



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ESTUDIO DEL TRATAMIENTO Y DEGRADACIÓN DE LOS  
DESECHOS PLÁSTICOS Y TENDENCIAS NO  
CONVENCIONALES DE REVALORIZACIÓN**

**TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**QUÍMICA FARMACÉUTICA BIÓLOGA**

**P R E S E N T A**

**THELMA LAURA GONZÁLEZ CRUZ**



**Ciudad Universitaria, CD. MX.**

**2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO:**

**PRESIDENTE: VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO**

**VOCAL: AMELIA MARÍA DE GUADALUPE FARRÉS GONZÁLEZ SARABIA**

**SECRETARIO: VERÓNICA DOMÍNGUEZ VALDEZ**

**1ER. SUPLENTE: CARMINA MONTIEL PACHECO**

**2° SUPLENTE: JAVIER AXOSCO MARÍN**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Laboratorio 312, Departamento de Alimentos y Biotecnología, Edificio E, Facultad de Química.

Ciudad Universitaria, UNAM (Av. Universidad, No. 3000, 04510, Ciudad de México, México).

**ASESOR DEL TEMA:**

Dra. Amelia María de Guadalupe Farrés González Sarabia

---

**SUSTENTANTE:**

Thelma Laura González Cruz

---

---

# ÍNDICE

RESUMEN .....	6
OBJETIVOS .....	7
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	8
1.1 ¿QUÉ ES EL PLÁSTICO?.....	9
1.2 TIPOS DE PLÁSTICO .....	10
1.3 USOS DEL PLÁSTICO.....	17
1.4 FABRICACIÓN DEL PLÁSTICO .....	18
1.5 PRODUCCIÓN Y ACUMULACIÓN MUNDIAL DE PLÁSTICO .....	20
1.6 PRODUCCIÓN Y USOS DE PLÁSTICO EN MÉXICO .....	22
CAPÍTULO II: DEGRADACIÓN DE PLÁSTICO .....	24
2.1 ¿QUÉ ES LA DEGRADACIÓN? .....	25
2.2 TIPOS DE DEGRADACIÓN DE PLÁSTICO .....	26
2.2.1 FOTODEGRADACIÓN .....	26
2.2.2 DEGRADACIÓN TERMO-OXIDATIVA .....	27
2.2.3 DEGRADACIÓN HIDROLÍTICA .....	28
2.2.4 BIODEGRADACIÓN .....	29
2.3 ¿CUÁNTO TIEMPO LE TOMA A LOS PLÁSTICOS DEGRADARSE? .....	30
CAPÍTULO III: DESECHOS PLÁSTICOS .....	32
3.1 GENERACIÓN MUNDIAL DE DESECHOS PLÁSTICOS .....	33
3.2 DESECHOS PLÁSTICOS EN MÉXICO .....	36
3.2.1 TIPOS DE RESIDUOS GENERADOS EN MÉXICO .....	36
3.2.2 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) .....	37
3.2.3 RSU GENERADOS POR REGIÓN EN MÉXICO .....	38
3.3 GESTIÓN DE RSU EN MÉXICO .....	43
3.3.1 RECOLECCIÓN DE RSU .....	43
3.3.2 SEPARACIÓN DE RSU .....	46

3.3.2.1	SEPARACIÓN DE RSU EN LA CIUDAD DE MÉXICO .....	49
3.3.2.2	PLANTA DE SEPARACIÓN DE RESIDUOS EN CIUDAD DE MÉXICO .....	50
CAPÍTULO IV: ¿CÓMO SE ELIMINAN LOS PLÁSTICOS? .....		52
4.1	TRATAMIENTOS TÉRMICOS PARA LA ELIMINACIÓN DE PLÁSTICO .....	53
4.1.1	COMBUSTIÓN .....	53
4.1.2	PIRÓLISIS .....	53
4.1.3	GASIFICACIÓN .....	54
4.2	TECNOLOGÍA UTILIZADA PARA COMBUSTIÓN DE DESECHOS .....	55
4.2.1	INCINERADOR DE PARRILLA .....	55
4.2.2	HORNO ROTATORIO .....	57
4.2.3	INCINERADOR DE LECHO FLUIDIZADO .....	58
4.3	CAPACIDAD Y COSTO DE PLANTAS INCINERADORAS EN EL MUNDO .....	60
4.4	CASO DE ÉXITO EN LA INCINERACIÓN DE BASURA .....	63
4.4.1	PLANTA INCINERADORA DE KLEMETSrud, NORUEGA .....	63
4.5	CASOS DE FRACASO EN LA INCINERACIÓN DE BASURA .....	65
4.5.1	VALLEY OF THE DRUMS, KENTUCKY, ESTADOS UNIDOS .....	65
4.5.2	KHIAN SEA WASTE INCIDENT, HAITÍ Y EL OCÉANO ATLÁNTICO.....	66
4.5.3	ACCIDENTE EN EL INCINERADOR DE POOLBERG, IRLANDA .....	67
4.6	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS .....	69
4.7	INCINERACIÓN DE RSU EN MÉXICO .....	73
4.8	LEGISLACIÓN RELACIONADA CON LA INCINERACIÓN DE DESECHOS .....	74
4.8.1	LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE .....	75
4.8.2	NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-098-SEMARNAT-2002 .....	75
4.8.3	NORMA MEXICANA NMX-AA-035-1976 .....	79
4.8.4	REGLAMENTO DE LA LEY EN MATERIA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA .....	79

CAPÍTULO V: ACUMULACIÓN DE PLÁSTICO EN RELLENOS SANITARIOS .....	81
5.1 QUÉ ES UN RELLENO SANITARIO .....	82
5.2 TIPOS DE RELLENO SANITARIO .....	83
5.3 REQUISITOS DE UN RELLENO SANITARIO .....	84
5.4 ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE UN RELLENO SANITARIO .....	87
5.5 CASOS DE ÉXITO DE RELLENO SANITARIO .....	89
5.5.1 PARQUE ECOLÓGICO DE SUDOKWON, COREA DEL SUR .....	90
5.5.2 PARQUE ECOLÓGICO NANJIDO, COREA DEL SUR .....	91
5.6 CASOS DE FRACASO UN RELLENO SANITARIO .....	93
5.6.1 K'ARA K'ARA EN COCHABAMBA, BOLIVIA .....	93
5.6.2 ESTRUTURAL EN BRASILIA, BRASIL .....	94
5.6.3 TRUITIER EN PORT-AU-PRINCE, HAITI .....	95
5.6.4 GUIYU, CHINA .....	96
5.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN RELLENO SANITARIO .....	99
5.8 RELLENOS SANITARIOS EN MÉXICO .....	101
5.9 LEGISLACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN MÉXICO .....	104
5.9.1 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-083-SEMARNAT-2003 .....	104
CAPÍTULO VI: RECICLAJE DE PLÁSTICO .....	107
6.1 ¿QUÉ ES EL RECICLAJE? .....	108
6.2 PANORAMA MUNDIAL DEL RECICLAJE .....	108
6.2.1 PANORAMA MUNDIAL DEL RECICLAJE DE PLÁSTICO .....	109
6.3 RECICLAJE EN MÉXICO .....	112
6.4 LEGISLACIÓN DEL RECICLAJE DE PLÁSTICO EN MÉXICO .....	112
6.4.1 NMX-E-263-CNCP-2016 .....	114
6.4.2 NMX-E-233-CNCP-2014 .....	114
6.4.3 PROY-NMX-E-277-NYCE-2017 .....	115
6.4.4 NMX-E-232-CNCP-2014 .....	115
6.5 EJEMPLO DE UN PROCESO DE RECICLAJE DE PLÁSTICO PET .....	116
6.5.1 PLANTA MEXICANA RECICLADORA DE PET PETSTAR® .....	116

CAPÍTULO VII: BIODEGRADACIÓN DE PLÁSTICO .....	121
7.1 INVESTIGACIONES INTERNACIONALES DE BIODEGRADACIÓN DE PLÁSTICO .....	122
7.1.1 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILEN TEREFALATO (PET), JAPÓN .....	122
7.1.2 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILEN TEREFALATO (PET), IRÁN .....	125
7.1.3 BIODEGRADACIÓN DE POLIURETANO (PU), JAPÓN .....	128
7.1.4 BIODEGRADACIÓN DEL ENLACE URETANO .....	131
7.1.5 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO (PE), FRANCIA .....	132
7.2 INVESTIGACIONES NACIONALES DE BIODEGRADACIÓN DE PLÁSTICO .....	138
7.2.1 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO (PE), UNAM .....	138
7.2.2 BIODEGRADACIÓN DE POLIURETANO (PU), UNAM .....	140
7.2.3 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILEN TEREFALATO (PET), IPN .....	143
7.2.4 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILEN TEREFALATO (PET) Y BIOPET, UNAM .....	147
7.2.5 BIODEGRADACIÓN DE DI(2-ETIL HEXIL)FTALATO (DEHP), CICB .....	150
7.3 INVESTIGACIONES RELEVANTES EN BIODEGRADACIÓN DE POLÍMEROS .....	154
7.3.1 BIODEGRADACIÓN DE CELULOSA EN PAÑALES, MÉXICO .....	154
CAPÍTULO VIII: PROSPECTIVA DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS .....	158
8.1 ¿QUÉ PASARÁ CON LOS DESECHOS PLÁSTICOS EN EL MUNDO? .....	159
8.2 ¿QUÉ ACCIONES Y OPCIONES NOS QUEDAN POR EXPLORAR? .....	164
CONCLUSIONES .....	165
REFERENCIAS .....	168

## RESUMEN

El plástico es uno de los mejores inventos químicos creados por el hombre, su versatilidad y larga vida útil nos han permitido utilizarlo para casi cualquier aplicación en la vida moderna, reemplazando materiales como el vidrio, madera o acero.

El plástico comercial surge alrededor de 1950, y se produce de manera tan acelerada que se estima que por cada ser humano vivo en este momento, se ha producido al menos una tonelada de plástico. Sin embargo, su producción a gran escala acompañada de su mala gestión de uso y desecho, ha generado uno de los más grandes problemas de contaminación que enfrenta el mundo actualmente.

Existen varios tipos de plástico y algunos son tan resistentes y duraderos que incluso pueden permanecer hasta 400 años sin degradarse en el medio ambiente.

La humanidad, tratando de deshacerse de la basura que produce, la cual se volvió un foco de contaminación de agua, aire y suelo, ha implementado diversas estrategias, entre ellas quemar, enterrar o, más recientemente, reciclar su basura. A medida que pasó el tiempo, aprendimos cómo utilizar los desechos a nuestro favor, generando energía a partir de su descomposición química, ya sea por métodos de combustión, que generan energía calorífica para otros procesos industriales; como por medio de la recuperación de biogás resultante de la descomposición de materia orgánica en la basura en rellenos sanitarios.

Recientemente se ha incursionado en alternativas de reciclaje, pues las prácticas de incineración o enterramiento siguen teniendo impacto negativo en el medio ambiente.

Para el caso de los plásticos, su tratamiento o revalorización es un proceso complicado, pues muchos de los productos que se fabrican actualmente son multicapa, es decir, contienen más de un tipo de plástico y son difíciles de separar, lo cual hace que su reciclaje se vuelva económicamente inviable. Aunado a esto, los desechos de plástico suelen estar mezclados con otro tipo de desechos, como orgánicos o textiles, lo cual dificulta y encarece su reciclaje.

Actualmente se buscan otras opciones de revalorización de desechos plásticos, entre ellos, la biodegradación de polímeros con el uso de bacterias, hongos o sus enzimas, lo cual pretende retornar el plástico de nuevo a sus componentes fundamentales, para reiniciar su ciclo productivo.

Existen diversos grupos de investigación que han logrado biodegradar diferentes tipos de plástico de manera eficiente. Plásticos como polietileno (PE), poliuretano (PU), polietileno tereftalato (PET); así como precursores de su síntesis como el di(2-etil hexil) ftalato (DEHP) han sido degradados con éxito, posicionando la biodegradación como otra posible solución a la contaminación por plástico.

# **OBJETIVOS**

## **OBJETIVO GENERAL**

Identificar y comparar los métodos actuales de tratamiento, eliminación y revalorización de los desechos plásticos a nivel mundial y nacional. Explorar las nuevas tendencias de revalorización de desechos plásticos que podrían disminuir el impacto ambiental negativo de las opciones actuales.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

Exponer la cantidad de plástico producida y desechada permitiendo vislumbrar la magnitud del problema mundial de contaminación por plástico.

Identificar los tratamientos de eliminación o revalorización de desechos plásticos que se llevan a cabo actualmente.

Explorar la normativa nacional relacionada a los procesos de eliminación y revalorización de desechos.

Analizar el impacto social, económico y ambiental que tienen los tratamientos actuales de eliminación de desechos plásticos.

Identificar tendencias de tratamiento de desechos plásticos con potencial menor impacto ambiental.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

*“Saber que uno no sabe, es comenzar a saber.”*

Gildardo Cruz

## 1.1 ¿QUÉ ES EL PLÁSTICO?

El plástico se define como un material sintético que puede moldearse fácilmente. «Plástico» es también un término habitual para describir una amplia gama de materiales sintéticos o semisintéticos que se utilizan para una inmensa cantidad de aplicaciones (RAE, 2001).

Químicamente, los plásticos son polímeros formados por la unión repetida de una o varias moléculas por medio de enlaces covalentes, como lo afirma el portal Plastics Europe, un referente importante de información sobre plásticos en el continente europeo. Los polímeros sintéticos contienen normalmente entre uno y tres tipos diferentes de unidades que se repiten. Las moléculas que se combinan para formar los polímeros se denominan “monómeros” y las reacciones a través de las cuales se obtienen los polímeros, se denominan reacciones de polimerización.

El término «plástico» proviene del griego «*plastikos*» que significa “que se puede moldear”. Esto se refiere a la maleabilidad o plasticidad del material durante la fabricación, lo cual permite fundirlo o prensarlo para obtener diferentes formas, como láminas, fibras, placas, tubos, botellas, cajas, etc. (Plastics Europe, 2018).

El plástico es un material inmensamente versátil, tiene aplicaciones tanto industriales, como de consumo personal. A pesar de que algunos polímeros sintéticos, como la baquelita, aparecieron a inicios del siglo XX, sus aplicaciones eran únicamente militares. Fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial que su producción a gran escala comenzó, aproximadamente en 1950 (Geyer *et al.*, 2017).

Con los años, el diseño y síntesis distintos polímeros logró que los plásticos pudieran ser utilizados para casi cualquier propósito. Algunas propiedades pueden atribuirse a los plásticos en general, por ejemplo, la mayoría de ellos proveen aislamiento térmico y eléctrico, resistencia a la corrosión, son duraderos, pueden fabricarse en una amplia gama de colores e incluso pueden ser transparentes, son fácilmente moldeables y poseen gran versatilidad (Plastics Europe, 2018).

## 1.2 TIPOS DE PLÁSTICO

Hay muchos tipos de plástico, se pueden agrupar en dos familias principales de polímeros. En la Tabla 1.1 se pueden observar ejemplos de las dos familias que componen esta clasificación:

- Los termoplásticos (que se ablandan con el calor y se endurecen cuando se enfrían)
- Los termoestables (que nunca se ablandan una vez moldeados)

Tabla 1.1: Clasificación de plásticos según sus características de moldeo.

Ejemplos de termoplásticos	Ejemplos de termoestables
Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)	Epóxido (EP)
Policarbonato (PC)	Fenol-formaldehído (PF)
Polietileno (PE)	Poliuretano (PUR)
Polietileno tereftalato (PET)	Politetrafluoroetileno (PTFE)
Policloruro de vinilo (PVC)	Resinas de poliéster insaturado (UP)
Polimetilmetacrilato (PMMA)	
Polipropileno (PP)	
Poliestireno (PS)	
Poliestireno expandido (EPS)	

Fuente: Plastics Europe (2018). *What are plastics?* Unión Europea. Recuperado el 11 de octubre de 2018, de <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics>

Existe otra clasificación de los plásticos de acuerdo internacional, en la que éstos son numerados del 1 al 7, como se describe en la Tabla 1.2. En la Figura 1.3 se muestra la estructura monomérica que presentan.

Tabla 1.2: Acuerdo internacional para la clasificación de plásticos.

Tipo de plástico	Símbolo y descripción	Propiedades	Ejemplos de aplicaciones
<p><b>Polietilen Tereftalato (PET o PETE)</b></p>	 <p>Este es el plástico que podemos encontrar más comúnmente en envases de alimentos como botellas de agua, refrescos, jugos, aceites, etc. El PET es un material que se puede reciclar si se deposita en los contenedores adecuados. Incluso se puede reutilizar una botella rellenándola si está limpia.</p>	<p>Puede tener contacto con productos alimenticios y farmacéuticos. Gran resistencia física y química. Tiene características térmicas óptimas para el transporte y contención de alimentos. Actúa como barrera al paso de microorganismos de los alimentos que contiene. Posee gran ligereza.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envases para alimentos y productos farmacéuticos</li> <li>• Lonas y cuerdas</li> <li>• Películas ultradelgadas para capacitores o cubiertas para motores</li> <li>• Telas y prendas de vestir</li> </ul>
<p><b>Polietileno de alta densidad (HDPE)</b></p>	 <p>Este es un plástico rígido y resistente al frío o calor, es común encontrarlo en envases de detergentes, botellas de leche, garrafas y bolsas de plástico. Es bastante seguro ya que se puede reciclar y puede ser reutilizado si se mantienen las normas adecuadas de higiene.</p>	<p>Su densidad oscilar de 0,94 a 0,97 g/cm<sup>3</sup> o 970 kg/m<sup>3</sup>. Aunque su densidad solo es marginalmente superior a la del polietileno de baja densidad, el HDPE es de baja ramificación lo que le aporta una mayor fuerza intermolecular y una mayor tensión de rotura que el LDPE. También es más duro y opaco y puede soportar temperaturas algo más elevadas (120°C en periodos cortos).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cajas y contenedores</li> <li>• Botellas (para productos alimenticios, detergentes, cosméticos)</li> <li>• Recipientes para alimentación</li> <li>• Juguetes</li> <li>• Depósitos de gasolina</li> <li>• Envoltorios industriales</li> <li>• Tuberías</li> <li>• Utensilios domésticos</li> </ul>
<p><b>Policloruro de vinilo (PVC)</b></p>	 <p>El PVC fue uno de los primeros plásticos que se descubrieron y también uno de los más utilizados. Es un derivado de la sal (57 %) y del petróleo o el gas (43 %). Es el tercer polímero de plástico sintético más producido del mundo, después del polietileno y el polipropileno. El PVC tiene dos formas básicas: rígido (a veces abreviado como RPVC) y flexible.</p>	<p>Es duradero, ligero, fuerte y resistente al fuego, con unas excelentes propiedades aislantes y baja permeabilidad. Si se utilizan determinados aditivos en el proceso de fabricación, la fuerza, la rigidez, el color y la transparencia se pueden adaptar para satisfacer necesidades específicas. Es excelente material para insumos de la industria energética y de telecomunicaciones. No reciclable.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tuberías y accesorios para agua potable y para aguas residuales</li> <li>• Cables, dispositivos eléctricos.</li> <li>• Envases para productos farmacéuticos, alimentos y confitería, agua y jugo de frutas, etiquetas</li> <li>• Productos médicos, bolsas de sangre, tubos para transfusiones y guantes quirúrgicos</li> <li>• Productos de ocio, como mangueras de jardín, calzado, piscinas hinchables, tiendas</li> </ul>

<p><b>Polietileno de baja densidad (LDPE)</b></p>	 <p>LDPE reciclable.</p>	<p>Al igual que el HDPE es muy seguro, lo podemos encontrar en bolsas y botellas para agua. Podemos reutilizarlo, sin embargo, no siempre es</p>	<p>Gama de densidad de 0,91–0,93 g/cm<sup>3</sup>. No reacciona a temperatura ambiente, excepto a fuertes agentes oxidantes y algunos disolventes. Puede soportar una temperatura continua de 80 °C y 95 °C durante un breve periodo de tiempo. Puede ser opaco o traslúcido, y es bastante flexible y duro.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Film transparente</li> <li>• Bolsas de compras</li> <li>• Revestimiento para brics de leche</li> <li>• Revestimiento para cable eléctrico</li> <li>• Bolsas industriales para grandes cargas</li> </ul>
<p><b>Polipropileno (PP)</b></p>	 <p>PP</p>	<p>Su uso es muy frecuente popotes, envases de yogures y mantequilla. Resiste al calor y sirve de barrera contra la humedad, la grasa y productos químicos. Es seguro reutilizarlo y también es reciclable. Su alto punto de fusión permite envases capaces de contener líquidos y alimentos calientes.</p>	<p>Su densidad es de entre 0,895 y 0,92 g/cm<sup>3</sup>. Por lo tanto, es el plástico básico con menor densidad. En comparación con el polietileno (PE) sus propiedades mecánicas y resistencia térmica son superiores, pero la resistencia química es menor. Normalmente el PP es duro y flexible, sobre todo cuando se copolimeriza con etileno. Por eso el polipropileno puede utilizarse como plástico técnico, y competir con materiales como el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envases para alimentos (vasos de yogur o margarina)</li> <li>• Envoltorios de caramelos o aperitivos</li> <li>• Recipientes para microondas</li> <li>• Fibras para alfombras</li> <li>• Muebles de jardín</li> <li>• Dispositivos médicos y sus envases</li> <li>• Maletas</li> <li>• Utensilios de cocina</li> <li>• Tuberías</li> </ul>
<p><b>Poliestireno (PS)</b></p>	 <p>PS</p>	<p>Polímero aromático sintético elaborado a partir del monómero de estireno, un petroquímico líquido. Es un polímero termoplástico que se ablanda con el calor y se puede convertir en láminas y hojas.</p>	<p>El poliestireno puede ser rígido o espumado; es duro y quebradizo. Es una resina barata por peso unitario, permite el paso del oxígeno y el vapor de agua. El poliestireno es naturalmente transparente, pero se puede tinter con colorantes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electrodomésticos</li> <li>• Productos electrónicos</li> <li>• Construcción y edificación, espuma aislante, accesorios de fontanería e iluminación</li> <li>• Medicina, bandejas para el cultivo de tejidos, tubos de ensayo, placas Petri, componentes para diagnóstico</li> </ul>
<p><b>Poliestireno expandido (PS-E)</b></p>	 <p>PSE</p>	<p>Es uno de los polímeros básicos más utilizados. Conocido en México como UNICEL. Durante más de 50 años ha sido el material preferido gracias a su versatilidad, rendimiento y rentabilidad. Se utiliza en muchas aplicaciones cotidianas.</p>	<p>El EPS es un producto termoplástico cuenta con ligereza, fuerza, durabilidad, amortiguación, aislamiento térmico y de bajo costo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envases y embalajes en alimentos para llevar, mantiene la temperatura y evita el deterioro</li> <li>• Aislamiento térmico en edificios</li> <li>• Construcción de carreteras</li> <li>• Aislamiento acústico</li> <li>• Protección de productos frágiles y valiosos</li> <li>• Cascos</li> </ul>

<p><b>Otros (OTHER)</b></p>	 <p>En esta categoría se encuentran una gran diversidad de plásticos muy difíciles de reciclar. En este grupo de plásticos se encuentran el PC (Policarbonato) característico de los biberones, CD's y DVD's; Nylon®, los plásticos biodegradables y otras resinas innovadoras.</p>	<p>La mayoría son combinaciones de diferentes tipos de plásticos. También se clasifican en esta categoría los nuevos plásticos biodegradables que son fabricados a base de almidones vegetales.</p> <p>Para mayor información ver Tabla 4.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autopartes</li> <li>• Aparatos electrónicos</li> <li>• Empaques diversos</li> <li>• Prendas de vestir</li> </ul> <p>Para mayor información ver Tabla 4.</p>
-----------------------------	--	--	--

Fuentes: Plastics Europe (2018). *What are plastics?* Unión Europea. Recuperado el 11 de octubre de 2018, de <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics>. QuimiNet (2018) Usos y aplicaciones del polietileno tereftalato. Recuperado el 11 de octubre de 2018, de <https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-polietileno-tereftalato-pet-42703.htm>. Inoquos (2016) Tipos de plástico. Recuperado el 11 de octubre de 2018, de <http://www.inoquos.com/blog/2018/01/siete-tipos-de-plastico-y-lo-que-debes-saber-sobre-ellos>

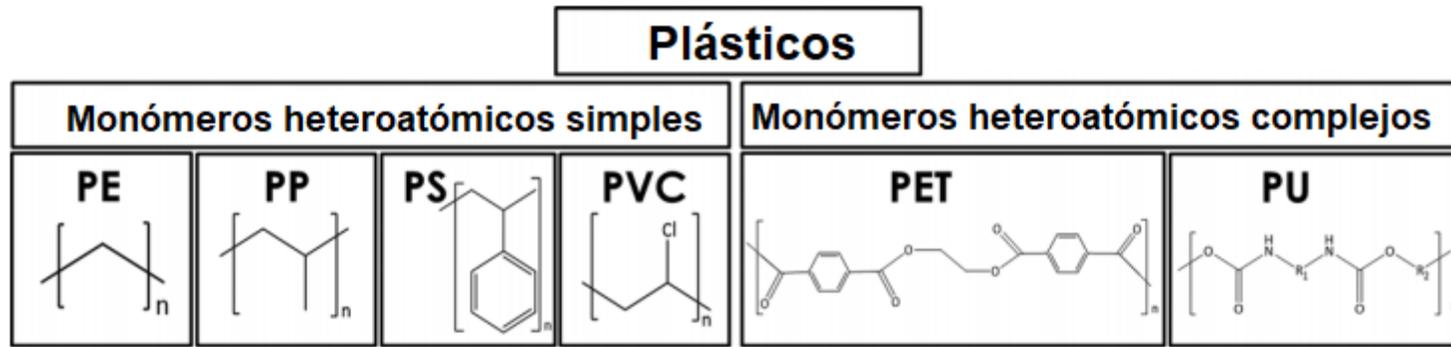


Figura 1.3: Estructura monomérica de diferentes tipos de plástico.

Fuente: Gewert, B., Plassmanna, M. M., & MacLeod, M., (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 17, 1513-1521.

La categoría 7, denominada otros plásticos, contiene entre otras resinas, los compuestos más difíciles de degradar o reciclar debido a que por lo general se trata de mezclas de diferentes tipos de plástico. Polímeros complejos como el policarbonato o Nylon® han sido ampliamente explotados por la industria y han generado gran daño ambiental, pues si bien han permitido el traslado y almacenamiento de información, no es posible reciclarlos ni reutilizarlos de manera sencilla o de bajo costo.

Dentro de este grupo también se encuentran los polímeros más recientemente descubiertos: los plásticos biodegradables. Los envases de este tipo no son reutilizables, sin embargo los etiquetados como “PLA” son biodegradables, es decir que no se reciclan pero pueden ser utilizados en composta. Cabe destacar que hay que distinguirlos de los bioplásticos, que son de épocas aún más recientes y se trata de plásticos fabricados en su totalidad de recursos biológicos renovables, como frutas o desechos agrícolas, lo cual los convierte en objetos compostables.

Para mayor información acerca de los diferentes tipos de plásticos que conforman el grupo 7, ver Tabla 1.4.

Tabla 1.4: Plásticos que conforman el grupo 7 según el acuerdo internacional de clasificación de plásticos.

