleccionados o no pueden dilucidar tipos de plásticos de una mezcla compleja con facilidad. La separación manual requiere seguimiento intensivo y capacitación continua, limitada por la cantidad de operarios y su capacidad de trabajo.

Por otra parte, la separación de plásticos con retardantes de llama se logra al establecer poblaciones, listados u otras herramientas que permitan, en primera instancia, clasificar un plástico como retardado a la llama. En todo caso, esta separación es presuntiva y debe estar apoyada en análisis posteriores o datos históricos. Para este fin, el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible desarrolló la aplicación SmartRAEE, la cual será discutida en el siguiente capítulo.

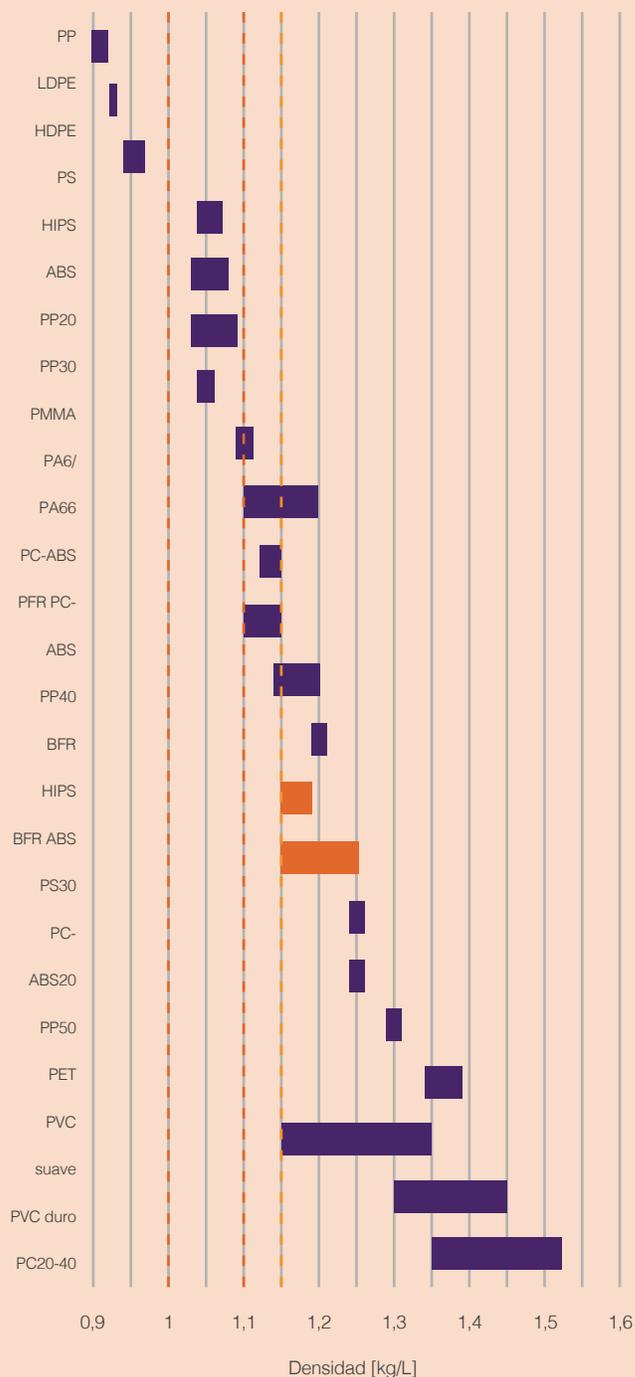
Gráfica 15. Línea de desensamble del gestor de RAEE



Separación por densidad

Ya sea de forma manual o con ayuda de equipos, la densidad se puede usar como criterio para separar tipos de plásticos, ya que cada uno tiene una gravedad específica particular. La gráfica siguiente muestra un resumen de algunos de estos valores.

Gráfica 16. Rangos de densidad en plásticos en RAEE



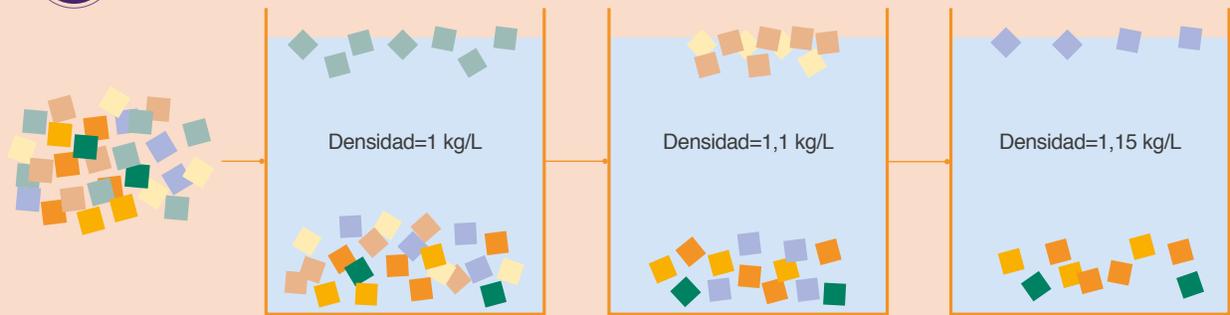
Por lo general, los puntos de corte 1 kg/L, 1,1 kg/L y 1,15 kg/L se consideran de mayor utilidad para la industria, ya que separan plásticos fácilmente aprovechables de aquellos cargados o difíciles de aprovechar. Así, también se logra la separación

del material que pudiera contener BFR. Para lograr la separación, las piezas plásticas se sumergen en soluciones salinas elaboradas a la densidad deseada; las piezas de menor densidad flotarán mientras las de mayor densidad se hundirán.

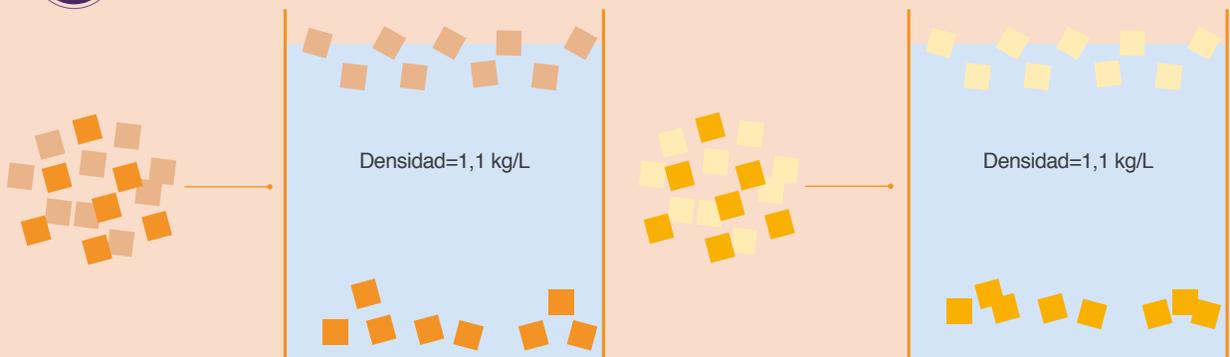
Gráfica 17. Diagrama de separación por densidad



1



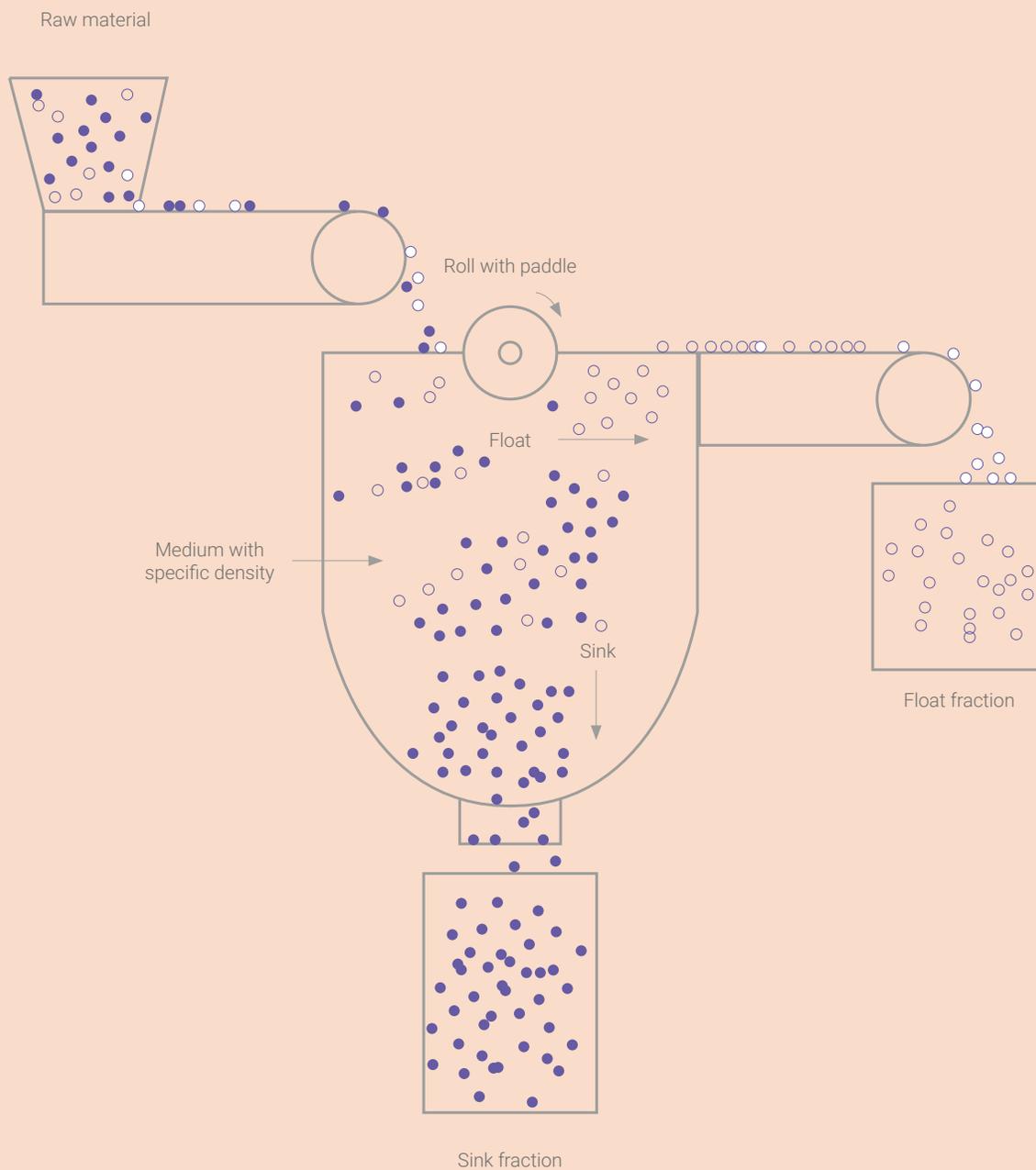
2



Además de las consideraciones mencionadas antes, la adecuada preparación de la solución es clave para lograr la separación deseada. La separación por densidad está limitada por la capacidad del equipo y la solución preparada; además, puede verse muy afectada

por las cargas de los plásticos e incluso por la presencia de otros materiales, como metales cuya densidad es considerablemente mayor. La separación de material con BFR también es presuntiva y debe estar apoyada en análisis posteriores o datos históricos.

Gráfica 18. Diagrama de separación por densidad a escala industrial

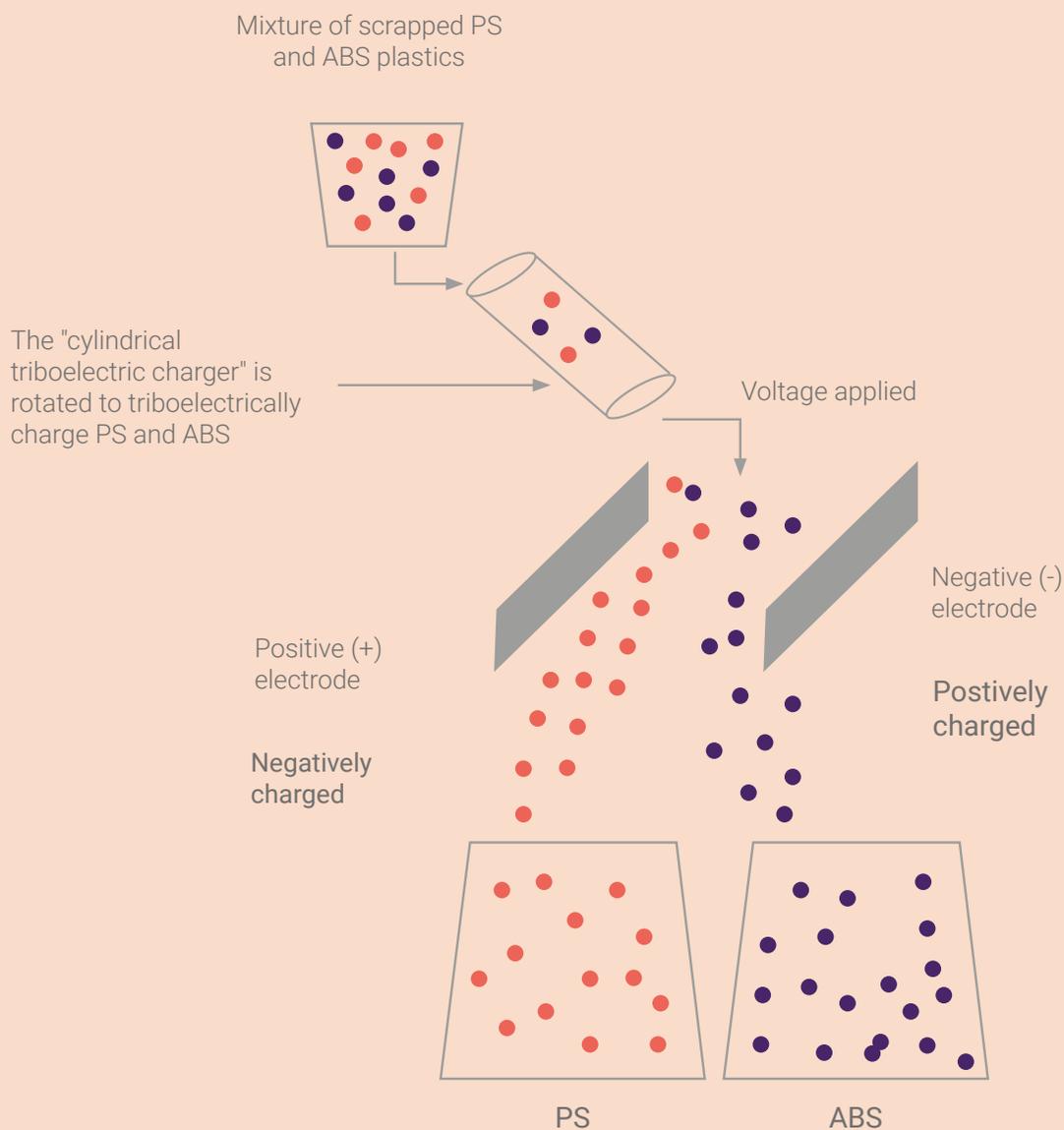


Separación electrostática

La frotación de materiales entre sí genera intercambio de electrones y cargas en los mismos dependiendo del par que interactúe. De esta forma, siguiendo un proceso ordenado, se puede separar una mezcla de material triturado. Este es un proceso de alta eficiencia y capacidad; no obstante, requiere de un equipo

especializado y se da mejor solo entre material previamente clasificado y de tamaño de partícula similar. Para separar mezclas complejas se requerirían corridas sucesivas. Es imposible determinar el contenido de retardantes de llama con esta técnica, por lo cual es indispensable el uso de una técnica adicional para tal fin.

Gráfica 19. Diagrama de separación electrostática

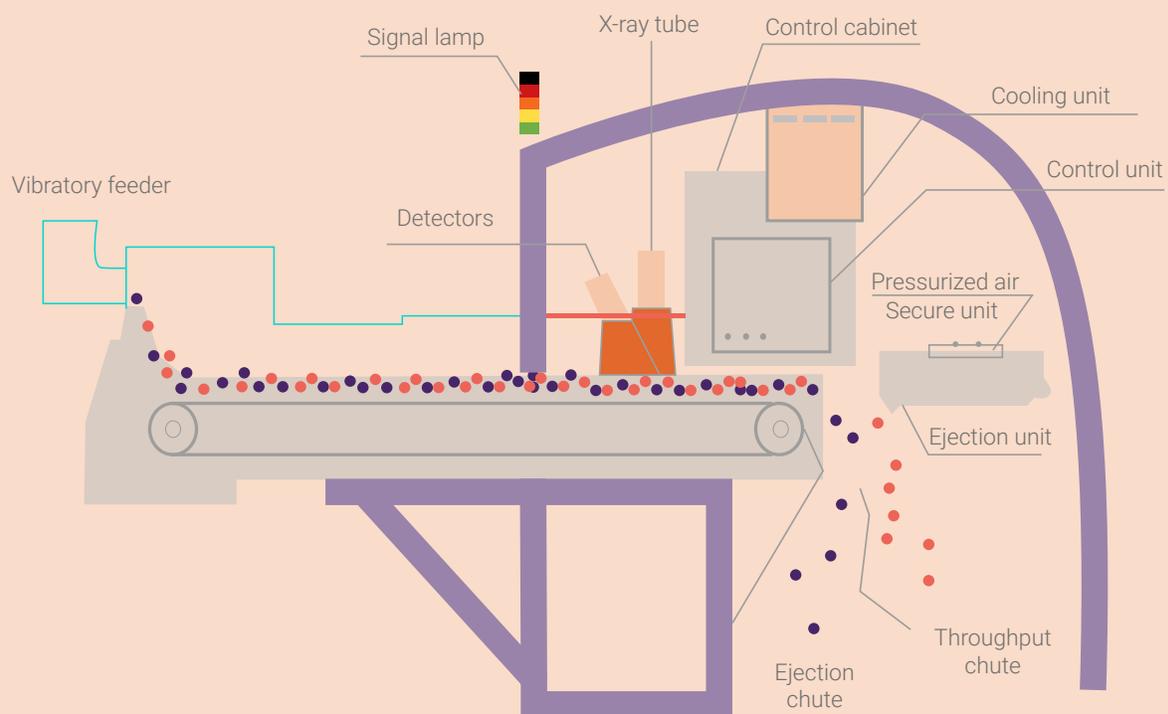


Separación espectroscópica

Al hacer interactuar plásticos con diferentes tipos de luz es posible discernir o seleccionar una cualidad específica que se desea. Así, la luz infrarroja permite comparar el espectro obtenido con bases de datos para determinar el tipo de polímero específico de un material, es decir identifica el tipo de plástico —ABS, PS, PC, entre otros—; la luz visible permite separar de manera

automática el plástico por color, lo cual resulta útil para facilitar los procesos de aprovechamiento y reciclaje —rojo, azul, negro, entre otros—; y los rayos X (XRF) determinan y cuantifican elementos específicos en los plásticos indicando la posible presencia de sustancias de acuerdo con su composición elemental —bromo para BRF, cloro para PVC, entre otros—.

Gráfica 20. Diagrama de separación por XRF a escala industrial



Al igual que la separación electrostática, estas técnicas solo separan la corriente de material en dos categorías, por lo que clasificaciones más rigurosas requieren separaciones sucesivas. Así mismo, es indispensable un equipo especializado y material triturado relativamente homogéneo. Por otra parte, dependiendo de la luz utilizada es posible estimar el contenido de BFR, más no su identidad química. Si el material de entrada es plástico mezclado, el aprovechamiento de las corrientes resultantes es complejo. Por ello, se requiere una separación previa o posterior del plástico por tipo.

2.3.3 Separación sistemática de materiales plásticos

La aplicación de una o más de las técnicas de separación anteriores puede lograr la separación de mezclas complejas de plásticos; en especial, si esta no se ha realizado en la fuente.

Por ejemplo, en una empresa hay 5 toneladas de plástico triturado cuya procedencia se desconoce porque son el resultado de moliendas sucesivas de material sin un control adecuado al proceso. A pesar de ello, se sospecha que el plástico puede ser valioso y, dada su cantidad, el esfuerzo por separarlo podría verse recompensado con un buen negocio. Por ello, se toman las siguientes decisiones:

1

Se pueden observar filamentos de cobre y otros materiales brillantes a simple vista, así que se comienza con una separación de metales ferrosos y no ferrosos; al parecer, un poco del material provenía de cables molidos.

2

Una vez separado el cobre se aplica la técnica de separación por densidad usando agua, 1 kg/L; parece que una pequeña fracción de plástico era PP, ya que está flotando en el agua. El PP suele representar el 2 % del plástico en RAEE; puesto que es incompatible con los demás plásticos, separarlo resulta fundamental para aprovechar el material.

3

Si se aplica de nuevo la técnica de separación por densidad usando solución salina a 1,1 kg/L se hunde aproximadamente el 20 % del plástico. Esta es la fracción usual de plástico en RAEE con altas cargas, incluidos los retardantes de llama que pueden estar prohibidos por el Convenio de Estocolmo sobre COP. Es necesario darle a esa tonelada un tratamiento diferenciado y evitar reciclarla, pues puede poner en riesgo la salud del personal, el medio ambiente y el futuro del negocio.

4

Lo más probable es que, al provenir de RAEE, los plásticos que flotaron sean ABS, PC y HIPS libres de BFR. Como el HIPS también representa el 2 % del plástico en RAEE y su compatibilidad con ABS y PC es limitada, podría utilizarse en un proceso de reciclaje sin que se tema a perder propiedades, aunque es mejor separarlo de antemano para darle más valor al plástico.