Tipo de plástico	Descripción	Propiedades	Ejemplos de aplicación
<b>Fluoropolímeros</b> </H2>	<p>Son una familia de plásticos de alto rendimiento. El más famoso de esta familia es el politetrafluoroetileno (PTFE). El PTFE es inerte a casi todas las sustancias químicas y se considera el material más resbaladizo que existe. Esas propiedades lo convierten en uno de los materiales más valiosos y versátiles que se han inventado, y representa una mejora significativa en ámbitos como el aeroespacial, las comunicaciones, la electrónica, los procesos industriales y la arquitectura.</p>	<p>Los fluoropolímeros poseen una combinación inusual de propiedades de gran valor, como la inercia química, una constante dieléctrica elevada, retardo de la llama, baja fricción, antiadherencia, resistencia a las inclemencias del tiempo o propiedades de barrera. Son conocidos en todo el mundo por sus enormes propiedades antiadherentes asociadas a su uso como revestimiento en utensilios de cocina, para el suelo, o repelente de las manchas en tejidos y productos textiles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rodamientos y juntas de alto rendimiento para automóviles y aviones</li> <li>• Retardantes de llama</li> <li>• Revestimientos para utensilios de cocina que proporcionan una gran estabilidad térmica y propiedades antiadherentes</li> <li>• Revestimientos de tuberías y depósitos para productos químicos</li> <li>• Envases para baterías de ion-litio</li> <li>• Revestimientos para cables en el sector de las telecomunicaciones y la informática</li> <li>• Implantes y catéteres para aplicaciones biomédicas</li> </ul>
<b>Resinas epoxi</b>	<p>Material resistente que se encuentra en las latas de refrescos y envases especiales, donde se pueden utilizar como revestimiento para proteger el contenido y conservar el sabor. También se utilizan como revestimiento protector para todo, desde camas, sillas de jardín, muebles de oficina y de hospital, hasta carros de supermercado y bicicletas. También se utilizan en pinturas especiales para proteger las superficies de barcos y plataformas petroleras.</p>	<p>Su estado físico puede variar desde un líquido de baja viscosidad hasta un sólido con un punto de fusión elevado. Las resinas epoxi se conocen por su excelente adhesión, resistencia a las sustancias químicas y al calor, propiedades mecánicas excelentes y buen aislamiento eléctrico. Se utilizan epoxis rellenos de plata con una muy buena conductividad eléctrica, a pesar de que los epoxis normalmente son aislantes. Algunas variaciones ofrecen un gran aislamiento térmico, o conductividad térmica combinada con resistencia eléctrica para las aplicaciones electrónicas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pinturas</li> <li>• Revestimientos</li> <li>• Adhesivos</li> <li>• Sistemas eléctricos y electrónicos</li> <li>• Aplicaciones marinas</li> <li>• Aplicaciones aeroespaciales</li> <li>• Biología</li> <li>• Arte</li> </ul>
<b>Plásticos técnicos</b>	<p>Son ideales para aplicaciones técnicas que requieren plásticos duros. Gradualmente han ido reemplazando materiales como la madera o el metal. Son mucho más fáciles de fabricar, sobre todo cuando se trata de formas complicadas.</p>	<p>Los plásticos técnicos ofrecen mejor rendimiento en ámbitos como la resistencia al calor, la resistencia a los productos químicos, la resistencia al impacto, la no propagación de la llama y la gran fuerza mecánica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte</li> <li>• Electricidad y electrónica</li> <li>• Construcción y edificación</li> <li>• Aparatos y productos de consumo</li> <li>• Aplicaciones industriales, revestimientos resistentes a la abrasión y corrosión</li> </ul>

<p><b>Plásticos biodegradables</b></p>	<p>Son plásticos que en determinadas condiciones los microorganismos degradan y convierten en agua, dióxido de carbono (o metano) y biomasa.</p>	<p>Se pueden espumar en material para envasado, o extrusionar o moldear por inyección en máquinas convencionales modificadas.</p> <p>Se pueden colorear y utilizar en varios tamaños de granulación para cambiar el aspecto externo del material.</p> <p>Se puede coinyectar con otros materiales plásticos como el LDPE, el PP y el HDPE. El proceso de coinyección deposita una fina capa de material plástico encima del plástico biodegradable. El resultado es un artículo completamente biodegradable más barato que los materiales de plástico convencionales, completamente impermeable y coloreado para que se parezca a los materiales de plástico convencionales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recogida y desviación de residuos orgánicos.</li> <li>• Sector agrícola y hortícola (láminas para cobertura de suelos, macetas)</li> <li>• Envasado de alimentos</li> </ul>
<p><b>Bioplásticos</b></p>	<p>Fabricados en su totalidad o en parte a partir de recursos biológicos renovables. Ejemplos: La caña de azúcar se procesa para fabricar etileno, que a su vez se utiliza para fabricar polietileno. El almidón se puede procesar para producir ácido láctico y posteriormente ácido poliláctico (PLA).</p>	<p>Los plásticos fabricados a partir de petroquímicos con aditivos biodegradables que mejoran la biodegradación. Varían considerablemente según el material.</p> <p>Los bioplásticos o los plásticos duraderos parcialmente biológicos, como el PE, el PET o el PVC, tienen las mismas propiedades que sus versiones convencionales.</p> <p>Algunos bioplásticos solo se pueden distinguir de los plásticos convencionales con un análisis químico.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envases</li> <li>• Fibras para el sector textil.</li> <li>• El ácido biosuccínico es utilizado para aplicaciones en deportes y calzado, automoción, envasado, agricultura, aplicaciones en fibras y telas sin tejer</li> </ul>

Fuente: Plastics Europe (2018). *What are plastics?* Unión Europea. Recuperado el 11 de octubre de 2018, de <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics>

### 1.3 USOS DEL PLÁSTICO

El uso más común de los plásticos, desde finales del siglo XX hasta principios del siglo XXI, se encuentra en el ámbito de envases y embalajes. En el 2015, la producción de plástico destinado a la generación en empaques fue de aproximadamente 146 millones de toneladas de plástico; seguido del sector de la construcción con 65 millones de toneladas (Ritchie & Roser, 2020). Otros sectores como el textil, transporte o maquinaria industrial también tienen participación en la producción plástica del mundo, como se observa en la Figura 1.5.

Producción de plástico por sector industrial en 2015

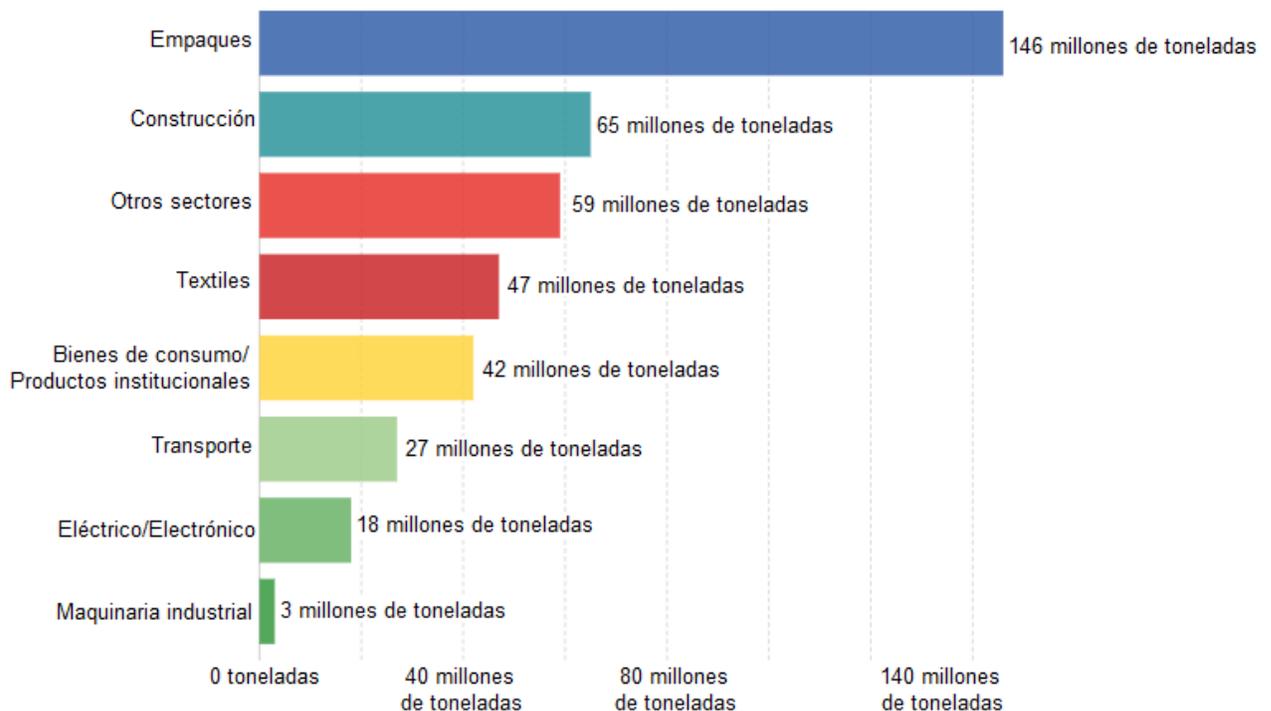


Figura 1.5: Producción de plástico por sector industrial.

Modificado de: Ritchie, H. & Roser, M. (2020). Plastic Pollution [en línea]. Publicado en: ourworldindata.org. Recuperado el 9 de enero de 2020 de: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

## 1.4 FABRICACIÓN DEL PLÁSTICO

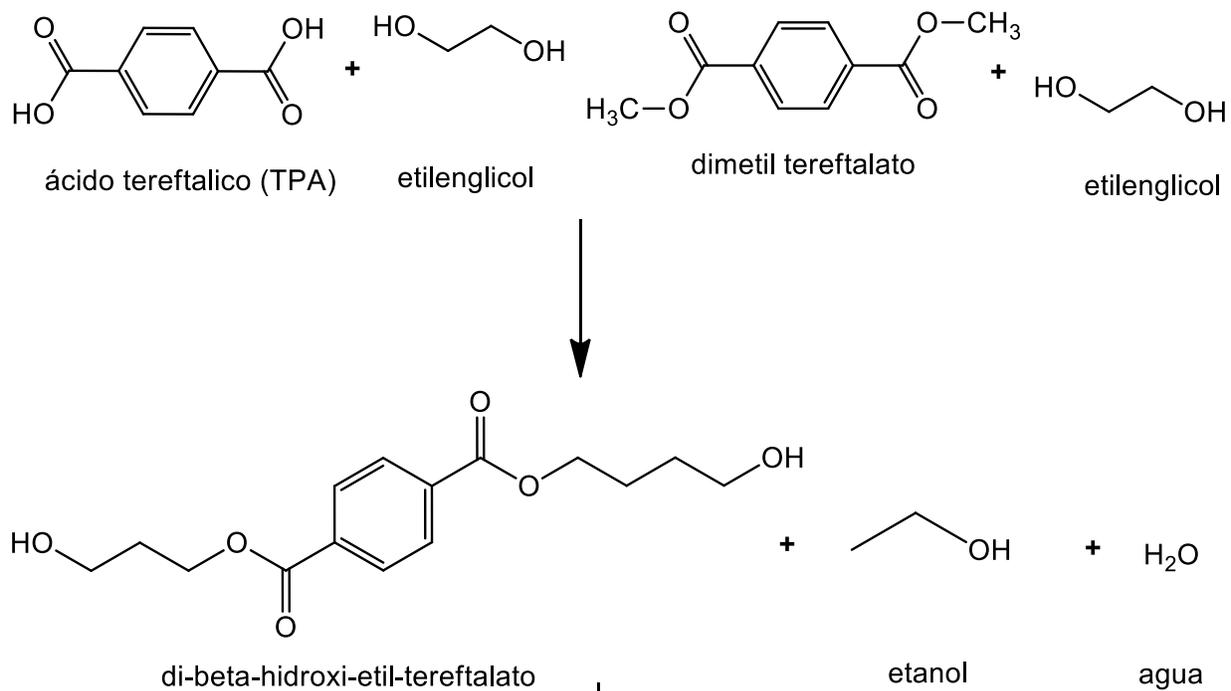
El plástico se fabrica a partir de materiales orgánicos naturales como la celulosa, carbón, gas natural, sal y preponderantemente petróleo. El petróleo es una mezcla de miles de compuestos de diferentes estructuras y pesos moleculares, por lo que debe ser procesado antes de ser utilizado.

La producción del plástico empieza con la destilación en una refinería, donde el petróleo crudo se separa en grupos de componentes más ligeros, denominados fracciones. Cada fracción es una mezcla de cadenas de hidrocarburos (compuestos químicos formados por carbono e hidrógeno) que difieren en términos de tamaño y estructura molecular (Plastics Europe, 2018). Una de esas fracciones, la nafta, es el compuesto esencial para la producción del plástico.

Para fabricar plástico se utilizan dos procesos principales: la polimerización y la policondensación, y ambos requieren catalizadores específicos. En un reactor de polimerización, monómeros como el etileno y el propileno se unen para formar cadenas largas de polímeros. Cada polímero tiene sus propiedades características, estructura y dimensiones en función del tipo de monómero básico que se haya utilizado (Beltrán-Rico *et al.*, 2012).

A nivel molecular, la síntesis de polímeros puede ser ilustrada con la reacción de polimerización de plástico tipo PET, representada en la Figura 1.6.

### Esterificación



### Policondensación

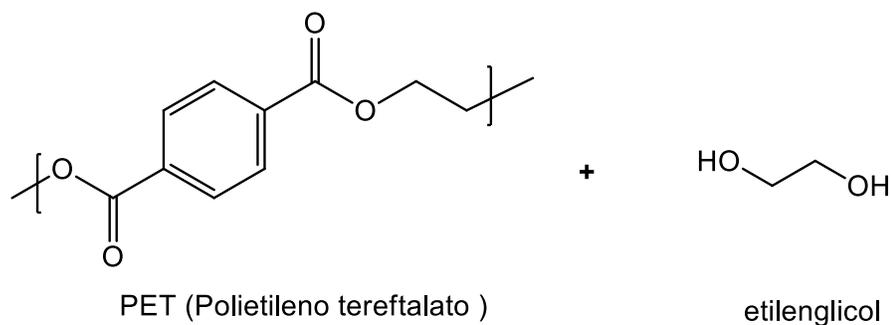


Figura 1.6: Reacciones de polimerización para formar plástico tipo PET.

Fuente: Di Serio, M., Tesser, R., Ferrara, A. & Santacesaria, A. (2004) Heterogeneous basic catalysts for the transesterification and the polycondensation reactions in PET production from DMT. *Journal of Molecular Catalysis*, 212, 251–257.

## 1.5 PRODUCCIÓN Y ACUMULACIÓN MUNDIAL DE PLÁSTICO

En un estudio realizado para la Universidad de Oxford, los investigadores Hannah Ritchie y Max Roser aseguran que la producción de plástico en 2015 ascendió a 381 millones de toneladas, siendo equivalente a dos tercios de la masa de la población mundial, en la Figura 1.7.



Figura 1.7: Producción mundial de plástico por año.

Modificado de: Ritchie, H. & Roser, M. (2020). Plastic Pollution [en línea]. Publicado en: [ourworldindata.org](https://ourworldindata.org). Recuperado el 9 de enero de 2020 de: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

El ligero decrecimiento que puede observarse en la Figura 1.7 en los años 2007 al 2009 se debió a una crisis financiera mundial, en la que también se redujeron índices de producción y consumo.

Como se mencionó anteriormente, el plástico tiene un período de vida largo, por lo que una vez producido se vuelve acumulativo. La Figura 1.8 se puede observar la cantidad acumulada de plásticos por década. Un dato alarmante respecto a la acumulación mundial de plástico es que para 2015 se habían producido 7.8 billones de toneladas de plástico en total, lo que significa más de una tonelada de plástico por cada ser humano vivo en la actualidad (Ritchie & Roser, 2020).

## Producción mundial acumulada de plástico

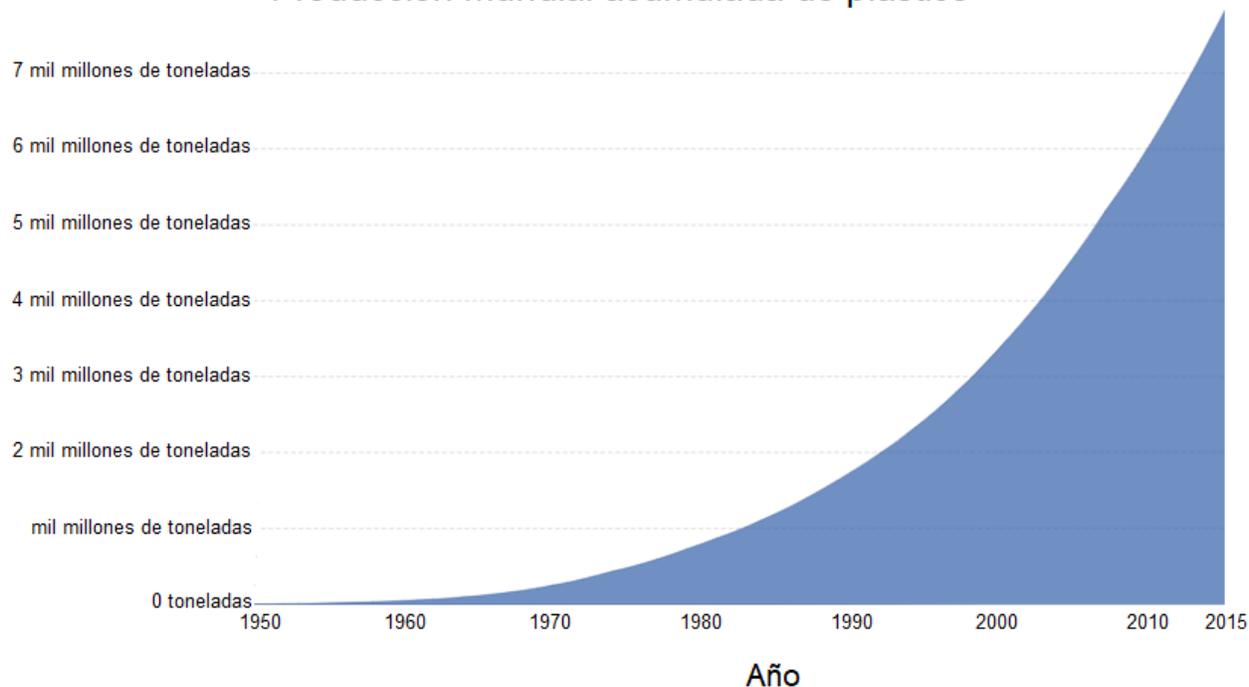


Figura 1.8: Producción mundial acumulada de plástico por década.

Modificado de: Ritchie, H. & Roser, M. (2020). Plastic Pollution [en línea]. Publicado en: [ourworldindata.org](https://ourworldindata.org). Recuperado el 9 de enero de 2020 de: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

Si bien, la producción mundial de plástico se redujo a 270 millones de toneladas al año, anualmente se generan 275 millones de toneladas de desechos plásticos (Ritchie & Roser, 2020), pues los desechos de años pasados se suman a la cuenta anual. Para saber por qué el plástico se acumula en forma de desecho es importante explorar el uso que le ha dado la humanidad y cómo estas pautas de uso han ido cambiando con el tiempo, así como analizar cómo es que se trata y elimina el plástico, lo cual se estudiará más adelante.

## 1.6 PRODUCCIÓN Y USOS DE PLÁSTICO EN MÉXICO

En México, la Asociación Nacional de Industrias del Plástico ANIPAC es la encargada de recopilar datos de generación de plásticos en México y en su informe del 2018 reporta que se generaron alrededor de 12 millones de toneladas (MMton) de plástico en México, de las cuales el 48% son fabricados para generar envases con el fin de proteger un producto o alimento, el 23% tienen fines de consumo personal, por ejemplo, juguetes, calzado, contenedores o accesorios para decoración y el 11% se produce para la industria de la construcción. El resto de las opciones de uso puede observarse en la Figura 1.9 (ANIPAC, 2018).

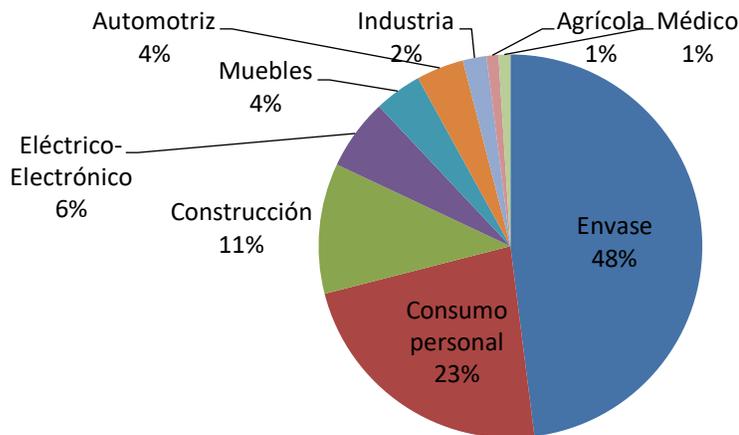


Figura 1.9: Uso del plástico en México según la Asociación Nacional de Industrias del Plástico ANIPAC en 2018.

Fuente: Asociación Mexicana de Envases y Embalajes AMEE. (2017). Recuperado el 10 de septiembre de 2018, de <http://www.packaging.enfasis.com/notas/16127-uso-y-consumo-envases-plastico>

Si bien es cierto que el uso de plásticos en muchos ámbitos de la vida cotidiana ha traído gran progreso a la humanidad y a la ciencia; también es cierto que ha generado un problema de contaminación sin precedentes que difícilmente se hubiera predicho en sus inicios.

Las industrias fabricantes de plástico, así como sus usuarios, son responsables del consumo y uso adecuado de este material y de los desechos que se generan al producirlos o el desecho mismo en el que se convierte el plástico una vez terminada su vida útil. Sin embargo el problema de contaminación que ha generado el uso inmoderado de plástico ha traído tan grandes consecuencias medioambientales negativas que corresponde a la sociedad, gobierno, industria y ciencia actuar en colaboración para mitigar los efectos generados por este invento químico.

Es por eso que deben ponerse sobre la mesa propuestas innovadoras para acabar de manera rápida y eficaz con desechos plásticos que han contaminado agua, aire y suelo. Esta investigación es una vía para ampliar el panorama de este grave problema mundial y pretende plantear alternativas para llegar a la resolución del problema de contaminación por plástico.

Para la realización del presente trabajo se han consultado distintos tipos de fuentes bibliográficas, como lo son artículos científicos de revistas arbitradas para los temas de alta complejidad técnica, fuentes estadísticas nacionales e internacionales que permiten dar contexto mundial en cuanto a la generación, reciclaje y biodegradación de plástico; literatura del ámbito gubernamental, como normas, leyes o decretos que permiten respaldar las actividades industriales que se realizan en diferentes países y finalmente fuentes periodísticas, que se encargaron de cubrir la información esencial de los grandes desastres medioambientales que se mencionan durante el desarrollo de este trabajo, pues algunas de estas catástrofes nunca tuvieron versión oficial o la información que provee el gobierno es muy limitada.

# **CAPÍTULO II**

## **DEGRADACIÓN DE PLÁSTICO**

*“La materia no se crea ni se destruye, sólo se transforma.”*

Antoine Lavoisier

## 2.1 ¿QUÉ ES LA DEGRADACIÓN?

En Química, la degradación se define como una o varias reacciones en las que las moléculas orgánicas pierden uno o varios átomos de carbono, o donde las moléculas complejas se descomponen en otras más simples.

Uno de los más grandes problemas que generan la contaminación por plásticos es que los polímeros contaminantes son muy recalcitrantes, es decir, son tan estables químicamente que resisten el ataque de microorganismos o cualquier mecanismo de degradación biológico, químico o ambiental (AMC, 2008).

Autores como Hayden Weeb y Rolf Müller afirman que para que plásticos como el PET sean degradados naturalmente deben pasar mínimo 50 años. La contaminación por plástico se presenta tanto en ambientes terrestres como marinos.

El plástico no se degrada fácilmente de manera natural en el ambiente, es necesario que existan ciertos factores ambientales, como luz solar, presencia de oxígeno, humedad y calor, para que se produzca su degradación: Fotodegradación, degradación termo-oxidativa, degradación hidrolítica y biodegradación. Más adelante se hablará de cada proceso.

También existe la degradación mediada por humanos, la degradación térmica, que consiste en su incineración hasta reducir el plástico a cenizas, de la cual se hablará ampliamente más adelante.

## 2.2 TIPOS DE DEGRADACIÓN DE PLÁSTICO

### 2.2.1 FOTODEGRADACIÓN

Técnicamente hablando, la degradación natural del plástico comienza con la fotodegradación (Webb *et al.*, 2012). La fotodegradación es el proceso en el que las sustancias son alteradas vía fotones, especialmente aquellos encontrados en las longitudes de onda de los rayos del sol. Aunque la fotodegradación eventualmente degrada el plástico, este es un proceso demasiado tardado e ineficiente (Pollution Solution, 2015).

Los rayos solares tienen la capacidad con su luz ultravioleta (UV) y radiación infrarroja (IR) de mediar la incorporación de oxígeno en el plástico, un proceso llamado oxidación, ilustrado en la Figura 2.1 (Gewert *et al.*, 2015).

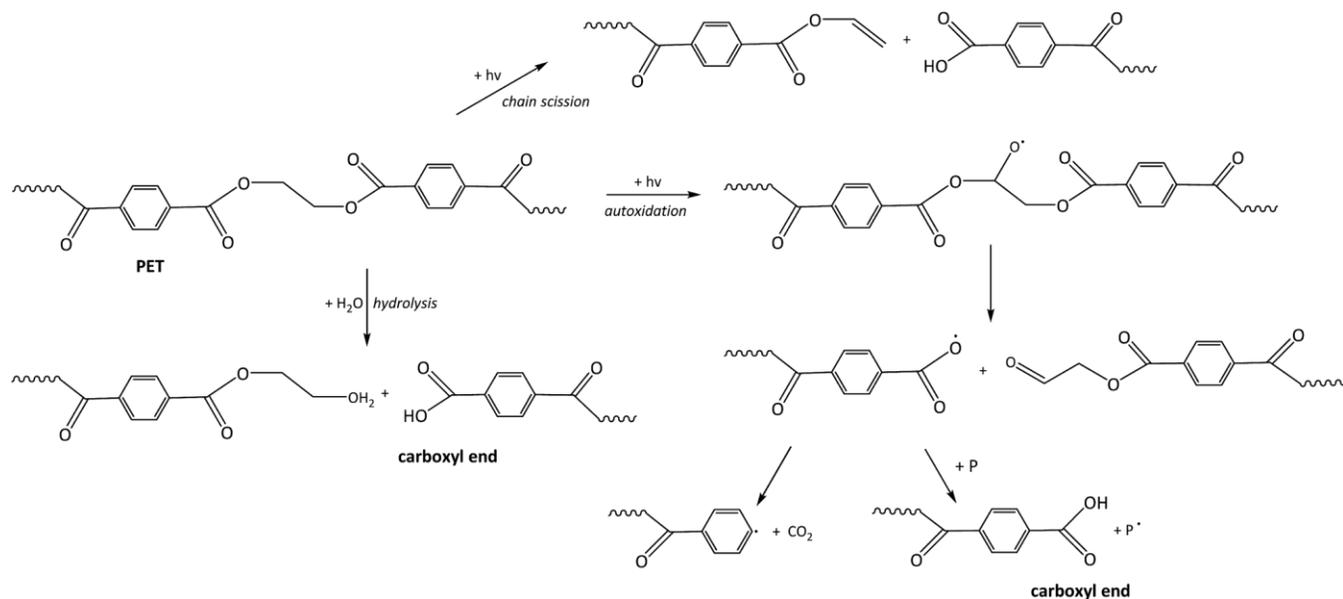


Figura 2.1: Fotodegradación abiótica de PET. Este mecanismo es muy similar al que ocurre durante el proceso de degradación por termo-oxidación.

Fuente: Gewert, B., Plassmann, M. M., & MacLeod, M., (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 17, 1513-1521.

Entre más y más oxígeno vaya incorporándose al polímero que forma el plástico, este se debilita y comienza a fragmentarse como se observa más adelante en la Figura 2.2.

Se destaca que los rayos solares únicamente facilitan la ruptura de enlaces y al haber moléculas de oxígeno en el ambiente, éstas se incorporan a la reacción catalítica.

Durante la degradación, el peso molecular del polímero disminuye y se crean muchos grupos funcionales que contienen oxígeno, como oligómeros de estireno, sus dímeros y trímeros, benceno, etilbenceno,  $\alpha$ -metilestireno, fenol, alcohol bencílico, benzaldehído, cetonas (acetofenona) y ácido benzoico.

## **2.2.2 DEGRADACIÓN TERMO-OXIDATIVA**

El siguiente paso es la termo-oxidación. El aumento en la temperatura del material tiene un efecto muy similar al de la incidencia de la radiación en las moléculas, es por eso que ambos procesos se manejan como altamente comparables en la literatura, pues su única variación en su proceso de iniciación (Gewert *et al*, 2015).

Con un aumento de temperatura, los enlaces se debilitan dando paso a moléculas de oxígeno, que atacan el polímero generando polímeros más pequeños con extremos carboxilo. Sus productos son los mismos que se generan durante el proceso de fotodegradación, el plástico se ve disminuido y desgastado, como se observa en la Figura 2.2.

Muchas veces, cuando el plástico es atacado por fotodegradación o sufre termo-oxidación, puede desencadenar reacciones autocatalíticas que siguen degradando al polímero entero. Durante esta autocatálisis la elevación de la temperatura puede mejorar la eficiencia de la degradación (Gewert *et al.*, 2015). Este proceso es común en la arena de las payas, pues esta conserva el calor y acelera las reacciones catalíticas de la degradación de los plásticos.



Figura 2.2: Botella encontrada en el ambiente que ha estado expuesta al sol y a otros factores ambientales.

Fuente: Just Science (2017, 26 de julio). What is photodegradation?. Recuperado el 10 de septiembre de 2019, de <http://www.justscience.in/articles/what-is-photodegradation/2017/07/26>

### **2.2.3 DEGRADACIÓN HIDROLÍTICA**

Esta ocurre la mayoría de las veces cuando el plástico se encuentra depositado en el océano (Pielichowski & Njuguna, 2005). Aunque se sabe que la hidrólisis de PET a temperatura ambiente es extremadamente lenta, es el proceso más importante en la degradación a baja temperatura del PET (Venkatachalam *et al.*, 2012). Durante este proceso, se forman grupos funcionales de ácido carboxílico y alcohol (Thomas & Visakh, 2011).

La tasa de la hidrólisis es mayor en condiciones ácidas o básicas, por lo que la hidrólisis de PET es una reacción autocatalítica cuando se forman grupos terminales carboxílicos (Thomas & Visakh, 2011).

Para el caso del poliuretano (PU), por ejemplo, durante el proceso de hidrólisis, el agua ataca el enlace éster y genera un ácido carboxílico y un alcohol, como se muestra en la Figura 2.3.

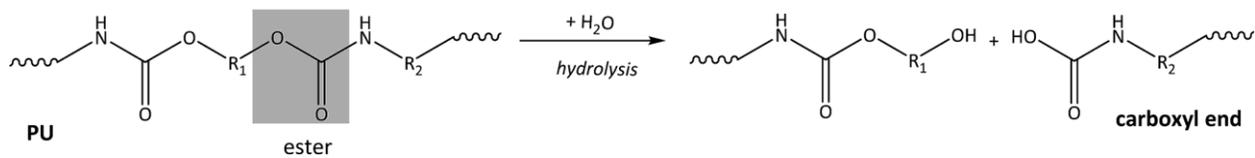


Figura 2.3: Degradación por hidrólisis del poliuretano PU.

Fuente: Gewert, B., Plassmanna, M. M., & MacLeod, M., (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 17, 1513-1521.

Cualquiera de estos procesos de degradación química genera que el plástico se vuelva susceptible a rupturas físicas, lo cual va fragmentando el plástico hasta que las cadenas poliméricas son tan pequeñas que ya pueden ser metabolizadas por microorganismos, es entonces donde la biodegradación comienza.

## 2.2.4 BIODEGRADACIÓN

La biodegradación, también conocida como degradación microbiana, es el proceso mediante el cual moléculas complejas se convierten en moléculas más simples, es decir hay una disminución en el peso molecular de la molécula biodegradada (Sivan, 2011), siendo este proceso mediado por un microorganismo o alguna de sus partes.

Los microorganismos capaces de llevar a cabo este proceso se denominan organismos biodegradadores, pues tienen la capacidad de convertir el carbono de las cadenas poliméricas, en este caso del plástico, en dióxido de carbono o incorporarlas como parte de su metabolismo en biomoléculas.

La biodegradación es una manera de lograr que los elementos químicos de los que está hecho un polímero sintético regresen a la naturaleza, disminuyendo o eliminando el problema de contaminación que genera la estabilidad química de dichos productos.

Se han llevado a cabo diferentes investigaciones relacionadas a la biodegradación de plásticos alrededor del mundo desde los años '90s (Nakajima-Kambe et al, 1999; Booma et al, 1994), sin embargo, no han cobrado gran relevancia como una propuesta de solución a la contaminación por plástico, lo cual es profundamente delicado, pues al

no encontrar soluciones innovadoras para este problema, sólo ha crecido a una magnitud prácticamente incontrolable.

La composición típica de los residuos plásticos que hasta ahora se han reportado como biodegradables por estos microorganismos son: polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), poliestireno (PS) y polietilentereftalato (PET). Es de destacar que el conjunto de las poliolefinas (PE y PP) más el poliestireno representan aproximadamente un 70% del total.

Más adelante, se presentan algunas de las investigaciones más relevantes que se han hecho nacional e internacionalmente acerca de la biodegradación de distintos tipos de plástico.

### **2.3 ¿CUÁNTO TIEMPO LE TOMA A LOS PLÁSTICOS DEGRADARSE?**

Muchos plásticos se definen como no degradables, lo que significa que no se descomponen químicamente, únicamente se vuelven hojuelas o partículas cada vez más pequeñas. Se ha calculado el tiempo estimado de descomposición para diferentes productos plásticos que llegan a océano volviéndose desechos marinos y los resultados se muestran en la Figura 2.4.

Por ejemplo, las redes de pesca, tardan aproximadamente 600 años en romperse en condiciones oceánicas, y las botellas de plástico rígido tardan aproximadamente 450 años (Ritchie & Roser, 2020).

### Tiempo estimado de descomposición de desechos marinos comunes

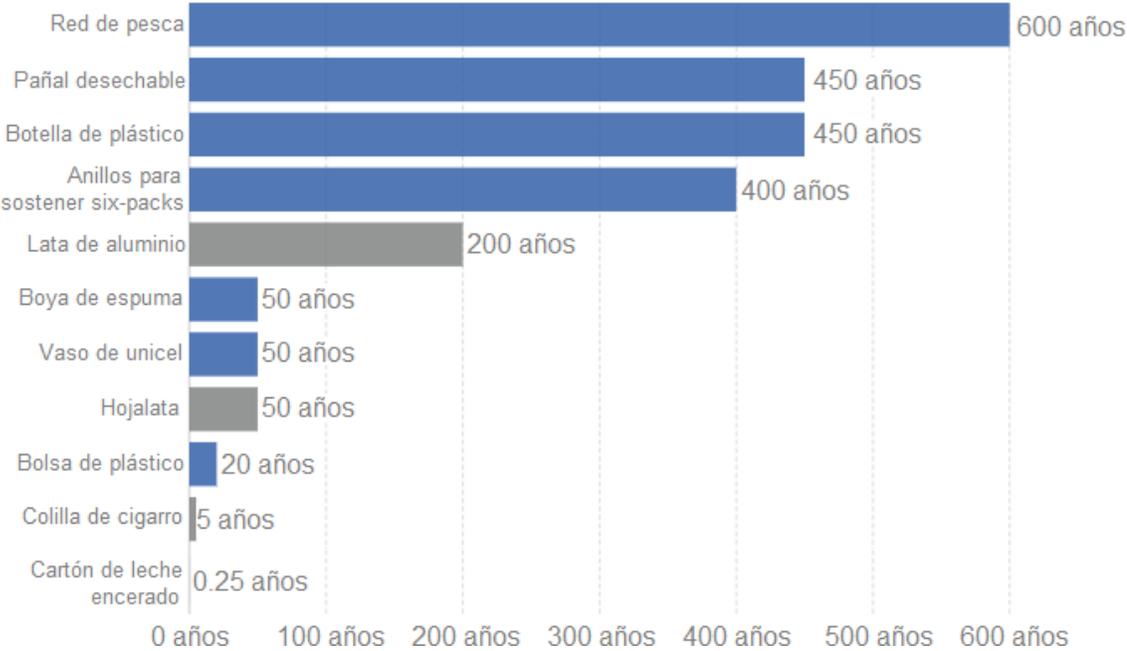


Figura 2.4: Tiempo de degradación de productos plásticos que se encuentran frecuentemente como contaminantes del océano. Las barras color azul indican que el producto está mayormente hecho de plástico.

Modificado de: Ritchie, H. & Roser, M. (2020). Plastic Pollution [en línea]. Publicado en: ourworldindata.org. Recuperado el 9 de enero de 2020 de: <https://ourworldindata.org/faq-on-plastics#note-27>

# **CAPÍTULO III**

## **DESECHOS PLÁSTICOS**

*“Tirar basura al mundo es tirar el mundo a la basura.”*

Anónimo

### 3.1 GENERACIÓN MUNDIAL DE DESECHOS PLÁSTICOS

Aunque un mundo sin plástico parece difícil de imaginar en esta época, pues está presente en todos los ámbitos de la vida cotidiana, este material no tiene más de 70 años de existencia en el planeta. Antes de la invención del plástico, los materiales más utilizados eran el acero (WSA, 2006), cemento, madera o vidrio (USGS, 2017).

En las últimas décadas, la utilización del plástico se ha modificado desde reutilizable a la implementación de plásticos de un solo uso (*single-use plastics*) en todo el mundo. Como resultado de esto, la cantidad de plásticos por masa en los residuos sólidos de distintas ciudades del mundo ha pasado de ser de menor al 1% en 1960 a mayor del 10% en 2005 en países de medianos y altos ingresos (Jambeck *et al.*, 2015). Al mismo tiempo, la generación de residuos sólidos, la cual está fuertemente relacionada con el producto interno bruto *per capita*, ha crecido de manera constante en las últimas décadas según el Global Waste Management Outlook de la Organización de las Naciones Unidas (UNEP, 2015).

La gran mayoría de los monómeros utilizados para hacer plásticos, como etileno y propileno, son derivados de hidrocarburos fósiles, difícilmente biodegradables sin tratamientos adecuados (Wagner *et al.*, 2014). Como resultado de esto en vez de descomponerse en el medio ambiente, se acumulan en basureros a cielo abierto, en las calles o en los océanos.

Un estudio mundial posicionó a China como el país con mayor generación de desechos plásticos con cerca de 60 millones de toneladas en 2010. El segundo país con mayor generación de desechos plásticos es Estados Unidos, con 38 millones de toneladas anuales y Alemania, con 14.5 millones de toneladas. México abajo en la lista con 3.73 millones de toneladas generadas ese mismo año (Ritchie & Roser, 2020). En la Figura 3.1 se presenta un mapa que da una idea de la cantidad de desechos plásticos generados por cada país en 2010. Aunque es importante aclarar que sólo se tomó en cuenta la generación de desechos plásticos *per se* y no representa los residuos que se reciclan o reciben algún tipo de tratamiento, por lo que un gran productor de desechos no es necesariamente un gran contaminador del mundo.

## Generación mundial de desechos plásticos en 2010

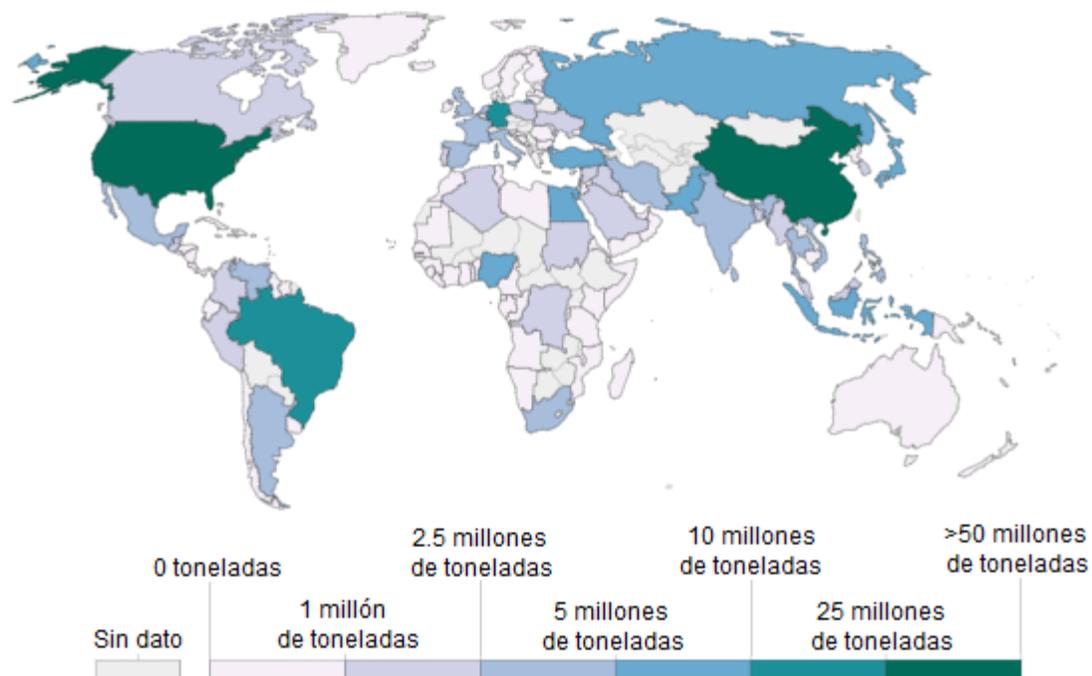


Figura 3.1: Generación mundial de desechos plásticos en 2010.

Modificado de: Ritchie, H. & Roser, M. (2020). Plastic Pollution [en línea]. Publicado en: [ourworldindata.org](https://ourworldindata.org). Recuperado el 9 de enero de 2020 de: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

De la producción anual total de plásticos, cerca del 85% de cada sector se convierte en desecho para el final del año. En la Figura 3.2 se observa explícitamente la cantidad de desechos en toneladas según el tipo de plástico en 2015.

## Desechos plásticos por polímero en 2015

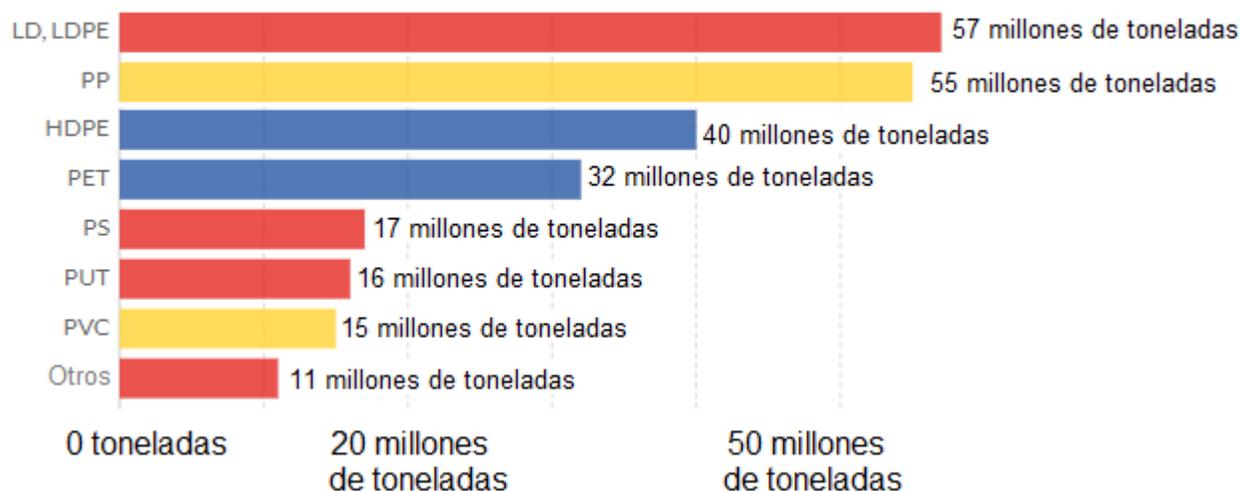


Figura 3.2: Desechos plásticos por polímero en 2015.

LD, LDPE (Polietileno de baja densidad); PP (Polipropileno); HDPE (Polietileno de alta densidad); PET (Polietileno tereftalato); PS (Poliestireno); PUT (Poliuretanos); PVC (Cloruro de polivinilo).

Se ha coloreado cada barra para indicar qué tan reciclable resulta cada tipo de polímero. En azul, los polímeros ampliamente reciclados; en amarillo, los polímeros que algunas ocasiones se reciclan dependiendo el contexto local y finalmente en rojo, los polímeros no reciclables.

Modificado de: Ritchie, H. & Roser, M. (2020). Plastic Pollution [en línea]. Publicado en: [ourworldindata.org](https://ourworldindata.org). Recuperado el 9 de enero de 2020 de: <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-waste-polymer>

Como se puede observar, la cantidad de desechos que no recibe un tratamiento o sólo se recicla dependiendo de la localidad donde se genera, excede por mucho a la cantidad de desechos que sí tienen un correcto proceso de reciclado, por lo que ya se puede intuir el gran problema de contaminación y acumulación de plástico que enfrenta el mundo actualmente.

## **3.2 DESECHOS PLÁSTICOS EN MÉXICO**

En México se cuenta con estadísticas nacionales acerca del uso del plástico desde 1970, pero únicamente son estadísticas de fabricación y no propiamente de desechos, las estadísticas de contaminación por desechos de plástico surgen hasta 1990.

El Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales es el encargado de analizar, cuantificar y publicar las estadísticas relacionadas a desechos urbanos, utilizando la palabra residuos para referirse a estos. En esta instancia gubernamental no solo se contemplan los efectos ambientales, sino también los problemas de salud pública derivados de la generación o manejo de desechos y el uso de los recursos naturales en general.

La gestión integral de los residuos pretende, además de procurar reducir su generación y conseguir su adecuada disposición final, dar como resultado colateral la reducción, tanto de la extracción de recursos naturales, como de energía y agua que se utilizan para producirlos, así como la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero (SEMARNAT, 2016). Todo ello persiguiendo importantes beneficios económicos, sociales y ambientales.

### **3.2.1 TIPOS DE RESIDUOS GENERADOS EN MÉXICO**

Los residuos en México se definen como los materiales o productos que se desechan ya sea en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, que se contienen en recipientes o depósitos, y que necesitan estar sujetos a tratamiento o disposición final con base en lo dispuesto en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2003). Se clasifican de acuerdo a sus características y orígenes en tres grupos:

- Residuos Sólidos Urbanos (RSU)
- Residuos de Manejo Especial (RME)
- Residuos Peligrosos (RP)

### **3.2.2 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)**

Para los fines que convienen a este trabajo, la categoría de interés que se estudiará son los RSU, pues de ellos se desprende un gran porcentaje de la contaminación plástica que afecta al país y son los que sufren gran rezago en cuanto a procesos de gestión y reciclaje. Este tipo de residuos son contabilizados y gestionados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son aquellos que se producen en las casas habitación como consecuencia de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (por ejemplo, residuos de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques, o residuos orgánicos); los que provienen también de cualquier otra actividad que se realiza en establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias y los resultantes de lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole (SEMARNAT, 2016). En la Figura 3.4 se muestra la composición de los RSU en todo el territorio nacional. Se destaca que más de la mitad de los residuos son de índole agrícola y que los plásticos contribuyen con un 10.9% del total, sin embargo, existen diversas estrategias para reutilizar y disponer de desechos considerados orgánicos, mientras que en este trabajo se hacen propuestas para los residuos plásticos.

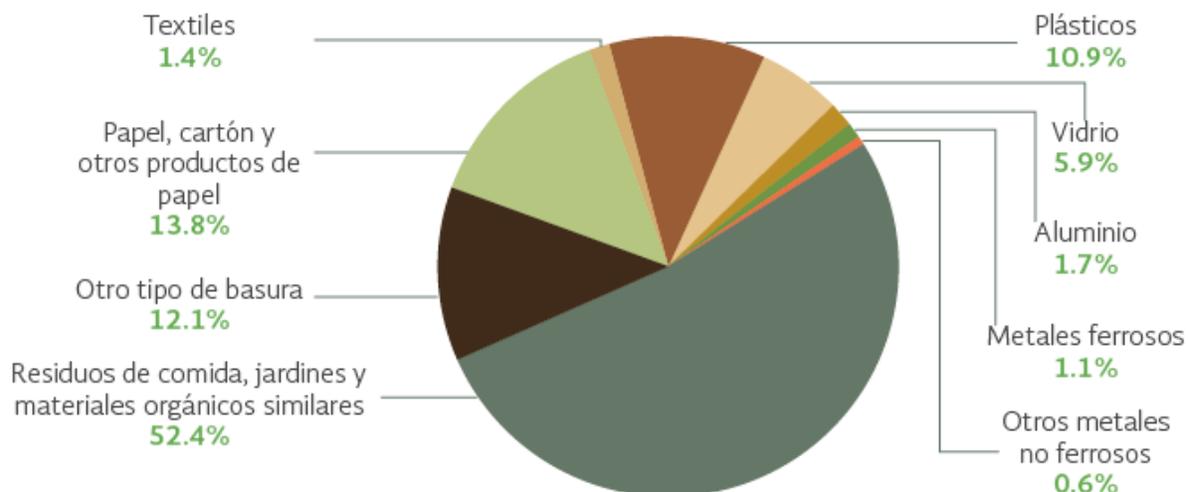


Figura 3.4: Composición de los RSU en México en 2012.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2016). Acciones y Programas: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

### 3.2.3 RSU GENERADOS POR REGIÓN EN MÉXICO

En el 2015 en México la generación de RSU alcanzó 53.1 millones de toneladas, lo que representó un aumento del 61.2% con respecto a 2003 (10.24 millones de toneladas más generadas en ese período). Si se expresa por habitante, alcanzó 1.2 kilogramos en promedio diariamente en el mismo año.

El aumento en la generación de RSU puede explicarse como resultado de múltiples factores, reconociéndose entre los más importantes:

- El crecimiento urbano e industrial
- Las modificaciones tecnológicas
- Cambio en los patrones de consumo de la población

Se puede afirmar que, a mayores niveles de consumo, se produce un mayor volumen de RSU. En el caso mexicano, entre 2003 y 2012, el producto interno bruto (PIB) y la generación de residuos crecieron prácticamente a la misma tasa (alrededor de 2.77%

anual). Esta misma relación puede encontrarse a nivel de entidad federativa: aquéllas que contribuyeron mayormente al PIB nacional también lo hicieron al volumen nacional de RSU, como se muestra en la Figura 3.5 (SEMARNAT, 2016).

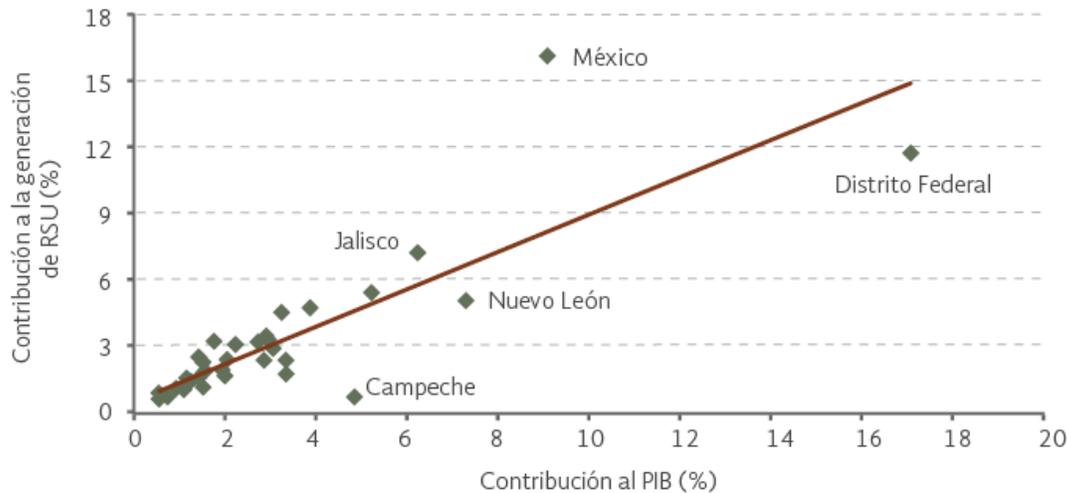


Figura 3.5: Contribución al PIB y a la generación de RSU por entidad federativa en 2012.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2016). Acciones y Programas: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

No obstante, en algunos casos la contribución a la producción total nacional de RSU de algunas entidades se desvía notablemente de la tendencia general, como en el caso del Estado de México (que produce más residuos respecto a la tendencia) o Campeche (que produce menos de lo esperado). Esto se explica básicamente por la alta contribución al PIB del estado de México, debida a su importante actividad industrial y a su alta población; mientras que en el caso de Campeche, su comportamiento se debe a su intensa actividad petrolera y a su baja población.

Las diferencias en la distribución de la población sobre el territorio provocan que la generación de residuos varíe geográficamente: los mayores volúmenes se producen en las zonas con mayor concentración de población. De acuerdo con la regionalización de la SEMARNAT, en 2012 la región Centro concentró el 51% de la generación de RSU, le siguió la Frontera Norte con 16.4% y el Distrito Federal con el 11.8% (Figura 3.6).

Dentro de las regiones, entre 1997 y 2012 el patrón de generación ha sido muy heterogéneo: en la región Frontera Norte aumentó 214%, en la zona Centro 53%, en la Sur 49% y en el Distrito Federal aumentó 20%. La única región que mostró una reducción del 25% en ese periodo fue la Norte, al pasar de 6 a 4.5 millones de toneladas de RSU.

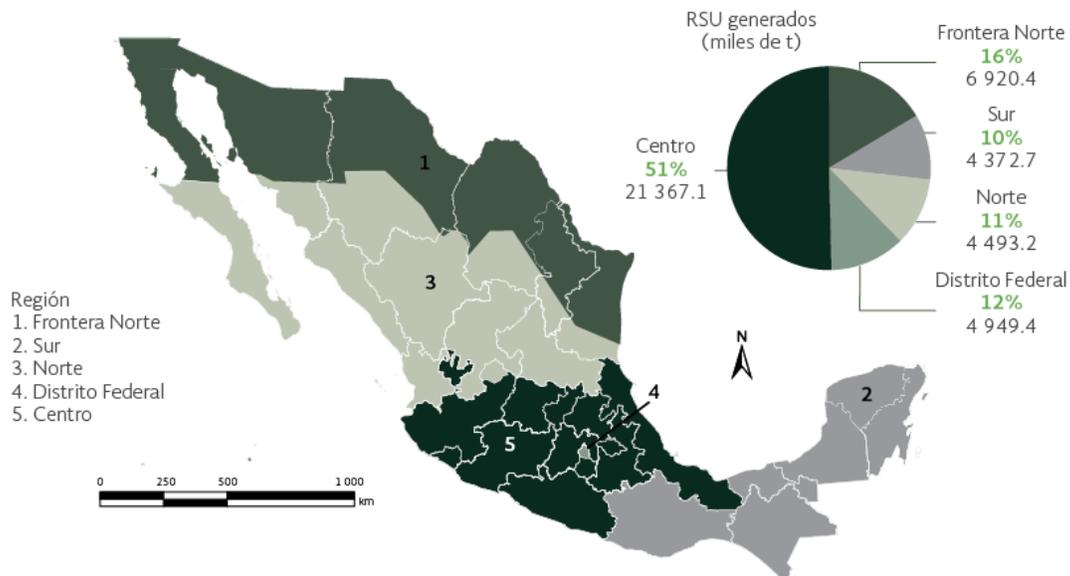


Figura 3.6: Generación nacional de RSU en 2012.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2016). Acciones y Programas: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

Si se clasifica a las entidades federativas por el volumen de RSU producidos (Figura 3.7), cinco concentraron el 45.7% del total nacional en 2012:

- Estado de México (6.7 millones de t; 16.1%)
- Ciudad de México (4.9 millones de t; 11.8%)
- Jalisco (3.1 millones de t; 7.2%)
- Veracruz (2.3 millones de t; 5.5%)
- Nuevo León (2.2 millones de t; 5.1%)

Mientras que las que registraron los menores volúmenes fueron:

- Nayarit (347 mil t; 0.82%)
- Tlaxcala (339 mil t; 0.81%)
- Campeche (272 mil t; 0.65%)
- Baja California Sur (259 mil t; 0.62%)
- Colima (228 mil t; 0.5%)

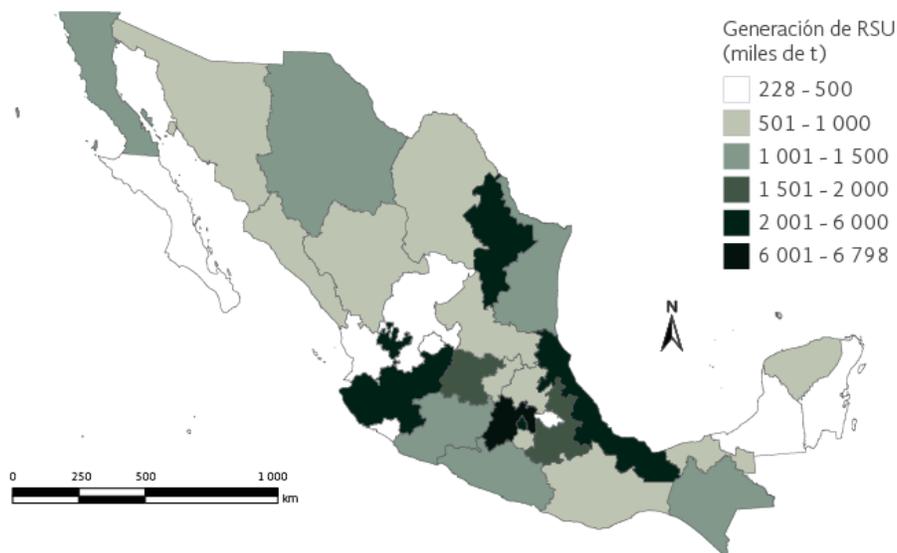


Figura 3.7: Generación de RSU por entidad federativa en 2012.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2016). Acciones y Programas: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

Se puede ya empezar a percibir cierta relación entre el nivel de industrialización, densidad poblacional y generación de RSU, se reconoce que las entidades con mayor urbanización y por lo tanto mayor poder adquisitivo, tiene estándares de vida con altos niveles de consumo de bienes y servicios, generando así mayor volumen de residuos. Así a la inversa, en las comunidades pequeñas o rurales, los habitantes basan principalmente su consumo en productos menos manufacturados que, por lo general,

carecen de materiales que terminan como residuos, por ejemplo, envolturas (SEMARNAT, 2016).

Siguiendo esta lógica, tiene sentido que las zonas con mayor industrialización y población, sean entonces las que más residuos generan, lo cual se puede confirmar en la Figura 3.8.