5

Ahora la pregunta es, ¿a quién podrían interesarle 4 toneladas de plástico listo para reciclaje y aprovechamiento? Si aún no tiene una respuesta puede que la encuentre más adelante.



2.3.4 Actividad 3. Separación de materiales en residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Asigne a las siguientes frases un número del 1 al 6 de manera que el proceso siga un orden lógico de acuerdo a un análisis sistemático de materiales plásticos.

.....

Se sumerge el plástico obtenido en agua salada (1,1 kg/L).

.....

Cada fracción de material que se obtiene de RAEE se ubica en un lugar diferente.

.....

Se desensambla el lote de RAEE del que se quieren aprovechar los plásticos.

.....

Se prepara el plástico que flotó para su posterior aprovechamiento.

.....

Se llevan las fracciones plásticas obtenidas a molienda.

.....

Se separan los pequeños materiales ferrosos y no ferrosos del plástico.

2.4 Identificación y cuantificación de retardantes de llama bromados en plásticos

Retomando lo visto en el capítulo anterior, Colombia ratificó, a través de la Ley 1196 de 2008, su obligación de cumplir lo pactado en el Convenio de Estocolmo sobre COP, el cual establece en su artículo 6 que las partes deben adoptar medidas adecuadas de gestión de las sustancias, los artículos o los desechos que contengan sustancias consideradas como COP. Los RAEE con BFR clasificados como COP, como el PBDE, se encuentran inscritos en esta disposición. Por ello es indispensable identificar y cuantificar el contenido de BFR en plásticos; por ejemplo, en aquellos provenientes de RAEE o de desintegración vehicular, entre otros.



Vocabulario clave

- **Identificar:** establecer una propiedad de manera cualitativa. Esta puede ser, por ejemplo, la presencia de una sustancia o su estructura molecular. Ejemplos: material plástico o metálico, material libre o contaminado.
- **Cuantificar:** establecer la magnitud de una propiedad. Ejemplo: el plástico contiene 1.000 mg/kg de retardantes de llama.

Competencias a desarrollar:

- Comprender las técnicas cualitativas y cuantitativas para la identificación y cuantificación de BFR clasificados como COP.

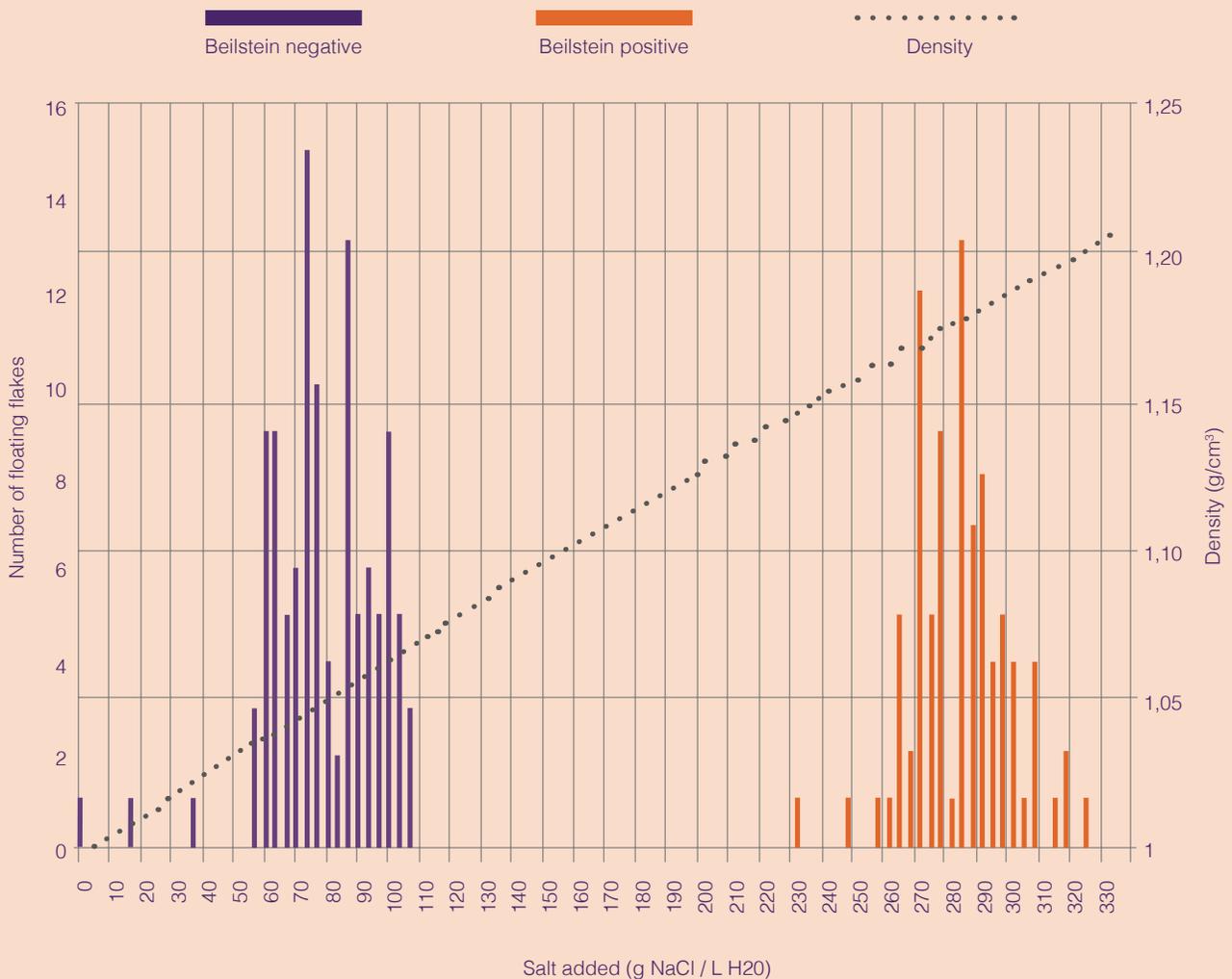


- **Análisis presuntivo:** corresponde a una identificación o cuantificación inicial o circunstancial sin que pueda darse sobre ella un grado de confianza.
- **Análisis confirmatorio:** corresponde a una identificación o cuantificación sobre la que puede darse un grado de confianza basado en materiales de referencia y análisis estadísticos.

2.4.1 Prueba de densidad

Ampliamente discutida en secciones anteriores, la prueba de densidad realizada a 1,1 kg/L permite identificar el plástico considerablemente cargado, lo que incluye cargas con retardantes de llama. A esta densidad, el plástico que suele hundirse presenta cargas iguales o superiores al 10 %; si estas están asociadas con retardantes de llama, pueden significar una cantidad importante de contaminantes circulando en el material plástico. El cruce de información con pruebas de Beilstein desarrolladas en laboratorio apoya esta idea.

Gráfica 21. Segregación de muestras por densidad y prueba Belstein

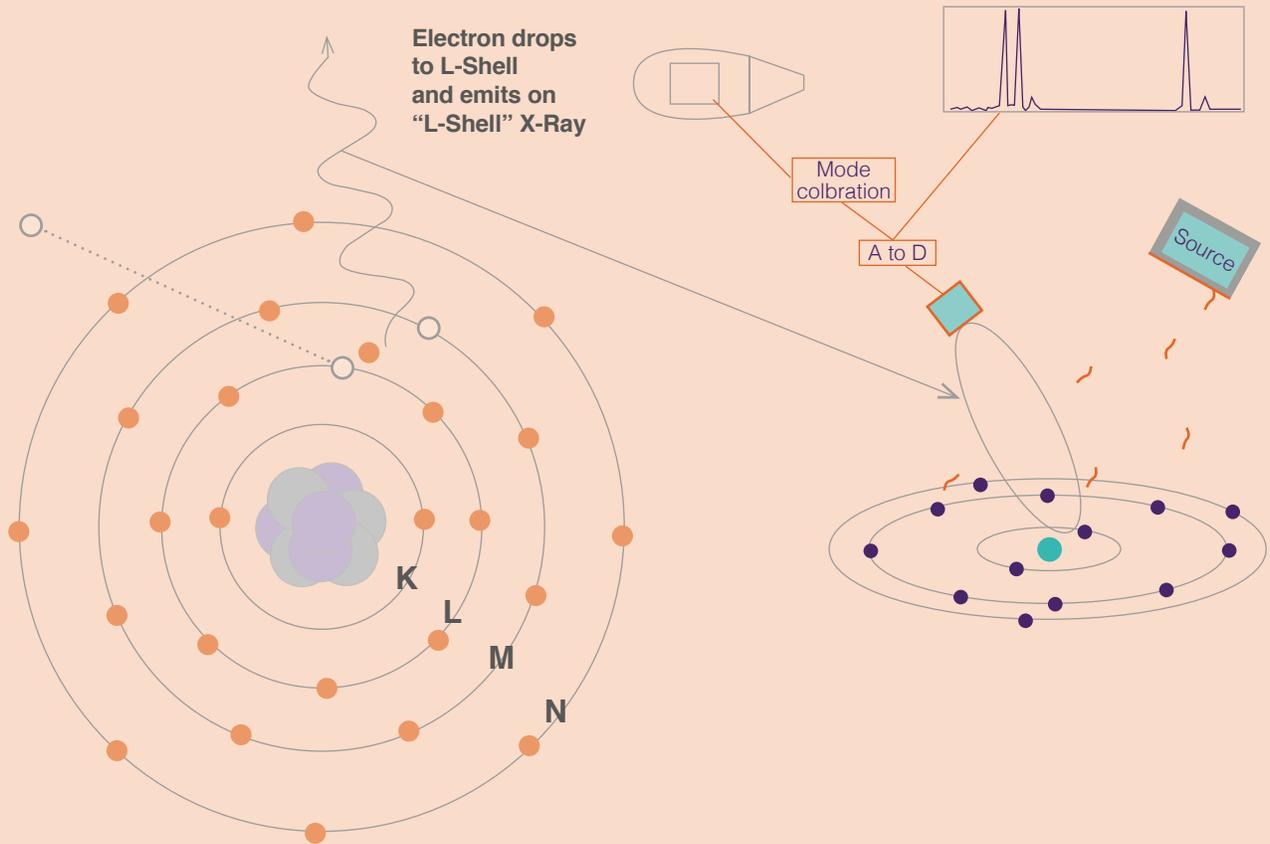


Esta prueba solo permite identificar el plástico sospechoso de contener retardantes de llama en altas concentraciones; sin embargo, plástico con concentraciones entre el 1 % y el 10 % no suelen separarse por esta técnica de manera eficaz. Además, la prueba es de carácter presuntivo, pues el hecho de que un plástico se hunda no implica de inmediato la presencia de retardantes de llama. Así mismo, la presencia de retardantes de llama no es prueba contundente de que estos sean COP, ya que hay muchos retardantes de llama inorgánicos, orgánicos y bromados que también se usan en plástico. A pesar de ser una prueba cualitativa se estima que su confiabilidad es del 70 %.

2.4.2 Fluorescencia de rayos X

La fluorescencia es el fenómeno por el cual un material emite luz después de haberla absorbido. La energía de la luz emitida es específica para cada elemento, por lo que es posible identificar la composición utilizando luz que excite sin destruir los átomos, como los rayos X. De esta forma es posible ajustar un equipo para la medición específica del elemento bromo. Su presencia en un plástico es una pista bastante contundente de la presencia de BFR. Sin embargo, esta no es una técnica confirmatoria, pues la presencia de bromo no es prueba inequívoca de BFR clasificados como COP.

Gráfica 22. Esquema de análisis por XRF



El método internacional estándar para este ensayo es el ASTM F2617-15: Standard Test Method for Identification and Quantification of Chromium, Bromine, Cadmium, Mercury, and Lead in Polymeric Material Using Energy Dispersive X-ray Spectrometry. Esta tecnología puede ser tanto de mesa como portátil y permite identificar y realizar análisis cuantitativo de bromo, cadmio, mercurio, plomo y otros elementos presentes en plásticos. El rango de trabajo de un equipo de XRF portátil suele comenzar en 0,001 % con una sensibilidad equivalente, lo que permite distinguir plásticos bromados de una manera más eficiente y establecer límites de decisión; por ejemplo, rechazar plásticos con más del 1 % de bromo. Esto se discutirá en el siguiente capítulo.

Gráfica 23. Medición con equipo de XRF portátil en RAEE



Además de los gastos asociados al equipo especializado, este método requiere personal entrenado específicamente para las tareas de preparación de muestra, análisis e interpretación de los resultados obtenidos; no obstante, la gran cantidad de información que ofrece y su alta confiabilidad —alrededor del 99 %— permite tomar decisiones informadas que, a su vez, pueden resultar en una considerable optimización de recursos a largo plazo.

2.4.3 Cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas

La cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) es la unión a escala de laboratorio de dos técnicas: la cromatografía para separar moléculas y la espectrometría de masas para identificarlas y cuantificarlas.

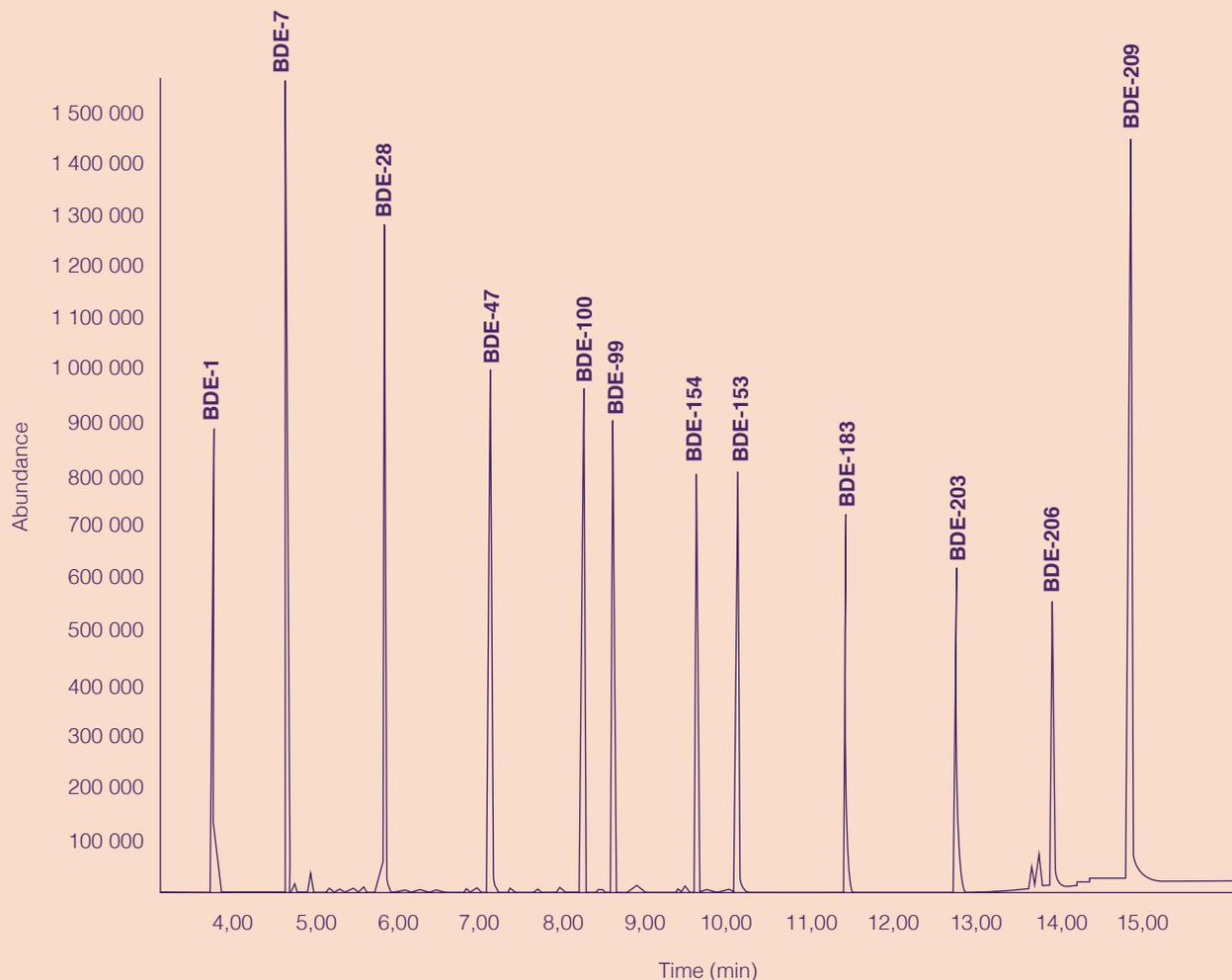
Gráfica 24. Laboratorio de ensayo de cromatografía, Laboratorio CROM-MASS de la Universidad Industrial de Santander



El método internacional estándar a la fecha para el análisis de BFR en matrices poliméricas es el IEC 62321-6. Utilizando este método se pueden identificar y cuantificar tanto bifenilos polibromados como PBDE, ya sea como moléculas o como perfiles de sus mezclas comerciales: pentaBDE, octaBDE y decaBDE. El acoplamiento de técnicas instrumentales de separación, identificación y cuantificación, como GC-MS, es quizás el único método para confirmar qué tipo de sustancias se encuentran en los plásticos y en qué cantidad.

El principio del método es simple: las sustancias se extraen del plástico, se separan en una columna de sílice, se identifican por la relación entre su masa y la carga que pueden recibir, y se cuantifican con la corriente que produce su carga en un detector. De esta forma se obtiene un espectro, como el de la gráfica a continuación, en el que cada señal corresponde a una sustancia específica. Mientras mayor sea la señal, mayor es el contenido de la sustancia en los plásticos. Las señales obtenidas se pueden comparar con materiales de referencia para comprobar su identidad y, así mismo, calcular la cantidad de sustancia presente en el plástico.

Gráfica 25. Cromatograma de BFR-PBDE



Los análisis por esta técnica son considerablemente costosos pues se requieren equipos, insumos, personal e infraestructura especializada, así como un proceso de preparación de la muestra bastante riguroso, punto clave para un resultado certero. Por este motivo, el cuarteo, la selección y la

homogenización de los plásticos es crucial; de varias toneladas de piezas con tamaños de centímetros a metros, que suelen trabajarse al nivel de la planta, menos de 100 mg de piezas de medio milímetro —es decir, menos de la millonésima parte de una tonelada— se utilizan durante el análisis.



2.5 Evaluación del capítulo

1

Los siguientes son polímeros termoplásticos y, por ende, reciclables:

a. PC, PET y PTFE.

b. HIPS, baquelita y silicona.

c. ABS, PC y PP.

d. Poliéster, poliúrea y resinas epóxicas.

2

Se quiere utilizar PP para una aplicación de alto valor agregado en las aspas de una turbina; para esto, es importante que el material tenga:

a. Baja resistencia química.

b. Alta fricción.

c. Alta resistencia mecánica.

d. Carácter decorativo y funcional.

3

El documento *Procesamiento de plásticos de RAEE: manual práctico (2019)* muestra que los televisores CRT tienen un gran porcentaje de HIPS, mientras que los monitores CRT tienen mayor proporción de ABS; esto significa que:

a. En RAEE pueden encontrarse tanto HIPS como ABS.

b. Cada tipo de RAEE tiene una composición distintiva.

c. Es imposible obtener PC a partir de RAEE.

d. Los datos son incongruentes pues la tecnología CRT es la misma.

4

En una pieza plástica se ve la etiqueta “PS-HI-DD5-P(ELO)-FR(19)”; esta significa que:

a. La pieza está hecha de HIPS y tiene como retardantes de llama PBDE y sustancias de antimonio.

b. La pieza está hecha de HI y tiene BFR clasificados como COP al 19 %.

c. La pieza está hecha de PS y tiene como retardante de llama hidrato de alúmina en polvo.

d. La pieza está hecha de HIPS y tiene como retardantes de llama el PDDE al 5 % y el BFR al 19 %.

5

Una pieza plástica que se vuelve pegajosa al contacto con el limoneno y se rompe como respuesta al estrés mecánico probablemente está hecha con:

a. PE.

b. PC.

c. ABS.

d. PS.

6

Una pieza plástica que no reacciona con limoneno ni acetona, que flota en agua a 1 kg/L y cuya dureza es muy baja probablemente está hecha con:

a. PE.

b. PC.

c. ABS.

d. PS.

7

Se desea aprovechar tres toneladas (3.000 kg) de ABS por las que ofrecen un muy buen precio. Si en estas toneladas hubiera por error 50 kg de HIPS que no se separaron correctamente, entonces:

a. Las tres toneladas deberán coprocesarse porque se encuentran contaminadas.

b. El ABS es incompatible con el HIPS y, por ende, el material no podrá aprovecharse con alto valor agregado.

c. Será necesario limpiar primero las toneladas usando separación por densidad.

d. Podrá aprovecharse la oferta de igual manera y se favorecerá la economía circular.

8

Se desea aprovechar tres toneladas (3.000 kg) de ABS por las que ofrecen un muy buen precio. Si en estas toneladas hubiera por error 50 kg de PC que no se separaron correctamente, entonces:

a. Las tres toneladas deberán coprocesarse porque se encuentran contaminadas.

b. El ABS es incompatible con el PC y, por ende, el material no podrá aprovecharse con alto valor agregado.

c. Será necesario limpiar primero las toneladas usando separación por densidad.

d. Podrá aprovecharse la oferta de igual manera y se favorecerá la economía circular.

9

Se desea aprovechar tres toneladas (3.000 kg) de ABS por las que ofrecen un muy buen precio. Si en estas toneladas hubiera por error 50 kg de materiales contaminados con PBDE, entonces:

a. Las tres toneladas deberán coprocesarse porque se encuentran contaminadas.

b. El ABS es incompatible con el PBDE y, por ende, el material no podrá aprovecharse con alto valor agregado.

c. Será necesario limpiar primero las toneladas usando separación por densidad.

d. Podrá aprovecharse la oferta de igual manera y se favorecerá la economía circular.