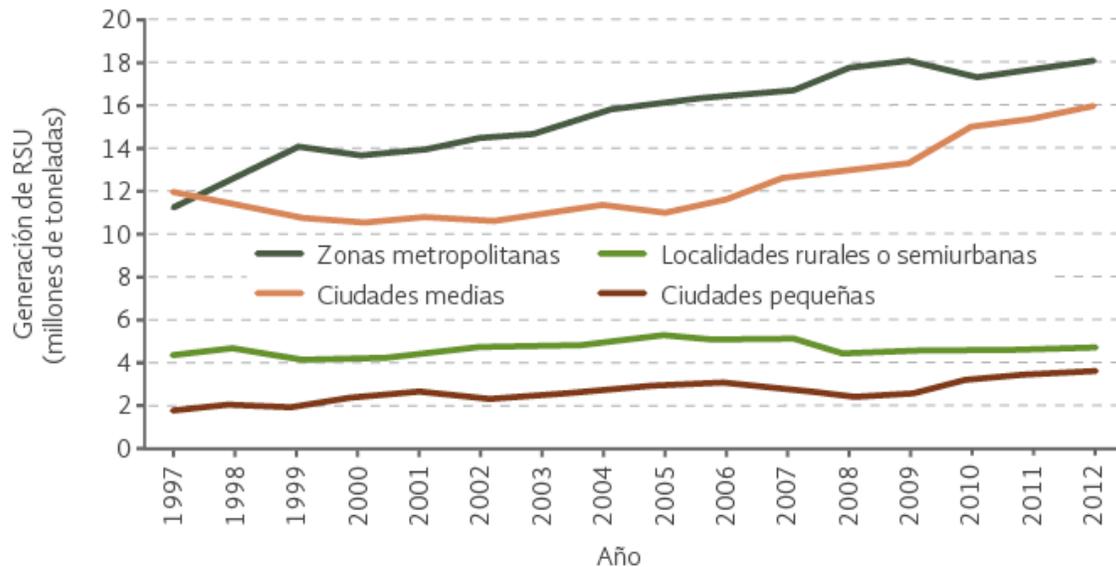


Figura 3.8: Generación de RSU por tipo de localidad desde 1997 hasta 2012.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2016). Acciones y Programas: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

Para SEMARNAT las zonas metropolitanas son las ciudades integradas por más de un municipio con una población mayor a un millón de habitantes. Las ciudades medias son todas aquellas que formaron parte del programa “100 ciudades” y las incluidas en los planes estratégicos de los gobiernos de los estados. Las ciudades pequeñas son aquellas cuya población es mayor a 15,000 habitantes y no incluidas en el programa que se mencionó anteriormente y, finalmente, las localidades rurales o semiurbanas corresponden a las que tienen una población menor a 15,000 habitantes.

## 3.3 GESTIÓN DE RSU EN MÉXICO

### 3.3.1 RECOLECCIÓN DE RSU

Para poder darle uso o llegar a la disposición final a los residuos generados en el territorio nacional, es necesario el paso de recolección, por medio del cual se concentran, transportan y clasifican los residuos generados en las diferentes ciudades.

La recolección es un servicio público que comprende la colecta de los RSU en el sitio donde se producen (casas, las industrias, los comercios o los edificios públicos (Figura 3.9) y su traslado hasta el sitio donde se tratan o disponen (SEMARNAT, 2016). Desde el punto de vista ambiental y de salud pública, tiene una relevancia fundamental, pues los residuos que se colectan pueden recuperarse o dispuestos adecuadamente.

En contraste, aquéllos que no se recolectan pueden permanecer en los sitios de generación o diseminarse, ocasionando efectos negativos, tales como: obstruir desagües y cursos de agua (generando riesgo de inundación), contaminar los cuerpos de agua y los suelos, deteriorar el paisaje o convertirse en fuente de enfermedades para la población, entre otros (UN-habitat, 2011).



Figura 3.9: Método de recolección de basura en México

Fuente: Notimex (2019, 26 de mayo) CDMX prevé ahorrar ocho mil 500 mdp con programa Basura Cero [en línea]. El sol de México sección Metrópoli. Recuperado el 10 de septiembre de 2019, de <https://www.elsoldemexico.com.mx/metropoli/cdmx/cdmx-preve-ahorrar-ocho-mil-500-mdp-con-programa-basura-cero-3675679.html>

Presumiblemente en México se cuenta con la capacidad de recolectar más del 80% de los RSU desde 1998. Ese porcentaje no ha hecho más que aumentar a más del 90% (Figura 3.10), lo cual es un excelente inicio para el procesamiento adecuado de la basura.

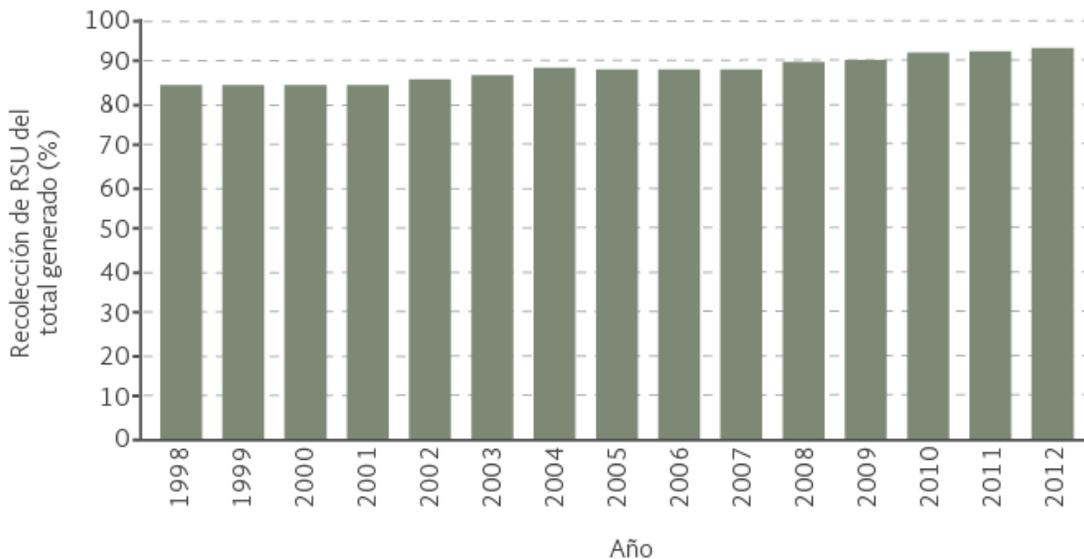


Figura 3.10: Recolección de RSU a nivel nacional en 2012.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2016). Acciones y Programas: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

Es alarmante el hecho de que se pueda ver tanta basura tirada en las calles y se generen constantes inundaciones a causa del menos de 10% que no se recolecta, pues nos da una idea de la gran cantidad de basura que se genera en nuestras entidades.

A continuación, se presenta un mapa de recolección por entidad federativa del año 2012 (Figura 3.11), donde de nuevo es consistente la afirmación de que las zonas más pobladas, con mayor urbanización y mayor generación de residuos son también las que tienen mejores procesos de recolección de basura. Esto puede explicarse porque las zonas más urbanizadas frecuentemente cuentan con mayor infraestructura y presupuesto para la gestión de los residuos que las localidades rurales.

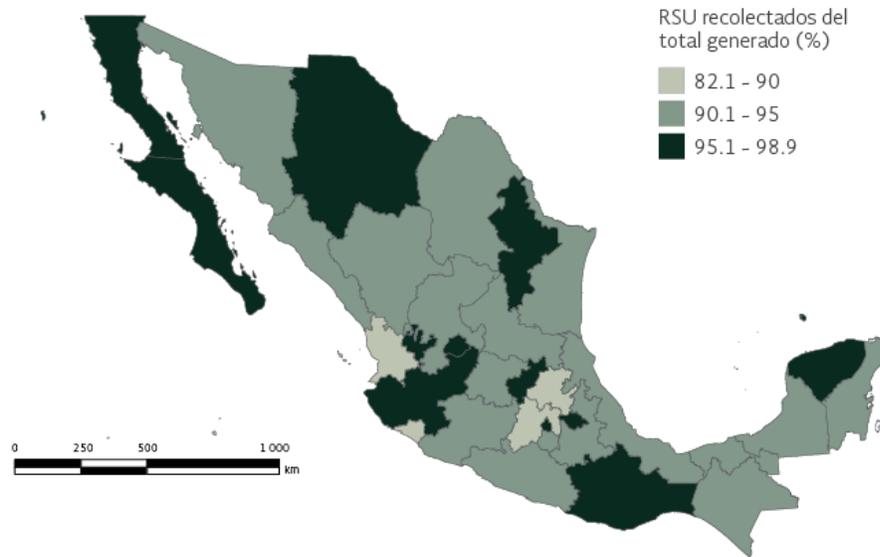


Figura 3.11: Recolección de RSU por entidad federativa.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2016). Acciones y Programas: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

En 2012, en las zonas metropolitanas del país la cobertura en la recolección de los residuos alcanzó 90%, mientras que en las ciudades medias fue de 80%, en las pequeñas de 26% y en las localidades rurales o semiurbanas alcanzó 13%.

A nivel nacional, el 95.6% de los municipios cuentan con servicio de recolección, y sólo Oaxaca presenta un número importante de entidades sin este servicio: 87 municipios; lo que representa el 3.5% de los municipios a nivel nacional y el 15% de los municipios de ese estado.

### **3.3.2 SEPARACIÓN DE RSU**

Un paso crucial durante la recolección de los residuos sólidos es la separación o clasificación de los desechos. Si esta selección se hace de manera correcta, puede tener múltiples ventajas en cuando a su manejo y disposición final. Cuando los residuos se separan previamente a su recolección es posible aumentar la cantidad y la calidad de los materiales reciclables; en contraste, los que se recuperan a partir de residuos no separados tienden por lo general a estar contaminados, lo que reduce su valor en el mercado y su posible reciclaje.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) vigente para todo el país en 2018 habla de dos niveles de separación de residuos:

- Separación Primaria: Acción de segregar los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en orgánicos e inorgánicos.
- Separación Secundaria: Acción de segregar entre sí los residuos sólidos urbanos y de manejo especial que sean inorgánicos y susceptibles de ser valorizados.

El artículo 18 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) de 2018, establece que los residuos sólidos urbanos podrán clasificarse en orgánicos e inorgánicos (Figura 3.12) con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria, de conformidad con los Programas Estatales y Municipales para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos y los ordenamientos legales aplicables, siendo:

- Residuos orgánicos: Todo desecho de origen biológico que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo.
- Residuos inorgánicos: Todo desecho que no es de origen biológico.



Figura 3.12: Iconografía que por ley debe ser utilizada en espacios públicos para identificar los residuos en las categorías “Orgánico” e “Inorgánico” en México.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2016). *Acciones y Programas: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU*. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/clasificacion-reciclaje-y-valoracion-de-los-rsu>

En la Tabla 3.13 se observan ejemplos de los residuos que pueden ser clasificados en las diferentes categorías:

Tabla 3.13: Separación primaria de residuos en la Ciudad de México

Residuos orgánicos	Residuos inorgánicos
Flores	Papel
Pasto	Cartón
Hojasca	Plástico
Restos de comida	Vidrio
Cáscaras de fruta, verdura, hortalizas	Metales
Cascarón de huevo	Ropa y textiles
Restos de café y té	Maderas procesadas
Pan, tortillas	Envases multicapas
Golosinas	Utensilios de cocina
Bagazo de frutas	Residuos sanitarios
Productos lácteos (sin recipiente)	Bolsas de frituras
Cenizas, viruta de lápiz y aserrín	Calzado, hule
Huesos y productos cárnicos	Gomas, chicle

Servilletas de papel usadas	Espejos, celofán
Heces de animales	Plumas, plumones, lápices
Desechables degradables (fécula de maíz, caña, aguacate, etc)	Poliestireno expandido (Unicel)
	Cerámicos
	Colillas de cigarro

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente SEDEMA. (2013). Norma Ambiental NADF-024-AMBT 2013 sobre Separación, Clasificación, Recolección Selectiva y Almacenamiento de los Residuos del Distrito Federal. Recuperado el 22 de septiembre de 2018, de <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/images/infografias/NADF-024-AMBT-2013.pdf>

A partir de esta clasificación, cada estado es independiente para hacer más subclasificaciones para facilitar la recolección y el reciclaje de sus residuos. La SEMARNAT aconseja que sean al menos 8 categorías (Figura 3.14) en las que se clasifiquen los residuos, pero ningún estado de la república es absolutamente estricto con esta recomendación.



Figura 3.14: Categorías que SEMARNAT propone para la separación de RSU.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2016). Acciones y Programas: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

De acuerdo a la información del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales, hasta 2010 sólo 11% de la recolección de desechos en el país era selectiva; las entidades que colectaron de esta forma el mayor volumen de sus residuos fueron Querétaro (57% del volumen producido en la entidad), Jalisco (40%) y Nuevo León (30%). En ese mismo año, 12 entidades federativas no realizaban recolección de este tipo (SEMARNAT, 2016).

### 3.3.2.1 SEPARACIÓN DE RSU EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Como en muchas grandes ciudades del mundo, el mayor problema al momento de hacer tratamiento de reciclaje o de degradación química, es que la basura no está correctamente separada y al existir una mezcla de compuestos, las únicas alternativas viables son la incineración a la acumulación de desechos a cielo abierto o en rellenos sanitarios.

Para disminuir la cantidad de RSU emitidos en la Ciudad de México y aumentara la cantidad de residuos reciclados en México, se creó en 2013 la norma NADF-024-AMBT-2013, que aparte de contemplar la disminución en el envío de residuos a otras entidades, obliga a los ciudadanos a separar la basura en cuatro categorías (véase Tabla 3.15).

Tabla 3.15: Categorías para separación de residuos en la Ciudad de México.

Orgánicos	Inorgánicos reciclables
<p>Son todos aquellos residuos de origen natural que pueden "echarse a perder" o convertirse en composta</p> <p><b>Ejemplos:</b> Cáscaras de fruta o verdura, restos de comida, pan, tortillas, huesos, semillas, flores, pasto y hojarasca</p> <p><b>Se utilizan para:</b> Abono para plantas, alimento para animales de granja, jabones y biogás</p>	<p>Son los residuos que sí pueden ser convertidos nuevamente en materia prima</p> <p><b>Ejemplos:</b> Papel, cartón, plástico, vidrio, metales, ropa, textiles, madera, tetrapack</p> <p><b>Se utilizan para:</b> Reincorporarlos al proceso de producción, y darles valor nuevamente</p>

Inorgánicos no reciclables	De manejo especial y voluminoso
<p>Son los residuos que no pueden ser transformados</p> <p><b>Ejemplos:</b> Residuos sanitarios, colillas de cigarro, preservativos, toallas sanitarias, chicles, hisopos, unicel, calzado, bolígrafos</p> <p><b>Se utilizan para:</b> Valorización energética (co-procesamiento) o tratamiento térmico.</p>	<p>Son los residuos de gran tamaño o que por tener componentes especiales, como electrónicos, requieren manejo especial.</p> <p><b>Ejemplos:</b> Electrodomésticos, equipo de informática y telecomunicaciones, aparatos eléctricos o electrónicos, muebles, radiografías, baterías, llantas, juguetes.</p> <p><b>Se utilizan para:</b> Varía dependiendo la composición. Se separan sus partes para revalorizar.</p>

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente SEDEMA. (2013). Norma Ambiental NADF-024-AMBT 2013 sobre Separación, Clasificación, Recolección Selectiva y Almacenamiento de los Residuos del Distrito Federal. Recuperado el 22 de septiembre de 2018, de <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/images/infografias/NADF-024-AMBT-2013.pdf>

La entrada en vigor de esta ley permitió disminuir casi en un 10% la cantidad de RSU enviado a rellenos sanitarios de otras entidades; pues si los ciudadanos separan la basura desde su origen es posible enviar los RSU a diferentes procesos de reciclaje, por ejemplo: los residuos orgánicos a plantas de composta, la cual eventualmente es distribuida a agricultores de Milpa Alta (Valdéz, 2018).

### **3.3.2.2 PLANTA DE SEPARACIÓN DE RESIDUOS EN VALLEJO, CIUDAD DE MÉXICO, 2019**

La campaña de separación de residuos en cuatro categorías en la Ciudad de México fue un proyecto que se impulsó fuertemente a nivel local y federal, sin embargo, con el tiempo perdió fuerza y un par de años después de la puesta en vigor de la NADF-024-AMBT-2013 la basura volvía a mezclarse en los camiones recolectores, incluso cuando la gente la separaba correctamente en sus hogares.

El gobierno de la ciudad de México volvió a poner en marcha proyectos de separación de residuos en 2019, el más ambicioso en la construcción de una planta separadora de residuos en la colonia Vallejo.

Esta planta será fundada junto a otra de transferencia de residuos, que ya recibe los RSU de varias colonias aledañas. También se destacó que actualmente la Ciudad de México envía cerca de 9 mil toneladas de residuos a rellenos sanitarios del Estado de México.

El proyecto tendrá una inversión de 300 millones de pesos y aunque es una cifra elevada, la jefa de gobierno asegura que enviando los residuos a rellenos sanitarios de estados vecinos se gastan cerca de 2 mil millones de pesos al año (Notimex, 2019).

Aunque un proyecto de ese calibre es ambicioso, es claro que la separación de basura debe comenzar desde la generación de los residuos, es decir, con los ciudadanos; pues cuando ya existe mezcla de basura orgánica e inorgánica, se tendría que incluso lavar los plásticos para que pudieran tener una correcta degradación química. Al no poder garantizar su limpieza, se compromete el reciclaje de la basura y únicamente quedan como opciones el relleno sanitario o la incineración.

## CAPÍTULO IV

# ¿CÓMO SE ELIMINAN LOS PLÁSTICOS?

*“A menos de que a alguien como tú esto le importe muchísimo,  
nada va a mejorar.”*

Dr. Seuss

La única manera de eliminar permanentemente los plásticos en la actualidad es por medio de algún tratamiento térmico destructivo de incineración.

Según la NOM-098-SEMARNAT-2002, la incineración se define como cualquier proceso para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica en la cual todos los factores de combustión como la temperatura, el tiempo de retención, y la turbulencia pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos.

En esta definición se incluyen procesos como pirólisis y gasificación, que son los más utilizados en el mundo (GAIA, 2017), los cuales serán descritos a continuación.

## **4.1 TRATAMIENTOS TÉRMICOS PARA LA ELIMINACIÓN DE PLÁSTICO**

### **4.1.1 COMBUSTIÓN**

La combustión de plásticos puede entenderse como su incineración. Una reacción química relativamente rápida de carácter notablemente exotérmico. La liberación de energía de esta reacción puede utilizarse en otros procesos, sin embargo, los desechos sólidos y gaseosos generados deben ser contenidos y no liberados al medio ambiente (GAIA, 2017).

### **4.1.2 PIRÓLISIS**

La pirólisis se define como la descomposición química de todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno y cualquier halógeno. En casos de pirólisis extrema, el único residuo es carbono. Un ejemplo claro de pirólisis es la degradación de caucho de llantas mediante calor en ausencia de oxígeno.

Si bien la combustión y pirólisis pueden llevar el plástico hasta carbono, tienen la gran desventaja de ser procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos, siendo una opción muy costosa para la mayoría de las plantas de tratamiento de residuos (GAIA, 2017).

### **4.1.3 GASIFICACIÓN**

La gasificación es una mezcla de incineración y pirólisis que pretende transformar residuos sólidos orgánicos en gas o combustibles a través de la combustión. Se someten los residuos sólidos a altas temperaturas (generalmente sobre los 600°C, llegando a los 1400°C) en un ambiente sin oxígeno. Los niveles de oxígeno se mantienen en cero para prevenir una combustión inmediata; en lugar de eso, la parte a base de carbono de los residuos sólidos se descompone en gas de síntesis (*syngas*) y un remanente sólido conocido como escoria, ceniza o residuo de carbón. Cabe señalar que las operaciones en condiciones sin oxígeno son difíciles de llevar a cabo durante las operaciones a escala comercial por su alto costo.

La gasificación a alta temperatura también tiene el beneficio de fundir las cenizas, es decir el contenido inorgánico de los residuos de entrada, para producir una escoria, que es inerte (López-Camacho, 2018).

El *syngas* se compone principalmente de monóxido de carbono, hidrógeno y dióxido de carbono, aunque se encuentran presentes otros contaminantes; además, tiene el valor calorífico suficiente para ser quemado y transformado en energía, pero requiere sistemas avanzados de control de la contaminación (APC por sus siglas en inglés). A menudo, las instalaciones operativas no logran producir la energía suficiente para ser económicamente rentables (GAIA, 2017).

## **4.2 TECNOLOGÍA UTILIZADA PARA COMBUSTIÓN DE DESECHOS**

En 2005 existían en el mundo alrededor de 760 plantas de incineración de basura en operación. Los países que destacan por incinerar su basura son Dinamarca y Suecia, quienes incineran el 55% de la basura que producen, seguidos por Holanda con el 48%, Suiza con el 45% y Alemania con el 42% (Arvizu-Fernández, 2010). En estos países las tecnologías más utilizadas con los incineradores de parrilla, hornos rotatorios y lecho fluidizado, que se detallarán a continuación:

### **4.2.1 INCINERADOR DE PARRILLA**

Las parrillas móviles son el sistema más utilizado para el tratamiento térmico de residuos. Más de 400 plantas en el mundo operan con esta tecnología.

Las partes que componen estas parrillas son:

- Alimentador de residuos
- Parrilla de incineración
- Descargador de ceniza de fondo
- Sistema de conducción de aire de incineración
- Cámara de incineración
- Quemadores auxiliares

Todos estos componentes deben ser capaces de sobrevivir a incendios ocasionales sin daños y la temperatura promedio en la que operan estos incineradores es de 850°C a 1100°C (López-Camacho, 2018).

Los residuos son descargados a las rampas de alimentación por medio de una grúa suspendida y dirigidos a sistema de parrillas por medio de una rampa hidráulica o algún sistema transportador similar. Se utiliza una tolva para de llenado para el suministro continuo de residuos. Se recomienda que haya una cantidad uniforme de residuos en la rampa para el funcionamiento uniforme del horno, para esto se agregan mecanismos de dosificación hidráulicos o mecánicos entre las rampas y los hornos (Figura 4.1).

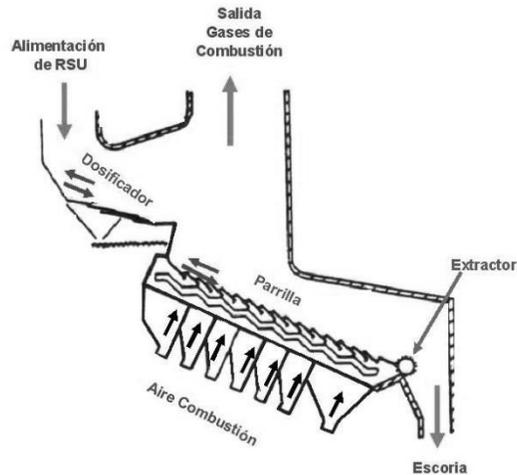


Figura 4.1: Diagrama del funcionamiento de un incinerador de parrilla.

Fuente: Sarmiento-Torres, R. (2000). Incineración de residuos urbanos y generación de electricidad [en línea]. Revista *Energía a Debate*. Recuperado el 10 de enero de 2020, de <https://www.potencianatural.com.mx/energia/Articulos/enero2008/Sarmientoene2008.htm>

Mediante el sistema de control de combustión se puede preescribir el tiempo de incineración y la velocidad de entrada para lograr una combustión uniforme de los residuos, que ahora se dirigen al horno en la rejilla rumbo a la parrilla. Todo incinerador tiene una zona de incineración principal en la cámara de incineración, en donde existe una buena distribución del aire de incineración en el horno. Un soplante de aire primario fuerza la entrada de aire a través de aberturas en la capa de la parrilla para mejorar la combustión. El proceso completo de incineración no suele durar más de 60 minutos.

Algunos materiales que no están del todo incinerados, caen por los agujeros de la rejilla y son colectados en el fondo por el extractor de cenizas. Estas pequeñas piezas son llamadas tamizados o cribados y pueden reinsertarse en la parrilla para su incineración o retirarse para su eliminación.

Algunas plantas de incineración de mayor tecnología, colocan un medio refrigerante líquido desde las zonas frías hasta las zonas más calientes de las parrillas y utilizan el calor absorbido para uso en el proceso o suministro externo.

## 4.2.2 HORNO ROTATORIO

Esta tecnología es más comúnmente empleada para residuos clínicos y biológicos, no realmente para residuos urbanos, por lo que únicamente se mencionará su fundamento sin entrar a mayor detalle.

En la Figura 4.2 se observa un diagrama del funcionamiento de un horno rotatorio, el cual consiste en un vaso cilíndrico ligeramente inclinado sobre el eje horizontal. Este vaso normalmente se encuentra situado entre rodillos que generan la oscilación del vaso sobre su propio eje. Este proceso se realiza entre 850°C a 1100°C, en este tipo de horno, el tiempo puede variar mucho según el contenido de cloro de los residuos (López-Camacho, 2018).

La ceniza acumulada en la cámara del horno se vierte en un transportador de escoria y se lleva a un contenedor y los sobrantes se dirigen a una cámara de postcombustión y se extraen y confinan las cenizas resultantes del proceso (López-Camacho, 2018).

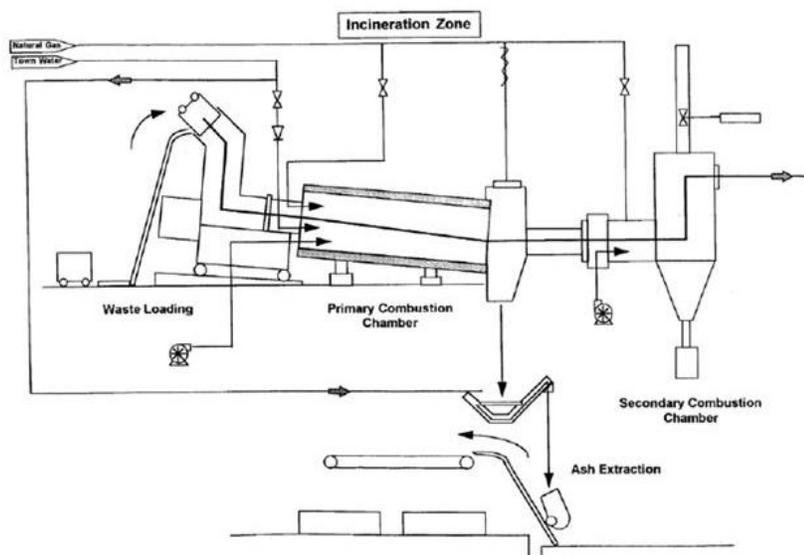


Figura 4.2: Diagrama del funcionamiento de un horno rotatorio.

Fuente: López-Camacho, S. (2018). Planta de incineración de residuos sólidos urbanos a partir de una tecnología de parrilla. Tesis de maestría. Universidad de Sevilla, España.

### **4.2.3 INCINERADOR DE LECHO FLUIDIZADO**

Este tipo de incineradores se utilizan por lo general con combustibles homogéneos como hulla, lignito crudo, lodos o biomasa.

El reactor es una cámara de combustión vertical de estructura similar a un embudo de acero revestido que contiene en la parte inferior un lecho inerte de materiales inertes, como arena de sílice, piedra caliza, alúmina o material cerámico (López-Camacho, 2018).

Este material está soportado por una rejilla refractaria perforada que permite que el aire se inyecte mediante difusores ubicados debajo de la rejilla, lo cual expande el lecho y permite que fluya el combustible. Los residuos pueden inyectarse en el lecho neumáticamente, mecánicamente o por gravedad.

La acción de movimiento constante del lecho fluidizado provoca una mezcla rápida y uniforme de los desechos y el material del lecho, lo que resulta en buenas condiciones de combustión. Además, el movimiento en el lecho y su capacidad de almacenamiento térmico inherente aumenta la combustión del material y minimiza la generación de cenizas de fondo. La Figura 4.3 permite conocer la estructura de un horno de lecho fluido.

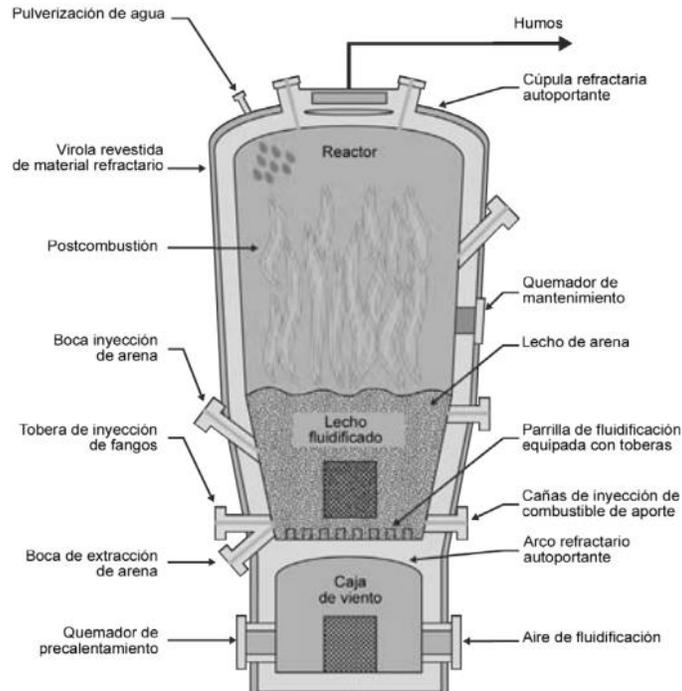


Figura 4.3: Diagrama de la estructura de un incinerador de lecho fluidizado.

Fuente: Degrémont (2011). Procesos térmicos de destrucción de materia orgánica. Manual Técnico del Agua Degrémont. Recuperado el 20 de enero de 2020, de <http://www.degremont.es/es/images/pdf/ft-manual%20tecnico%20degremont-n3-thermylis.pdf>

La temperatura en el espacio libre sobre el lecho está generalmente entre 850 y 950°C. En el lecho en sí, la temperatura es inferior, y puede estar alrededor de 650°C o más.

Para residuos heterogéneos, la combustión en lecho fluidizado requiere un paso de proceso de preparación para su homogenización, como la trituración para lograr un tamaño de partícula uniforme (López-Camacho, 2018).

### 4.3 CAPACIDAD Y COSTO DE PLANTAS INCINERADORAS EN EL MUNDO

Dentro del marco de la ley europea, las plantas de incineración se dividen en dos tipos:

- a) **Plantas de incineración:** Que se dedican al tratamiento térmico de residuos y pueden o no recuperar el calor generado por la combustión.
  
- b) **Plantas de co-incineración:** Como hornos de cemento o cal, plantas siderúrgicas o centrales eléctricas cuyo objetivo principal es la generación de energía o la producción de productos materiales y en la que los residuos se utilizan como combustible o se tratan térmicamente para su eliminación.

De esta clasificación se excluyen las plantas que únicamente incineran biomasa resultante de desechos vegetales de agricultura y las plantas experimentales con una capacidad limitada utilizada para la investigación y el desarrollo de procesos de incineración mejorados.

En la Figura 4.4 se esquematiza la combustión de desechos y los productos generados en un procesamiento adecuado de estos.

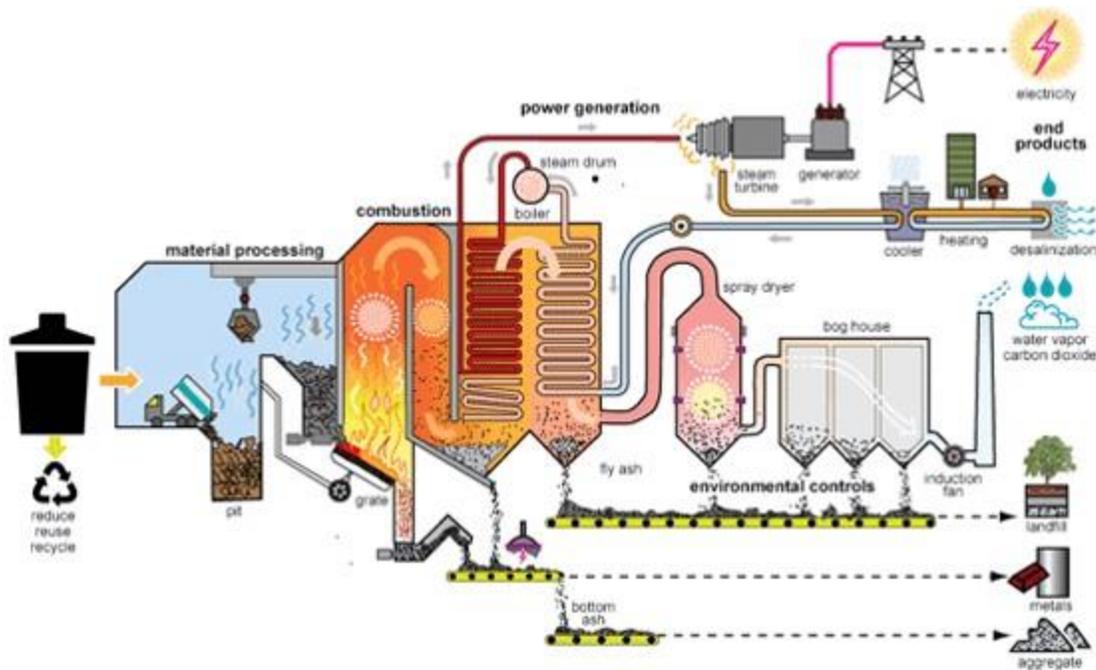


Figura 4.4: Esquema que ilustra el procesamiento general de basura por medio de combustión y los productos generados.

Fuente: Adaptado del Programa Nacional de Desarrollo de la Educación en Energía de Carleton, Canadá. Recuperado el 10 de septiembre de 2018, de [https://serc.carleton.edu/download/images/46447/solid\\_waste\\_energy\\_plant.v3.jpg](https://serc.carleton.edu/download/images/46447/solid_waste_energy_plant.v3.jpg)

Según la Agencia de Cooperación Alemana al Desarrollo, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), el costo aproximado de la incineración de residuos tiene muchas variantes a considerar dependiendo el país o la ciudad donde se quiera establecer una planta incineradora, desde la infraestructura como la obra civil, hornos, calderas, equipos para manejo de cenizas, etc; hasta los costos de operación, como los productos químicos utilizados, mantenimiento, servicio de limpieza, electricidad o agua.

Para tener una idea de cuánto cuesta incinerar residuos por tonelada en distintas partes del mundo, la Tabla 4.5 enumera la capacidad de la planta que se toma de ejemplo, así como el costo de incinerar una tonelada de residuos. En el caso de México y los países Sudamericanos, las cifras que se proveen son una proyección, pues esas plantas no habían sido concluidas para el 2011.

Tabla 4.5: Capacidad y costo de capital de diferentes plantas de incineración en 2011.

Capacidad y costo de capital de diferentes plantas de incineración en 2011

Lugar	Capacidad [t/año]	Costo de capital por tonelada de capacidad [US\$*año/t]
Moscú, Rusia	360,000	800
París, Francia	460,000	1,313
Shanghái, China	500,000	331
Riverside, Reino Unido	670,000	617
Brescia, Italia	796,000	460
País de bajos ingresos	-	300 - 500
País de ingreso medio	-	400 - 600
País de altos ingresos (América del Norte y Europa)	-	600 - 900
Estudio de caso: Valparaíso, Chile	336,000 (proyección)	670
Estudio de caso: Toluca, México	160,000 (proyección)	750
Estudio de caso: Buenos Aires, Argentina	990,000 (proyección)	595

Modificado de: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) (2011). Plantas de incineración de residuos sólidos urbanos. Revisión de costos y emisiones a la atmósfera, con una aproximación a los rellenos sanitarios. Recuperado el 10 de enero de 2020, de

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279569/Costos\\_y\\_emisiones\\_plantas\\_de\\_incineracion.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279569/Costos_y_emisiones_plantas_de_incineracion.pdf)

## 4.4 CASO DE ÉXITO EN LA INCINERACIÓN DE BASURA

### 4.4.1 PLANTA INCINERADORA DE KLEMETSrud, NORUEGA, 2018

Una de las plantas insignia en el procesamiento de basura es la planta de incineración de Klemetsrud en Oslo, Noruega (Figura 4.6). Es tan eficiente que Noruega ha tenido que importar basura de otros países para poder ayudar con el problema de contaminación mundial (Lars-Bevanger, 2015).



Figura 4.6: Maquinaria utilizada en el procesamiento de desechos plásticos en la planta de incineración de Klemetsrud en Oslo, Noruega.

Fuente: Lars-Bevanger, L. (2015, 23 de noviembre). *First-world problem? Norway and Sweden battle over who gets to burn waste* [en línea]. Periódico digital DW. Recuperado el 7 de septiembre de 2018, de <https://www.dw.com/en/first-world-problem-norway-and-sweden-battle-over-who-gets-to-burn-waste/a-18772064>

Esta planta de procesamiento de desechos ha sido tan exitosa que acabó con los plásticos desechados en Noruega y para que la planta siga siendo rentable trabajando a su capacidad óptima ha sido necesario comenzar a importar basura. La planta de Klemetsrud es capaz de generar energía que se distribuye a 60,000 hogares y negocios de la capital noruega (Lars-Bevanger, 2015).

“El proceso de incineración ocurre en un horno gigante que oscila entre los 850 y los 1,000°C, el calor generado del proceso de incineración es usado para calentar agua, esta agua se envía al sistema de calefacción de Oslo y adicionalmente se obtiene energía a partir del vapor generado, lo cual beneficia a cerca de 340,000 habitantes de la capital.” explica Jannicke Gerner Bjerkås, el encargado de la parte operativa de la planta de procesamiento de desechos de Klemetsrud (Figura 4.7).



Figura 4.7: Centro de control de la planta de incineración de Klemetsrud en Oslo, Noruega.

Fuente: Lars-Bevanger, L. (2015, 23 de noviembre). First-world problem? Norway and Sweden battle over who gets to burn waste [en línea]. Periódico digital DW. Recuperado el 7 de septiembre de 2018, de <https://www.dw.com/en/first-world-problem-norway-and-sweden-battle-over-who-gets-to-burn-waste/a-18772064>

Esta planta puede incinerar 300 toneladas de desechos cada día, lo cual significa que necesita cantidades enormes de basura para funcionar de manera óptima.

El siguiente problema al que se enfrenta este tipo de plantas es que el mundo ya no presenta una tendencia a incinerar residuos, si no que ahora se promueve el reciclaje, de lo cual se hablará más adelante en este trabajo.

## 4.5 CASOS DE FRACASO EN LA INCINERACIÓN DE DESECHOS

### 4.5.1 VALLEY OF THE DRUMS, KENTUCKY, ESTADOS UNIDOS

La mala gestión de una planta de procesamiento de residuos en Kentucky ocasionó la que es considerada la exposición a dioxinas más grande en todo Estados Unidos, devastando una comunidad de 2,000 personas y convirtiendo la ciudad en un pueblo fantasma. Las dioxinas, cuya estructura se muestra en la Figura 4.8, son consideradas moléculas altamente tóxicas de vida media entre 7 y 11 años.

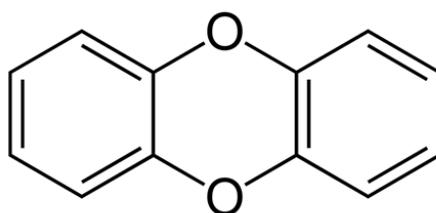


Figura 4.8: Estructura general de las dioxinas

Fuente: Cheremisinoff, N. & Rosenfeld, Paul. (2010). Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production. *Best Practices in the Wood and Paper Industries* (pp.83-134) Estados Unidos de América. Elsevier.

Por muchos años, el valle de Drums había sido considerado un vertedero de residuos tóxicos resultantes de plantas incineradoras de otros condados circundantes. Valley of the Drums se encontraba muy pobremente regulado y con deudas por mal funcionamiento que nunca fueron cubiertas. Las sustancias tóxicas se acumulaban en barriles, como se muestra en la Figura 4.9. Con el paso de los años, los contenedores se deterioraron y en el 1979 se descubrió que el contenido de los barriles oxidados estaba entrando al flujo de ríos porque había fuertes olores a las orillas del río y varias casas y embarcaciones habían sido dañadas (EPA, 1981).

El pueblo fue desalojado y pasaron 5 años antes de que las autoridades diseñaran un programa de limpieza que oficialmente terminó de llevar de a cabo en 1990. A pesar de que ya no existían registros de contaminación, la población no volvió a habitar el pueblo (Filiatreau *et al.*, 1979).



Figura 4.9: Evidencia del desastre de Valley of the Drums.

Fuente: Filiatreau, J., & Hornblower, M. (1979, 4 de febrero). Kentucky Hunts Cleanup Funds for Valley of the Drums [en línea]. The Washington post. Recuperado el 8 de septiembre de 2018, de [https://www.washingtonpost.com/archive/politics/1979/02/04/kentucky-hunts-cleanup-funds-for-valley-of-the-drums/ea2fabcc-ccb-4d1c-8c85-b9d3b58fe7d4/?noredirect=on&utm\\_term=.8fab29901a50](https://www.washingtonpost.com/archive/politics/1979/02/04/kentucky-hunts-cleanup-funds-for-valley-of-the-drums/ea2fabcc-ccb-4d1c-8c85-b9d3b58fe7d4/?noredirect=on&utm_term=.8fab29901a50)

#### **4.5.2 KHIAN SEA WASTE INCIDENT, HAITÍ Y EL OCÉANO ATLÁNTICO**

Un barco con un cargo de 14,000 toneladas de ceniza provenientes de empresas incineradoras de Pennsylvania fue enviado esperando su aceptación a Nueva Jersey, sin embargo la carga fue rechazada y los conductores del barco perteneciente a la empresa Khian Sea, mostrado en la Figura 4.10, intentaron desechar las cenizas cerca de las Bahamas, pero el gobierno los interceptó e impidió el descargo.

Durante los siguientes 16 meses el barco viajó por el Océano Atlántico con la intención de descargar los desechos en diferentes países, como República Dominicana, Honduras, Panamá, Guinea Bissau y las Antillas Holandesas, pero sus peticiones fueron negadas. Posteriormente el barco descargó 4,000 toneladas de desechos cerca de Haití, haciéndolos pasar por fertilizante.

Finalmente el navío descargó las 10,000 toneladas restantes en el Océano Atlántico e Índico en su regreso a Estados Unidos. En 1997 *The New York Trade Waste Commission* investigó el caso y obligó a los dueños del barco a contribuir a la limpieza de los océanos con una multa y retiró su licencia de embarque (The New York Times, 1988).



Figura 4.10: Barco Khian Sea, responsable de descargar 14,000 toneladas de ceniza en territorio haitiano y en el Océano Atlántico en 1986.

Fuente: The New York Times. (1988, 27 de noviembre). After 2 Years, Ship Dumps Toxic Ash [en línea]. The New York Times. Recuperado el 9 de septiembre de 2018, de <https://www.nytimes.com/1988/11/28/us/after-2-years-ship-dumps-toxic-ash.html>

### **4.5.3 ACCIDENTE EN EL INCINERADOR DE POOLBERG, IRLANDA, 2017**

Una noche de junio del 2017 en Dublín, Irlanda, once trabajadores de la nueva planta incineradora *Waste-to-Energy* de Poolberg comenzaron a quejarse porque tenían problemas para respirar, visión borrosa y náuseas.

El responsable de la planta declaró que los malestares se debieron a que había habido una fuga de cal, que, en vez de ser expulsada por una de las chimeneas, se acumuló dentro del edificio.

Al enterarse de esta noticia, la Agencia de Protección al Medio Ambiente (EPA) y las autoridades de salud y seguridad de dicho país comenzaron a indagar sobre las causas del accidente, pues la planta estaba recién inaugurada y contaba con todos los permisos necesarios para operar (Figura 4.11).



Figura 4.11: La planta incineradora de Poolberg, operada por Dublin Waste-to-Energy

Fuente: BBC News. (2017, 8 de junio). Poolbeg incinerator workers hospitalised after incident [en línea]. BBC News. Recuperado el 12 de septiembre de 2018, de <https://www.bbc.com/news/world-europe-40199683>

"En la noche del miércoles, una pequeña cantidad de cal fue liberada inadvertidamente dentro del área de tratamiento de gases de combustión durante la puesta en marcha y las pruebas de la planta de Dublin Waste-to-Energy en Poolberg", se indicó en un comunicado.

"Estamos investigando para entender qué ocurrió exactamente, pero de la investigación preliminar se desprende que la liberación de la cal se debió a un problema con el sello de la puerta en la cámara de filtrado del aire", agregó el encargado.

Aunque este accidente no tiene el impacto ambiental de las anteriores, se debe destacar que la planta de Poolberg es considerada una de las más modernas en el mundo, desarrollada en un país con amplia experiencia en plantas incineradoras. Se podría pensar incluso que en países que parecen tener gran avance en este tipo de tecnologías, siguen ocurriendo incidentes que dañan la salud de los trabajadores y pueden generar contaminación del aire con sus residuos.

## 4.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los productos derivados a partir de estos tres procedimientos comprenden emisiones atmosféricas, escorias (una forma de residuo sólido), cenizas volantes (que requiere manejo especial debido a su toxicidad que podría considerarse contaminación atmosférica) y residuos líquidos y/o aguas residuales.

Según la consultora ambiental GAIA en 2017 enlistó las notables desventajas de cualquiera de estos tres:

- 20% - 30% del peso de los residuos se convierte en ceniza. En lugar de evitar el relleno sanitario, la incineración es simplemente un paso previo al enterramiento de estos en rellenos sanitarios de residuos que se vuelven más peligrosos a través de la combustión.
- Los desechos suelen estar combinados, materia orgánica con inorgánica, haciendo los procesos de incineración y pirólisis de alguna manera inciertos y poco controlados.
- Mediante estos procesos son generadas emisiones intensas de carbono, emisiones de compuestos orgánicos persistentes (dioxinas, furanos, mercurio), metales pesados, material en suspensión, nanopartículas y otros contaminantes que no pueden ser liberados al medio ambiente.
- Sin un control, normatividad estricta y planeación estratégica las plantas incineradoras han demostrado tener accidentes fatales para el ambiente y para sus trabajadores. Para asegurar el correcto funcionamiento de una planta de este tipo se requiere una gran cantidad de dinero como inversión inicial y también contar con mantenimiento especializado cada cierto tiempo.
- Las incineradoras no permiten que los procesos de reciclaje se desarrollen a su máximo potencial, pues la materia prima del reciclaje se ve, literalmente, reducida a cenizas.
- Los procesos de pirólisis y gasificación tienen problemas alcanzando cantidades industriales, si bien pueden brindar energía a comunidades pequeñas, no

podrían generar energía suficiente para las grandes ciudades o industrias con sistemas de alto consumo de energía. No es económicamente viable.

- Algunos movimientos sociales han empezado a manifestar rechazo a la construcción de incineradores o a su operación bajo la premisa de que la presencia de mayor cantidad de incineradoras incentiva a la sociedad a generar más basura.
- Los miembros de la sociedad que están en contra de los incineradores han decidido apegarse a un estilo de vida sin desechos (*Zero-waste*). Su estilo de vida se ha ido expandiendo fuertemente por Europa y gradualmente los inversionistas van perdiendo interés en temas de procesos de incineración de desechos, pues actualmente la meta es no generarlos.

Un informe realizado en China en 2015 sobre los 160 incineradores de Residuos Sólidos Municipales (RSM) existentes y en funcionamiento en el país, señaló que el 40% de ellos tiene información incompleta de las emisiones atmosféricas y sólo el 8% tiene información disponible para el público respecto de las dioxinas. Dentro de los que tienen información incompleta, el 69% tiene registros de violar las normas medioambientales chinas.

Hay compañías alemanas, inglesas, chinas y norteamericanas que han experimentado con estas técnicas o combinaciones de ellas, sin embargo muchas de esas plantas se han visto forzadas a cerrar debido a fallas técnicas o fracaso financiero, aparte del surgimiento de oposición por parte de la comunidad y problemas de fiscalización ante el gobierno local (GAIA, 2017).

En la Tabla 4.12 se presenta un resumen de las ventajas y desventajas de cada uno de los tratamientos térmicos de residuos sólidos actualmente implementados.

Es importante mencionar que uno de los residuos gaseosos de estos procesos es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), lo cual los descalifica para pedir subvenciones públicas, pues los procesos no pueden catalogarse como “energías renovables”.

La legislación europea para la incineración de residuos sólidos del 2002, que es de las legislaciones más estrictas en temas medioambientales para procesos a gran escala, únicamente establece valores límite de emisión y requisitos de monitoreo de contaminantes al aire como polvo, óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), cloruro de hidrógeno (HCl), fluoruro de hidrógeno (HF), metales pesados y dioxinas y furanos. También se establecen controles sobre las emisiones al agua resultantes del tratamiento de los gases residuales (European Comission, 2016).

Tabla 4.12: Ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos de residuos sólidos actuales.

Tecnología	Ventajas	Desventajas
<b>Combustión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de volumen</li> <li>• Emisiones controladas</li> <li>• Aprovechamiento de calor para generación de electricidad y otras aplicaciones</li> <li>• Alternativa a rellenos sanitarios cuando no hay espacio</li> <li>• Relativamente silenciosos e inodoros (siempre y cuando se tomen las medidas previstas)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta inversión inicial</li> <li>• Dificultad de operación (necesidad de mano de obra especializada)</li> <li>• Posible generación de productos sumamente nocivos para la salud (dioxinas, furanos, metales pesados)</li> <li>• Problemas con las comunidades cercanas al incinerador. Posibles conflictos con programas destinados a la reducción en la generación de residuos</li> <li>• Requieren de más energía si se tratan residuos con altos porcentajes de humedad</li> </ul>
<b>Pirólisis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aprovechamiento de subproductos en otros procesos</li> <li>• Permite generar productos específicos de acuerdo a las condiciones de operación</li> <li>• Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados y azufrados peligrosos (selección previa de materiales que se ingresan al proceso)</li> <li>• Facilidad de manejo de los productos finales (excepto los líquidos por su alto poder corrosivo y viscosidad)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo de inversión inicial</li> <li>• Cuidado en la operación para no obtener productos no deseados</li> <li>• Aún no se cuenta con instalaciones de gran escala</li> <li>• Los recursos más deseados son separados para fines de reciclaje</li> <li>• Requieren de más energía si se tratan residuos con altos porcentajes de humedad</li> </ul>
<b>Gasificación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención de un gas de síntesis con varios usos (producción de electricidad, uso como combustible, producción de una amplia gama de químicos)</li> <li>• Facilidad de manejo de los productos obtenidos</li> <li>• Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados, dioxinas y azufrados peligrosos (selección previa de materiales que se ingresan al proceso)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complejidad de operación.</li> <li>• Experiencias a gran escala limitadas</li> <li>• Utilización de recursos que preferiblemente son destinados al reciclaje</li> <li>• Requieren de más energía si se tratan residuos con altos porcentajes de humedad</li> </ul>

Fuente: CEGESTI (2014). Recuperado el 23 de septiembre de 2018 de [http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion\\_253\\_240314\\_es.pdf](http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_253_240314_es.pdf)

## 4.7 INCINERACIÓN DE RSU EN MÉXICO

En México la Secretaría de Energía SENER y la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT son las encargadas de la gestión y operación de plantas de incineración de residuos sólidos urbanos, así como de su revisión de costos y emisiones a la atmósfera por medio del Programa de Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México.

Las propuestas de plantas de incineración en México nacieron no sólo con la ambición de deshacerse de los residuos, sino con la de generar energía eléctrica para una verdadera revalorización de los desechos, dicha tecnología se denomina *Waste-to-energy* y ha sido ampliamente explorada por otros países.

La energía resultante de plantas de este tipo que han sido propuestas para gobiernos de distintas localidades, ofrecen generar energía para aprovecharla en alumbrado público, bombeo de agua o transporte masivo, como el metro, basándose en los proyectos de este tipo que han prosperado en países extranjeros, específicamente en Estados Unidos y Europa (Arvizu-Fernández, 2010).

Como se mencionó anteriormente, en México se genera casi un kilogramo de basura por habitante al día, del cual 58.1% termina en rellenos sanitarios, 9,4% en sitios controlados y 32.5% en basureros a cielo abierto. Como se puede inferir de estas estadísticas, no existe un porcentaje de basura incinerada porque México no existen plantas incineradoras de basura.

Aunque ciertamente hay lugares donde la basura es quemada para deshacerse de ella, formalmente no existe ninguna planta que cumpla con la regulación que se menciona más adelante (Arvizu-Fernández, 2010). Ya sea por lo estricta que es la normatividad o el elevado costo que representa en comparación a otras opciones de revalorización de basura, lo cierto es que ninguna planta en México es capaz de aprovechar la basura para generar energía a partir de ella, como sí ocurre en otros países más desarrollados.

A pesar de los cuantiosos beneficios que podría tener la construcción de una planta incineradora de residuos, como reducir la cantidad de materiales enviados a los rellenos

sanitarios, prevenir contaminación de agua, aire y suelo, mejorar programas de reciclaje, requiere menos espacio que otras opciones de tratamiento de desechos y disminuye la dependencia de combustibles fósiles; no se ha concretado ni siquiera la construcción de alguna de estas plantas en el país.

Recientemente, en 2017, se informó la construcción de la primera planta de revalorización de desechos *Waste-to-energy* en el Bordo Poniente de la Ciudad de México a cargo de la empresa francesa Veolia, proyectada para empezar operaciones en 2020 y cuya energía generada sería destinada a la operación del Metro de la ciudad (El Economista, 2018).

Sin embargo, el proyecto fue cancelado al cambio de administración siguiente, en 2018 se informó que la planta termovalorizadora no se construiría al considerar, según la jefa de gobierno, que su funcionamiento no dejaría de emitir impactos negativos al medio ambiente (Excelsior, 2018)

#### **4.8 LEGISLACIÓN RELACIONADA CON LA INCINERACIÓN DE DESECHOS**

Todos los mexicanos tienen derecho a disfrutar de un ambiente adecuado, por lo que aquéllos que realicen obras que puedan afectar el ambiente, están obligados a prevenir, minimizar, o reparar los daños que causen, asumiendo los costos que eso implique.

Para eso, en México se han generado distintos protocolos, parámetros y medidas precautorias plasmadas en ordenamientos legales a diferentes niveles u obligación de cumplimiento, a continuación se presentan las principales leyes, normas o reglamentos relacionados a la incineración de residuos, así como los pasajes más relevantes en cuanto a esta actividad.

## **4.8.1 LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE**

Lo relacionado a incineradores y su operación en esa Ley se encuentra en el artículo 142, contemplando que en ningún caso podrá autorizarse la importación de residuos para su derrame, depósito, confinamiento, almacenamiento, incineración o cualquier tratamiento para su destrucción o disposición final en el territorio nacional o en las zonas en las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.

También contempla que las autorizaciones para el tránsito por el territorio nacional de residuos no peligrosos con destino a otra nación, sólo podrán otorgarse cuando exista previo consentimiento de ésta.

En el artículo 15 BIS en sus diferentes fracciones, menciona que la SEMARNAT será la encargada de autorizar la prestación de servicios a terceros que tengan por objeto la operación de sistemas para la recolección, almacenamiento, transporte, reúso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos, así como la instalación y operación de sistemas para el tratamiento o disposición final de residuos peligrosos, o para su reciclaje cuando éste tenga por objeto la recuperación de energía, mediante su incineración.

## **4.8.2 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-098-SEMARNAT-2002**

La Norma Oficial Mexicana, NOM-098-SEMARNAT-2002 relacionada a la protección ambiental - incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes, declara las condiciones de operación a la que deberían estar sujetas las plantas de incineración nacionales, según los acuerdos internacionales logrados en el Convenio de Estocolmo. Entre estas condiciones, se encuentran:

- Toda planta incineradora debe tener instalaciones adecuadas para recibir los residuos, así como para su almacenamiento y manejo con una capacidad mínima de dos veces la capacidad diaria de operación autorizada, así como un sistema para el pesaje de los residuos que se reciban.
- La instalación de incineración debe contar con los sistemas de control o con una planta generadora de energía eléctrica para emergencias, que garanticen el paro seguro y la combustión completa de los residuos en caso de falla del suministro eléctrico.
- Las empresas de servicios a terceros deben contar con un laboratorio dentro de sus instalaciones, el cual deberá realizar una evaluación presuntiva del contenido de cloro en cada lote de residuos admitidos, por cualquier método de análisis.
- El diseño, equipamiento y funcionamiento de las instalaciones de incineración deben permitir que la temperatura de los gases derivados de la incineración de los residuos se eleve, aun en las condiciones más desfavorables, hasta por lo menos 850°C, alcanzados en o cerca de la pared interna, de la cámara de combustión final, durante un tiempo mínimo de por lo menos dos segundos. Para aquellos residuos cuya temperatura de destrucción sea mayor a 1100°C, la SEMARNAT podrá determinar la temperatura y tiempo de residencia a cumplir, para garantizar su destrucción.
- La unidad de incineración debe estar equipada con quemadores que se pongan en marcha de manera automática cuando la temperatura descienda por debajo de la mínima establecida para su operación, así como con un sistema de paro automático en la alimentación de residuos peligrosos.
- El operador debe mantener un registro diario en bitácora foliada o archivos electrónicos, a disposición de la PROFEPA, en la cual registrará datos específicos de la incineración de desechos:
  - a) Tipo y cantidad de residuos incinerados, en el caso de las empresas de servicios a terceros, los resultados del análisis de cloro
  - b) Temperatura del equipo en las diferentes cámaras y equipos de control
  - c) Tipo y cantidad de combustible consumido
  - d) Arranques, paros y horas de operación del equipo

- e) Fallas y problemas presentados durante la operación del equipo, señalando las medidas correctivas adoptadas para el restablecimiento de las condiciones normales de operación
  - f) Mediciones de los contaminantes especificados en las tablas de esta Norma
  - g) Condiciones de operación del equipo de control de emisiones (presión, temperatura y tasa de alimentación)
  - h) Cantidad, tipo y destino final de los residuos generados por el incinerador
  - i) Nombre y firma del responsable de la instalación de incineración
- No se permite la alimentación manual del incinerador o con otros residuos no autorizados por la SEMARNAT.
  - Las instalaciones de incineración deben de contar con un Programa para Atención a Contingencias y con los sistemas o procedimientos para prevenir y responder a incendios o explosiones, así como a fugas o derrames de residuos.
  - Las cenizas y otros residuos sólidos que se generen durante los procesos de incineración, serán considerados como residuos peligrosos, por lo que su manejo deberá cumplir con lo establecido en los ordenamientos legales aplicables; y si el contenido de materia volátil en la ceniza es mayor al 10%, éstas deben ser realimentadas al incinerador.
  - La instalación de incineración debe contar con sistemas para la medición continua de indicadores de buenas prácticas de operación y control, contando por lo menos con un equipo de monitoreo continuo para la temperatura de la cámara de combustión final y para las emisiones de monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O<sub>2</sub>), a la salida de los gases de chimenea.
  - Para llevar a cabo la medición de las emisiones a la atmósfera, los incineradores deben contar con plataforma y puertos de muestreo en el ducto de salida de los gases.
  - No deben incinerarse residuos peligrosos que sean o contengan compuestos orgánicos persistentes y bio-acumulables o plaguicidas organoclorados, así como baterías y acumuladores usados que contengan metales tóxicos.