10

Sobre la prueba de densidad usada como técnica para identificar y cuantificar BFR puede decirse que:

a. Permite cuantificar el contenido de retardantes de llama hasta en un 10 %.

b. Solo es indicativa del plástico con mayores cargas y no se puede usar para cuantificar.

c. No se recomienda su uso, pues expone a los operarios a riesgos químicos y mecánicos.

d. Ayuda a establecer la identidad de los retardantes de llama presentes en los plásticos.

11

Sobre la prueba de XRF usada como técnica para identificar y cuantificar BFR puede decirse que:

a. Cuantifica bromo elemental en un amplio rango, pero no confirma la presencia de COP.

b. Es muy peligrosa porque utiliza radiación ionizante y de alta energía.

c. Requiere un arduo entrenamiento, equipos e infraestructura especializada para su implementación.

d. Es garante de la presencia de retardantes de llama si el plástico tiene más del 1 % de bromo.

12

Sobre la prueba de GC-MS usada como técnica para identificar y cuantificar BFR puede decirse que:

a. Es una técnica económica y fácil de aplicar en planta por personal técnico capacitado.

b. Solo permite diferenciar entre plásticos con BFR y plásticos sin BFR.

c. Permite la detección de contaminantes al extraer, separar y cargar el plástico.

d. Confirma la identidad y cantidad de retardantes de llama en una muestra.

2.6 Bibliografía

- Bill, A., Gasser, M., Haarman, A., y Böni, H. (2019). *Procesamiento de plásticos de RAEE: manual práctico*. SRI, Step, Swiss Confederation, EMPA y World Resources Forum. https://www.step-initiative.org/files/_documents/other_publications/Manual%20Plásticos%20RAEE%20Español-min.pdf.
- Caballero, S., Arley, S., Abella, P., Rodríguez, J. A., y Edward, G. (2015). *Características y propiedades de los plásticos reciclables*.
- Dascalescu, L., Zegloul, T. e Iuga, A. (2016). *Electrostatic Separation of Metals and Plastics From Waste Electrical and Electronic Equipment*. Elsevier Inc.
- Haarman, A. (2016). *Managing Hazardous Additives in WEEE Plastic From the Indian Informal Sector: A Study on Applicable Identification & Separation Methods*.
- International Electrotechnical Commission. (2015). *Determination of Certain Substances in Electrotechnical Products: Part 6, Polybrominated Biphenyls and Polybrominated Diphenyl Ethers in Polymers by Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)*. <https://webstore.iec.ch/publication/22592>.
- National Geographic España. (2018, diciembre). *Plásticos 101* [video]. <https://www.youtube.com/watch?v=3FeBxc13ROY&feature=youtu.be>.
- Nikkei Xtech. (S. f.). *Mitsubishi to Reclaim PP, PS, ABS from Plastic Mixture with 99% Purity*. https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/english/NEWS_EN/20080821/156659/.

CAPÍTULO

Reglas de decisión y herramientas para la identificación y separación de plásticos



Competencias a desarrollar:

Comprender los argumentos que soportan las reglas de decisión asociadas con el nivel de contaminación de los plásticos y las herramientas a su disposición para fortalecer los procesos de aprovechamiento.

3.1 Referentes técnicos internacionales

El principal referente internacional es el Convenio de Estocolmo sobre COP (ver capítulo 1). Aunque Colombia ha ratificado su compromiso, las normas aún no tienen carácter de exigibles; tampoco se ha reglamentado la forma de implementación y fijación de los límites de concentración para los COP listados en el Convenio. En la actualidad, el país está desarrollando las capacidades para realizar de manera autónoma la cuantificación de estas sustancias preparando la infraestructura que permita dar cumplimiento a las futuras regulaciones que lleguen a desarrollarse. Por ello, hasta el momento, los valores de referencia están dados por los establecidos en el Convenio de Estocolmo sobre COP, los cuales sirven como criterio de decisión para la clasificación de los materiales sospechosos de contener sustancias con COP⁶.

Por una parte, en casi todo el mundo se fabrican piezas plásticas que hacen uso del gran abanico de posibilidades de dichos materiales; sin embargo, no todos estos países fabrican piezas para el sector de AEE debido a las altas exigencias de calidad de estos. Ahora bien, algunos de los países que fabrican este tipo de piezas no se han adherido al Convenio de Estocolmo sobre COP o no lo han implementado aún de manera efectiva, lo cual genera una brecha que posibilita el uso de aditivos retardantes de llama clasificados como COP; en especial, por su bajo costo.

Competencias a desarrollar:

- Comprender las diferentes directivas y los estándares internacionales para la identificación, separación y gestión adecuada de plásticos en RAEE con BFR.



Por otra parte, en los países predominantemente consumidores de AEE, en especial aquellos en vías de desarrollo o subdesarrollados, las infraestructuras de recuperación y reciclaje no cuentan con las características necesarias para identificar y separar de manera adecuada los plásticos contaminados con COP de los libres de COP. Otro aspecto a tener en cuenta son los flujos de materiales recuperados a través del mundo; es decir, los de países que no cuentan con infraestructura propia para el reciclaje y que exportan estos materiales a otros países para su aprovechamiento, casos en los que se pierde la trazabilidad entre las fuentes de materiales y los usos que se les da.

En todos estos casos a pesar de la complejidad planteada deben considerarse las leyes y regulaciones propias de cada país en su rol —productor, consumidor o transformador—, pues cada país determina, si los tiene considerados, los valores límite para sustancias peligrosas en plásticos —como BFR y metales pesados— para regular su exportación y comercio⁷. Así, una empresa encargada de realizar el aprovechamiento de estos materiales, en especial si cuenta con participación en exportaciones, deberá asegurarse de conocer y cumplir con las regulaciones y leyes de aquellos países con los que tenga relación, esto le permitirá alcanzar mejores mercados a nivel nacional e internacional⁸.

6. Para más información, consulte el video *Estándares internacionales para el manejo y tratamiento de los RAEE. 10 de noviembre 2020* del Proyecto de Residuos Electrónicos (2020a) en el enlace: <https://youtu.be/oi3nNMrPG5w>. El video presenta las experiencias de gestores formales de tres países de América Latina con relación a la implementación de estándares internacionales para el manejo y tratamiento de RAEE, y está dirigido principalmente a empresas gestoras de RAEE, programas de recolección, tomadores de decisiones, especialistas y público general interesados en la correcta gestión de RAEE.

7. La información sobre estas regulaciones y los valores límite legales que se aplican en la actualidad se puede consultar en las páginas web de las autoridades nacionales de ambiente o industria de cada país.

8. Como herramienta de apoyo para el cumplimiento de estas regulaciones se cuenta con lo descrito en el capítulo 2 del presente curso, lo cual ayuda a que los niveles de sustancias peligrosas puedan reducirse por debajo de los valores límite legales con un esfuerzo razonable.

3.1.1 Normas y tratados internacionales

Diversas normas internacionales definen los valores límite para sustancias peligrosas en productos plásticos, y regulan las exportaciones y el comercio de fracciones plásticas peligrosas.

Tabla 15. Valores límite de sustancias COP por diferentes regulaciones

Convenio de Basilea: bajo contenido de COP (provisional*)	
Valor límite para HBB	50 mg/kg
Valor límite para HBCD	100 o 1.000 mg/kg
Valor límite para suma de PBDE	50 o 1.000 mg/kg
Regulación UE: Directiva de Restricción de Sustancias Peligrosas (RoHS, por sus siglas en inglés**)	
Valor límite para varios BFR (PBB y PBDE)	1.000 ppm (0,1 %)
Estándar europeo de tratamiento de RAEE EN/TS 50625***	
Valor límite para el bromo total (Br)	2.000 ppm (0,2 %)

*Los valores establecidos en el Convenio de Basilea son de carácter provisional. En la tabla se presentan los valores mínimos y máximos que se están evaluando. Para profundizar al respecto, se sugiere revisar la bibliografía correspondiente en *Publications: Previously Adopted Technical Guidelines* (Basel Convention, s. f. a).

**RoHS: acrónimo de “Restriction of Hazardous Substances” o “restricción de sustancias peligrosas”. La RoHS es una directiva que adoptó la Comunidad Europea en febrero del 2003 (2002/95/CE), la cual está orientada a reducir el uso de algunas sustancias peligrosas en AEE. Para más información, consulte el enlace: https://ec.europa.eu/environment/waste/rohs_eee/legis_en.htm.

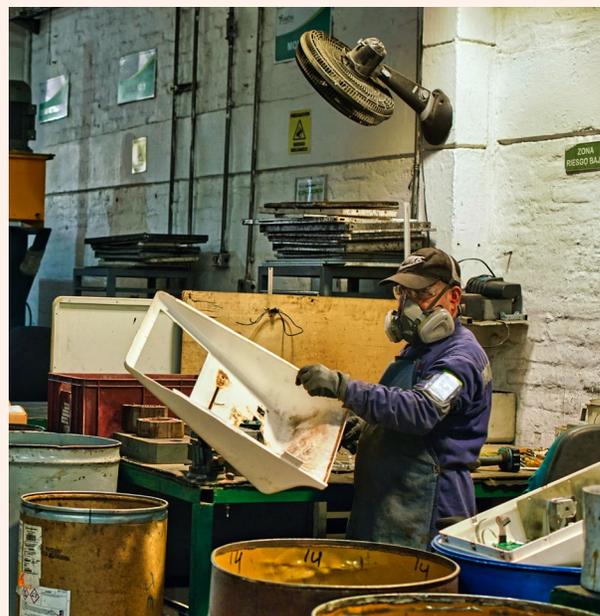
***El estándar europeo de tratamiento de RAEE es desarrollado por el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC). Para más información, consulte el enlace: <https://www.cenelec.eu/>.

Exportación de materiales plásticos

Las empresas gestoras con intención de exportar materiales deben tener en cuenta que el movimiento transfronterizo de residuos peligrosos, incluidos los plásticos en RAEE, está regulado por el Convenio de Basilea⁹. A partir del 1 de enero del 2021, las exportaciones de fracciones plásticas mezcladas —excepto las mezclas de PE, PP y PET— requieren el procedimiento de **consentimiento informado previo (CIP)**¹⁰. Este procedimiento establece que para realizar una exportación que contenga sustancias peligrosas, **el país de destino debe otorgar el permiso antes de que el envío abandone** el país de origen.

Notas sobre los procedimientos de CIP:

- Los procedimientos de CIP implican un mayor conocimiento y cuidado al momento de realizar exportaciones; no obstante, estos no representan un inconveniente para fracciones de plástico puro con contenidos de aditivos peligrosos por debajo de los niveles estandarizados a nivel internacional.
- En el caso del PVC incluso las fracciones puras estarán sujetas al procedimiento de CIP. Esto se debe a que los PVC son plásticos halogenados que a menudo contienen metales pesados como estabilizadores térmicos o en forma de pigmentos y, por lo tanto, se consideran peligrosos.



9. Para más información, consulte el enlace: <http://www.basel.int/>.

10. Para más información, consulte el enlace: <http://www.pic.int/Procedures/PICProcedure/tabid/1364>.

3.1.2 Estándares internacionales

Existen cinco estándares internacionales técnicos y ambientales para el tratamiento de RAEE (Miotti *et al.*, 2015):

- Europa:
 - WEEELabex (www.weeelabex.org)
 - CENELEC (<https://www.cenelec.eu/>)
- Suiza: Swico / SENS (<https://www.swico.ch/>)
- Estados Unidos:
 - R2 (<https://sustainableelectronics.org/>)
 - E-Stewards (<http://e-stewards.org/>)

Se discutirán con mayor detalle los estándares de Europa y Estados Unidos.

Europa (WEEELABEX Y CENELEC)

Estándar WEEELabex



WEEELabel of Excellence es un estándar europeo creado entre el 2009 y el 2012 en el marco de un proyecto cofinanciado por LIFE+, programa ambiental de la Unión Europea (UE). El estándar está disponible en 7 idiomas y consta de 3 documentos: recogida, logística y tratamiento. El estándar sobre el tratamiento también incluye anexos extendidos. WEEELabex es de cumplimiento voluntario (WEEELabex, s. f. b).

Estándar CENELEC



El estándar CENELEC está basado en el estándar WEEELabex. Se espera que CENELEC se convierta en una norma europea; por consiguiente, está previsto declararlo como vinculan-

te en la próxima revisión de la directiva de RAEE de Europa. Frente a este compromiso pretendido, las leyes nacionales de cada país europeo deberán considerar el estándar CENELEC como vinculante (CENELEC, s. f.).

Tal como se presenta en la tabla 16, estos estándares tienen elementos positivos y negativos que son necesario tener en cuenta.

Tabla 16. Características principales CENELEC/ WEEELabex

Bueno	Malo
El estándar es respaldado por las especificaciones técnicas y cubre toda la cadena de valor.	Alto costo de auditoría; en algunos casos, más de 10.000 €.
Cubre la cadena de valor más allá de la UE.	Todavía se requiere de una red de apoyo limitada para los operadores que requieren una verificación de conformidad.
Requiere de supervisión de la cadena de valor mediante la presentación de informes de acuerdo con WEEE Directive.	El estándar WEEELABEX no es obligatorio excepto cuando se requiere a nivel nacional.
Especifica los procedimientos para cumplir los requisitos de descontaminación de la WEEE Directive.	-

Estados unidos (R2 Y E-STEWARDS)

Estándar R2

Fue diseñado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Aunque este estándar es voluntario, la mayoría de los programas de gestión de RAEE del país lo exigen. El estándar se caracteriza porque los operadores o gestores de cualquier parte del mundo pueden certificarse. La primera versión fue publicada por la Sustainable Recycling Industry (SRI) en el 2008. A marzo del 2014 había 511 operadores certificados en 17 países; es decir, más que en cualquier otro estándar. En Latinoamérica hay operadores certificados en México, Costa Rica y Brasil (SERI, s. f.).

Tabla 17. Características principales del estándar R2/RIOS

Bueno	Malo
Promueve la recuperación y reutilización segura y efectiva de equipos y materiales eléctricos y electrónicos.	Permite la exportación de RAEE a los países en vías de desarrollo para su reciclaje.
Vigila el control de la cadena de reciclaje.	Los recicladores pueden certificarse sin certificar todas las instalaciones que operan bajo el control de la empresa.
Minimiza los riesgos para el medio ambiente y la salud humana.	-
Minimiza la responsabilidad y reduce los costos de seguro para los recicladores.	-
Asegura la confianza del público mediante certificación y monitoreo por terceras partes.	-

Estándar E-Stewards

Este estándar fue creado por la ONG Basel Action Network (BAN). En principio, las ONG involucradas en el diseño del estándar R2 no estaban de acuerdo con algunas directivas —en especial, con las directivas sobre exportaciones—; como no se logró ningún acuerdo, abandonaron el estándar R2 e iniciaron el estándar de E-Stewards. Por consiguiente, el estándar E-Stewards es más restrictivo que el R2; en particular, en las áreas de exportaciones y de salud. En la actualidad hay 68 operadores certificados en 3 países: Estados Unidos, Canadá e Inglaterra (E-Stewards, s. f.).

Tabla 18. Características principales del estándar E-Stewards

Bueno	Malo
Prohíbe rigurosamente la exportación de RAEE a países en desarrollo.	Los costos de participación son altos, por lo que potencialmente solo las grandes empresas intentan obtener la certificación E-Stewards.
La certificación E-Stewards requiere un certificado ISO 14001.	La mayoría de las empresas certificadas por E-Stewards tienen su sede en Estados Unidos y Canadá.
La protección y destrucción de datos es asegurada mediante los requisitos de la cadena de custodia.	Tiene una estricta prohibición en cuanto a la exportación de todo equipo, indiferentemente de si estos pudieran reutilizarse.
La certificación logra el cumplimiento legal del Convenio de Basilea.	Se centra en gran medida en mejorar la situación de las exportaciones de RAEE en Estados Unidos en ausencia de la firma del Convenio de Basilea.
Es responsable socialmente y asegura que las prácticas como el trabajo infantil sean prohibidas.	-
La certificación tiene el respaldo de Greenpeace.	-
Su cadena de valor es transparente, ya que el carácter de todos los residuos peligrosos de los recicladores puede demostrarse.	-

De acuerdo con Miotti *et al.* (2015) en la comparación de los estándares de RAEE de Suiza, Europa y Estados Unidos se tiene que:

- Los enfoques de los estándares son distintos: el estándar E-Stewards atribuye mucha importancia al control de las exportaciones y a la salud y seguridad de los trabajadores mientras que los estándares europeos dan más importancia a la valorización y recuperación de materiales y al cumplimiento de tasas de reciclaje. Así mismo, el reuso de aparatos tiene más importancia en los estándares estadounidenses que en los europeos.
- Los estándares Swico/SENS, WEEELabex y CENELEC son diseñados para un país o un grupo de países específicos —por ejemplo, la UE—, y están relacionados directamente con las normativas vigentes en estos países. Por otro lado, los estándares estadounidenses son aplicables en todo el mundo e incluyen temas que no aparecen, o tienen menor importancia, en los estándares europeos, no porque estos últimos los omitan, sino porque algunos temas ya están cubiertos por la legislación suiza —en el caso de Swico/SENS— o de la UE —en el caso de WEEELabex y CENELEC—.
- Por lo general, el estándar R2 es el más abierto e inespecífico, por lo que se presume que es el de más fácil cumplimiento.
- Los estándares WEEELabex y CENELEC son muy parecidos, aunque tienen diferencias significativas. En particular, la débil supervisión de operadores aguas abajo —es decir, en flujos posteriores— del CENELEC ha sido criticada. En términos generales, en los puntos en los cuales hay diferencias entre WEEELabex y CENELEC, CENELEC plantea requisitos menos estrictos.



3.2 Herramientas para la identificación y separación de plásticos

A la fecha, la mayoría de las compañías licenciadas ambientalmente en el país para la gestión de RAEE realizan el desensamble manual seguido por la separación de las piezas por material: metálico, plástico o vidrio. Los plásticos recuperados se comercializan a un valor muy bajo, ya que no hay separación de los diferentes tipos de polímeros en el mercado nacional. En otros casos, el plástico se tritura, compacta y empaca para ser exportado a otros países donde se les da valor agregado.

En ninguno de los dos casos se da un tratamiento diferenciado al plástico contaminado con BFR clasificados como COP, ya que estos ni siquiera se identifican en primer lugar. Esto evidencia uno de los retos claves que afronta el país: es indispensable que los gestores de plásticos provenientes de RAEE tengan la capacidad de identificar entre sus materiales aquellos que contienen BFR clasificados como COP para poder realizar un manejo ambientalmente adecuado de los mismos.

A esto se une el modelo económico que rige el reciclaje de plásticos, el cual incluye la REP y esquemas de recolección de RAEE. Para que cualquier cambio o herramienta a implementar sea atractivo, este debe ser económicamente viable; por este motivo es imperativo que no solo se procure identificar y tratar de manera adecuada el plástico contaminado con BFR clasificados como COP, sino que a su vez se propicie la sostenibilidad del modelo nacional de reciclaje.

En este tema se abordará una herramienta diseñada teniendo en cuenta los planteamientos anteriores. Una visión nacional de cómo propender a la sostenibilidad se discutirá en el siguiente tema y se profundizará en el capítulo 4, relacionado con el aprovechamiento de plásticos.

Competencias a desarrollar:

- Aplicar una de las herramientas disponibles en el país para la identificación y separación de plásticos. Estudio de caso con SmartRAEE.



3.2.1 Aspectos clave de la herramienta

De acuerdo con la situación planteada antes, la experiencia en campo, las necesidades del país y el contexto internacional, se pueden identificar los siguientes aspectos clave:

Lenguaje común

Es importante facilitar el entendimiento de los diferentes actores; esto se logra con un lenguaje común. Aunque los procesos de gestión son similares, la terminología es única en cada gestor y no está ligada con el marco normativo nacional. Por ello es importante unificar términos y conceptos, así como encontrar los equivalentes del caso.

Piense en cuál es la diferencia entre un radio, una grabadora, un equipo de sonido y un tocadiscos. ¿Se manejan de la misma manera? o ¿pueden agruparse y aprovecharse de manera indistinta? Al ser clasificados como enseres de audio y video —subcategoría 1.2, anexo I, Resolución 0076 de 2019—, ¿estos pueden gestionarse de igual forma que parlantes, bafles o amplificadores de sonido, elementos que pertenecen a la misma subcategoría?

Capacidad para identificar plásticos contaminados

Los métodos de identificación de plásticos contaminados más usuales en los procesos de gestión son la prueba de densidad, los XRF y la GC-MS. Si estos se aplican a grupos estables a través del tiempo es posible establecer con un buen margen de certeza el comportamiento de un RAEE. Por ejemplo, si una cantidad representativa de televisores está contaminada con BFR clasificados como COP, es lógico suponer que los demás televisores presenten un comportamiento similar teniendo como fundamento la ocurrencia de plástico en RAEE vista en el capítulo 2.

Pero ¿qué es un “grupo estable”? Hay muchas formas de definirlos de acuerdo con el **lenguaje común**, de allí su importancia. La literatura, en conjunto con estudios realizados a nivel nacional, sugiere que un grupo estable —útil con miras al aprovechamiento— es aquel en el que se cruza el tipo de aparato y su color; por ejemplo, televisor negro, CPU blanca, entre otros.