En cuanto a las emisiones que se pueden liberar al ambiente, los límites máximos permitidos se especifican en la Tabla 4.13, y ninguno de estos gases puede rebasar la temperatura de 250°C.

Tabla 4.13: Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos.

CONTAMINANTE	LIMITE DE EMISION	FRECUENCIA DE MEDICION	NORMA QUE APLICA O METODO
CO (mg/m <sup>3</sup> )	63	CONTINUO	Infrarrojo No Dispersivo y Celda Electroquímica Anexo 1
HCl (mg/m <sup>3</sup> )	15	TRIMESTRAL	NMX-AA-070-1980
NOx (mg/m <sup>3</sup> )	300	SEMESTRAL	Quimiluminiscencia Anexo 2
SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	80	SEMESTRAL	NMX-AA-55-1979
PARTICULAS (mg/m <sup>3</sup> )	50	SEMESTRAL	NMX-AA-10-SCFI-2001
ARSENICO SELENIO COBALTO NIQUEL MANGANESO ESTAÑO (mg/m <sup>3</sup> )	0.7*	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica. Anexos 3 y 4
CADMIO (mg/m <sup>3</sup> )	0.07	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica. Anexos 3 y 4
PLOMO CROMO total COBRE ZINC (mg/m <sup>3</sup> )	0.7*	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica. Anexos 3 y 4
MERCURIO (mg/m <sup>3</sup> )	0.07	SEMESTRAL	Espectrometría de absorción atómica con vapor frío Anexos 3 y 4
DIOXINAS Y FURANOS EQT (ng/m <sup>3</sup> ) Instalaciones de incineración nuevas	0.2	ANUAL	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de alta resolución Anexo 5A
DIOXINAS Y FURANOS EQT (ng/m <sup>3</sup> ) Instalaciones de incineración existentes antes de la publicación de esta NOM.	0.5	ANUAL	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de baja resolución Anexo 5B

Fuente: SEMARNAT, 2002. Norma Oficial Mexicana, NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental- Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.

### **4.8.3 NORMA MEXICANA NMX-AA-035-1976**

La Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI) publicó en 1976 dicha norma con el título “Determinación de Bióxido de Carbono, Monóxido de Carbono y Oxígeno en los gases de combustión”. Y aunque no detalla precisamente el caso de los incineradores de desechos, sí establece el método para determinar por absorción las proporciones de bióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno, que aplican para emisiones de chimeneas o motores de combustión interna.

Se detalla el procedimiento de medición de muestreo de gases y filtrado de sólidos para poder analizar la composición del fluido. Se detalla también la preparación de reactivos utilizados para dichas pruebas, aunque no se encuentran contempladas dentro de esta norma, los límites permitidos de cada sustancia, sin embargo, esa información ya se menciona en la Tabla 3.12 del presente trabajo.

### **4.8.4 REGLAMENTO DE LA LEY EN MATERIA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LA ATMÓSFERA**

Este Reglamento se refiere en el capítulo dos a la emisión de contaminantes a la atmósfera, generados por fuentes fijas. En el artículo 16 menciona que las emisiones de olores, gases, así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera que se generen por fuentes fijas, no deberán exceder los niveles máximos permisibles de emisión e inmisión, por contaminantes y por fuentes de contaminación que se establezcan en las normas técnicas ecológicas que para tal efecto expida la SEMARNAT en coordinación con la Secretaría de Salud (Tabla 3.12), con base en la determinación de los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente que esta última determina.

Este reglamento llama la atención pues contempla la rápida generación de tecnología capaz de medir o reducir los niveles de contaminantes en los gases de incineración, asegurando que según su avance podrá establecerse en la norma técnica ecológica

diferentes valores al determinar los niveles máximos permisibles de emisión o inmisión, para un mismo contaminante o para una misma fuente.

Mientras que en el artículo 17 señala que los responsables de las fuentes fijas de jurisdicción federal, por las que se emitan olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera estarán obligados a:

- Emplear equipos y sistemas que controlen las emisiones a la atmósfera, para que éstas no rebasen los niveles máximos permisibles establecidos.
- Integrar un inventario de sus emisiones contaminantes a la atmósfera, en un formato específico.
- Instalar plataformas y puertos de muestreo.
- Medir sus emisiones contaminantes a la atmósfera, registrar los resultados en un formato específicos y remitir a la SEMARNAT los registros, cuando así lo solicite.
- Llevar a cabo el monitoreo perimetral de sus emisiones contaminantes a la atmósfera, cuando la fuente de que se trate se localice en zonas urbanas o suburbanas, cuando colinde con áreas naturales protegidas, y cuando por sus características de operación o por sus materias primas, productos y subproductos, puedan causar grave deterioro a los ecosistemas.
- Llevar una bitácora de operación y mantenimiento de sus equipos de proceso y de control.
- Dar aviso anticipado a la SEMARNAT del inicio de operación de sus procesos, en el caso de paros programados, y de inmediato en el caso de que éstos sean circunstanciales, si ellos pueden provocar contaminación.
- Dar aviso inmediato a la SEMARNAT en el caso de falla del equipo de control, para que ésta determine lo conducente, si la falla puede provocar contaminación.

# **CAPÍTULO V**

## **ACUMULACIÓN DE PLÁSTICO EN RELLENOS SANITARIOS**

*“Vale más hacer y arrepentirse, que no hacer y arrepentirse.”*

Nicolás Maquiavelo

Otra opción para manejar los residuos plásticos de la población mundial es utilizarlos como relleno sanitario con o sin recuperación de biogás. Estos rellenos pueden pertenecer al estado o a particulares.

## **5.1 ¿QUÉ ES UN RELLENO SANITARIO?**

Según la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) los rellenos sanitarios son instalaciones bien diseñadas y gestionadas para el almacenamiento o eliminación de residuos sólidos. Estos rellenos se ubican, diseñan, operan y monitorean para garantizar el cumplimiento de las regulaciones federales. Estas instalaciones deben tener al menos 40,000 m<sup>3</sup> de capacidad para el depósito de desechos.

En México, según la definición de la NOM-083-SEMARNAT-2003, un relleno sanitario es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicional, los impactos ambientales.

Los rellenos sanitarios están diseñados para proteger el medio ambiente de contaminantes, que pueden estar presentes en la corriente de desechos. Los rellenos sanitarios no se pueden construir en áreas ambientalmente sensibles, y se colocan utilizando sistemas de monitoreo ambiental en el sitio. Estos sistemas de monitoreo verifican cualquier señal de contaminación del agua subterránea y de gas de la superficie del relleno sanitario, así como también proporcionan salvaguardas adicionales. Los rellenos sanitarios de hoy deben cumplir con los estrictos requisitos de diseño, operación y cierre establecidos en la ley correspondiente según cada país (EPA, 2017).

En México hasta el 58% de los Residuos Sólidos Urbanos termina en rellenos sanitarios, de los cuales, la mayoría incumple con lo establecido en la NOM-083.

## 5.2 TIPOS DE RELLENO SANITARIO

Según la EPA, los rellenos sanitarios se dividen en:

- **Relleno sanitario de desechos sólidos municipales** (MSWLFs por sus siglas en inglés): Diseñados específicamente para recibir desechos domésticos, así como otros tipos de desechos no peligrosos.
  - **Relleno sanitario con biorreactor:** Subtipo de MSWLF que opera para transformar y degradar rápidamente los desechos orgánicos.
  
- **Relleno sanitario de desechos industriales:** Diseñado para recolectar desechos comerciales e institucionales (es decir, desechos industriales), que a menudo constituyen una porción significativa de desechos sólidos, incluso en ciudades pequeñas y suburbanas.
  - **Relleno sanitario de desechos de construcción y demolición (C&D):** Es un subtipo de relleno sanitario de residuos industriales diseñado exclusivamente para materiales de construcción y demolición, que consiste en los desechos generados durante la construcción, renovación y demolición de edificios, carreteras y puentes. Los materiales de C&D a menudo son voluminosos y pesados, como concreto, madera, metales, vidrio y componentes de construcción recuperados.
  - **Relleno sanitario de residuos de combustión de carbón** (CCR, por sus siglas en inglés): Es un relleno de desechos industriales que se utiliza para administrar y eliminar los residuos de combustión de carbón.
  
- **Relleno sanitario de desechos peligrosos:** Instalaciones utilizadas específicamente para la eliminación de desechos peligrosos. Estos rellenos sanitarios no se utilizan para la eliminación de residuos sólidos.

Aunque agencias europeas y canadienses tienen diferentes clasificaciones para rellenos sanitarios, en general pueden englobarse en la clasificación de la EPA.

También se pueden clasificar según la manera en la que operan en:

- **Mecanizado:** Está diseñado para ciudades grandes que generen de 40 toneladas de basura en adelante. Es una instalación compleja que requiere planeación y operación muy específica. No solo se trata de operar con equipo pesado, sino de tomar en cuenta factores importantes, como las dimensiones del terreno, tiempo de operación, diseño y ejecución del relleno, el equipo que se necesita, gastos de operaciones y mantenimiento, la logística para la recepción de la basura y su confinamiento, etc. Este tipo de relleno necesita equipo muy preciso para el movimiento de tierra, tractores, retroexcavadora, volquete, etc.
- **Semimecanizado:** Se utiliza en comunidades que generen entre 16 y 40 toneladas de desperdicios y residuos sólidos al día. Se recomienda el uso de maquinaria pesada como complemento al trabajo y la operación manual, con el objetivo de que haya una correcta compactación y que el relleno sanitario tenga una vida útil más larga.
- **Manual:** Se utiliza por comunidades muy pequeñas que produzcan menos de 15 toneladas de desechos sólidos al día y que no tengan la posibilidad de adquirir o contar con equipo pesado para el manejo del relleno debido al costo de operación y cuidado. Generalmente una cuadrilla de hombres con herramienta pueden realizar la compactación y acomodo de los desechos.

### 5.3 REQUISITOS DE UN RELLENO SANITARIO

Para que los desechos sean utilizados en un relleno sanitario regulado correctamente, la Comisión Europea del Medio Ambiente indica que los desechos necesitan cumplir ciertas características:

1. Los desechos deben ser tratados antes de ingresar al relleno sanitario.
2. Los desechos deben estar correctamente clasificados (peligrosos o inocuos).

3. Los rellenos sanitarios para desechos no peligrosos deben ser usados únicamente para desechos municipales.
4. Cada relleno sanitario debe tener normas establecidas y conocidas por aquellos interesados en enviar residuos y al público en general.

Puede ser que algunos residuos no sean aceptados como parte del relleno sanitario, algunos ejemplos de esto, son:

- Desechos líquidos
- Desechos flamables
- Desechos explosivos u oxidantes
- Desechos clínicos u hospitalarios
- Neumáticos usados (existen excepciones)
- Desechos que no cumplan con normas vigentes o si la mezcla de residuos contiene desechos no aceptados

Gran parte del éxito que se ha tenido en el funcionamiento de los rellenos sanitarios en Europa y Asia se basa principalmente en la selección de desechos que llegan al relleno. Para poder delegar un desecho a un relleno sanitario, se necesita un permiso gubernamental. Para solicitar un permiso se necesita llenar una aplicación con datos de la persona o empresa que quiere hacer uso del relleno sanitario:

- La identidad de la empresa o institución que necesita hacer uso del relleno, a veces es necesario incluso el nombre del operador que llevará los desechos
- La descripción de los tipos y cantidades totales de residuos que desea depositar
- Capacidad de sitio requerida para la disposición de sus desechos
- Una propuesta para la prevención y reducción de la contaminación
- Plan de operación, monitoreo y control propuesto
- Seguridad financiera del solicitante
- Estudio de impacto ambiental (sólo aplica en casos específicos)

Cabe destacar que se considera responsabilidad del usuario el verificar que el relleno sanitario del que piensa hacer uso cumpla con las normas de seguridad y funcione conforme a la ley (EPA, 2017).

Si los rellenos sanitarios globalmente contaran con características, la gestión, manejo y disposición de los residuos sólidos se llevaría a cabo de manera eficiente y quizá no se tendrían los problemas de contaminación ambiental terrestre y oceánica existentes en el mundo. Pero en realidad sólo algunos países nórdicos operan de esta manera gracias a sus excelentes prácticas de separación de residuos.

Aparte de lo complicado que se vuelve el envío de residuos a rellenos sanitarios si no existe una correcta separación de desechos, se tiene que destacar la estricta regulación que también se toma en cuenta al cerrar un relleno sanitario que ha alcanzado el límite de su capacidad.

Un ejemplo de esto es la regulación ambiental de Ontario, Canadá en 2010, la cual establece que una vez que los rellenos sanitarios de residuos municipales no peligrosos hayan llegado a su máxima capacidad, se debe entregar un reporte en el que se indique la viabilidad futura del terreno y el uso de suelo incluyendo:

- Vegetación viable en ese suelo
- Propuesta para construcción de nuevos proyectos en esa superficie, tomando en cuenta la pendiente generada con el paso del tiempo con el peso de los componentes del relleno sanitario
- Costo de remoción de instalaciones del relleno sanitario (maquinaria industrial) para poder ocupar el espacio con otro propósito
- Cuidados recomendados después de la clausura
- Un reporte final del contenido del relleno sanitario
- Mapa de las corrientes de agua o cuerpos acuíferos más cercanos
- Análisis de balance en caso de precipitación, en caso de que grandes superficies de agua sean colocadas, drenaje, filtración de agua o evapotranspiración
- Identificación de zonas inestables para prevención de riesgos
- Estudio de gases que pueden ser emitidos después de diferentes períodos de tiempo

Los estudios requeridos no sólo son técnicamente complejos, sino que también existen requerimientos financieros. En el caso de Canadá, los rellenos sanitarios privados

deben contar con planes de contingencia por si ocurre algún desastre natural o industrial. Una medida que se ha tomado desde 1997 es que el dueño de un relleno sanitario privado debe aportar 50 centavos de dólar por cada tonelada de desechos depositada en el relleno sanitario (esta cantidad tomando en cuenta la inflación al momento de depositar desechos en el relleno sanitario) y una vez llegado a su límite, se mantiene en una cuenta que puede ser ocupada en caso de contingencia (Government of Ontario, 2018).

Hay países, como Noruega o Suecia en los que los rellenos sanitarios están prohibidos por ley desde 2009 (Lars-Bevanger, 2015).

Tanto la eliminación por incineración o sus derivados, como la acumulación en rellenos sanitarios son opciones que poco aportan al medio ambiente, pues en el caso de la incineración, no se conocen con certeza las consecuencias que los gases y residuos generados vayan a tener en el futuro, mientras que acumularlo bajo el suelo no es una práctica que pueda llevarse a cabo indefinidamente, pues no resuelve el problema, lo pospone.

## **5.4 ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE UN RELLENO SANITARIO**

Como se mencionó anteriormente, el propósito fundamental de un relleno sanitario es almacenar y transformar en la medida de lo posible diferentes tipos de desechos generados por la humanidad. Por lo que sus instalaciones deberían permitir el procesamiento de la basura provocando un daño mínimo al medio ambiente.

Un relleno sanitario consiste en depositar en el suelo los desechos sólidos, los cuales se esparcen y compactan reduciéndolos al menor volumen posible, para que así ocupen un área pequeña. Luego se cubren con una capa de tierra y se compactan nuevamente al terminar el día.

Durante la planeación de un relleno sanitario es importante tomar en cuenta las características que tendrá para saber si el terreno en donde se planea colocar es el ideal para este tipo de proyectos, entre ellos estudios geológicos, hidrológicos y

topográficos. Para el caso de México se especificarán los estudios necesarios más adelante.

Para construir un relleno sanitario es importante seleccionar el terreno que reúna condiciones técnicas adecuadas como son: topografía, nivel a que se encuentran las aguas subterráneas y disponibilidad de material para cubrir la basura (MSCR, 1997)

De acuerdo con las características del terreno, el relleno sanitario puede construirse siguiendo los métodos de área, zanja o una combinación de ambos métodos:

- **Método de área:** Se utiliza principalmente para rellenar depresiones o barrancos, depositando la basura compactada en la parte inferior de la depresión y se debe transportar tierra de otros sitios, como montañas o cerros, para cubrirla.
- **Método de zanja o trincheras:** Se utiliza en terrenos planos, fabricando una zanja de dos o tres metros de profundidad y depositando la basura compactada dentro, y se cubre con la misma tierra que se sacó de la zanja.

Diariamente, la basura debe ser cubierta con 10 a 20 cm de tierra. Y se debe controlar que en caso de lluvias, la impermeabilización previa sea resistente y no permita la diseminación de contaminantes a cauces fluviales por medio de drenajes planificados.

La recuperación de biogás se debe hacer por medio de estructuras diseñadas por expertos en el área que permitan su óptima recuperación y utilización, evitando fugas al medio ambiente. Diversos análisis de impacto ambiental deben ser implementados periódicamente según el país en donde se encuentren.

La estructura recomendada para el óptimo funcionamiento de un relleno sanitario se muestra en la Figura 5.1.

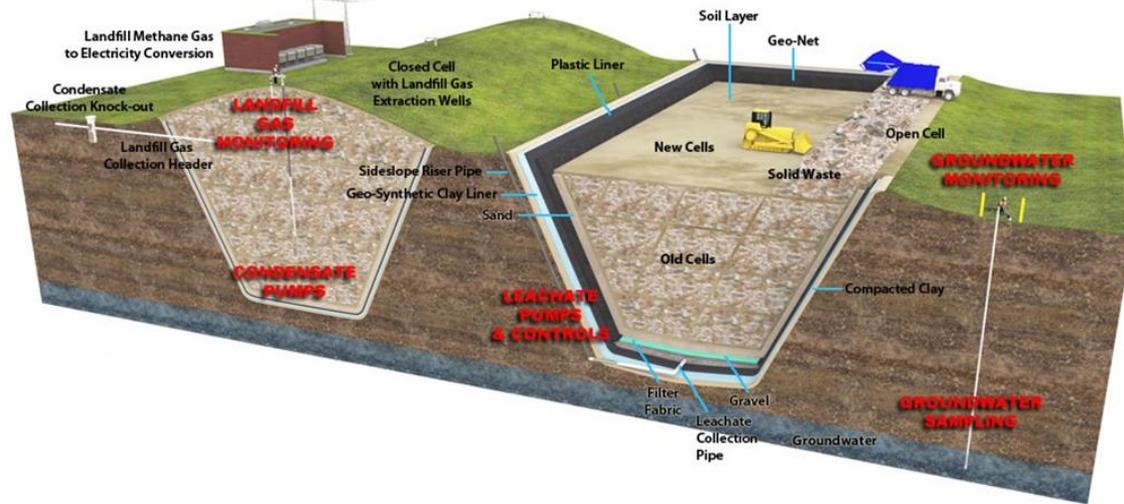


Figura 5.1: Equipo y distribución adecuada de las instalaciones de un relleno sanitario.

Fuente: Geotech Environmental Equipment, Inc. (2018). Landfill equipment. Recuperado el 10 de septiembre de 2018, de [http://www.geotechenv.com/landfill\\_equipment.html](http://www.geotechenv.com/landfill_equipment.html)

Lamentablemente, por diferentes motivos sociales, gubernamentales y económicos, la mayoría de los rellenos sanitarios no cumplen con esta estructura y funcionamiento.

## 5.5 CASOS DE ÉXITO DE UN RELLENO SANITARIO

Corea del Sur es uno de los países que han sabido aprovechar de mejor manera el espacio con relleno sanitario, transformándolo en parques ecológicos. El gobierno metropolitano de Seúl se ha preocupado por tener estricto control de los rellenos sanitarios que nacieron cerca de 1997, ya sea en el territorio de Corea, como las islas artificiales que crearon con el propósito de almacenar sus desechos.

### 5.5.1 PARQUE ECOLÓGICO DE SUDOKWON, COREA DEL SUR, 2011

El parque Sudokwon es el relleno sanitario más grande del mundo (Figura 5.2), contando con 20 millones de metros cuadrados y se encuentra a 40 minutos de Seúl. En el relleno sanitario se procesan 18,000 toneladas de desechos diariamente desde 1992, estos desechos provienen del área metropolitana de Seúl (Ministry of Environmental of South Korea, 2007).



Figura 5.2: Parque ecológico Sudokwon, construido sobre relleno sanitario en Corea del Sur.

Fuente: Ministry of Environment of South Korea. (2007). Sudokwon Landfill Site Management. Corea del Sur. Recuperado el 13 de septiembre de 2018, de <http://eng.me.go.kr/eng/web/index.do?menuId=54>

Con el gas que resulta de este relleno sanitario, la planta genera cerca de 30 millones de dólares en electricidad. Además, este relleno sanitario se convertirá en un 'Metropolitan Eco & Energy Town', es decir, en una mini ciudad energéticamente sustentable, para 2020.

Transforma los residuos en energía utilizando combustibles, lodos y biogás. Se estima que se producirán anualmente 2,61 millones de gigacalorías de energía y este relleno sanitario se convertirá en una atracción turística ecológica (Ministry of Environmental of South Korea, 2007).

## **5.5.2 PARQUE ECOLÓGICO NANJIDO, COREA DEL SUR, 2015**

La transformación de las instalaciones del relleno sanitario de Nanjido es quizá la más impresionante aplicación de la ingeniería, voluntad social y política que se haya registrado en la historia de los rellenos sanitarios.

En la Figura 5.3 se muestra cómo era inicialmente el basurero de Nanjido, como muchos otros en el mundo, sólo una gran extensión de tierra cubierta de basura. En este caso se trataba de una isla situada cerca del río Han, que en algún momento fue conocida como una isla con gran variedad de flores de temporada, coles, rábanos, melones, etc.

La rápida urbanización y el crecimiento económico en Seúl inevitablemente aumentaron el volumen de desperdicios de los hogares y los sitios industriales. Sin embargo, debido a la falta de sitios oficiales de eliminación de desechos, los desechos sólidos municipales generalmente se han desechado en basureros abiertos, como áreas residenciales y zonas pantanosas bajas. El gobierno de la ciudad se apresuró a encontrar un relleno sanitario a gran escala que pudiera almacenar cada vez más basura. Nanjido fue elegido como el relleno sanitario oficial de Seúl en 1978 por su fácil acceso y distancia desde el centro de Seúl. Desde este momento la isla se convirtió lentamente en uno de los más grandes basureros del país. Se vertían alrededor de 28,877 toneladas de basura todos los días, no fue hasta 1992, cuando se estableció un plan de relleno sanitario para hacer algo respecto a toda la basura que se estaba acumulando ahí.

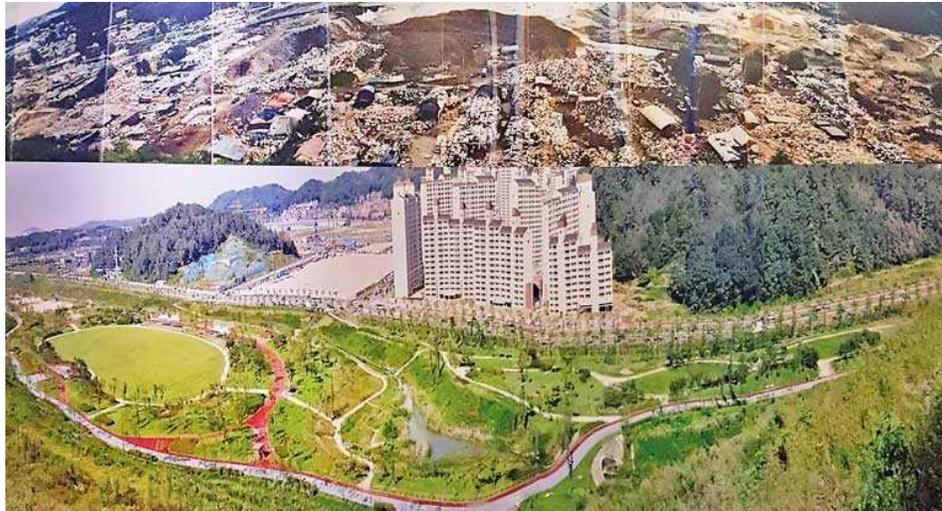


Figura 5.3: Las instalaciones de Nanjido en Corea del Sur. En la parte superior se muestra cómo era antes de la remodelación y en la parte inferior el resultado de años de acondicionamiento para volverlo parque ecológico.

Fuente: Seoul Metropolitan Government. (2015). Seoul solution: Landfill Recovery Project. Transformation of Landfill to Ecological Park. Corea del Sur. Recuperado el 14 de septiembre de 2018, de <https://seoulsolution.kr/en/content/landfill-recovery-project-transformation-landfill-ecological-park>

La isla de Nanjido se convirtió en montañas de basura sin ninguna medida de higiene que expedía un olor penetrante a desperdicios y generaba gases nocivos, como el metano, que aparte de ser tóxicos eran altamente explosivos. Los desechos acumulados en la isla también contaminaban los afluentes de agua y el ecosistema circundante.

El gobierno de Seúl empezó a reunir esfuerzos para transformar ese montón de basura en un gran espacio verde que contara con parques, senderos y actividades artísticas.

Se llevó a cabo una planificación minuciosa de 1991 a 1996 y en 1997 empezó el proyecto de recuperación de Nanjido. Este importante proyecto tuvo 4 ejes de desarrollo: recuperación y nivelación del suelo superior, tratamiento de lixiviados, extracción y reciclaje del gas generado y estabilización de pendientes en el terreno.

En un proceso que duró poco más de cinco años, el gran relleno sanitario se convirtió en un parque tan emblemático que inclusive sobre él se construyó un estadio de fútbol en el que se jugó la copa del mundo del 2002.

Con esta gran restauración Corea pretendía demostrar mucho más que gran habilidad en ingeniería ambiental, era un proyecto que representaba que una tierra de basura, simbólica de los efectos negativos de la urbanización podía renacer como un espacio ecológico (Seoul Metropolitan Government, 2015).

Actualmente el complejo de Nanjido cuenta con al menos 5 parques distribuidos de manera estratégica que lo hace un lugar muy atractivo para los turistas nacionales e internacionales.

## **5.6 CASOS DE FRACASO DE UN RELLENO SANITARIO**

Muchos de los proyectos que nacen como rellenos sanitarios se abandonan quedando como basureros a cielo abierto, donde inicialmente se buscaba emparejar la llanura para hacer áreas de topografía uniforme, se convirtieron en grandes áreas de depósito sin estrategia, control ni supervisión. Hay infinidad de listas acerca de los basureros más peligrosos del mundo, aquí muestro únicamente los considerados más tóxicos del planeta según distintas publicaciones periodísticas.

### **5.6.1 K'ARA K'ARA EN COCHABAMBA, BOLIVIA**

Un basurero de desechos municipales (Figura 5.4), con una extensión de 25 hectáreas (EPA, 1981). En este lugar se han suscitado graves incendios con comprometen la salud de las personas en ciudades aledañas (Blight, 2014).

Según medios locales, el basurero lleva contaminando ríos y pozos por más de 22 años, pues llegan más de 450 toneladas de basura diariamente (Somos Sur, 2009).



Figura 5.4: Basurero *K'ara K'ara* en Cochabamba, Bolivia.

Fuente: Blight, G. (2014, 6 de octubre). The world's biggest and most dangerous dump sites [en línea]. The Guardian. Recuperado el 15 de septiembre de 2018, de <https://www.theguardian.com/global-development/ng-interactive/2014/oct/06/world-biggest-most-dangerous-dump-sites-interactive>

Aparte de la contaminación física en aire, agua y suelo, se tiene que considerar que los basureros que se mencionarán son fuente de fauna nociva, como perros, ratas, mosquitos y amenazas microscópicas.

### **5.6.2 ESTRUCTURAL EN BRASILIA, BRASIL**

Este gran foco de infecciones tiene una extensión de 136 hectáreas y se ubica en la capital brasileña, es un basurero a cielo abierto como se ilustra en la Figura 5.5 (Blight, 2014).



Figura 5.5. Basurero Estructural en Brasilia, Brasil.

Fuente: Blight, G. (2014, 6 de octubre). The world's biggest and most dangerous dump sites [en línea]. The Guardian. Recuperado el 15 de septiembre de 2018, de <https://www.theguardian.com/global-development/ng-interactive/2014/oct/06/world-biggest-most-dangerous-dump-sites-interactive>

Este es considerado el basurero más grande de Latinoamérica, el gobierno tomó la decisión de cerrarlo en el 2018 después de 67 años de acumular desechos municipales. Se estima que hay cerca de 50 millones de toneladas de basura. Lo más preocupante de este lugar es que, al cerrarlo, 40,000 personas se quejaron del cierre, pues se trataba de los pepenadores que no solamente tenían en ese basurero su fuente de ingresos, sino sus hogares y sus familias dependían de lo que ahí encontrarán. Muchas de estas personas llevaban décadas de laborar en ese lugar, buscando latas, alambre de cobre y cualquier otro material que se pudiera revender (El Clarín, 2018).

### 5.6.3 TRUITIER EN PORT-AU-PRINCE, HAITI

Este basurero se localiza en la capital del país, tiene una extensión de 94 hectáreas llenas de una mezcla de desechos municipales y residuos peligrosos, se calcula que cada mes llegan a él 100,000 toneladas de basura (Figura 5.6), al mismo tiempo que en varias secciones se extienden incendios que contaminan aún más es aire viciado del basurero (Blight, 2014).



Figura 5.6: Basurero Truitier en Port-au-Prince, Haití.

Fuente: El comercio. (2018, 9 de diciembre). Los haitianos que se ganan la vida en un infernal vertedero de basura [en línea]. El Comercio. Recuperado el 19 de septiembre de 2018, de <https://elcomercio.pe/mundo/actualidad/haitianos-ganan-vida-hurgando-basura-fotos-noticia-556770>

Lo más destacable de este basurero es que dentro viven unas 500 familias, expuestas no solo a la falta de higiene de ese lugar, si no a riñas constantes entre los habitantes que se disputan los hallazgos más valiosos que se hacen dentro de este lugar. En la temporada de lluvias, este sitio es registrado como un foco de brotes de cólera y, lo que es peor, con la lluvia los desechos tóxicos se filtran hasta el suelo llegando a diversas fuentes de agua del país (El Comercio, 2018).

#### **5.6.4 GUIYU, CHINA**

Según estudios de gestión de desechos electrónicos de la ONU (UN-University, 2013), China es ahora el vertedero más grande de basura electrónica “*E-waste*” del mundo.

China es de los más grandes productores, consumidores y exportadores de productos eléctricos y electrónicos del mundo; aparte de ser uno de los más grandes importadores de basura electrónica. Estos productos van desde los típicos de consumo doméstico como televisores, refrigeradores, lavadoras, sistemas de aire acondicionado, hasta los más modernos sistemas de cómputo y telefonía.

Se estima que únicamente durante el año 2011, se depositaron en basureros de China:

- 1,2 millones de toneladas de televisores
- 440 mil toneladas de refrigeradores
- 320 mil toneladas de lavadoras
- 1 millón de toneladas de sistemas de aire acondicionado
- 670 mil toneladas de computadoras

En conjunto, estos cinco tipos de productos descartados ascendieron a 3,62 millones de toneladas de desechos en 2011. La mayoría de estos productos llega de manera ilegal al país asiático (United Nations University, 2013).

En el 2013 agencia de noticias CNN informó que durante la última década, la ciudad de Guiyu en el sureste de China, situada en la principal zona de fabricación de China, ha sido un centro importante para la eliminación de desechos electrónicos, pues cientos de

miles de personas que ahí habitan son expertos en el desmantelamiento de la basura electrónica del mundo.

Aparentemente, en cada calle, los trabajadores se sientan en el pavimento afuera de los talleres mientras arrancan las entrañas de electrodomésticos con martillos y taladros. Los caminos en Guiyu están llenos de paquetes de plástico, cables y otros desechos. Los componentes son separados de acuerdo a su valor y potencial para ser revendidos.

En una calle se encuentra una pila de placas verdes y doradas de circuitos. En otra, las cajas metálicas de computadoras de escritorio.

En esta provincia existen “campos” de chips plásticos que llegan hasta los tobillos.

Los habitantes afirman: “Vendemos este plástico a Foxconn”, refiriéndose a la empresa taiwanesa que fabrica productos para muchas empresas globales de electrónicos, incluidas Apple, Dell y Hewlett-Packard.

Esta se trata de una de las mayores operaciones informales de reciclado en el mundo para desechos electrónicos. Se trata de un trabajo sucio y muy peligroso para los trabajadores y para el medio ambiente.

Gran parte de la contaminación tóxica se produce por las placas de circuitos, plástico y cables de cobre que se queman, o porque las lavan con ácido clorhídrico para recuperar metales valiosos como el cobre y el acero. Este proceso contamina a los trabajadores (Figura 5.7) y al medio ambiente con metales pesados tóxicos como el plomo, berilio y cadmio, al mismo tiempo liberan cenizas de hidrocarburos en el aire, agua y tierra.

Para los que visitan Guiyu por primera vez, el aire les deja una sensación de ardor en los ojos y la nariz. Los estudios realizados por el Colegio Médico de la Universidad Shantou, en China, revelaron que más del 80% de los niños examinados en Guiyu tenían niveles de plomo más altos de lo normal en su sangre, lo que puede impedir el desarrollo del cerebro y el sistema nervioso central.

Las pantallas planas a menudo utilizan mercurio, un metal altamente tóxico. La liberación de mercurio puede ocurrir durante el desmantelamiento de equipo electrónico, al igual que durante su almacenamiento en basureros o su incineración. Este elemento aparte puede bioacumularse y biomagnificarse en altos niveles en las cadenas alimentarias, particularmente en los peces (Huo *et al.*, 2007).

La mayoría de los trabajadores en Guiyu involucrados en el negocio de los desechos electrónicos son migrantes de regiones necesitadas en China y con una educación pobre. Muchos de ellos minimizaron el daño potencial que la industria podría causar a su salud.

Pero los residentes que no trabajaban en el negocio de los desechos electrónicos ofrecían un punto de vista muy diferente sobre la contaminación en Guiyu. Un agricultor de esa provincia declaró:

“Nosotros no nos atrevemos a comer el arroz que cultivamos porque es sembrado aquí con toda la contaminación... muchos productores no se atreven a etiquetarlo como ‘cultivado en Guiyu’. Escribirán que es de otro lugar”.

Los funcionarios en la ciudad Guangzhou, aproximadamente a 400 kilómetros de Guiyu, encontraron niveles altos de cadmio en el arroz y productos hechos a base del cereal. Según la Dirección de Alimentos y Medicamentos de la ciudad, las muestras tomadas de un restaurante local, un vendedor de comida y dos comedores universitarios mostraron altos niveles de cadmio en el arroz y los fideos (CNN en Español, 2013).



Figura 5.7: Hombre de la provincia de Guiyu, China, pepenando componentes electrónicos en el basurero de aparatos electrónicos más grandes del mundo.

Fuente: CNN en Español. (2013, 11 de junio). China, el basurero electrónico del mundo [en línea]. CNN en Español. Recuperado el 11 de septiembre de 2018, de <https://cnnespanol.cnn.com/2013/06/11/china-el-basurero-electronico-del-mundo>

## 5.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL RELLENO SANITARIO

Ventajas de los rellenos sanitarios:

- Generación de energía: con una correcta gestión del relleno sanitario, es posible generar biogás a partir de la materia orgánica ahí depositada y utilizarlo como fuente de energía para otros procesos industriales.
- Costo de inversión bajo: comparado con una planta incineradora de residuos, lo cual lo cual ha hecho a los rellenos sanitarios de las opciones más atractivas a nivel mundial.
- Evita diseminación de contaminación: un relleno sanitario bien administrado, evita problemas como cenizas y materiales en descomposición en el ambiente.
- Costo de mantenimiento y operación bajo: Comparado con el mantenimiento de un incinerador u otras opciones.
- Reduce gastos de transporte: dependiendo del terreno, es posible ubicarlos relativamente cerca de áreas urbanas y reducir gastos de transporte.

### Desventajas de los rellenos sanitarios:

- Gases de efecto invernadero: se siguen emitiendo gases de efecto invernadero, pues cuando la materia orgánica se descompone, se genera metano o dióxido de carbono, los cuales contribuyen negativamente al cambio climático.
- Lixiviados: el material en descomposición puede producir aguas contaminadas o ricas en nutrientes que, si no se contienen adecuadamente, pueden filtrarse al medio ambiente circundante y potencialmente ingresar a las vías fluviales y a los suelos. Los rellenos sanitarios bien administrados generalmente están rodeados por un revestimiento protector para evitar la filtración de agua al medio ambiente circundante. Sin embargo, la contaminación local puede ocurrir cuando esto no se implementa de manera efectiva, o el revestimiento se rompe y no se reemplaza.
- Normativa estricta y económicamente complicado: se tienen que cumplir normativas muy estrictas para el establecimiento de un relleno sanitario, es complejo cumplir con tantos requisitos y económicamente muy costoso.
- Los plásticos contaminan más: cuando los plásticos no se manejan correctamente, algunos tipos de plástico, el PVC puede lixiviar sustancias químicas como aditivos y compuestos plastificantes (Asakura, 2004).
- Los plásticos se mantienen íntegros por más tiempo: la degradación del plástico toma más tiempo en ausencia de oxígeno (Ritchie & Roser, 2020), pues como se explicará más adelante, el oxígeno cumple un rol importante en su degradación abiótica.
- Esta práctica no puede perpetuarse: si se continúa indefinidamente generando desechos sanitarios, eventualmente no habrá espacios disponibles libres de riesgo por contaminación de rellenos cerrados.

## 5.8 RELLENOS SANITARIOS EN MÉXICO

El INEGI estimó que en 2008 se recolectaba 87% de los residuos generados y, de éstos, 64% se enviaba a los rellenos sanitarios existentes y sitios controlados; lo restante se depositaba en tiraderos a cielo abierto y en sitios sin control (INEGI, 2015).

Los sitios controlados son estructuralmente parecidos a los rellenos sanitarios, pero no cuentan con la capa impermeabilizada que los rellenos sanitarios requieren.

Es alarmante saber que la mayoría de los desechos sólidos urbanos del país se depositan en rellenos sanitarios, sin tener otra opción que almacenarlos y obtener el mínimo de energía posible en vez de darles un tratamiento más eficiente.

En 2012, la SEDESOL mapeó los rellenos sanitarios existentes en territorio nacional, dando como resultado 260 rellenos a lo largo del país, distribuidos como se puede observar en la Figura 5.8. Actualmente, según SEMARNAT, existen 238 establecimientos de relleno sanitario (SEMARNAT, 2019)

La entidad con mayor cantidad de rellenos sanitarios es San Luis Potosí, con 26 establecimientos, seguido de Puebla, con 18 y Guanajuato con 17; mientras que la única entidad federativa que no cuenta con rellenos sanitarios es la Ciudad de México, la cual en 2011 cerró las puertas del único relleno sanitario que tenía, el Bordo Poniente, ubicando sus desechos en rellenos del Estado de México.



Figura 5.8: Rellenos sanitarios por entidad federativa en 2012.

Fuente: SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Residuos sólidos urbanos [en línea]. Recuperado el 28 de enero de 2020, [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/07\\_residuos/7\\_1\\_2.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_2.html)

Como se mencionó anteriormente, más del 58% de RSU generados en México terminan en un relleno sanitario, en la Figura 5.9 se muestra detalladamente la cantidad de desechos que terminan en un relleno sanitario comparado con la cantidad total de RSU generados por entidad federativa.

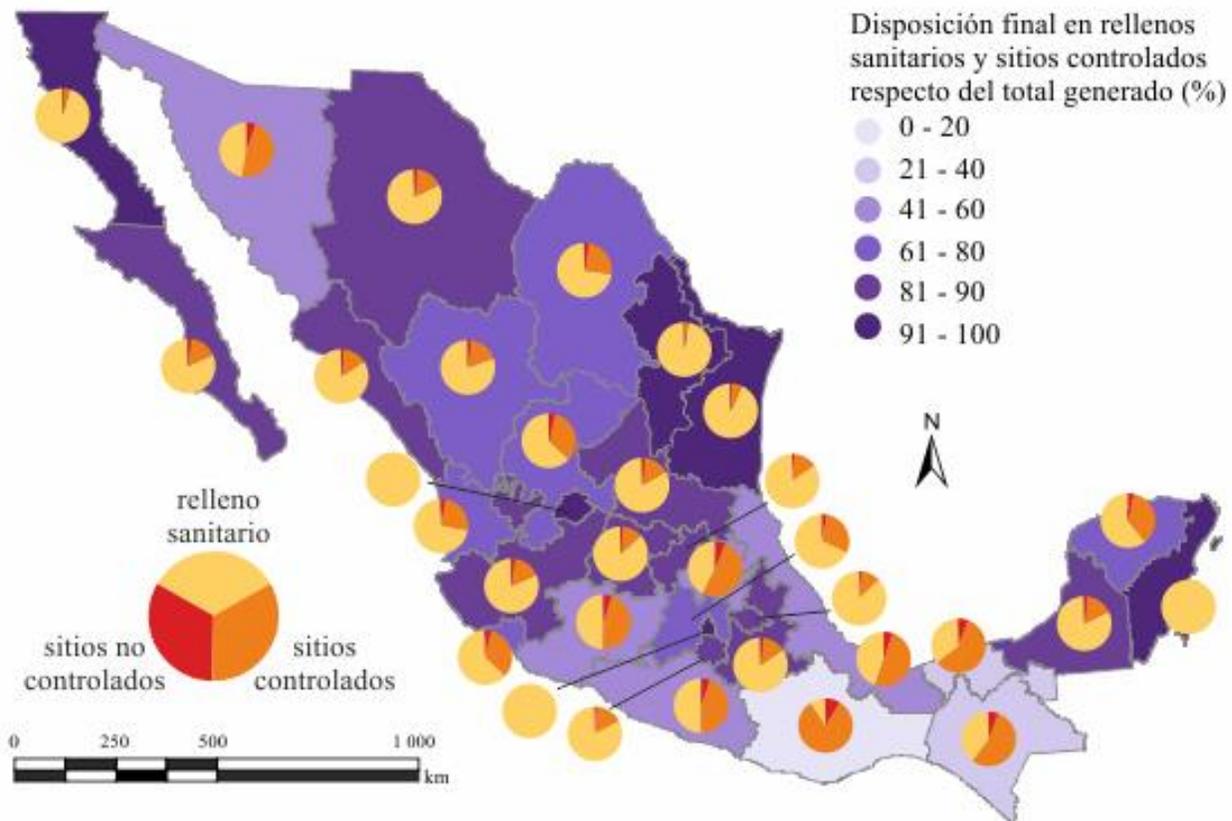


Figura 5.9: Disposición final de RSU en rellenos sanitarios, sitios controlados y no controlados por entidad federativa en 2012

Fuente: SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Residuos sólidos urbanos [en línea]. Recuperado el 28 de enero de 2020, [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/07\\_residuos/7\\_1\\_2.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_2.html)

La recuperación de biogás es una opción que apenas comienza a vislumbrarse en el horizonte del tratamiento de residuos en México, contando con un solo caso de éxito en la instauración de un relleno sanitario de recuperación de biogás en el municipio de Salinas Victoria, Nuevo León. Este proyecto se puso en marcha en mayo del 2003, con una capacidad de generación inicial de energía de 7.4 megawatts por tonelada de basura; en 2008 ascendió a 12.7 megawatts y actualmente se encuentra en proceso de una nueva ampliación que se estima en 16.9 megawatts, aunque no se descarta que en los próximos años llegue hasta 30 megawatts.

La energía producida en esta planta es utilizada para oficinas gubernamentales y un parte de ella, se utiliza para el sistema de transporte Metrorrey.

Se ha reportado en que en plantas de otras partes del mundo se pueden producir hasta 165 megawatts de energía por tonelada de basura, que es poco en comparación con los 2,415 megawatts que podrían obtenerse en un proceso correcto de incineración (Arvizu-Fernández, 2010).

## **5.9 LEGISLACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN MÉXICO**

### **5.9.1 NOM-083-SEMARNAT-2003**

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 es la encargada de dictar las características que deben tener estos lugares de disposición final de residuos.

Los rellenos sanitarios en México deben contar con estudios:

- Geológicos y geohidrológicos regionales
- Evaluación geológica y geohidrológica
- Hidrológicos
- Topográficos
- Geotécnicos
- De generación y composición de los RSU de manejo especial (si es un relleno sanitario para este tipo de desechos)
- Generación de biogás
- Generación de lixiviado

En México, el tipo de relleno sanitario está dado principalmente por la cantidad diaria de desechos que recibe, como se observa en la Tabla 5.10, y de esto depende la cantidad de compactación que deben de cumplir cada día.

Tabla 5.10: Tipos de relleno sanitario y requerimientos de compactación en México.

SITIO		COMPACTACION DE LOS RESIDUOS KG/M <sup>3</sup>	RECEPCION DE RESIDUOS SOLIDOS TON/DIA
A	A1	Mayor de 700	Mayor de 750
	A2	Mayor de 600	100-750
B		Mayor de 500	50-100
	C	Mayor de 400	10-50

Fuente: SEMARNAT, 2003. Norma Oficial Mexicana, NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño y construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Recuperada el 28 de enero de 2020, de <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1306/1/nom-083-semarnat-2003.pdf>

Entre las características que deben cumplir estos sitios de disposición final de residuos, se encuentran:

Todos los rellenos sanitarios, deben contar con una barrera geológica natural o equivalente a un espesor de un metro de coeficiente de conductividad hidráulica de al menos  $1 \times 10^{-7}$  cm/seg sobre la zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final o bien, garantizarla con un sistema de impermeabilización equivalente.

Se debe garantizar la extracción, captación, conducción y control de biogás generado en el sitio de disposición final una vez que este sea producido y de no disponerse de sistemas para su aprovechamiento, se procederá a la quema ya sea a través de pozos individuales o quemadores centrales.

Debe construirse un sistema que garantice la captación y la extracción del lixiviado generado en el sitio de disposición final, el cual debe ser recirculado a las celdas de residuos confinados en función de los requerimientos de humedad para la descomposición de los residuos.

Se debe diseñar un drenaje pluvial para el desvío de escurrimientos pluviales y el desalojo del agua de lluvia, minimizando su filtración en las celdas de desechos comprimidos.

Los rellenos sanitarios deben contar con área de emergencia para la recepción de los RSU y de manejo especial cuando alguna eventualidad, desastre natural o emergencia de cualquier orden no permitan la operación en el frente de trabajo. Dicha área debe proporcionar la misma seguridad ambiental y sanitaria que las celdas de operación ordinarias.

Se deben controlar la dispersión de materiales ligeros, fauna nociva y la infiltración pluvial. Los residuos deben de ser cubiertos en forma continua y en un lapso menor a 24 horas posteriores a su depósito.

Los rellenos sanitarios deben contar con instalaciones adecuadas para su operación dependiendo su capacidad de tratamiento de desechos, en la Tabla 5.11 se detallan las instalaciones con las que se debe de contar según su tipo.

Tabla 5.11: Instalaciones y obras complementarias requeridas de acuerdo al tipo de sitio de disposición final de residuos.

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Caminos de acceso	X	X	X
Caminos interiores	X	X	
Cerca perimetral	X	X	X
Caseta de vigilancia y control de acceso	X	X	X
Báscula	X	X	
Agua potable, electricidad y drenaje	X	X	
Vestidores y servicios sanitarios	X	X	X
Franja de amortiguamiento (Mínimo 10 metros)	X	X	X
Oficinas	X		
Servicio Médico y Seguridad Personal	X		

Fuente: SEMARNAT, 2003. Norma Oficial Mexicana, NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño y construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Recuperada el 28 de enero de 2020, de <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1306/1/nom-083-semarnat-2003.pdf>

Los protocolos de operación del relleno sanitario incluyen manual de operaciones detallado, control de registro, informe mensual de actividades y un programa de monitoreo de biogás y lixiviado, cuyas características particulares se pueden consultar en esta Norma Oficial Mexicana.

# CAPÍTULO VI

## RECICLAJE DE PLÁSTICO

*“Una vez hayas probado el placer de volar caminarás por la Tierra con la vista mirando al cielo, porque ahí has estado y ahí desearás volver.”*

Leonardo da Vinci

## **6.1 ¿QUÉ ES EL RECICLAJE?**

Reciclar se define por la Real Academia de la Lengua Española en 2001 como someter un material usado a un proceso para que se pueda volver a utilizar.

En el contexto de la contaminación por plásticos, el reciclaje intenta convertir algunos de los plásticos ya utilizados y desechados en materiales reusables. No se limita únicamente a que los desechos tengan el mismo uso una y otra vez, si no que sus componentes puedan ocuparse incluso en otras etapas del proceso productivo.

## **6.2 PANORAMA MUNDIAL DEL RECICLAJE**

Según la Organización para la Cooperación para el desarrollo Económico en 2016, el país con mayor tasa de reciclaje es Corea del Sur con 59% de sus residuos reciclados, seguido por Alemania con el 48%. México se ubica muy por debajo, con el 9%, como se observa en la Figura 6.1 (OECD, 2016).

Desde el punto de vista de la gestión de los residuos, el reciclaje tiene la ventaja de reducir el volumen de materiales que requieren ser recolectados, transportados y dispuestos en sitios adecuados (INEGI, 2014).

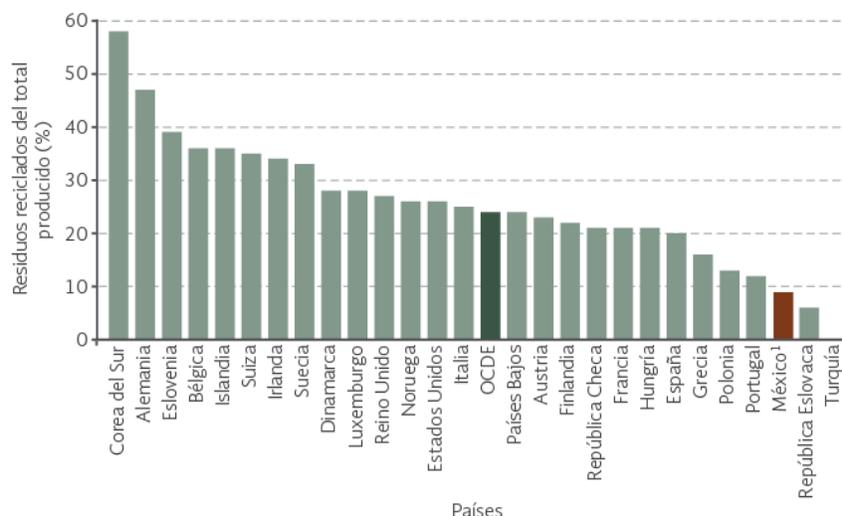


Figura 6.1: Porcentaje de reciclaje de residuos urbanos en 2016 según la Organización para la Cooperación y desarrollo Económico (OCDE) en comparación con los plásticos generados.

Fuente: The Organization for Economic Co-operation and Development OECD. (2016). Environment Dataset: Municipal Waste, Generation and Treatment. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=MUNW>

En algunos casos, la revalorización de los residuos también disminuye el consumo de materias primas, electricidad y agua, entre otros insumos, que serían necesarios para la extracción y procesamiento de nuevos materiales. Por ejemplo, obtener aluminio a partir de aluminio reciclado requiere 95% menos energía que producirlo de materiales puros; esto se conoce como eco-eficiencia (World Business Council for Sustainable Development, 2005).

## 6.2.1 PANORAMA MUNDIAL DEL RECICLAJE DE PLÁSTICO

Hablando específicamente del caso del plástico, se estima que en 2015, alrededor del 55% del plástico desechado fue descartado en basureros o rellenos sanitarios, 25% incinerado y 20% reciclado, entras que entre 1950 y 2015 únicamente 9% fue reciclado (Ritchie & Roser, 2020).

La razón principal por la que los plásticos no se reciclan es porque la mayoría de los desechos están mal separados y se “contaminan” las corrientes de reciclaje, por ejemplo, contaminación por restos de alimentos reduce drásticamente la productividad al momento de reciclar esos contenedores.

Incluso en el caso de plásticos reciclables, a veces es más factible económicamente desviar esos residuos a un basurero o relleno sanitario.

Los costos de procesamiento de las cargas de plástico mal clasificadas o contaminadas son más elevados, en algunos casos superan las ganancias obtenidas por los materiales reciclados. La tasa de 'reciclaje rechazado' puede variar significativamente entre países dependiendo de las políticas de reciclaje, los objetivos y la efectividad de los métodos de separación de reciclaje, ya sea a nivel doméstico y de recolección local, o en instalaciones de manejo de desechos.

Para tener una idea de la escala del problema, las últimas cifras para Inglaterra estiman que entre el 3% y el 4% del reciclaje total de los hogares (que es plástico, pero también papel, metales, etc.) fue rechazado y enviado a rellenos sanitarios o incineración. En términos relativos, esta participación es baja, pero podría mejorarse mediante una mejor comprensión de cómo evitar la contaminación de las corrientes de reciclaje de plástico (Ritchie & Roser, 2020).

El plástico para reciclaje es un producto comercializado a nivel mundial. La mayoría de los principales exportadores son países de altos ingresos. Los diez principales países exportadores durante el período de 1988 a 2016, colectivamente representan el 78% de las exportaciones mundiales de plástico, estos diez principales exportadores se definen como de altos ingresos.

En conjunto, han exportado 168 millones de toneladas durante este período, lo que equivale a un valor económico de \$ 65 mil millones de dólares. China ha sido el mayor importador de plástico del mundo. En conjunto, China y Hong Kong han importado el 72.4% de todos los desechos plásticos. En 2017, China introdujo una prohibición de las importaciones de plástico no industrial, en parte debido a los niveles de plásticos contaminados en flujo de exportación de los países.

Por lo tanto, parte de este plástico importado terminó en algún basurero o relleno sanitario y posiblemente en riesgo de ingresar al océano. Es difícil rastrear el destino final de los plásticos comercializados, sin embargo, es probable que al menos algunos de los plásticos reciclados exportados de países de altos ingresos ingresen a algún basurero en los países a los que se comercializan (Ritchie & Roser, 2020).

Luego de la prohibición de China sobre el plástico importado en 2017, los grandes exportadores, como Estados Unidos, Canadá, Australia y el Reino Unido, no pudieron manejar el aumento de la demanda interna de reciclaje de plástico. Como tal, algunos materiales destinados al reciclaje se han desviado posteriormente a algún basurero ahora en su país de origen.

La calidad de los plásticos suele disminuir durante el proceso de reciclaje. La mayoría de los plásticos reciclables solo son adecuados para reciclar una vez. Como resultado, la mayoría del plástico reciclado que usamos finalmente llega al basurero, incluso si pasa por un ciclo de uso adicional como otro producto. El reciclaje generalmente demora en lugar de evitar la eliminación de plástico al relleno sanitario o la incineración.

Para saber si un plástico es fácilmente reciclable, es necesario recordar la clasificación en 7 números que se mencionó en la introducción del presente trabajo. De esas 7 categorías de plástico, la 1 y 2 (PET - Polietilentereftalato y HDPE - Polietileno de alta densidad) son fácilmente reciclables y se tienen protocolos descritos y plantas industriales para llevarlo a cabo, el caso del 3 y 5 (PVC - Policloruro de vinilo y PP - Polipropileno) son plásticos no son usualmente reciclados, aunque hay un procedimiento conocido, no es del todo eficiente y depende de la ciudad en la que se generen los residuos, si es que existen programas de reciclaje, mientras que las categorías 4, 6 y 7 (LDPE - Polietileno de baja densidad, PS – Poliestireno y Otros) no son recicladas y los protocolos que se han generado para intentar reciclarlos son complejos o terminan contaminando más de lo que contamina el plástico por sí solo (Ritchie & Roser, 2020).

### 6.3 RECICLAJE EN MÉXICO

El volumen de materiales reciclados en México es reducido: en 2012 alcanzó alrededor del 9.6% del volumen de los residuos generados según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. En comparación con otros países de la OCDE, las cifras de México son muy bajas, pues países como Corea del Sur y Alemania reciclaron 58 y 47%, respectivamente (OECD, 2016).

Par el caso específico de los plásticos en México, el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegaciones (CNGMD) del INEGI en 2012 reporta que del volumen total reciclado en el país, el PET tiene el 15.8% y otros plásticos el 9.2%.

A pesar de que cerca del 25% de los residuos son plásticos que podrían entrar a una cadena de reciclaje, la mayor parte de los RSU en México termina en rellenos sanitarios, como se muestra en la Figura 6.2 siendo esta la disposición final más común de los RSU (SEMARNAT, 2016).



Figura 6.2: Disposición final de los RSU del total generado en México de 1997 a 2013.

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT. (2016). Acciones y Programas: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

Actualmente, el reporte de SEMARNAT del 2019 asegura que únicamente el 5% de los RSU generados en México se reciclan. Aunque la estrategia nacional para enfrentarse a la contaminación por residuos sólidos urbanos ha cambiado, ahora se apega a la agenda 2030 de la ONU, que prioriza la prevención de desechos por sobre la valorización de estos, siendo el orden establecido el que se muestra en la Figura 6.3.