Al caracterizar estos “cruces” con técnicas de identificación de BFR es posible establecer cuáles de estos tienen BFR clasificados como COP y, por ende, deben tratarse de manera diferenciada. A su vez, esto permite conocer cuáles RAEE pueden aprovecharse con total tranquilidad sin incurrir en faltas a los compromisos internacionales, como los Convenios de Estocolmo y Basilea. Aunque las caracterizaciones son costosas, una vez estas son realizadas de forma adecuada pueden considerarse vigentes a través del tiempo. Las caracterizaciones solo necesitarán reevaluarse cuando la tecnología cambie —por ejemplo, de los televisores CRT a los LCD— o si se desea rebatir o confirmar la caracterización ya establecida.

Además, la correcta separación de plásticos tiene dos impactos económicos fundamentales. Primero, reduce la cantidad de plástico que debe tratarse diferenciadamente —por coprocesamiento, por ejemplo—, lo cual disminuye los costos. Segundo, permite seleccionar plástico específico de los RAEE —por ejemplo, ABS negro— para usarlo como materia prima en aplicaciones de alto valor agregado.

3.2.2 Estudio de caso SmartRAEE



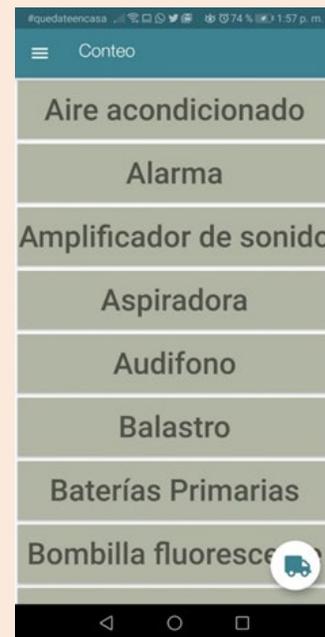
SmartRAEE es una aplicación web y móvil que tiene como propósito orientar a los gestores de RAEE en la identificación y separación de plásticos de acuerdo con su contenido de BFR.

A continuación se muestran diferentes características de la aplicación SmartRAEE y cómo estas satisfacen los aspectos clave que se esperan de una herramienta.

Interfaz

La interfaz de la aplicación incluye los tipos de RAEE identificables a simple vista tal y como se conocen por los gestores; sin embargo, estos tipos están cruzados internamente con categorías y subcategorías de la Resolución 0076 de 2019 para crear un lenguaje común. Por ejemplo: Aire acondicionado --> Aparatos electrodomésticos --> Equipos de acondicionamiento de aire.

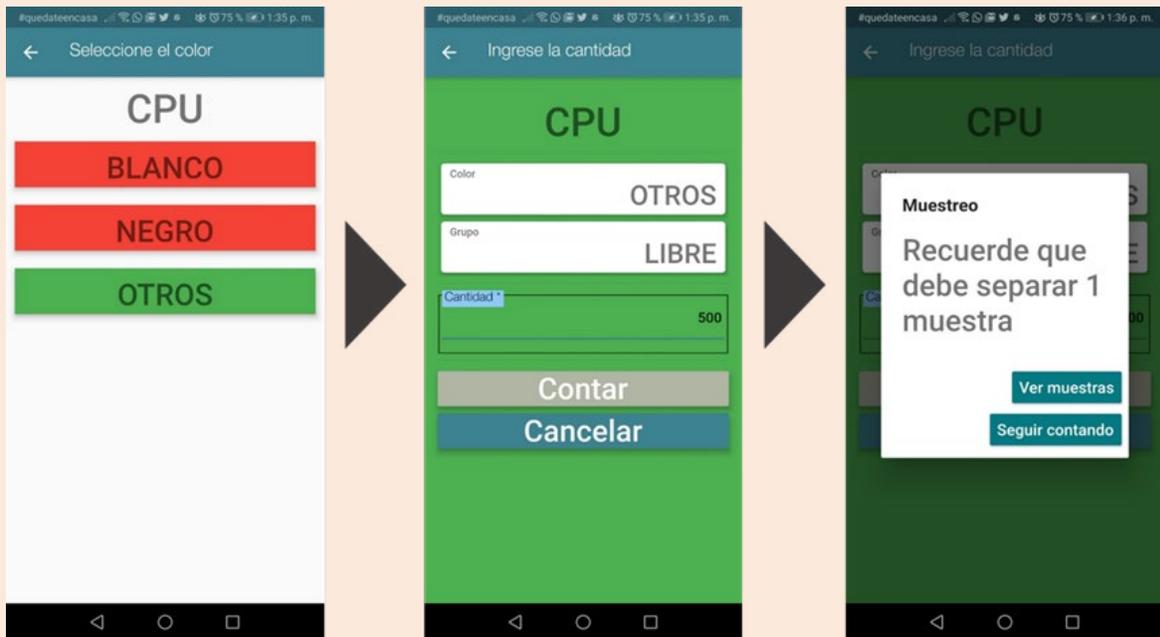
Gráfica 26. Aplicación SmartRAEE



Identificación de plásticos contaminados y muestreo representativo

Los cruces aparecen en la aplicación por color: rojo para aquellos que contienen BFR clasificados como COP, verde para aquellos libres de sospecha y azul para aquellos que aún no se han caracterizado. Como se puede ver en la imagen, el cruce CPU de otros colores (rojo, azul, etc.) ya se encuentra caracterizado; así mismo, de los 500 aparatos solo es necesario realizar control a uno de ellos utilizando la técnica de XRF. En los cruces sin caracterización la cantidad de aparatos a controlar puede ser mayor, lo cual depende del método de muestreo escogido para tal fin. SmartRAEE utiliza una proporción inversa: entre mayor sea la caracterización, menor es la cantidad de equipos a controlar.

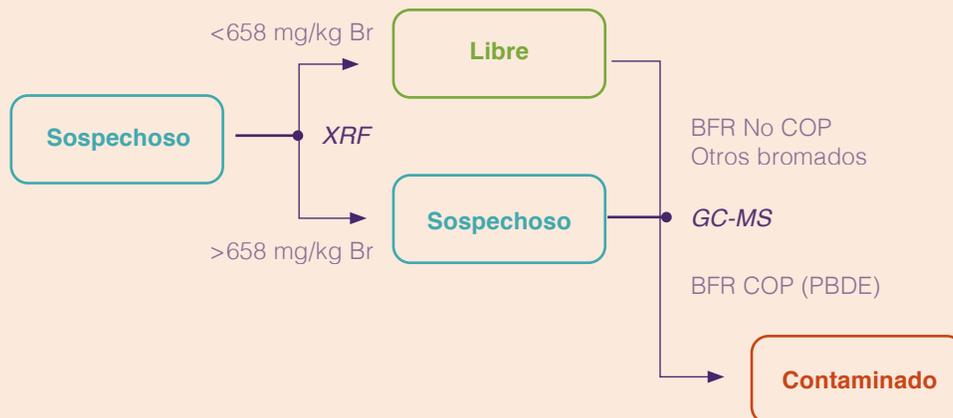
Gráfica 27. Proceso de muestreo de un lote en SmartRAEE



Los XRF portátiles son una técnica de campo de fácil aplicación que permite realizar control de calidad para asegurarse de que la caracterización se mantiene a través del tiempo. Esta no es obligatoria y se utiliza para orientar la toma de decisiones de acuerdo con el diagrama de la gráfica 28.

El límite utilizado es 658 mg/kg de bromo (valor de referencia), pues se calcula que este corresponde a los 1.000 mg/kg de PBDE sugeridos provisionalmente por el Convenio de Basilea y establecidos en la Directiva RoHS. Eventualmente, Colombia adoptará una normativa respecto al contenido de PBDE en plásticos, a la cual deberá ajustarse este y cualquier otro criterio de decisión.

Gráfica 28. Diagrama de flujo para la clasificación de RAEE en listados de riesgo



¿Qué ha implicado esta implementación?

Todo cambio o mejora en un sistema implica costos asociados a los mismos. Por una parte, para las empresas los costos solo se relacionan con el dispositivo inteligente a usar y una muy estable conexión a Internet. Por otra parte, el operario que realiza el desensamble manual tiene la aplicación a disposición en todo momento como una herramienta de consulta para orientar su trabajo.

Los análisis por XRF y GC-MS solo se requieren para caracterizar los grupos de manera que una vez esto se haya realizado no sea necesario realizar más mediciones. Además, la aplicación ya incluye la caracterización de más de 40 cruces de RAEE. Así mismo, la correcta

separación manual de plásticos por tipo de plástico y color durante el desensamble ha permitido la obtención de materiales homogéneos con características adecuadas para usos de alto valor agregado, como inyección de piezas para AEE y otras aplicaciones.

Para asegurar un modelo económico robusto y sostenible se requiere asegurar criterios de calidad y cantidad de material. La aplicación solo es una herramienta que facilita el proceso indicando qué se puede realizar con cada RAEE; sin embargo, se necesita la articulación del gestor, como un proveedor de material, y del transformador, como su cliente. Esto se profundizará a detalle en el capítulo 4.



3.2.3 Actividad 4. Conceptos clave

Complete las frases a continuación con los conceptos adecuados:

- El _____ y la Directiva RoHS son referentes internacionales que, entre otras cosas, establecen _____ del contenido de PBDE en plásticos.
- El CIP es un procedimiento para asegurar que la exportación de sustancias peligrosas se realiza con _____ del país de destino.

- El uso de terminología unificada por diferentes actores se denomina _____ y debe guardar alguna relación con la _____.
- Las técnicas de XRF y GC-MS permiten caracterizar grupos estables o “cruces” para poder _____ el plástico contaminado y, a su vez, _____ el plástico libre de BFR clasificados como COP para su posterior aprovechamiento.

3.3 Procedimiento operativo para la identificación y separación de plásticos en Colombia

Competencias a desarrollar:

- Analizar el procedimiento operativo para la identificación y separación de plásticos en Colombia.



En la actualidad, en Colombia aún existen grandes brechas en la cadena de valor que dificultan el aprovechamiento de plástico reciclado no contaminado y su separación del plástico contaminado con COP. Un reciclaje adecuado de plástico permitiría devolverle el valor al material logrando que este entre en ciclos de uso y reuso aportando a la economía circular¹¹.

Un resumen esquemático de cómo funciona la gestión de plásticos, y su cadena de valor, en Colombia se puede apreciar en la gráfica 29.

Esto representa dos grandes inconvenientes, uno ambiental y otro económico. Para atenderlos, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible viene apoyando la generación de nuevas capacidades en el país que permitan cerrar estas brechas y dar una mejor disposición a los RAEE. Como parte de estos esfuerzos se han desarrollado proyectos demostrativos que permitan desarrollar y validar modelos de operación en los gestores para separar de manera oportuna los materiales contaminados.

Gráfica 29. Plásticos en RAEE: cadena de valor actual



11. Para más información, consulte el video *Identificación y separación de plásticos RAEE POP PBDEs: caso Colombia* del Proyecto Residuos Electrónicos (2020b) en el enlace: <https://youtu.be/6Z3lk6TdUDo>. En este video se presentaron las experiencias del "Proyecto demostrativo enfocado en la separación y el manejo ambientalmente adecuado de plásticos bromados que se encuentran en residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)", suscrito entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, como socio ejecutor, y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

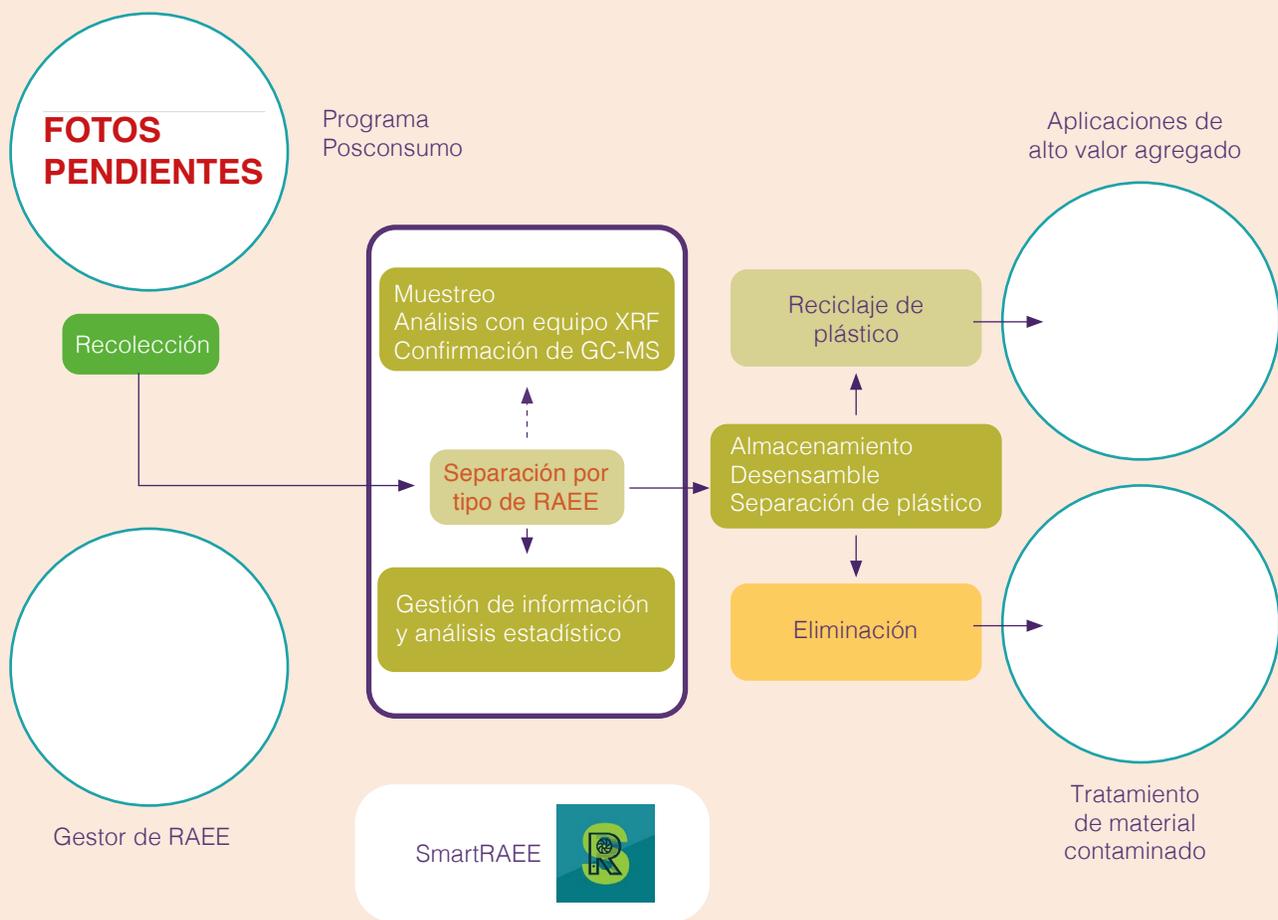
3.3.1 Mejorando el aspecto ambiental de la gestión de plástico de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Colombia

En Colombia no se separa el plástico libre de COP del plástico contaminado, por lo que los contaminantes se difunden por los materiales plásticos reciclados. Esto es en especial problemático si los plásticos reciclados contaminados llegan a aplicaciones en las que estos contaminantes no estaban previstos y representan un riesgo mayor para la salud humana;

por ejemplo, muebles, juguetes para bebé, tapicería, entre otros.

Tal como se explicó en el tema 2, en la actualidad se está validando la aplicación SmartRAEE como una herramienta para lograr la separación de plásticos basada en información estadística; no obstante, cualquier herramienta o procedimiento capaz de identificar y separar plásticos es adecuado, siempre y cuando evite que los BFR clasificados como COP se propaguen a través del reciclaje de plásticos. A esta fracción de plásticos debe darse un tratamiento diferenciado y no es correcto reciclarla.

Gráfica 30. Proyecto demostrativo de plásticos de RAEE

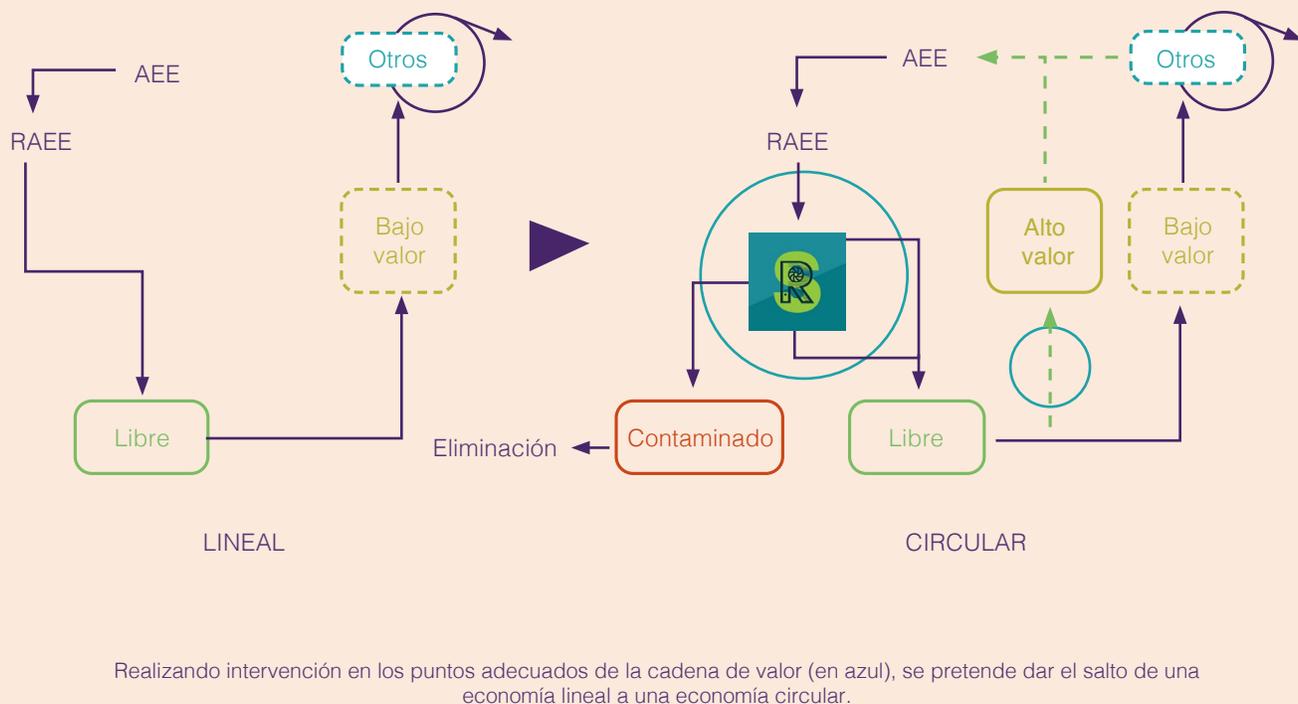


3.3.2 Mejorando el aspecto económico de la gestión de plástico de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Colombia

En Colombia se desperdicia el potencial del plástico proveniente de RAEE al reciclarlo sin una separación adecuada, lo que impide comercializarlo por un alto valor en aplicaciones de calidad igual o superior. Al perder ciertas características, el material puede terminar su ciclo de vida prematuramente, lo cual impide un modelo de economía circular.

Los puntos clave a intervenir son: primero, la adecuada separación de plásticos provenientes de RAEE; segundo, su aprovechamiento en aplicaciones de alto valor agregado. Por ejemplo, el plástico reciclado puede usarse para la inyección de piezas de AEE con el fin de cerrar el ciclo económico. El aprovechamiento de alto valor agregado requiere un mayor trabajo y articulación por parte de varios actores de la cadena, por lo cual le dedicaremos el capítulo 4 para estudiarlo en detalle¹².

Gráfica 31. De economía lineal a economía circular



12. Para más información sobre las acciones y los proyectos que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible está adelantando en este tema, consulte el video *Plásticos: una segunda oportunidad* del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021) en el enlace: <https://youtu.be/D4kNqcrNRTU>.



3.4 Evaluación del capítulo

1

Para un adecuado manejo de plásticos, inclusive aquellos provenientes de RAEE, es indispensable:

a. Poseer una licencia ambiental vigente.

b. Utilizar los criterios establecidos en el Convenio de Estocolmo sobre COP.

c. Separar e identificar los plásticos con XRF y GC-MS.

d. Considerar la normativa y los referentes internacionales.

2

Si desea exportar cierta cantidad de plástico cuyo contenido de PBDE es desconocido, usted debe:

a. Realizar la exportación sin ningún tipo de trámite.

b. Verificar que el plástico no está contaminado y realizar un CIP si corresponde.

c. Tramitar el procedimiento de CIP.

d. Abstenerse de realizar la exportación.

3

En Colombia los estándares WEEELabex y CENELEC aplican:

a. Como referentes internacionales que pueden apoyar la gestión de RAEE en Colombia.

b. Como estándares vinculantes debido a la firma del Convenio de Basilea.

c. Como normas de estricto cumplimiento, ya que Colombia pertenece a la OCDE.

d. Como criterios técnicos para la certificación de los gestores de RAEE.

4

En Colombia los estándares R2 y E-Stewards aplican:

a. Como referentes dados por el Convenio de Estocolmo sobre COP.

b. Como estándares vinculantes adoptados en el país.

c. Como criterios técnicos para la certificación de los gestores de RAEE.

d. Como normas de estricto cumplimiento, ya que Colombia pertenece a la OCDE.

5

Uno de los grandes problemas que afronta Colombia en la gestión de plásticos es:

a. La ausencia de un mercado interesado en aprovechar plástico.

b. Los altos niveles de contaminación de los plásticos en el país por PBDE.

c. La falta de capacidad para separar e identificar plásticos contaminados.

d. La normatividad ambigua para el licenciamiento ambiental de los gestores.

6

El documento que incluye la categorización de los diferentes AEE en Colombia es:

a. Convenio de Estocolmo sobre COP.

b. Convenio de Basilea.

c. Directiva RoHS.

d. Resolución 0076 de 2019.

7

El comportamiento estable a través del tiempo de la composición de los RAEE se fundamenta en:

a. Literatura científica y estudios estadísticos.

b. Persistencia de los PBDE.

c. Resistencia de los materiales plásticos.

d. Rápida innovación tecnológica.

8

Separar plásticos de RAEE durante su gestión tiene grandes ventajas, por ejemplo:

a. Los costos se reducen al tener el material de forma ordenada.

b. Se puede aprovechar el material en aplicaciones de mayor valor.

c. Se cumplen los requisitos de certificación de referentes internacionales.

d. Permite el uso de herramientas automatizadas y análisis de laboratorio.

9

Una de las debilidades de la gestión de plásticos sin identificarlos ni separarlos previamente es que:

a. Al gestionarse mayores cantidades surgen dificultades logísticas.

b. Al estar mezclados su valor comercial es mucho menor.

c. Los contaminantes pueden difundirse durante su posterior reciclaje.

d. No puede automatizarse y se requiere el desensamble manual.

10

Una de las debilidades de la gestión de plásticos sin identificarlos ni separarlos previamente es que:

a. Aumentan los costos de las licencias ambientales.

b. Las cantidades de plástico que pueden gestionarse disminuyen.

c. Se requieren bases de datos estadísticas como apoyo al proceso.

d. Impide darle al plástico contaminado un tratamiento diferenciado.

11

El aspecto clave a mejorar en la gestión de plásticos en Colombia desde el punto de vista ambiental es:

a. La capacidad de tratar diferenciadamente el plástico contaminado con BFR clasificados como COP.

b. La tecnología para eliminar el plástico proveniente de RAEE por métodos alternativos.

c. Los esquemas de recolección y transporte de los programas posconsumo.

d. Los métodos de compactación para optimizar el espacio de almacenamiento de los gestores.

12

El aspecto clave a mejorar en la gestión de plásticos en Colombia desde el punto de vista económico es:

a. La cantidad de plástico que se recicla para hacer sostenible un modelo circular.

b. El encadenamiento entre los gestores y aprovechadores de plástico.

c. La disponibilidad de aplicaciones para polímeros como ABS y HIPS.

d. Las brechas existentes entre gestores y sus programas posconsumo.

3.5 Bibliografía

- Basel Convention. (S. f. a). *Publications: Previously Adopted Technical Guidelines* [página web]. [Http://www.basel.int/Implementation/Publications/TechnicalGuidelines/tabid/2362/Default.aspx](http://www.basel.int/Implementation/Publications/TechnicalGuidelines/tabid/2362/Default.aspx).
- Basel Convention. (S. f. b). *Home page* [página web]. [Http://www.basel.int/](http://www.basel.int/).
- Bill, A., Gasser, M., Haarman, A., y Heinz, B. (2019). *Procesamiento de plásticos de RAEE: manual práctico*. SRI, Step, Swiss Confederation, EMPA y World Resources Forum. [Https://www.step-initiative.org/files/_documents/other_publications/Manual%20Plásticos%20RAEE%20Español-min.pdf](https://www.step-initiative.org/files/_documents/other_publications/Manual%20Plásticos%20RAEE%20Español-min.pdf).
- CENELEC. (S. f.). *CENELEC* [página web]. [Https://www.cenelec.eu/index.html](https://www.cenelec.eu/index.html).
- Convenio de Basilea. (2015). *Conferencia de las Partes en el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación*. Naciones Unidas y PNUMA. [Http://www.basel.int/Implementation/Publications/TechnicalGuidelines/tabid/2362/Default.aspx#](http://www.basel.int/Implementation/Publications/TechnicalGuidelines/tabid/2362/Default.aspx#).
- E-Stewards. (S. f.). *E-Stewards* [página web]. [Http://e-stewards.org](http://e-stewards.org).
- European Commission. (2011). *Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS)*. [Https://ec.europa.eu/environment/waste/rohs_eee/legis_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/waste/rohs_eee/legis_en.htm).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021, junio). *Plásticos, una segunda oportunidad* [video]. [Https://www.youtube.com/watch?v=D4kNqcrNRTU&ab_channel=MinisteriodeAmbienteyDesarrolloSostenible-Colombia](https://www.youtube.com/watch?v=D4kNqcrNRTU&ab_channel=MinisteriodeAmbienteyDesarrolloSostenible-Colombia).
- Miotti, M., Böni, H, Hernández S., C. A., y Schluemp, M. (2015). *Technical and Environmental Standards for the Treatment of WEEE: Comparison of WEEE-Standards From Switzerland, Europe and the US*. SRI, Centro Nacional de Producción Más Limpia, World REsources Forum y EMPA. [Https://www.sustainable-recycling.org/wp-content/uploads/2015/07/SRI_ComparisonStandards_2015en.pdf](https://www.sustainable-recycling.org/wp-content/uploads/2015/07/SRI_ComparisonStandards_2015en.pdf).
- Parlamento Europeo y Consejo Europeo. (2011). *Directiva 2011/65/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 8 de junio de 2011 sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos*. Diario Oficial de la Unión Europea. [Https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0065&from=ES](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0065&from=ES).
- Proyecto Residuos Electrónicos. (2020a, noviembre). *Estándares internacionales para el manejo y tratamiento de los RAEE. 10 de noviembre 2020* [video]. [Https://youtu.be/6Z3Ik6TdUDo](https://youtu.be/6Z3Ik6TdUDo).
- Proyecto Residuos Electrónicos. (2020b, octubre). *Identificación y separación de plásticos RAEE POP PBDEs: caso Colombia* [video]. [Https://www.youtube.com/watch?v=6Z3Ik6TdUDo&ab_nnel=ProyectoResiduosElectr%C3%B3nicos%20CPREAL](https://www.youtube.com/watch?v=6Z3Ik6TdUDo&ab_nnel=ProyectoResiduosElectr%C3%B3nicos%20CPREAL).
- Rotterdam Convention. (S. f.). *Database: The Prior Informed Consent (PIC) Procedure* [página web]. [Http://www.pic.int/Procedures/PICProcedure/tabid/1364](http://www.pic.int/Procedures/PICProcedure/tabid/1364).
- SERI. (S. f.). *R2* [página web]. [Https://sustainableelectronics.org/r2/](https://sustainableelectronics.org/r2/).
- WEEELabex. (S. f. a). *Treatment & Re-Use Operators* [página web]. [Https://www.weeelabex.org/documents/treatment-operator/](https://www.weeelabex.org/documents/treatment-operator/).
- WEEELabex. (S. f. b). *WEEELabex conformity & verification* [página web]. [Https://www.weeelabex.org/](https://www.weeelabex.org/).

CAPÍTULO

Aprovechamiento de plásticos



Competencias a desarrollar:

Identificar las etapas del ciclo de vida del plástico y las acciones que en cada una de ellas facilitarían oportunidades de negocio de alto valor agregado.

4.1 Procesamiento de plásticos y su recuperación

En este capítulo se abordarán las etapas a implementar para realizar un adecuado aprovechamiento de los materiales plásticos aprovechables libres de COP. Además, se presentarán las diferentes técnicas para realizar el reciclaje de los materiales plásticos.

Comenzamos con lo relativo al procesamiento y la recuperación de plásticos. El procesamiento de los materiales plásticos se encuentra altamente tecnificado, pues los materiales y los procesos de manufactura han evolucionado a pasos agigantados en los últimos años. Esto hace que la interacción entre los proveedores de materiales y sus clientes tenga un carácter predominantemente técnico, ya que el proveedor de materiales conoce a la perfección las características de sus productos y, a su vez, cuenta con conocimientos por lo menos básicos sobre los procesos de manufactura de sus clientes.

Por otro lado, como se ha mencionado en módulos anteriores, la cadena de valor del reciclaje de materiales plásticos en Colombia es en su mayoría informal y tiene grandes brechas de conocimiento y tecnológicas, características que hacen que la interacción con los clientes —en especial los que fabrican productos de mayor valor agregado— sea difícil y a veces frustrante para las partes. Por lo tanto, en la recuperación y el reciclaje de los materiales plásticos se deberá elevar el nivel de conocimiento tanto sobre los materiales como sobre los procesos tecnológicos disponibles para su recuperación, así como sobre sus ventajas, desventajas y posibilidades; así mismo, se deben adquirir conocimientos sobre los procesos de manufactura de los clientes potenciales para

Competencias a desarrollar:

- Identificar alternativas para el reciclaje de plásticos en RAEE y diseñar procesos.



entender las características que ellos valoran en los materiales a parte de la motivación económica.

4.1.1 Aprovechamiento de materiales dentro del concepto de economía circular

El mercado potencial de los materiales reciclados depende en gran medida de sus propiedades químicas y mecánicas, lo que define sus posibles aplicaciones y, por ende, su precio. Dependiendo de las tecnologías de reciclaje utilizadas se pueden mejorar (*upgrading*) o desmejorar (*downgrading*) la calidad del material con respecto al material virgen (Cobo *et al.*, 2018).

Antes de entrar en los procesos y las técnicas de reciclaje es importante tener claro el concepto de **“compatibilidad”** entre los materiales plásticos. Como pudo apreciarse en el módulo 2, existen varias familias de polímeros con características físicas y de conformación química diferente. En específico, la conformación química —es decir, la forma en la que están unidos y distribuidos los átomos que componen las cadenas poliméricas— es la principal responsable de que un polímero sea compatible con otro de modo que al mezclarse se dé miscibilidad entre ellos y no se dé el fenómeno de **“separación de fases”**, como sucede con el agua y el aceite. Cuando los polímeros no son compatibles, estos se separan generando **“interfaces”** que se presentan en las fronteras entre uno y otro, las cuales debilitan la estructura de la pieza y hacen que esta sea más débil o tenga un desempeño más pobre que una pieza elaborada a partir de un material homogéneo.

El segundo elemento a tener en cuenta cuando se habla de compatibilidad está asociado con la “viscosidad” o la diferencia de viscosidades entre los polímeros a mezclar. La viscosidad es la medida de la resistencia de un fluido a moverse; por ejemplo, la miel es un líquido viscoso que se mueve lentamente mientras que el agua que es un líquido poco viscoso que fluye con facilidad. Cuando hablamos de polímeros siempre se debe pensar en ellos durante su procesamiento como fluidos viscosos que se mueven muy lentamente. Así, aunque dos polímeros sean de la misma familia, si estos tienen viscosidades muy lejanas entre sí, no será posible lograr una mezcla. La viscosidad de un polímero dependerá de la temperatura a la cual se mida, entre otros factores. Si bien el Índice de Fluidéz (MFI) es una propiedad de las fichas técnicas muy usada en los polímeros, este índice no debe usarse como único criterio, pues no necesariamente refleja el comportamiento del material a la condición a la cual se está procesando.

Por ejemplo:

Se tienen dos polietilenos de alta densidad (HDPE). El primero proviene de envases de aseo y hogar (champú con MFI 0,8 g/10min. El segundo proviene de canastas para envases y refrescos, con MFI 7 g/10min.

1

En estas dos aplicaciones, a pesar de que ambos materiales son HDPE, la viscosidad dista mucho una de la otra; por lo tanto, una mezcla entre sí será muy difícil de homogenizar.

2

Ahora bien, una vez comprendidos los dos conceptos fundamentales a la hora de mezclar materiales, es posible describir las técnicas de aprovechamiento o reciclaje existentes que pueden dar como resultado una disminución de propiedades, “*downgrading*”, o una mejora de estas, “*upgrading*”, como se mencionó al inicio de esta sección.

Por una parte, un ejemplo de reciclaje tipo *downgrading* es la mezcla de polímeros incompatibles, sin ninguna funcionalización o compatibilización, utilizada para hacer vaciados y obtener partes plásticas de grandes espesores —como postes, tablonés, entre otros—, las cuales son usadas

para hacer amueblamiento, componentes de parques, entre otros. Debido a las bajas propiedades del material resultante, estas piezas son fabricadas de grandes espesores para poder asegurar una rigidez mínima, con lo cual el material pierde valor.

Por otra parte, el reciclaje “botella a botella” del PET es un ejemplo de reciclaje tipo *upgrading*, ya que el material se somete a un proceso de ultralimpieza y reconstitución de sus propiedades hasta valores equivalentes a los de un material virgen (Forrest, 2016).

Además del *upgrading* y *downgrading*, también existe el concepto de reciclado “de bucle cerrado” y “de bucle abierto”.

Por una parte, en el reciclaje de bucle cerrado el material es usado y recuperado para la misma aplicación o aplicaciones similares (ISO, 2006), lo cual no implica que el material pueda reciclarse de manera indefinida; esto, debido a los cambios microestructurales que el material sufre por la acumulación de elementos contaminantes y los procesos de degradación de cada uno de los ciclos de reuso (Gaustad *et al.*, 2011). Un ejemplo de reciclaje de bucle cerrado es cuando se toma una botella de vidrio y se genera con este material una jarra, pues la funcionalidad es la misma (Haupt *et al.*, 2017). El concepto “de bucle cerrado” es el ideal de la economía circular, ya que las cadenas de uso y reuso de los materiales se maximizan.

Por otra parte, en el reciclaje abierto el material es utilizado en una aplicación totalmente diferente a la de su ciclo anterior. El reciclaje abierto puede generar que se pierda la trazabilidad y el valor del material, por lo que el número de reusos puede ser significativamente disminuido y su fin de vida a relleno será más inminente. Un ejemplo de reciclaje de ciclo abierto es reciclar botellas de PET para obtener fibras de PET usadas para la confección de telas (Shen *et al.*, 2010).

A su vez, los procesos de reciclado pueden clasificarse como “*downcycling*” y “*upcycling*”.

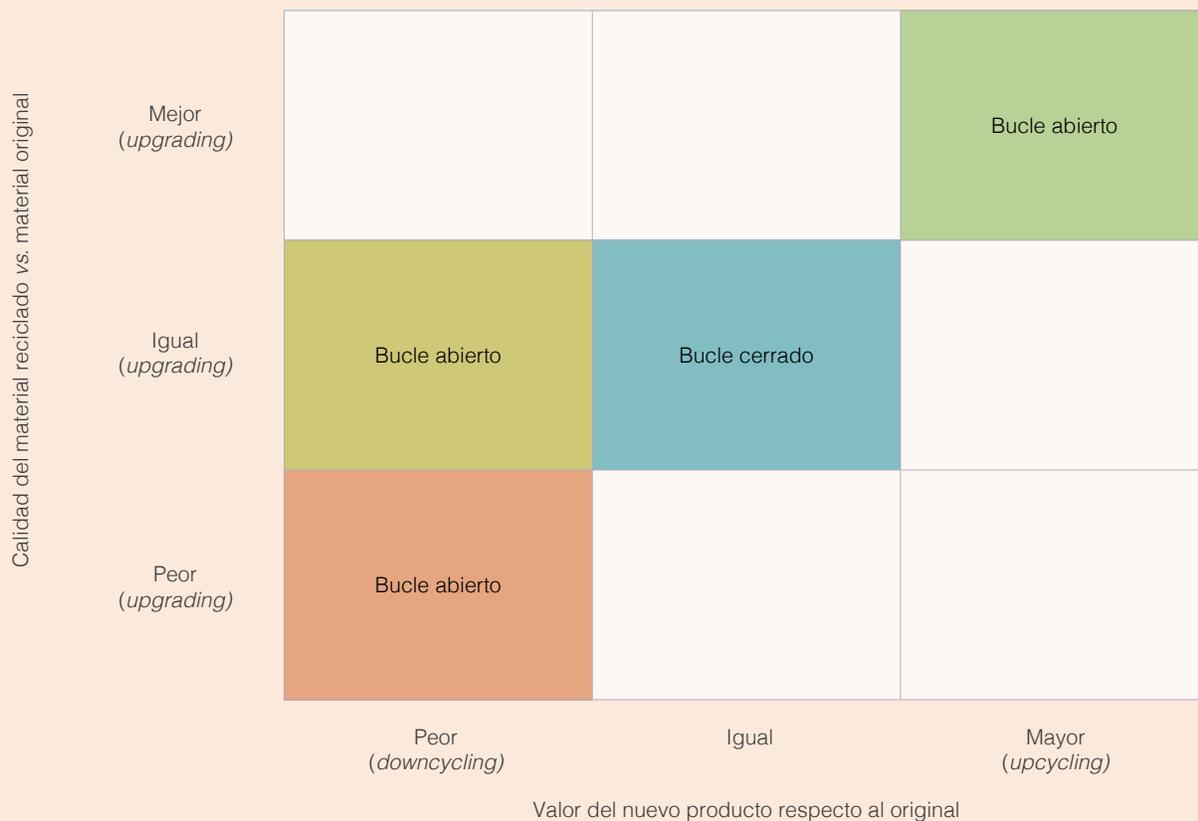
Por una parte, se habla de *downcycling* cuando el material reciclado es usado para obtener productos de menor valor respecto al precio por kilogramo de materia prima (Gaustad, 2012). Un ejemplo de *downcycling* es la utilización de material de empaque de grado alimentario para producir elementos como palos de escoba, reglas escolares, entre otros.

Por otra parte, se habla de *upcycling* cuando el producto reciclado es de mayor valor que el producto original (Pol, 2010). Por lo general, estos casos incluyen cambios físicos en la estructura o cambios en la composición química.

Los cuadros rojo y naranja corresponden a los casos comunes en materiales reciclados en los que se obtienen productos de mala calidad

con materias primas de bajas prestaciones y poca consistencia. El cuadro azul corresponde al caso más cercano de economía circular, en el que el material es reutilizado varias veces para generar el mismo producto; por ejemplo, el caso “botella a botella” del PET. El cuadro verde corresponde a la obtención de productos de mayor valor agregado al mejorar el desempeño del material reciclado.

Gráfica 32. Resumen grafico *upgrading* y *upcycling*



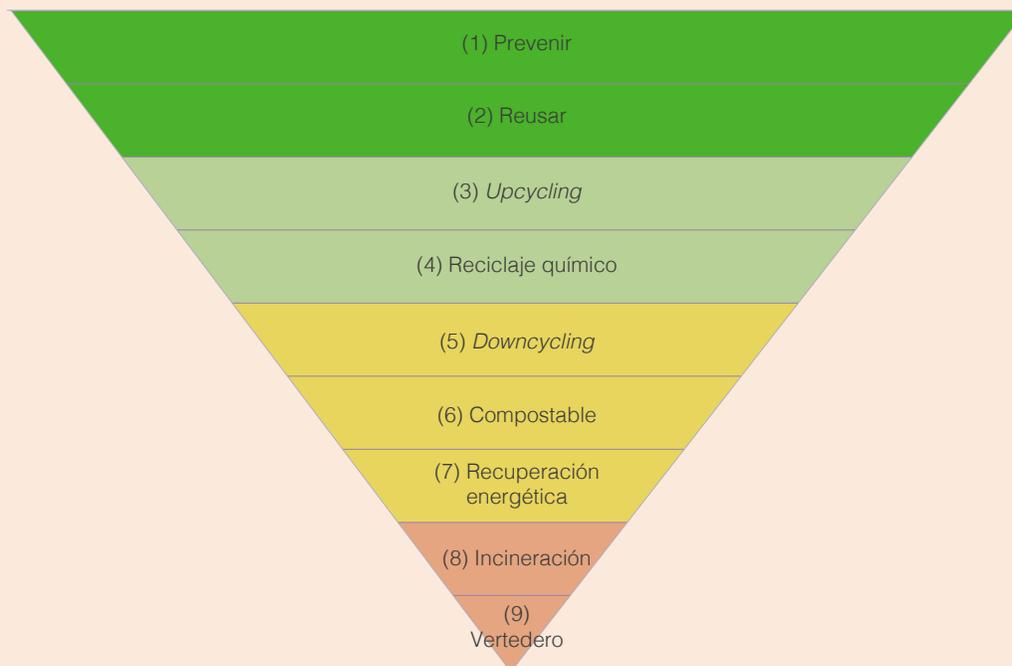
4.1.2 Reciclaje de materiales plásticos

El reciclaje es el proceso mediante el cual se aprovechan y transforman los residuos recuperados y se devuelve a los materiales su potencial de reincorporación como materia prima para la fabricación de nuevos productos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Al igual que el metal y el vidrio, los plásticos son, en su mayoría, técnicamente reciclables (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2004). Sin embargo, para realizar este proceso hay numerosos obstáculos técnicos y económicos que afrontar; por ejemplo, las incompatibilidades

entre los diferentes tipos de polímeros representan un reto en el proceso, ya que una pequeña cantidad de material incompatible puede dañar un lote completo de material reprocesado.

Antes de abordar una tecnología de reciclaje se debe tener presente la jerarquización de las prioridades, como se muestra en la gráfica 33, de manera que se agote el orden propuesto antes de continuar con algunas de las alternativas presentadas en la escala inferior, evaluando siempre los aspectos ambientales y económicos de dichas alternativas.

Gráfica 33. Jerarquía de priorización para la disposición o el aprovechamiento de materiales



Reciclaje mecánico

Casi todos los plásticos pueden reciclarse con éxito para segundas aplicaciones. Una vez limpios y triturados, los materiales pueden usarse en dicha forma o ser granulados para poder usarlos en procesos posteriores de transformación de acuerdo con sus distintas aplicaciones.