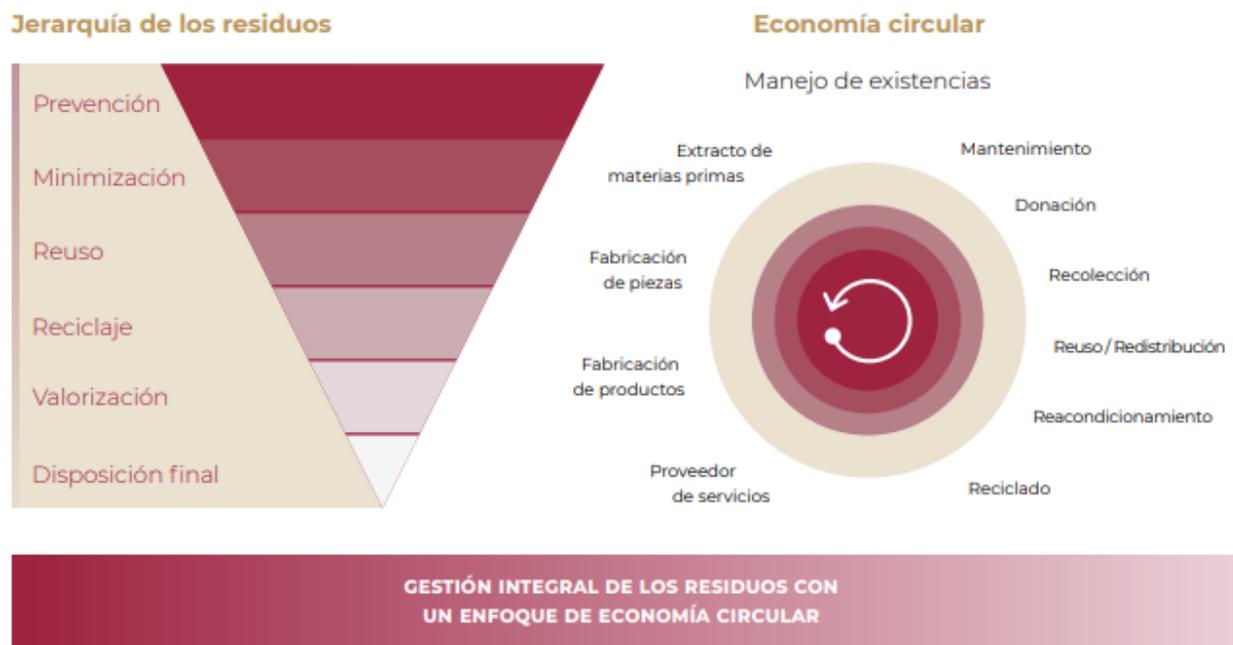


Figura 6.3: Modelo propuesto por el gobierno de México en 2019 para la minimización en la producción de residuos sólidos urbanos.

Fuente: SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). Visión nacional hacia una gestión sustentable [en línea]. Recuperado el 28 de enero de 2020, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/435917/Vision\\_Nacional\\_Cero\\_Residuos\\_6\\_FEB\\_2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/435917/Vision_Nacional_Cero_Residuos_6_FEB_2019.pdf)

## 6.4 LEGISLACIÓN DEL RECICLAJE DE PLÁSTICO EN MÉXICO

Las normas relacionadas a procesos de reciclaje son relativamente nuevas, pues anteriormente únicamente se realizaron normas de gestión, transporte y manejo de desechos. Ninguna de estas normas puede ser directamente consultada en la página del Diario Oficial de México aún, únicamente existen en la red declaratorias de su existencia, pero no está el cuerpo entero de ninguna de ellas.

### **6.4.1 NMX-E-263-CNCP-2016**

Esta norma es quizá la que contempla en mayor medida el reciclaje de plásticos, pues el resto de las Normas Mexicanas que se presentan en este trabajo toman en cuenta productos específicos, como envases de fertilizantes o hablan acerca de la normatividad que cumplirán materiales futuros, los cuales ya se deberán realizar con enfoque en el reciclaje y economía circular.

Esta Norma se titula: Industria del plástico – Polietileno tereftalato reciclado utilizado para envases de alimentos y bebidas – Especificaciones y métodos de prueba.

Establece las especificaciones para evaluar los procesos de descontaminación para el reciclado del polietileno tereftalato (PET) post-consumo provenientes incluso de usos diferentes al de grado alimenticio, que permitan obtener un material inocuo para envases que serán utilizados para el contenido de alimentos y bebidas.

### **6.4.2 NMX-E-233-CNCP-2014**

Esta Norma Mexicana, la cual lleva por título: Industria del plástico – reciclado – terminología; establece los términos relacionados con el reciclado de plásticos, con el objeto de unificar la terminología empleada en esta área de la industria del plástico. Asimismo, esta recopilación de términos ha sido preparada para evitar la ocurrencia de más de un término dado al reciclado de plásticos y para evitar dar una doble significación en el caso de términos particulares.

### **6.4.3 PROY-NMX-E-277-NYCE-2017**

Este proyecto de NMX se denomina: Industria del plástico-Manejo sustentable de plásticos agrícolas para su reciclado.

Este Proyecto de Norma Mexicana establece la metodología para el manejo y reciclado adecuado de los plásticos agrícolas, envases vacíos de agroquímicos y fertilizantes, las actividades de todos los actores involucrados en el proceso.

Aplica a todo tipo de residuos de plásticos originados de invernaderos, acolchado (arropado), malla sombra, cinta de goteo y envases que se encuentran en desuso y que se generen en el territorio nacional, excepto aquellos plásticos generados de protección personal utilizados en la aplicación de soluciones de plaguicidas, así como el material utilizado en la recolección y limpieza de derrames de plaguicidas.

El material que se obtiene del reciclado de los plásticos agrícolas, a menos que se demuestre que es grado alimenticio se puede emplear para la producción de productos que estén en contacto con alimentos o bebidas para consumo humano, de lo contrario solo se pueden emplear para la fabricación de productos que se empleen en la agricultura.

### **6.4.4 NMX-E-232-CNCP-2014**

La norma lleva por título: Industria del plástico – Símbolos de identificación de plásticos.

Esta Norma Mexicana establece y describe los símbolos de identificación que deben tener los productos fabricados de plástico en cuanto al tipo de material se refiere con la finalidad de facilitar su selección, separación, acopio, recolección, reciclado y/o reaprovechamiento.

Es aplicable a todos aquellos productos fabricados de plástico, comercializados en el territorio nacional, quedando excluidos aquellos artículos que por su tamaño no sea factible incluir el símbolo que identifique al material de manera legible, así como aquellos productos que sean reprocesados por el fabricante (reciclaje post-industrial).

## **6.5 EJEMPLO DE UN PROCESO DE RECICLAJE DE PLÁSTICO PET**

En general, es la industria privada la encargada de reciclaje de residuos, al ser los residuos orgánicos, los que preponderan en la generación de residuos nacional, no es sorprendente que el área de reciclaje se haya desarrollado en mayor medida para ese tipo de residuos, mientras que el reciclaje del plástico no es tan estudiado. Existen algunas plantas de reciclaje de plástico en México, entre ellas la recicladora de botellas PET más grande del mundo, la planta PetStar®, que se utiliza como ejemplo en este trabajo.

### **6.5.1 PLANTA MEXICANA RECICLADORA DE PET PETSTAR®**

Para entender más a fondo cuál es el proceso de reciclaje de los plásticos es necesario recalcar que los plásticos son molecularmente muy versátiles y diferentes entre sí, e incluso si existen moléculas idénticas, con distintas condiciones de fabricación se generarán plásticos finales distintos.

Para ejemplificar el proceso de reciclaje de uno de los plásticos más abundantes y sencillos de reciclar, hablaremos del caso de la planta recicladora de PET más grande de México, PetStar®, ubicada en Toluca, México.

#### **1. ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA**

El reciclaje en esta planta comienza con el almacenamiento de materia prima, es decir, botellas utilizadas provenientes de basureros o centro de acopio de PET. Las botellas se encuentran almacenadas en paquetes que pueden llegar a pesar hasta 700 kilogramos. Las botellas son de diferentes marcas y algunas tienen tapón, etiqueta e incluso a veces líquido. Los almacenes que las contienen son solo bodegas grandes sin ningún otro tipo de instalación (Figura 6.4).



Figura 6.4: Las botellas almacenadas aún contienen etiquetas y algunas tienen tapa.

Fuente: PetStar® Company. (2019). Recorrido virtual. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <http://www.petstar.mx/>

## 2. PRELAVADO

Estos paquetes se rompen y se introducen en una banda transportadora, donde comenzarán el proceso de prelavado, en el que una máquina a través de un proceso químico elimina la suciedad superficial del exterior de las botellas y les retira la mayoría de las etiquetas o la tierra y polvo que puedan tener. No hay mayor detalle técnico acerca de qué tipo de químicos se utiliza, pero el objetivo de este paso es simplemente eliminar suciedad, no comenzar a atacar el plástico de manera química (Figura 6.5).



Figura 6.5: Los paquetes se rompen y las botellas pasan por un prelavado con sustancias químicas.

Fuente: PetStar® Company. (2019). Recorrido virtual. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <http://www.petstar.mx/>

### 3. CLASIFICACIÓN Y TRITURACIÓN

Posteriormente se separan las botellas clasificándolas por tipo de material y/o colores, y una banda transportadora las introduce en un cuarto anti-ruido donde se muelen, transformándose en hojuelas (Figura 6.6).



Figura 6.6: Proceso de clasificación por material y color hecho por empleados y hojuelas formadas después de la tritución del PET.

Fuente: PetStar® Company. (2019). Recorrido virtual. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <http://www.petstar.mx/>

### 4. TRATAMIENTO TÉRMICO

Las hojuelas son nuevamente lavadas para quitarles cualquier rastro de pegamento o sólidos que les pueda haber quedado como remanente. Se elimina el agua y cualquier rastro de humedad por medio de calor. La temperatura favorece la degradación del plástico durante los pasos posteriores (Figura 6.7).



Figura 6.7: Maquinaria para secar y calentar las hojuelas de PET.

Fuente: PetStar® Company. (2019). Recorrido virtual. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <http://www.petstar.mx/>

## 5. CONTROL DE CALIDAD Y FUNDICIÓN

Una vez secas, pasan a silos (torres cilíndricas de metal), en las que se mezclan y pasan por un proceso de control de calidad en el que se eliminan partículas metálicas o cualquier otro residuo. Posteriormente pasan al proceso de fundición, en la que las hojuelas se convierten en pequeñas “gotas” de resina aglomerada (Figura 6.8).



Figura 6.8: Resina aglomerada libre de impurezas.

Fuente: PetStar® Company. (2019). Recorrido virtual. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <http://www.petstar.mx/>

## 6. CRISTALIZACIÓN Y POLICONDENSACIÓN

Utilizando nitrógeno se remueven sobrantes de material en los bordes y pasan por un proceso de cristalización y policondensación. Se forman los polímeros de polietileno, haciendo la resina más resistente, son extruidos como espaguetis y cortados para tener pellets pequeños. A partir de este momento, la resina ya es apta para fabricar nuevas botellas o envases para alimentos (Figura 6.9).



Figura 6.9: Las impurezas son removidas con nitrógeno y se prepara el sustrato para la cristalización y policondensación.

Fuente: PetStar® Company. (2019). Recorrido virtual. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <http://www.petstar.mx/>

Una vez finalizado el proceso, las piezas que se obtienen son diminutas y de color gris claro y de forma cilíndrica y son PET listo para utilizarse en la fabricación de nuevos productos como playeras y bolsas o volver a hacer botellas 100% recicladas.

Para producir textiles, el proceso a partir de la resina es derretirla para formar un hilo haciendo prendas totalmente de poliéster reciclado. Se necesitan aproximadamente 8 botellas para poder hacer una playera, según la empresa PetStar®.

La mayor recomendación que hace esta empresa para desechar botellas de PET es que al terminar su contenido, la botella sea aplastada, se coloque su tapa con el fin de que no se ensucie durante su traslado y finalmente se disponga en un contenedor especializado para PET.

# CAPÍTULO VII

## BIODEGRADACIÓN DE PLÁSTICO

*“Algunas bacterias piensan que el plástico es fantástico.”*

Nicholas S. Wigginton

## **7.1 INVESTIGACIONES INTERNACIONALES DE BIODEGRADACIÓN DE PLÁSTICO**

Se ha estudiado hasta ahora la manera de convertir plástico en energía, por medio de su incineración o de su conversión en biogás. En términos de reciclaje, se ha utilizado el plástico para hacer los mismos productos plásticos que generaron la contaminación. Es momento de explorar otra alternativa al reciclaje, que alcanza un nivel molecular, que podría abrir camino a nuevas formas de reciclaje, el cual conjunte la generación de productos de valor, como en el reciclaje y los métodos biológicos de degradación, como lo que ocurre en residuos orgánicos, pero enfocado a plástico.

### **7.1.1 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILEN TEREFALATO (PET), JAPÓN**

Los investigadores japoneses Kohei Oda y Shosuke Yoshida en 2016, preocupados por la contaminación por plástico del tipo PET, aislaron a la bacteria *Ideonella sakaiensis* 201-F6 de comunidades microbianas expuestas a PET en el medio ambiente. Esta bacteria es capaz de utilizar PET como fuente de carbono y energía, siendo los productos finales de estas reacciones ácido tereftálico y etilenglicol, los precursores del PET.

Los investigadores recolectaron de 250 muestras ambientales contaminadas con residuos de PET, entre ellas había sedimentos en ríos, tierra, agua contaminada con desechos líquidos y lodos activados de una planta procesadora de PET. Se realizó un screening para saber cuáles de los microorganismos presentes en cada muestra eran capaces de crecer utilizando como fuente de carbono el plástico PET.

Una de las muestras de sedimento contenía distintos consorcios microbianos, entre ellos, uno especial, al que denominaron “consorcio 46” el cual indujo un cambio morfológico en la laminilla de PET con la que entró en contacto, como se puede observar en la Figura 7.1A, mientras que en la Figura 7.1B se observa la laminilla de

PET con un microscopio electrónico de barrido posterior a la biodegradación, y en la Figura 7.1C, el curso temporal de la pérdida de masa de la laminilla de PET.

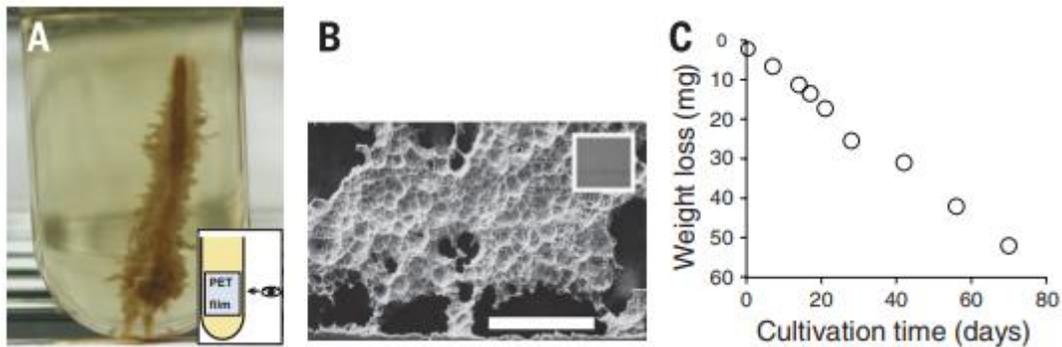


Figura 7.1: (A) Crecimiento de un consorcio microbiano en una laminilla de PET después de 20 días. (B) Microscopía Electrónica de Barrido de la laminilla de PET posterior a su biodegradación. (C) Curso temporal de la biodegradación de la laminilla de PET.

Fuente: Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351, 6278, 1196-1199.

Posteriormente una microscopía reveló que el denominado consorcio 46 contenía una mezcla de bacterias, levaduras y protozoarios, y había generado una biodegradación de  $0.13 \text{ mg cm}^{-2}$  por día, a  $30^\circ\text{C}$  y que 75% de la laminilla de PET había sido catabolizada a  $\text{CO}_2$  a  $28^\circ\text{C}$ .

Utilizando un análisis por dilución límite del consorcio 46 en la cual el medio de cultivo únicamente contenía PET como fuente de carbono, se seleccionó al microorganismo capaz de metabolizarlo. Esta bacteria se identificó como una nueva especie del género *Ideonella*, y los investigadores decidieron nombrarla como *Ideonella sakaiensis* 201-F6, cuyos datos actualmente se pueden encontrar en la base de datos taxonómicos del Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI) con el identificador 1547922.

Aparte de encontrarse en la dilución de la que fue aislada, la bacteria también se encontró en la superficie de la laminilla del plástico, como se puede observar en la

Figura 7.2, claramente se puede observar que la bacteria forma pequeños apéndices entre vías bacterias y diferentes secciones del plástico. Los autores sugieren que estos apéndices podrían ayudar a la secreción de enzimas directo a la laminilla de PET.

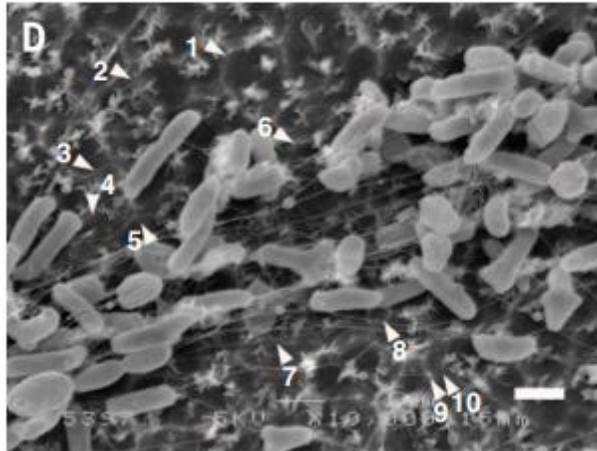


Figura 7.2: Microscopía Electrónica de Barrido de la laminilla de PET que permite observar a la cepa *Ideonella sakaiensis* 201-F6 formando pequeños apéndices que las conectan entre ellas y al PET (1-10).

Fuente: Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351, 6278, 1196-1199.

La laminilla de PET fue degradada casi por completo después de 6 semanas a 30°C.

Los científicos reportaron que al hacer subcultivos del consorcio 46, uno de ellos perdió su capacidad degradativa y al analizarlo, observaron que *I. sakaiensis* no estaba presente en esa dilución, lo cual indicaba una vez más que esa bacteria era crucial para la degradación del plástico.

Se exploraron los genes relacionados con esta degradación, sabiendo que la literatura anteriormente había reportado casos en los que esterasas, lipasas o cutinasas eran capaces de llevar a cabo estas reacciones degradativas. Uno de los marcos de lectura abiertos (ORF) en el genoma de la bacteria codificaba para una lipasa putativa que

comparte el 51% de identidad con una hidrolasa de la bacteria *Thermobifida fusca*, en la cual también ha sido reportada actividad degradadora de PET.

Los productos de la biodegradación fueron, en mayor proporción ácido mono (2-hidroxiethyl) tereftálico (MHET) y pequeñas cantidades de ácido tereftálico (TPA) y ácido bis(2-hidroxiethyl) tereftálico (BHET), lo cual confirma que el PET sí está siendo degradado. Si la reacción continúa por más tiempo el BHET pasa a ser MHET sin mayor descomposición posterior.

### **7.1.2 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILEN TEREFALATO (PET), IRÁN**

Otro estudio llevado a cabo por un grupo de científicos iraníes encontró que bacterias Gram positivas del género *Streptomyces* de la familia *Actinomycetaceae*, aisladas en el suelo de Azerbaiyán del Este, tenían potencial para degradar PET (Farzi *et al.*, 2019)

El plástico que se utilizó como fuente de carbono durante los experimentos fue PET de botellas de agua que fueron cortadas en trozos pequeños y posteriormente se les agregó nitrógeno líquido y se sometieron a un proceso de trituración, que convirtió las botellas de PET en partículas no mayores a 500 µm, tamizándolos posteriormente con mallas de los números 40, 50 y 70, correspondiendo al tamaño de partícula de 420, 300 y 212 µm respectivamente.

Para llevar a cabo la comprobación de biodegradación de plástico, primero se procedió con la purificación de la cepa con potencial degradador, se prepararon medios de cultivo líquidos cuya única fuente de carbono era el polvo de PET y se inocularon con *Streptomyces*. Posteriormente se extrajo el PET residual y se obtuvo el porcentaje de degradación según el peso. Finalmente se realizaron los estudios de Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas para identificar los productos de la biodegradación y la Microscopía Electrónica de Barrido para observar los cambios físicos en el polvo de PET expuesto a la biodegradación con *Streptomyces*, como se observa en la Figura 7.3.

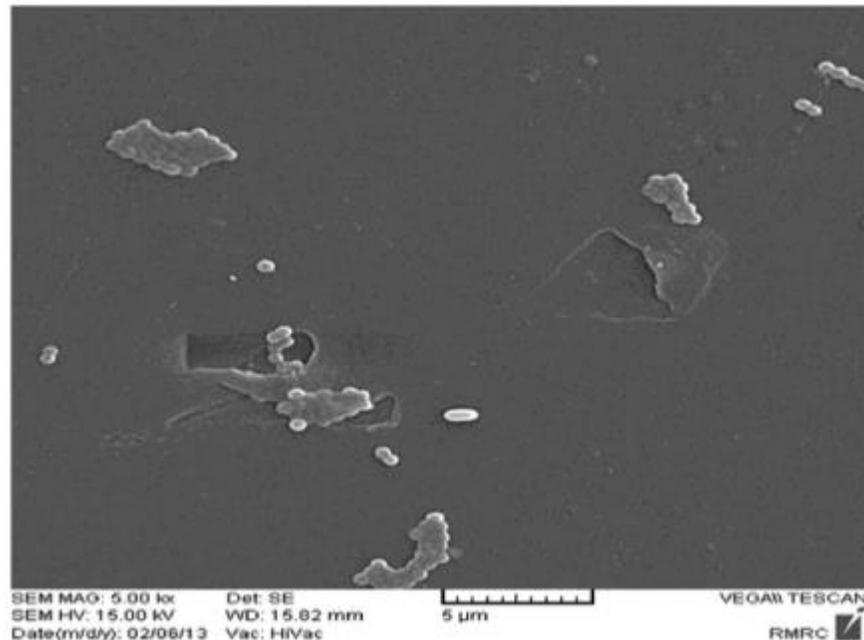


Figura 7.3: Microfotografía Electrónica de Barrido de una superficie de PET después de ser biodegradada por *Streptomyces*.

Fuente: Farzi, A., Dehnad, A., & Fotouhi, A.F. (2019). Biodegradation of polyethylene terephthalate waste using *Streptomyces* species and kinetic modeling of the process. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 25–31.

Los experimentos se replicaron cuatro veces para cada tamaño de partícula antes mencionado, para que el muestreo pudiera llevarse a cabo los días 3, 6, 12, y 18 posteriormente a la inoculación de la bacteria. A cada tubo Falcon se agregaban 50 mg de polvo PET esterilizado y finalmente se agregaban 0.5 mL de suspensión microbiana de 0.5 McFarland a cada tubo y eran incubados. A 28°C a 120 rpm por 18 días, como se mencionó anteriormente, el PET era la única fuente de carbono del medio, el resto eran sales inorgánicas. Para establecer condiciones aerobias, los tubos Falcon se dejaron cubiertos por sus tapas, pero sin ejercer presión al cerrar.

Para la extracción de PET para su cuantificación final, se agregaron 5 mL de tolueno, provocando decantación de las partículas de plástico, posteriormente se centrifugaron y a 4000 rpm por 15 min, la fase orgánica se filtró con filtros Wattman de papel y se pesó

hasta obtener peso constante después incubadas a 50°C para la evaporación de agua y solventes.

Para evaluar los metabolitos producto de la biodegradación de *Streptomyces* sp., se analizó el filtrado por medio de Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas, teniendo como resultado moléculas de no más de 15 átomos de carbono, entre ellas etil-benceno y hexametil-ciclotrisiloxano, formados por el rompimiento de las cadenas aromáticas del PET; en la Tabla 7.4 se muestran los productos de degradación resultantes.

Al plástico a veces le son añadidos borosilicatos en el proceso de manufactura en forma de fibra de vidrio con el fin de que el material sea más moldeable al momento de ser extruido, por lo que no resulta sorprendente que algunos silicatos estén presentes como productos de degradación.

También se encontraron rastros de o-xileno y metil-benceno, que si bien no son declarados como dañinos para la salud, sí deben ser confinados de manera especial sin dejarlos llegar al medioambiente.

Tabla 7.4: Compuestos existentes en la muestra, su composición y toxicidad. El análisis realizado fue Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas.

Component	Chemical formula	Composition (wt%)	Toxicity
Ethyl benzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	33.13	LD50 > 3.5 g/kg rats
o-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	5.18	May cause skin and eye irritation
1,2- β Pinene	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.16	LD50 > 4.7 g/kg rats
1,8- Cineole	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	2.49	LD50 > 2.48 g/kg rats
I-Menthone	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	6.85	May cause skin and eye irritation
p-Menthan – 3-one	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	2.98	LD50 > 0.5 g/kg rats
2-(4'-Nitro – 2'-Thienyl)-Pyrimidine	C <sub>8</sub> H <sub>5</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub> S	0.87	Not available
Germacrene D	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0.49	Non-toxic (allergic)
Hexamethyl Cyclotrisiloxane	C <sub>6</sub> H <sub>18</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	45.02	LD50 > 50 g/kg rats
6-Methyl – 2-Phenylindole	C <sub>15</sub> H <sub>13</sub> N	0.95	May cause skin and eye irritation
N-Methyl – 1-Adamantaneacetamide	C <sub>13</sub> H <sub>21</sub> NO	0.09	Not available
Cyclobarbital	C <sub>12</sub> H <sub>16</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.31	Non-toxic (drug)

Fuente: Farzi, A., Dehnad, A., & Fotouhi, A.F. (2019). Biodegradation of polyethylene terephthalate waste using *Streptomyces* species and kinetic modeling of the process. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 25–31.

Una de las aportaciones más importantes de esta investigación es el hecho haber experimentado con PET triturado con el fin de aumentar el área de contacto entre las enzimas del microorganismo y el plástico, pues la literatura anterior a este artículo, en su mayoría, no llevaba a cabo este proceso y tenía rendimientos más bajos.

El artículo sostiene que, aunque los costos de operación podrían ser incluso menores utilizando biodegradación en vez de métodos físicos como incineración o reciclaje, el tiempo de biodegradación sigue siendo muy alto, por lo que para acortarlo, es necesario combinar el método físico de trituración con la biodegradación de *Streptomyces*.

### **7.1.3 BIODEGRADACIÓN DE POLIURETANO (PU), JAPÓN**

Otra de las investigaciones es más relevantes en el área de biodegradación de plásticos fue la realizada por el equipo de investigación liderado por investigadores japoneses Nakajima-Kambe y Shigeno-Akutsu en 1999, quienes estudiaron microorganismos capaces de degradar el poliuretano (PU). Esta investigación se destaca por ser de las primeras realizadas en el mundo relacionadas a biodegradación de plástico, con la perspectiva de resolver el problema de contaminación ambiental.

Otra de las características particulares de esta investigación es que el plástico con el que se hizo el estudio es uno de los más versátiles y recalcitrantes. El PU, resultado de la condensación de un poliisocianato y un polioliol, formando un enlace uretano, como se muestra en la Figura 7.5.



Desde 1968 se comenzaron a reportar una gran cantidad de especies capaces de deteriorar el plástico. En la Tabla 7.6 se muestran los reportes de microorganismos degradadores de poliuretano.

Tabla 7.6: Microorganismos capaces de degradar PU. PS es poliéster-poliuretano y PE, poliéter-poliuretano.

Microorganisms	PUR	Putative degrading enzymes	Reference
<b>Fungi</b>			
<i>Aspergillus niger</i> <sup>b</sup>	PS, PE	Unknown	Darby and Kaplan 1968
<i>A. flavus</i> <sup>b</sup>	PS, PE	Unknown	Darby and Kaplan 1968
<i>A. fumigatus</i>	PS	Esterase	Pathirana and Seal 1984a
<i>A. versicolor</i> <sup>b</sup>	PS, PE	Unknown	Darby and Kaplan 1968
<i>Aureobasidium pullulans</i> <sup>b</sup>	PS, PE	Unknown	Darby and Kaplan 1968
<i>Chaetomium globosum</i> <sup>b</sup>	PS, PE	Unknown	Crabbe et al. 1994
	PS	Esterase, protease, urease	Darby and Kaplan 1968
<i>Cladosporium</i> sp.	PS	Unknown	Pathirana and Seal 1984a
<i>Curvularia senegalensis</i>	PS	Esterase <sup>a</sup>	Crabbe et al. 1994
<i>Fusarium solani</i>	PS	Unknown	Crabbe et al. 1994
<i>Gliocladium roseum</i>	PS	Esterase, protease, urease	Pathirana and Seal 1984a
<i>Penicillium citrinum</i>	PS	Esterase, protease, urease	Pathirana and Seal 1984a
<i>P. funiculosum</i> <sup>b</sup>	PS, PE	Unknown	Darby and Kaplan 1968
<i>Trichoderma</i> sp. <sup>b</sup>	PS, PE	Unknown	Darby and Kaplan 1968
<b>Bacteria</b>			
<i>Comamonas acidovorans</i>	PS	Esterase <sup>a</sup>	Nakajima-Kambe et al. 1991
<i>Corynebacterium</i> sp.	PS	Esterase