Por lo general, el reciclaje mecánico consta de los siguientes pasos:

- Separación
- Clasificación
- Reducción de tamaño
- Lavado
- Secado
- Densificación
- Peletización
- Filtrado
- Empaque
- Control de calidad

A su vez, el reciclaje mecánico se divide en primario y secundario según la fuente del residuo (Al Salem *et al.*, 2009).

a. Reciclaje primario: reciclaje mecánico de plásticos posindustriales y poscomerciales

El reciclaje primario de plásticos es aquel que aprovecha los materiales residuales y los reincorpora en el mismo producto o aplicación sin que estos hayan salido del control del proceso productivo. Este tipo de reciclaje es ampliamente utilizado por empresas productoras de artículos plásticos. Como todo proceso de manufactura, el proceso de manufactura de los plásticos no es 100 % eficiente, por lo que una parte de la materia prima que ingresa no se convierte en producto terminado por razones como arranques o paradas de producción, ineficiencias propias del proceso (retales, cortes y sobrantes) y no cumplimiento de los parámetros de calidad. Estos materiales, por lo general, al estar dentro del control de planta de producción posindustrial, pueden reincorporarse de nuevo al proceso productivo, lo cual minimiza los desperdicios y hace más eficiente el uso del material dentro de un ciclo cerrado.

Una variante del reciclaje primario es el que aprovecha el material poscomercial; es decir, material que es utilizado para la gestión comercial y logística de un producto principal —como plástico *stretch*, cajas distribuidoras, sacos, entre otros— que por lo general está relacionado con empaque secundario que no se encuentra en contacto directo con el producto. El material poscomercial cumple su propósito una vez entra en las cadenas de distribución donde es recolectado sin que llegue a rellenos o al público en general, por lo que es más controlado. En ocasiones, este material puede reutilizarse en su aplicación original, caso en el que se considera reciclaje primario.

b. Reciclaje secundario: reciclaje mecánico de plásticos posconsumidor

A diferencia del reciclaje primario, el reciclaje secundario refiere al uso de materiales recuperados en otras aplicaciones diferentes a la inicialmente concebida —es decir, en un ciclo abierto— y puede categorizarse como *downgrading* o *upgrading* dependiendo de las propiedades que se obtengan de este proceso. Por lo general, el reciclaje secundario tiende a ser en su mayoría del tipo *downgrading*; por ejemplo, en el reciclaje mecánico de material de empaque (HDPE, LDPE y PP) cuando con su mezcla se fabrican productos como madera plástica.

Reciclaje químico o reciclaje terciario

Cuando no es posible realizar la recuperación de los materiales plásticos por vía mecánica —bien sea por razones técnicas, económicas o sanitarias—, el reciclaje químico tiene sentido. Estos casos se presentan cuando se tiene una alta contaminación con sustancias químicas orgánicas e inorgánicas, cuando hay un alto grado de deterioro en las propiedades mecánicas o cuando por su composición no es posible una fácil separación; por ejemplo, en productos multimaterial o multicapa.

El reciclaje químico permite eliminar colorantes y pigmentos, lograr calidades aptas para contacto con alimentos dependiendo de la tecnología, volver a obtener materiales grado virgen y, con algunas tecnologías, manejar plásticos mezclados y contaminados. Este tipo de reciclaje implica elevadas inversiones, alto nivel tecnológico y una cadena de suministro robusta, así como cercanía con los usuarios de los productos que genera.

Las tecnologías para reciclaje químico se dividen en tres grupos: de purificación, de descomposición y de conversión.

En las tecnologías de purificación por solvolisis el polímero se disuelve con solventes potentes con los que se filtra el polímero y se recupera el solvente para su reuso. En la actualidad, esta tecnología no cuenta con una fuente de materia prima atractiva y requiere materiales limpios.

En las tecnologías de descomposición por depolimerización se devuelven los polímeros a sus unidades primordiales o monómeros. Esta tecnología es adecuada para polímeros policondensados —como PET, PA y PLA— y requiere que los materiales estén separados, pero no necesariamente limpios.

En las tecnologías de conversión por pirolisis y gasificación se convierten los polímeros en gases, monómeros y otros elementos que pueden usarse como combustible o insumos para otras industrias. Esta tecnología permite usar materiales mezclados.

Reciclaje energético o reciclaje cuaternario

Todos los residuos plásticos que no son susceptibles de aprovechamiento a través de reciclaje mecánico o químico pueden utilizarse como combustible debido a su alto valor energético cercano al del carbón (Al Salem *et al.*, 2009). Ya que los residuos plásticos no son otra cosa que hidrocarburos derivados del petróleo o del gas natural, la recuperación de energía puede ser eficaz en función de los costos de recuperar el valor intrínseco de los residuos plásticos (Ryszard Wasilewski, 2013).

Este tipo de aprovechamiento siempre deberá tenerse en cuenta, ya que hasta el momento no se ha demostrado que sea factible, ni técnica ni económicamente, poder reciclar el 100 % de los materiales plásticos por vía mecánica o química. Esto indica que no existe una única vía para el aprovechamiento de los materiales plásticos. Así, todas las posibilidades son complementarias y tienen sentido en la medida en la que se hayan respetado las diferentes jerarquías de disposición.

4.2 Control de calidad y propiedades de los materiales plásticos

4.2.1 Control de calidad

La evaluación y el control de calidad de un producto es uno de los aspectos más importante en todos los sectores de fabricación industrial. Esto es particularmente cierto para los materiales reciclados cuyo mercado aún se ve obstaculizado por muchas barreras; una de las principales es la percepción que se tiene de un material reciclado: de baja calidad, inconsistente, falto de trazabilidad y de bajo precio.

La calidad de una materia prima plástica —independientemente de si su fuente es reciclada o virgen— parte del conocimiento del proceso productivo y de las características —físicas, químicas y de desempeño— del material, así como del conocimiento de los procesos productivos de los clientes que la usan y de la forma en la que se negocian las variables críticas o de importancia. Es decir, es un proceso de concertación en el cual ambas partes, cliente y proveedor, acuerdan unos términos de negociación bajo los cuales el material es apto para la aplicación, funcional para el proceso y económicamente viable.

Los requisitos de calidad dependen directamente de las aplicaciones de los productos de plástico; por ejemplo, en artículos en contacto con alimentos o bienes duraderos, en electrónica y automóviles o en bienes de consumo como cepillos y escobas. Por lo tanto, toda empresa que quiera convertirse en proveedora de materias primas plásticas fabricadas a partir de material reciclado deberá identificar su nicho de mercado, tipología de clientes y requerimientos para determinar qué infraestructura requiere para asegurar el control de la calidad de la materia prima que ofrece.

El control de calidad suele hacerse por lotes de producción. Un lote de producción puede referirse a un tiempo de producción por horas, a su peso o a cualquier otra variable que sea representativa

Competencias a desarrollar:

- Identificar los controles de calidad y las propiedades de los materiales plásticos.



del proceso. Sea cual sea el criterio que se tome, el control de calidad comprende la toma de una muestra a ese tamaño de lote, el cual necesita estar debidamente identificado con la información necesaria y suficiente que permita hacer trazabilidad al lote; es decir, con fecha de producción y hora, equipo de producción, condiciones de operario, entre otros aspectos. La trazabilidad es una de las características más apreciadas por los clientes dado que en caso de que se presente algún problema permite apoyar la investigación de la causa, asociar el problema a un día, máquina y turno, centrar esfuerzos y contener otros posibles problemas con otros clientes.

Las muestras tomadas de los lotes requieren pruebas realizadas bajo condiciones estándar, normalmente en un laboratorio. La cantidad de pruebas a realizar será el resultado del proceso de negociación con los clientes; mientras más intensivos sean en requerimientos, más pruebas serán necesarias. La realización sistemática de pruebas de laboratorio permite el levantamiento de información a la que se le puede realizar el tratamiento estadístico de datos —con promedios, tendencias, varianza, entre otros— que sirve para elaborar una ficha técnica del producto. Así, la ficha técnica del producto se convierte en la especificación de este y, luego de la validación de los clientes, sirve para determinar si el lote se encuentra dentro o fuera de las especificaciones.

Los controles de calidad pueden ser tan básicos o sofisticados como la aplicación lo exija y se pueden agrupar, de manera general, en tres niveles relacionados con lo que se desea verificar. Estos comprenden desde pruebas básicas, como color o densidad, hasta pruebas avanzadas, como espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) o GC-MS. A continuación se describen los niveles de sofisticación de un laboratorio de control de calidad de materias primas plásticas.

Laboratorio con capacidades básicas

Debería estar en capacidad de medir:

- Densidad de empaque
- Índice de Fluidéz (MFI)
- Color
- Densidad del producto

Laboratorio con capacidades intermedias

Debería estar en capacidad de medir:

- Propiedades de tensión y elongación
- Propiedades de impacto
- Contenido de cargas

Laboratorio con capacidades avanzadas

Debería estar en capacidad de medir:

- Calorimetría diferencial de barrido (DSC)
- Infrarrojo
- GC-MS
- Muchas otras dependiendo del nivel de exigencia que sea solicitado por los clientes y del valor que ellos le den a este tipo de control

De esta manera es posible pasar de ser un proveedor de material reciclado que desconoce las propiedades de sus productos a ser un proveedor de materias primas controladas y certificadas cuya

fFuente proviene de material reciclado. Esto implica que los productos con controles más estrictos necesariamente tendrán un costo mayor por el tipo de inversiones y esfuerzos que implica el aseguramiento de su calidad, lo que deja de lado la falsa idea alrededor del reciclado como “barato”.

4.2.2 Propiedades generales de los materiales plásticos

Las propiedades y características de la mayoría de los plásticos, aunque estas no siempre se cumplen en determinados plásticos especiales, son:

- Fáciles de trabajar y moldear.
- Bajo costo de producción.
- Baja densidad cuando se comparan con metales o vidrios.
- Suelen ser impermeables.
- Buenos aislantes.
- Aceptables aislantes acústicos.
- Buenos aislantes térmicos, aunque la mayoría no resisten temperaturas muy elevadas.
- Resistentes a la corrosión y a muchos factores químicos dependiendo del tipo de polímero.

En específico, un material plástico puede caracterizarse por sus propiedades físicas, químicas y de desempeño, muchas de las cuales se encuentran estandarizadas bajo normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), de la Organización Internacional de Normalización (ISO) o de la Norma Técnica Colombiana (NTC).

Tabla 19. Propiedades más relevantes de los materiales plásticos y sus normas

Categoría	Nombre	Normas / Estándares
Propiedades térmicas	Temperaturas de fusión y cristalización de polímeros mediante un DSC	ASTM D3418-15
	Análisis de composición por termogravimetría (TGA)	ASTM D6370-99(2019) - ASTM D3850-19
	Tiempo de inducción a la oxidación (OIT)	ASTM D3895-14
	Temperatura de flexión bajo carga	ISO 75-1,2 y 3:2013 - ASTM D648-16 NTC 493-2004
	Temperatura de reblandecimiento Vicat	ISO 306:2013 - NTC 4169-1:1997 y NTC 4169-2:1997 - ASTM D1525-17e1
Propiedades reológicas	Índice de Fluidéz de Materiales Termoplásticos (MFI)	ASTM D1238-13 - ISO 1133-1:2011 NTC 3576-2009
	Reometría rotacional	ISO 6721-10:2015 - ASTM D4440-15
	Reometría capilar	ASTM D3835-16

Categoría	Nombre	Normas / Estándares
Caracterización de materiales	Espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	ASTM E1252-98(2013) - ASTM D3677-10(2019)
	GC-MS	Varios
Propiedades físicas	Dureza Shore D	NTC 467-2006 - ASTM D2240-15e1
	Densidad de plásticos	ASTM D792-13 - ISO 1183-1:2012 NTC 907-2006
	Resistencia al impacto Izod	SO 180:2000 - ASTM D256-10e1
	Propiedades en flexión de plásticos	ASTM D790-17 - ISO 178:2010
	Contenido de resina de materiales reforzados	ASTM D2584-11
	Propiedades en tensión de plásticos	NTC 595-2007 - ASTM D638-14 ISO 527-1:2012
	Propiedades en compresión de plásticos	ASTM D695-15 - ISO 604:2002



4.2.3 Actividad 5. Proceso de economía circular

Organice de manera lógica las etapas del proceso presentadas a continuación de manera que se desarrolle un proceso de economía circular que además sea ambientalmente adecuado.

- Se calcula que la inversión en mano de obra, ensayos de laboratorio, infraestructura y logística se compensará con creces si se logra mantener el negocio con el cliente potencial.
- En un gestor de plásticos se identifica que cada mes se generan cerca de 10 toneladas de plástico de RAEE.
- Por la apariencia del material, parece que el ABS tiene el mayor potencial de aprovechamiento por ser el material más limpio y homogéneo.
- Del plástico generado se cuantifica que 6 toneladas corresponden a ABS, 2 toneladas a HIPS, 1 tonelada a PC y el resto a otros plásticos.
- El ABS puede usarse en hilos de impresión 3D, autopartes, piezas para AEE, entre otros; el material generado podría tener características adecuadas para estas aplicaciones.
- El cliente potencial, la empresa que produce la aplicación, necesita asegurar ciertas cantidades de material plástico que, además, cumplan sus criterios de calidad (propiedades).
- Se logra así un reciclaje de ciclo abierto. Si se fabrican piezas para AEE, estas regresarán al final de su ciclo de vida útil y se logrará un modelo de economía circular.
- Se implementan las medidas necesarias, como controles en la separación del material y ensayos de propiedades del material plástico, para garantizar la calidad de cada lote entregado.

4.3 Técnicas para aumentar el valor agregado de los materiales plásticos

Competencias a desarrollar:

- Comprender algunas de las técnicas para aumentar el valor agregado de los materiales plásticos.



Dentro de las técnicas para valorizar los materiales reciclados existen varias categorías. Estas pueden dividirse, desde las de más baja inversión y tecnología requerida hasta las más sofisticadas, en:

- Técnicas de limpieza / filtración / peletización
- Técnicas que hacen uso de aditivos
 - Para proteger o minimizar el daño del material
 - Para compatibilizar diferentes materiales
- Técnicas de elaboración de compuestos
 - Uso de otras materias primas y aditivos para generar un nuevo compuesto con desempeño superior
- Técnicas que modifican los materiales
 - Extrusión reactiva

4.3.1 Técnicas de limpieza / filtración / peletización

Esta técnica se fundamenta en el tratamiento de materiales separados por tipo o familia similar y asegura la limpieza de elementos extraños —como metales, papel y etiquetas— como requisito previo al procesamiento. A su vez, considera que el material peletizado y filtrado en la extrusora tendrá unas propiedades más estables y con un mejor desempeño para los clientes que un material simplemente molido. De hecho, muchos procesos de transformación son sensibles al uso de material solo molido, lo cual tiende a causar inestabilidades, ineficiencias o problemas de calidad. La técnica de limpieza / filtración / peletización es la más básica y sigue los pasos que comprende el reciclaje mecánico, los cuales se presentan en la gráfica 34.

Gráfica 34. Reciclaje mecánico



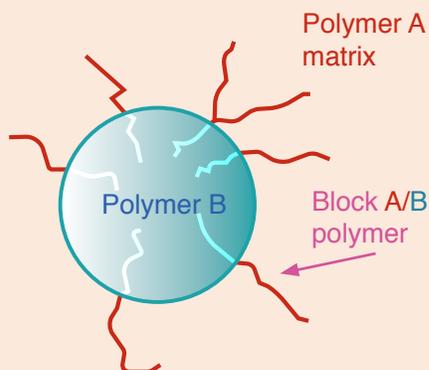
4.3.2 Técnicas que hacen uso de aditivos

En algunas ocasiones, la separación y limpieza del material no es suficiente, por lo que se requiere la incorporación de aditivos que ayuden a la compatibilización cuando no se logra una separación efectiva de los materiales plásticos. El objetivo principal de la compatibilización es aumentar la adhesión entre los materiales al igual que mejorar la dispersión; de esta manera se mejora el desempeño mecánico del material obtenido y el aspecto superficial de los productos fabricados. Dentro de los compatibilizantes se pueden diferenciar tres categorías: uso de copolímeros de bloque (no reactivos), uso de copolímeros funcionales reactivos (formación *in situ* de copolímeros de bloque) y uso de copolímeros polares no reactivos (interacción específica por polaridad).

Uso de copolímeros de bloque

El principio de compatibilización mediante copolímeros en bloque o injertados se muestra en la gráfica 35. En este caso, el agente compatibilizante actúa como un tensioactivo que migra a la interfaz para reducir la tensión superficial. Como resultado se obtiene una mejor adhesión entre los materiales y una mejor dispersión de la fase dispersa en la matriz. Por lo general, la cantidad de agente compatibilizador es alta, a veces de más del 5 %, comercialmente no se encuentran muchos copolímeros de bloque disponibles para todos los polímeros y estos son costosos.

Gráfica 35. Principio de compatibilización por copolímero en bloque



Los bloques rojos son compatibles con el polímero A (matriz) y los bloques azules son compatibles con el polímero B (fase dispersa).

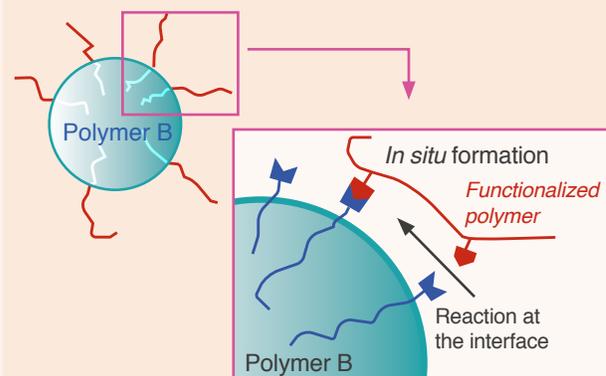
Un ejemplo del uso de copolímeros de bloque es la **compatibilización de ABS/PS**, mezcla proveniente de RAEE que es descrita en *Compatibilization of HIPS/ABS Blends From WEEE by Using Styrene- Butadiene Rubber (SBR)* (Vázquez y Barbosa, 2018). En esta mezcla se usó caucho estireno-butadieno (SBR, por sus siglas en inglés) ARPOL 1502. Esta compatibilización mostró ser efectiva para mezclas donde el HIPS es el componente mayoritario (HIPS80/ABS20), ya que la adición del 2 % de compatibilizante SBR incrementó la resistencia en 244 % y la tenacidad en 186 % en ensayos de resistencia mecánica a la flexión.

En este trabajo los autores concluyeron que, por una parte, el SBR en una concentración del 2 % es buen compatibilizante para mezclas de plásticos de RAEE donde el HIPS es el componente mayoritario, ya que hay una mejora significativa en las propiedades; por otra parte, en las mezclas donde el ABS es el componente mayoritario, el ABS no compatibiliza debido a que se generan burbujas de la degradación del ABS que afectan el desempeño final del compuesto.

Uso de copolímeros funcionales reactivos

El principio de acción de estos agentes es reaccionar en la interfaz para crear justo en el momento del procesamiento *in situ* un copolímero de bloque injertado por reacción entre grupos funcionales de los diferentes polímeros. El copolímero funcionalizado es miscible con la matriz y puede reaccionar con grupos funcionales de la fase dispersa (Murphy, 2001), tal como se muestra en la gráfica 36. Entre las ventajas de este tipo de agentes se encuentra que su reactividad es ajustable, que cuentan con una alta eficiencia y que comercialmente son más económicos y comerciales que los copolímeros en bloque.

Gráfica 36. Principio de acción por grupos funcionales reactivos



Entre los compatibilizantes reactivos se encuentran:

- **Polímeros maleicos:** es la familia más amplia de los polímeros funcionales que hacen uso del anhídrido maleico, el cual también es usado para incrementar la adherencia de los plásticos al metal, mejorar la cohesión entre un polímero y cargas —por ejemplo, hidróxido de aluminio (también conocido como trihidrato de aluminio o ATH), madera y cargas orgánicas—, mejorar la adhesión entre el polímero y la fibra de vidrio en termoplásticos y compuestos, y modificar el impacto.
- **Polímeros epoxidados:** son polímeros modificados principalmente por metacrilato de glicidilo, los cuales son muy reactivos con grupos NH_2 , anhídridos, ácidos y alcoholes. Se recomiendan para compatibilizar poliésteres, como PET y PBT, y polímeros olefínicos o elastómeros.
- **Copolímeros polares no reactivos:** en estos casos el compatibilizador debe ser compatible con una de las fases —por lo general, no polar— y generar interacciones específicas con la otra fase.

Ejemplo de este tipo de compatibilización es la mezcla ABS/PC, la cual puede realizarse mediante el compatibilizante Fine-Blend® de la empresa Fine-Blend Compatilizer Jiangsu Co. LTD., que ha desarrollado opciones para compatibilizar ABS/PC para resinas recicladas a virgen (Rosato, 2019). También se han analizado mezclas 70 % PC/30 % ABS con compatibilizante a base de

terpolímero estireno-acrilonitrilo-anhídrido maleico (SAM-002) o compatibilizante terpolímero estireno-acrilonitrilo-glicidil metacrilato (SAG) variando el glicidil metacrilato (GMA; SAG-001, SAG-005).

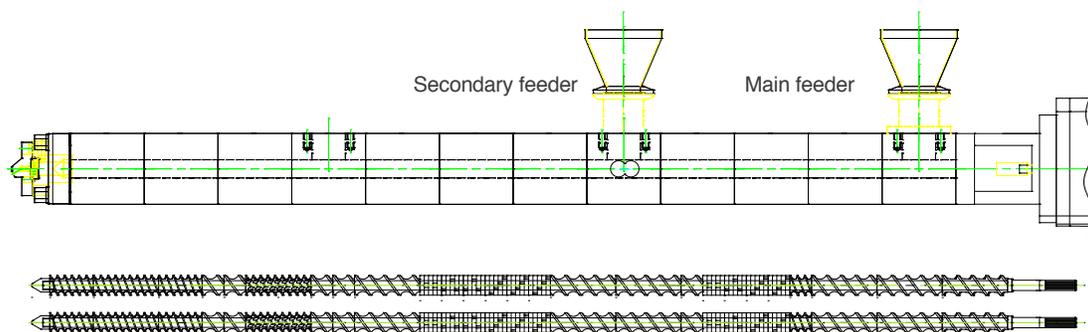
4.3.3 Técnica de elaboración de compuestos: *compounding*

El *compounding* es el proceso de tomar materiales plásticos vírgenes o reciclados y modificarlos con varios aditivos según una fórmula para obtener características o propiedades específicas de color, propiedades y rendimiento que buscan cumplir un desempeño específico. Una vez mezclados los materiales se obtiene una nueva materia prima con propiedades definidas, conocida como *blend* o mezcla.

Por lo general, el *compounding* se realiza en sistemas de extrusión doble husillo (ver gráfica 37) debido a que esta tecnología favorece de manera significativa el mezclado en comparación con una extrusora monohusillo, y a que brinda una versatilidad de configuraciones que solo es posible con este sistema. Así es posible realizar mezclas complejas con plástico, como fibras, altas concentraciones de cargas, líquidos, entre otros.

Un proceso de esta naturaleza requiere de conocimientos profundos del proceso de mezclado y de los materiales y aditivos. A cambio, brinda un sinnúmero de posibilidades para fabricar compuestos a la medida para aplicaciones específicas, lo cual difícilmente será replicable por su competencia y será una barrera tecnológica para esta.

Gráfica 37. Extrusora doble husillo modular para la fabricación de mezclas a la medida



4.3.4 Técnica de modificación por extrusión reactiva

La extrusión reactiva es un método que combina los procesos químicos tradicionalmente separados —síntesis o modificación de polímeros— y la extrusión —plastificación, mezcla y conformación— en un único proceso realizado en una extrusora (Hopmann *et al.*, 2017). De esta manera se mejora el desempeño de los plásticos y se obtienen nuevos productos fabricados a medida gracias a la mejora de la interacción entre los plásticos y los aditivos o cargas incorporados. Por lo general, en este proceso se usan extrusoras doble husillo, como la presentada en la sección anterior. En este caso, al interior de la extrusora se busca la generación de reacciones químicas, como poliadición, policondensación, copolimerización

por radicales libres, *grafting*, polimerización iónica y aniónica e hidrólisis.

Un ejemplo de esta técnica es el **reciclaje de ABS por extrusión reactiva** presentado por Wang *et al.* en *Recycling of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Copolymers From Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Through Using an Epoxy-Based Chain Extender (2015)*. En este reciclaje se realiza la extrusión reactiva de ABS reciclado y virgen usando un extendedor de cadena llamado Joncryl-ADR-4370S (CE), el cual es un oligómero multifuncional estireno-acrílico con un grupo funcional epoxi que reacciona con el grupo final carboxilo del ABS. La extrusión reactiva mejoró las propiedades de los materiales reciclados y recuperó las propiedades que se perdieron durante el reciclaje.



4.4 Técnicas de eliminación de plásticos con retardantes de llama bromados clasificados como contaminantes orgánicos persistentes

Las mejores técnicas disponibles (MTD) para la gestión y eliminación de fracciones peligrosas se definen a menudo a nivel internacional o nacional (Bill *et al.*, 2019; Stockholm Convention, s. f.). Sin embargo, en muchas regiones del mundo, estas MTD no son accesibles por el tipo de infraestructura requerida; por ejemplo, los incineradores o los rellenos de residuos peligrosos no existen. Identificar las mejores soluciones alternativas es a menudo un desafío, ya que los impactos a largo plazo de las soluciones subóptimas son difíciles de evaluar y comparar.

4.4.1 Coprocesamiento de desechos peligrosos en hornos de cemento

El coprocesamiento implica el uso de los desechos de los procesos de fabricación para recuperar energía y recursos reduciendo el uso de combustibles convencionales y materias primas mediante su sustitución. Esto tiene total sentido en las industrias que requieren gran cantidad de recursos como fuente de energía o combustible, como la industria del cemento y concreto. En este caso, el coprocesamiento de los desechos peligrosos en los hornos de cemento permite la recuperación del valor energético y mineral de los desechos mientras se fabrica el cemento, lo cual evita el uso de combustibles fósiles como carbón o gas (Convenio de Basilea, 2011).

El coprocesamiento es un concepto de desarrollo sostenible basado en los principios de la ecología industrial que se centra en el papel potencial de la industria para reducir las cargas ambientales a lo largo de todo el ciclo vital del

Competencias a desarrollar:

- Identificar técnicas de eliminación de plásticos con BFR clasificados como COP.



producto (Convenio de Basilea, 2011). Uno de los objetivos principales de la ecología industrial es convertir los desechos de una industria en la materia prima de otra. En el sector del cemento, el uso de desechos como combustibles y materias primas es un ejemplo positivo de visión de futuro. Según el Convenio de Basilea, esto constituye una operación “que puede llevar a la recuperación de recursos¹³, el reciclado, la regeneración, la reutilización directa u otros usos” en las categorías R1 —utilización como combustible u otros medios de generar energía— y R5 —reciclado o recuperación de otras materias inorgánicas— de la parte B del anexo IV del Convenio.

Es de vital importancia que el coprocesamiento de los desechos peligrosos en los hornos de cemento se lleve a cabo siempre cumpliendo con las MTD¹⁴ y que se cumplan los requisitos establecidos de control de alimentación, proceso y emisión; en este contexto, la prevención o reducción de la formación y consiguiente liberación de COP involuntarios. Para ello, en el artículo 5 del Convenio de Estocolmo sobre COP, la Secretaría del Convenio ha publicado una guía de MTD y directrices provisionales sobre mejores prácticas ambientales. Otras fuentes de especial relevancia son los documentos de referencia sobre MTD de la Comisión Europea (BREF, por sus siglas en inglés) que se han publicado sobre la fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio (EIPPCB, 2010, citado por Convenio de Basilea, 2012), sobre el sector del tratamiento de desechos (EIPPCB, 2006, citado por Convenio de Basilea, 2012) y sobre los principios generales de supervisión (EIPPCB, 2003, citado por Convenio de Basilea, 2012).

13. De acuerdo con la sentencia del Tribunal Europeo de Justicia del 13 de febrero de 2003 dictada en el caso C-458/00.

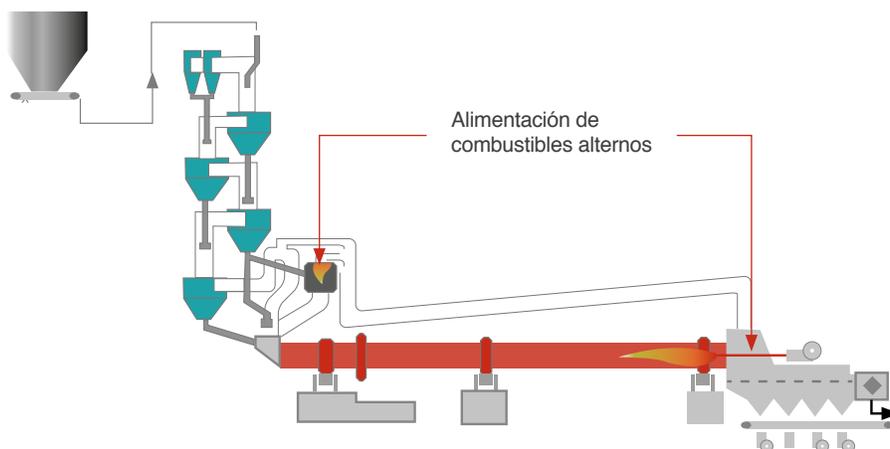
14. Los hornos de eje vertical no se deben considerar como una opción de MTD (PNUMA, 2007). Muchas plantas que tienen hornos de eje vertical no cuentan con controles ambientales y la tecnología vigente impide el uso eficiente de controles modernos de polvo y otras emisiones (Karstensen, 2006, citado por Convenio de Basilea, 2012).

El coprocesamiento de residuos en plantas cementeras aporta beneficios ambientales, sociales y económicos (Cortinas de Nava, 2003), como se muestra en la tabla 20 y la gráfica 38.

Tabla 20. Beneficios del coprocesamiento

Beneficios ambientales
Reducción en consumo de combustibles no renovables.
Alternativa para la disposición ambientalmente segura de algunos residuos, tanto municipales como industriales, que evita la contaminación de mantos acuíferos, suelos, ríos y mares.
Disminución de las emisiones globales de CO ₂ a la atmósfera.
Recuperación de la energía contenida en residuos.
No generación de residuos adicionales, como cenizas o subproductos.
No aumento en las emisiones de los hornos de cemento con respecto al uso de combustibles convencionales.
Beneficios sociales
Disminución de un pasivo ambiental para futuras generaciones, como es la contaminación por residuos.
Manejo regional y controlado de residuos que disminuye riesgos y costos.
Colaboración a altos estándares de seguridad en clasificación, manejo y disposición de residuos.
Beneficios económicos
Aprovechamiento de la infraestructura existente, la industria cementera nacional.
Incremento en la competitividad del sector y la cadena productiva al optimizar el costo de energéticos.

Gráfica 38. Horno cementero con capacidad de coprocesamiento



Características

- Altas temperaturas hasta 2.200 °C.
- Alta permanencia de los gases, entre 4-10 segundos.
- Alta permanencia del material, mayor a 20 minutos.
- Cenizas incorporadas en clínker.
- Ambiente alcalino.
- Sofisticado sistema de filtrado de gases.
- Garantizan una combustión completa de los residuos.
- No se generan cenizas porque se incorporan en el clínker.
- Los gases de combustión al atravesar la torre son limpiados por la materia prima del proceso.
- En las plantas se cuenta con sistemas de monitoreo continuo de emisiones CEMS, por sus siglas en inglés que permiten tomar acciones de control garantizando una operación limpia.

4.4.2 Incineración de residuos peligrosos

La incineración a temperaturas muy altas, alrededor de 1.100 °C, destruye sustancias orgánicas peligrosas, incluidos los BFR. Los incineradores de residuos peligrosos funcionan a estas temperaturas e implementan un control de emisiones de última generación para

eliminar gases tóxicos y metales pesados. En la actualidad, la incineración de plásticos que contienen sustancias como BFR y metales pesados se considera una MTD.

Es indispensable utilizar las MTD en este proceso, pues la incineración de fracciones de plástico que contienen BFR o PVC en

incineradores sin MTD o su uso como combustibles alternativos pueden conducir a varios problemas, ya que —debido al efecto de retardantes de llama de los halógenos— la combustión puede ser incompleta. Esto es a menudo un problema cuando las temperaturas no son lo suficientemente altas y no se logra la destrucción completa de los contaminantes. Por lo tanto, esta alternativa no se recomienda debido a la falta de control que se tiene sobre la misma.

Además, se pueden formar gases ácidos, HCl y HBr, que son corrosivos y pueden dañar la infraestructura en la que se incinera el plástico, especialmente si los niveles de halógenos son superiores al 1 % en plásticos con BFR y PVC; sin embargo, esto puede remediarse incinerando pequeñas cantidades para mantener bajas las concentraciones de gases ácidos. En este caso es importante considerar el tratamiento de gases de combustión —lavado seco o semiseco con absorbentes básicos— para eliminar gases ácidos y otros COP que puedan generarse de forma no intencional, como dioxinas y furanos clorados y bromados.

4.4.3 Rellenos de seguridad para residuos peligrosos

Los rellenos de seguridad están equipados con mecanismos de control específicos para evitar que las sustancias peligrosas se dispersen en el ambiente. Estos rellenos a menudo tienen compartimentos separados y están equipados con revestimientos impermeables y un sistema de recolección de lixiviados que deben manejarse adecuadamente. Los rellenos de seguridad proporcionan una solución de eliminación viable para BFR y plásticos que contienen metales pesados.

Los rellenos de seguridad para residuos peligrosos son diferentes a los rellenos sanitarios, que están equipados con un revestimiento impermeable y un sistema de control de lixiviados, los cuales pueden ser insuficientes para evitar que las sustancias peligrosas se dispersen en el ambiente. Aunque es mejor que la disposición incontrolada y la quema al aire libre, se debe evitar la eliminación de fracciones plásticas peligrosas en rellenos sanitarios.



4.5 Evaluación del capítulo

1

¿Un proceso de aprovechamiento que solo contempla el proceso de molienda del material puede considerarse como reciclaje mecánico?

a. Verdadero, pues la trituración es el paso clave de este tipo de reciclaje.

b. Falso, porque el reciclaje mecánico es primario y secundario.

c. Verdadero, pues no es posible reciclar material sin molienda.

d. Falso, porque debe incluir separación, limpieza u otros.

2

El reciclaje de una carcasa de aire acondicionado para fabricar posteriormente una pieza de nevera se considera como:

a. Bucle abierto porque no es la misma aplicación.

b. Bucle cerrado porque es la misma aplicación.

c. Bucle abierto siempre y cuando la pieza de nevera pueda reciclarse de nuevo en la misma pieza de nevera.

d. Bucle cerrado siempre y cuando la pieza de nevera pueda reciclarse de nuevo en la misma pieza de nevera.

3

El reciclaje de una carcasa de aire acondicionado para fabricar posteriormente una pieza de nevera se considera como:

a. *Upgrading* porque el precio es más alto.

b. *Downgrading* porque el precio es más bajo.

c. *Upgrading* porque la calidad del material no se pierde.

d. *Downgrading* porque la calidad del material se pierde.

4

¿Todos los productos reciclados exigen el mismo nivel de control de calidad?

a. Verdadero, porque el reciclaje debe ser de calidad.

b. Falso, porque el control depende del destino del material.

c. Verdadero, porque todo material reciclado tiene el mismo uso final.

d. Falso, porque no es posible obtener material reciclado de calidad.

5

¿Quién o qué define las propiedades a obtener en la materia prima plástica reciclada?

a. El fabricante.

b. El gestor.

d. El mercado.

d. La aplicación.

6

¿Son indispensables los aditivos para incrementar el valor del material reciclado?

a. Nunca.

b. Depende del material y la aplicación.

c. Solo para copolímeros de bloque.

d. Siempre.

7

¿Si en la empresa tengo una caldera a carbón, puedo usar los plásticos con BFR como combustible?

a. No es recomendable debido a la generación de contaminantes.

b. No es recomendable debido al bajo poder calorífico de los plásticos.

c. Se recomienda como reciclaje energético o cuaternario.

d. Se recomienda por el alto nivel energético de los plásticos.

8

¿Un relleno sanitario es la mejor forma de disponer las fracciones de plástico contaminadas con retardantes de llama?

a. Falso, pues no se asegura la contención de los contaminantes.

b. Falso, pues no se considera una estrategia económicamente viable.

c. Verdadero, pues es fácil contar con un relleno sanitario.

d. Verdadero, pues los plásticos deben ser desechados.

9

Señale la estrategia que **NO** asegura que una oportunidad de negocio de aprovechamiento de material plástico reciclado sea exitosa:

a. Asegurar una fuente constante de material y contar con infraestructura para la separación del mismo.

b. Contar con un sistema de control de los materiales y tener claro qué aplicación tendrá y sus requisitos.

c. Vender a precios más bajos y hacer *upgrading* de todos los materiales.

d. Capacitarse en el procesamiento de los materiales y entender las necesidades de los clientes.

10

¿El reciclaje químico compite con el mecánico?

a. Verdadero, porque no pueden aplicarse simultáneamente.

b. Falso, porque no son mutuamente excluyentes.

c. Verdadero, porque el reciclaje químico es contaminante.

d. Falso, porque el reciclaje químico es terciario.

4.6 Bibliografía

- Al Salem, S. M., Lettieri, P. y Baeyens, J. (2009). Recycling and Recovery Routes of Plastic Solid Waste (PSW): A Review. *Waste Manag.*, 29(10), 2625-2643.
- Bill, A., Gasser, M., Haarman, A., y Heinz, B. (2019). *Procesamiento de plásticos de RAEE: manual práctico*. SRI, Step, Swiss Confederation, EMPA y World Resources Forum. https://www.step-initiative.org/files/_documents/other_publications/Manual%20Plásticos%20RAEE%20Español-min.pdf.
- Cobo, S., Domínguez Ramos, A. y Irabien, A. (2018). From Linear to Circular Integrated Waste Management Systems: A Review of Methodological Approaches. *Resour. Conserv. Recycl.*, 135, 279-295.
- Convenio de Basilea. (2011). Directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento. Naciones Unidas, PNUMA y Convenio de Basilea. <http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/pub/techguid/cement/06a3r1s.pdf>.
- Convenio de Basilea. (2012). *Directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento*. PNUMA y Convenio de Basilea. <https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Convenio-de-Basilea-Directrices-tecnicas-sobre-coprocesamiento-de-RESPEL-en-hornos-de-cemento.pdf>.
- Cortinas de Nava, C. (2003). *Manual 3: valorización de residuos, participación social e innovación en su gestión*. Grupo Parlamentario del PVEM. http://cristinacortinas.org/Libros/3_valorizacion_de_residuos.doc.
- European Commission. (S. f.). *Circular Economy Action Plan* [página web]. https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm.
- Fenalco Antioquia. (2016). *Coprocesamiento: una alternativa sostenible* [presentación]. <https://es.slideshare.net/FenalcoAntioquia/coprocesamiento-una-alternativa-sostenible>.
- Forrest, M. (2016). *Recycling of Polyethylene Terephthalate*. https://www.researchgate.net/publication/304996595_Recycling_of_Polyethylene_Terephthalate.
- Gaustad, G., Olivetti, E. y Kirchain, R. (2012). Improving Aluminum Recycling: A Survey of Sorting and Impurity Removal Technologies. *Resour. Conserv. Recycl.*, 58, 79-87.
- Gaustad, G., Olivetti, E. y Kirchain, R. (2011). Toward Sustainable Material Usage: Evaluating the Importance of Market Motivated Agency in Modeling Material Flows. *Environ. Sci. Technol.*, 45(9), 4110-4117.
- GQSP Colombia. (2020). *Diagnóstico de requisitos y brechas de calidad y sostenibilidad: sector plástico*. GQSP, ONUDI, Confederación Suiza, Mincomercio y Colombia Productiva. https://gqspcolombia.org/wp-content/uploads/2020/08/Diagnóstico-sector-plástico_VF.pdf.
- Haupt, M., Vadenbo, C. y Hellweg, S. (2017). Do We Have the Right Performance Indicators for the Circular Economy?: Insight Into the Swiss Waste Management System. *J. Ind. Ecol.*, 21(3), 615-627.
- Hopmann, C., Adamy, M. y Cohnen, A. (2017). Introduction to Reactive Extrusion. *React. Extrus.*, 1-10.
- ISO. (2006). *ISO14044: gestión ambiental, análisis del ciclo de vida, y requisitos y directrices*.
- Karstensen, K. H., Kinh, N. K., Thang, L. B., Viet, P. H., Tuán, N. Đ., Toi, D. T., Hung, N. H., Quan, T. M., Hanh, L. D., y Thang, D. H. (2006). Environmentally sound destruction of obsolete pesticides in developing countries using cement kilns. *Environmental Science & Policy*, 9, 577-586.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2004). *Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica y manejo, aprovechamiento y disposición de residuos plásticos post-consumo*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Política Nacional de Gestión Integral de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://quimicos.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Politica-Nacional-para-la-Gestion-Integral-de-los-RAEE.pdf>.
- Murphy, J. (2001). *Additives for Plastics Handbook*. Elsevier.
- Pol, V. G. (2010). Upcycling: Converting Waste Plastics Into Paramagnetic, Conducting, Solid, Pure Carbon Microspheres. *Environ. Sci. Technol.*, 44(12), 4753-4759.
- Rosato, D. (2019). *Latest Advances in Recycling Compatibilizers & Additive Options*. <https://polymer-additives.specialchem.com/tech-library/article/recycling-compatibilizer-and-additive-options-advancing>.
- Ryszard Wasilewski, Z. (2013). Energy Recovery From Waste Plastics. *Chemik*, (5), 435-445.
- Shen, L., Worrell, E. y Patel, M. K. (2010). Open-Loop Recycling: A LCS Case Study of PET Bottle-To-Fibre Recycling. *Resour. Conserv. Recycl.*, 55(1), 34-52.
- Stockholm Convention. (2015). *Revised Draft Guidance on Best Available Techniques and Best Environmental Practices for the Recycling and Waste Disposal of Articles Containing Polybrominated Diphenyl Ethers Listed Under the Stockholm Convention*. En *Stockholm Convention, UNEP/POPS/COP.7/INF/22*. United Nations UNEP y Stockholm Convention. <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-COP.7-INF-22.English.pdf>.
- Stockholm Convention. (S. f.). *Recently Developed Drafts: Guidance on Best Available Techniques and Best Environmental Practices Relevant to the Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDES) Listed Under the Stockholm Convention* [página web]. <http://chm.pops.int/Implementation/NIPs/Guidance/IdanceonBATBEPfortherecyclingofPBDES/tabid/3172/>.
- Vázquez, Y. V. y Barbosa, S. E. (2018). Compatibilization of HIPS/ABS Blends From WEEE by Using Styrene-Butadiene Rubber (SBR). *J. Environ. Manage.*, 217, 381-390.
- Wang, J., Li, Y., Song, J., He, M., Song, J., y Xia, K. (2015). Recycling of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Copolymers From Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Through Using an Epoxy-Based Chain Extender. *Polym. Degrad. Stab.*, 112, 167-174.

CAPÍTULO

Resultados de las actividades y evaluaciones

5.1 Resultados capítulo 1



5.1.1 Actividad 1. Emparejamiento de conceptos

Empareje los conceptos enunciados en la columna izquierda con las definiciones propuestas en la columna derecha.

Convenio de Estocolmo sobre COP

Anexo A

COP

PBDE

Efecto en la salud humana

Sustancia tóxica y resistente a la degradación que se bioacumula, biomagnifica y puede transportarse largas distancias.

Protege la salud humana y el ambiente de los COP.

Los BFR clasificados como COP suelen afectar el sistema endocrino y algunos se han identificado como carcinogénicos

BFR clasificado como COP presente en algunos plásticos.

Establece la prohibición y eliminación del uso de sustancias como los BFR clasificados como COP.

5.1.2 Evaluación del capítulo

1

¿Qué es el Convenio de Estocolmo sobre COP?

a. Una ley para eliminar los plásticos en el mundo.

b. Un tratado para reducir la contaminación.

c. Un acuerdo para proteger la salud humana y el ambiente.

d. Un manual de buenas prácticas alrededor de los COP.

2

¿Dónde se pueden consultar los países miembros del Convenio de Estocolmo sobre COP?

a. En la página web del Convenio de Estocolmo sobre COP.

b. En Google.

c. En la página web del Ministerio de Ambiente.

d. En la página web de la Cancillería.

3

¿Dónde se pueden consultar los países miembros del Convenio de Estocolmo sobre COP?

a. Es un policía americano.

b. Es una sustancia contaminante con ciertas características.

c. Es una sustancia controlada por convenios internacionales.

d. Es una sustancia que al degradarse contamina y daña la salud.

4

Si tengo una sustancia que considero sospechosa, ¿cómo valido que sí es un COP?

a. Consulto los anexos del Convenio de Estocolmo sobre COP.

b. Miro el número CAS de la ficha de seguridad y consulto en Google.

c. Hago una consulta oficial al Ministerio de Ambiente.

d. Reviso la ficha técnica que debe declararlo.

5

Con relación al PBDE, Colombia tiene el compromiso de:

a. Prohibir su uso y eliminar sus existencias en el país.

b. Restringir su uso de acuerdo con las exenciones específicas.

c. Evitar su producción no intencional.

d. Reportar su uso a los países del Convenio de Estocolmo sobre COP.

6

Un retardante de llama es:

a. Un tipo de plástico que es resistente al calor y la temperatura.

b. Una sustancia que hace que las llamas se retrasen.

c. Una sustancia orgánica halogenada contaminante.

d. Un aditivo para aumentar la resistencia a la llama de ciertos materiales.

7

¿Todos los plásticos tienen COP?

a. Verdadero.

b. Solo aquellos que contienen retardantes de llama.

c. Solo aquellos que contienen halógenos.

d. Falso.

8

¿Un retardante de llama es necesariamente un COP?

a. Verdadero, todos los retardantes son COP.

b. Falso, solo los retardantes inorgánicos son COP.

c. Falso, solo aquellos establecidos por el Convenio de Estocolmo sobre COP son COP.

d. Falso, solo los retardantes usados en plásticos son COP.

9

Las siguientes sustancias son retardantes de llama clasificados como COP:

a. PBDE y trióxido de aluminio.

b. HBCD y TBBPA.

c. SCCP y PCB.

d. DecaBDE y PFOS.

10

Los efectos de los COP sobre el ambiente son:

a. Mínimos debido a su baja concentración.

b. Moderados, pues solo afectan a la vida acuática.

c. Graves debido a su toxicidad y capacidad de transporte.

d. Catastróficos, pues destruyen los ecosistemas.

11

Los sistemas que los COP suelen afectar con mayores efectos nocivos sobre la salud son:

a. Nervioso, endocrino y reproductor.

b. Ocular, respiratorio y osteomuscular.

c. Circulatorio, nervioso y óseo.

d. Digestivo, endocrino y excretor.

12

De los RAEE se puede decir que:

a. Siempre se encuentran contaminados con COP.

b. Solo los equipos anteriores al Convenio de Estocolmo sobre COP se encuentran contaminados.

c. Pueden estar contaminados o no con COP y deben gestionarse de manera adecuada.

d. Representan una categoría importante de COP no intencionales.

13

La gestión de RAEE en Colombia se realiza así:

a. Cualquier entidad puede gestionar RAEE.

b. Solo entidades con licencia ambiental pueden gestionar RAEE.

c. Las autoridades ambientales gestionan RAEE.

d. Los RAEE se exportan, ya que no existe capacidad nacional.

14

La gestión integral de RAEE puede resumirse así:

a. Se promueve el reuso y reciclaje de RAEE desde una visión empresarial integral.

b. Todos los materiales se reutilizan en un sistema de economía circular y de cero residuos.

c. Los aspectos ambientales se integran al balance económico de las empresas de reciclaje.

d. Se previenen y minimizan los residuos que, de generarse, se aprovechan, tratan o disponen.

15

La mejor forma de gestionar los plásticos de RAEE es:

a. Generando estrategias de reciclaje para todos los plásticos.

b. Reciclando aquellos que son seguros para la salud humana y el ambiente.

c. Disponiendo el plástico contaminado en rellenos sanitarios.

d. Disponiendo todo el material en rellenos de seguridad.

5.2 Resultados capítulo 2



5.2.1 Actividad 2. Análisis de materiales plásticos

Asigne a las siguientes frases un número del 1 al 6 de manera que el proceso siga un orden lógico de acuerdo a un análisis sistemático de materiales plásticos.

5

Al sumergir el plástico en agua salada, este flota.

1

El plástico es negro, liso y opaco. No se evidencia ningún tipo de marcación.

3

El resultado de la prueba anterior fue negativo así que se aplica acetona. El plástico parece derretirse y ponerse pegajoso, y su color sigue siendo negro.

6

Además del tipo de plástico, ahora se sabe que es poco probable que este tenga retardantes de llama.

4

Es posible concluir que el plástico es ABS de color negro.

2

Se aplica limoneno. Ahora el plástico se ve brillante y tiene un aroma cítrico. Su textura sigue siendo lisa.

5.2.2 Actividad 3. Separación de materiales en residuos de aparatos eléctricos y electrónicos

Asigne a las siguientes frases un número del 1 al 6 de manera que el proceso siga un orden lógico de acuerdo a un análisis sistemático de materiales plásticos.

5

Se sumerge el plástico obtenido en agua salada (1,1 kg/L).

2

Cada fracción de material que se obtiene de RAEE se ubica en un lugar diferente.

1

Se desensambla el lote de RAEE del que se quieren aprovechar los plásticos.

6

Se prepara el plástico que flotó para su posterior aprovechamiento.

3

Se llevan las fracciones plásticas obtenidas a molienda.

4

Se separan los pequeños materiales ferrosos y no ferrosos del plástico.

5.2.3 Evaluación del capítulo

1

Los siguientes son polímeros termoplásticos y, por ende, reciclables:

a. PC, PET y PTFE.

b. HIPS, baquelita y silicona.

c. ABS, PC y PP.

d. Poliéster, poliúrea y resinas epóxicas.

2

Se quiere utilizar PP para una aplicación de alto valor agregado en las aspas de una turbina; para esto, es importante que el material tenga:

a. Baja resistencia química.

b. Alta fricción.

c. Alta resistencia mecánica.

d. Carácter decorativo y funcional.

3

El documento *Procesamiento de plásticos de RAEE: manual práctico (2019)* muestra que los televisores CRT tienen un gran porcentaje de HIPS, mientras que los monitores CRT tienen mayor proporción de ABS; esto significa que:

a. En RAEE pueden encontrarse tanto HIPS como ABS.

b. Cada tipo de RAEE tiene una composición distintiva.

c. Es imposible obtener PC a partir de RAEE.

d. Los datos son incongruentes pues la tecnología CRT es la misma.

4

En una pieza plástica se ve la etiqueta “PS-HI-DD5-P(ELO)-FR(19)”; esta significa que:

a. La pieza está hecha de HIPS y tiene como retardantes de llama PBDE y sustancias de antimonio.

b. La pieza está hecha de HI y tiene BFR clasificados como COP al 19 %.

c. La pieza está hecha de PS y tiene como retardante de llama hidrato de alúmina en polvo.

d. La pieza está hecha de HIPS y tiene como retardantes de llama el PDDE al 5 % y el BFR al 19 %.

5

Una pieza plástica que se vuelve pegajosa al contacto con el limoneno y se rompe como respuesta al estrés mecánico probablemente está hecha con:

a. PE.

b. PC.

c. ABS.

d. PS.

6

Una pieza plástica que no reacciona con limoneno ni acetona, que flota en agua a 1 kg/L y cuya dureza es muy baja probablemente está hecha con:

a. PE.

b. PC.

c. ABS.

d. PS.

7

Se desea aprovechar tres toneladas (3.000 kg) de ABS por las que ofrecen un muy buen precio. Si en estas toneladas hubiera por error 50 kg de HIPS que no se separaron correctamente, entonces:

a. Las tres toneladas deberán coprocesarse porque se encuentran contaminadas.

b. El ABS es incompatible con el HIPS y, por ende, el material no podrá aprovecharse con alto valor agregado.

c. Será necesario limpiar primero las toneladas usando separación por densidad.

d. Podrá aprovecharse la oferta de igual manera y se favorecerá la economía circular.

8

Se desea aprovechar tres toneladas (3.000 kg) de ABS por las que ofrecen un muy buen precio. Si en estas toneladas hubiera por error 50 kg de PC que no se separaron correctamente, entonces:

a. Las tres toneladas deberán coprocesarse porque se encuentran contaminadas.

b. El ABS es incompatible con el PC y, por ende, el material no podrá aprovecharse con alto valor agregado.

c. Será necesario limpiar primero las toneladas usando separación por densidad.

d. Podrá aprovecharse la oferta de igual manera y se favorecerá la economía circular.

9

Se desea aprovechar tres toneladas (3.000 kg) de ABS por las que ofrecen un muy buen precio. Si en estas toneladas hubiera por error 50 kg de materiales contaminados con PBDE, entonces:

a. Las tres toneladas deberán coprocesarse porque se encuentran contaminadas.

b. El ABS es incompatible con el PBDE y, por ende, el material no podrá aprovecharse con alto valor agregado.

c. Será necesario limpiar primero las toneladas usando separación por densidad.

d. Podrá aprovecharse la oferta de igual manera y se favorecerá la economía circular.

10

Sobre la prueba de densidad usada como técnica para identificar y cuantificar BFR puede decirse que:

a. Permite cuantificar el contenido de retardantes de llama hasta en un 10 %.

b. Solo es indicativa del plástico con mayores cargas y no se puede usar para cuantificar.

c. No se recomienda su uso, pues expone a los operarios a riesgos químicos y mecánicos.

d. Ayuda a establecer la identidad de los retardantes de llama presentes en los plásticos.

11

Sobre la prueba de XRF usada como técnica para identificar y cuantificar BFR puede decirse que:

a. Cuantifica bromo elemental en un amplio rango, pero no confirma la presencia de COP.

b. Es muy peligrosa porque utiliza radiación ionizante y de alta energía.

c. Requiere un arduo entrenamiento, equipos e infraestructura especializada para su implementación.

d. Es garante de la presencia de retardantes de llama si el plástico tiene más del 1 % de bromo.

12

Sobre la prueba de GC-MS usada como técnica para identificar y cuantificar BFR puede decirse que:

a. Es una técnica económica y fácil de aplicar en planta por personal técnico capacitado.

b. Solo permite diferenciar entre plásticos con BFR y plásticos sin BFR.

c. Permite la detección de contaminantes al extraer, separar y cargar el plástico.

d. Confirma la identidad y cantidad de retardantes de llama en una muestra.

5.3 Resultados capítulo 3



5.3.1 Actividad 4. Conceptos clave

Complete las frases a continuación con los conceptos adecuados:

- El **Convenio de Basilea** y la Directiva RoHS son referentes internacionales que, entre otras cosas, establecen **valores límite** del contenido de PBDE en plásticos.
- El CIP es un procedimiento para asegurar que la exportación de sustancias peligrosas se realiza con **consentimiento informado** del país de destino.

- El uso de terminología unificada por diferentes actores se denomina **lenguaje común** y debe guardar alguna relación con la **normatividad vigente**.
- Las técnicas de XRF y GC-MS permiten caracterizar grupos estables o "cruces" para poder **distinguir** el plástico contaminado y, a su vez, **separar** el plástico libre de BFR clasificados como COP para su posterior aprovechamiento.

5.3.2 Evaluación del capítulo

1

Para un adecuado manejo de plásticos, inclusive aquellos provenientes de RAEE, es indispensable:

a. Poseer una licencia ambiental vigente.

b. Utilizar los criterios establecidos en el Convenio de Estocolmo sobre COP.

c. Separar e identificar los plásticos con XRF y GC-MS.

d. Considerar la normativa y los referentes internacionales.

2

Si desea exportar cierta cantidad de plástico cuyo contenido de PBDE es desconocido, usted debe:

a. Realizar la exportación sin ningún tipo de trámite.

b. Verificar que el plástico no está contaminado y realizar un CIP si corresponde.

c. Tramitar el procedimiento de CIP.

d. Abstenerse de realizar la exportación.

3

En Colombia los estándares WEEELabex y CENELEC aplican:

a. Como referentes internacionales que pueden apoyar la gestión de RAEE en Colombia.

b. Como estándares vinculantes debido a la firma del Convenio de Basilea.

c. Como normas de estricto cumplimiento, ya que Colombia pertenece a la OCDE.

d. Como criterios técnicos para la certificación de los gestores de RAEE.

4

En Colombia los estándares R2 y E-Stewards aplican:

a. Como referentes dados por el Convenio de Estocolmo sobre COP.

b. Como estándares vinculantes adoptados en el país.

c. Como criterios técnicos para la certificación de los gestores de RAEE.

d. Como normas de estricto cumplimiento, ya que Colombia pertenece a la OCDE.

5

Uno de los grandes problemas que afronta Colombia en la gestión de plásticos es:

a. La ausencia de un mercado interesado en aprovechar plástico.

b. Los altos niveles de contaminación de los plásticos en el país por PBDE.

c. La falta de capacidad para separar e identificar plásticos contaminados.

d. La normatividad ambigua para el licenciamiento ambiental de los gestores.

6

El documento que incluye la categorización de los diferentes AEE en Colombia es:

a. Convenio de Estocolmo sobre COP.

b. Convenio de Basilea.

c. Directiva RoHS.

d. Resolución 0076 de 2019.

7

El comportamiento estable a través del tiempo de la composición de los RAEE se fundamenta en:

a. Literatura científica y estudios estadísticos.

b. Persistencia de los PBDE.

c. Resistencia de los materiales plásticos.

d. Rápida innovación tecnológica.

8

Separar plásticos de RAEE durante su gestión tiene grandes ventajas, por ejemplo:

a. Los costos se reducen al tener el material de forma ordenada.

b. Se puede aprovechar el material en aplicaciones de mayor valor.

c. Se cumplen los requisitos de certificación de referentes internacionales.

d. Permite el uso de herramientas automatizadas y análisis de laboratorio.

9

Una de las debilidades de la gestión de plásticos sin identificarlos ni separarlos previamente es que:

a. Al gestionarse mayores cantidades surgen dificultades logísticas.

b. Al estar mezclados su valor comercial es mucho menor.

c. Los contaminantes pueden difundirse durante su posterior reciclaje.

d. No puede automatizarse y se requiere el desensamble manual.

10

Una de las debilidades de la gestión de plásticos sin identificarlos ni separarlos previamente es que:

a. Aumentan los costos de las licencias ambientales.

b. Las cantidades de plástico que pueden gestionarse disminuyen.

c. Se requieren bases de datos estadísticas como apoyo al proceso.

d. Impide darle al plástico contaminado un tratamiento diferenciado.

11

El aspecto clave a mejorar en la gestión de plásticos en Colombia desde el punto de vista ambiental es:

a. La capacidad de tratar diferenciadamente el plástico contaminado con BFR clasificados como COP.

b. La tecnología para eliminar el plástico proveniente de RAEE por métodos alternativos.

c. Los esquemas de recolección y transporte de los programas posconsumo.

d. Los métodos de compactación para optimizar el espacio de almacenamiento de los gestores.

12

El aspecto clave a mejorar en la gestión de plásticos en Colombia desde el punto de vista económico es:

a. La cantidad de plástico que se recicla para hacer sostenible un modelo circular.

b. El encadenamiento entre los gestores y aprovechadores de plástico.

c. La disponibilidad de aplicaciones para polímeros como ABS y HIPS.

d. Las brechas existentes entre gestores y sus programas posconsumo.

5.4 Resultados capítulo 4



5.4.1 Actividad 5. Proceso de economía circular

Organice de manera lógica las etapas del proceso presentadas a continuación de manera que se desarrolle un proceso de economía circular que además sea ambientalmente adecuado.

6

Se calcula que la inversión en mano de obra, ensayos de laboratorio, infraestructura y logística se compensará con creces si se logra mantener el negocio con el cliente potencial.

1

En un gestor de plásticos se identifica que cada mes se generan cerca de 10 toneladas de plástico de RAEE.

3

Por la apariencia del material, parece que el ABS tiene el mayor potencial de aprovechamiento por ser el material más limpio y homogéneo.

2

Del plástico generado se cuantifica que 6 toneladas corresponden a ABS, 2 toneladas a HIPS, 1 tonelada a PC y el resto a otros plásticos.

4

El ABS puede usarse en hilos de impresión 3D, autopartes, piezas para AEE, entre otros; el material generado podría tener características adecuadas para estas aplicaciones.

5

El cliente potencial, la empresa que produce la aplicación, necesita asegurar ciertas cantidades de material plástico que, además, cumplan sus criterios de calidad (propiedades).

8

Se logra así un reciclaje de ciclo abierto. Si se fabrican piezas para AEE, estas regresarán al final de su ciclo de vida útil y se logrará un modelo de economía circular.

7

Se implementan las medidas necesarias, como controles en la separación del material y ensayos de propiedades del material plástico, para garantizar la calidad de cada lote entregado.

5.4.2 Evaluación del capítulo

1

¿Un proceso de aprovechamiento que solo contempla el proceso de molienda del material puede considerarse como reciclaje mecánico?

a. Verdadero, pues la trituración es el paso clave de este tipo de reciclaje.

b. Falso, porque el reciclaje mecánico es primario y secundario.

c. Verdadero, pues no es posible reciclar material sin molienda.

d. Falso, porque debe incluir separación, limpieza u otros.

2

El reciclaje de una carcasa de aire acondicionado para fabricar posteriormente una pieza de nevera se considera como:

a. Bucle abierto porque no es la misma aplicación.

b. Bucle cerrado porque es la misma aplicación.

c. Bucle abierto siempre y cuando la pieza de nevera pueda reciclarse de nuevo en la misma pieza de nevera.

d. Bucle cerrado siempre y cuando la pieza de nevera pueda reciclarse de nuevo en la misma pieza de nevera.

3

El reciclaje de una carcasa de aire acondicionado para fabricar posteriormente una pieza de nevera se considera como:

a. *Upgrading* porque el precio es más alto.

b. *Downgrading* porque el precio es más bajo.

c. *Upgrading* porque la calidad del material no se pierde.

d. *Downgrading* porque la calidad del material se pierde.

4

¿Todos los productos reciclados exigen el mismo nivel de control de calidad?

a. Verdadero, porque el reciclaje debe ser de calidad.

b. Falso, porque el control depende del destino del material.

c. Verdadero, porque todo material reciclado tiene el mismo uso final.

d. Falso, porque no es posible obtener material reciclado de calidad.

5

¿Quién o qué define las propiedades a obtener en la materia prima plástica reciclada?

a. El fabricante.

b. El gestor.

d. El mercado.

d. La aplicación.

6

¿Son indispensables los aditivos para incrementar el valor del material reciclado?

a. Nunca.

b. Depende del material y la aplicación.

c. Solo para copolímeros de bloque.

d. Siempre.

7

¿Si en la empresa tengo una caldera a carbón, puedo usar los plásticos con BFR como combustible?

a. No es recomendable debido a la generación de contaminantes.

b. No es recomendable debido al bajo poder calorífico de los plásticos.

c. Se recomienda como reciclaje energético o cuaternario.

d. Se recomienda por el alto nivel energético de los plásticos.

8

¿Un relleno sanitario es la mejor forma de disponer las fracciones de plástico contaminadas con retardantes de llama?

a. Falso, pues no se asegura la contención de los contaminantes.

b. Falso, pues no se considera una estrategia económicamente viable.

c. Verdadero, pues es fácil contar con un relleno sanitario.

d. Verdadero, pues los plásticos deben ser desechados.

9

Señale la estrategia que **NO** asegura que una oportunidad de negocio de aprovechamiento de material plástico reciclado sea exitosa:

a. Asegurar una fuente constante de material y contar con infraestructura para la separación del mismo.

b. Contar con un sistema de control de los materiales y tener claro qué aplicación tendrá y sus requisitos.

c. Vender a precios más bajos y hacer *upgrading* de todos los materiales.

d. Capacitarse en el procesamiento de los materiales y entender las necesidades de los clientes.

10

¿El reciclaje químico compite con el mecánico?

a. Verdadero, porque no pueden aplicarse simultáneamente.

b. Falso, porque no son mutuamente excluyentes.

c. Verdadero, porque el reciclaje químico es contaminante.

d. Falso, porque el reciclaje químico es terciario.



**MINISTERIO DE AMBIENTE Y
DESARROLLO SOSTENIBLE**

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Bogotá D. C., Colombia
www.minambiente.gov.co

Publicación financiada por:

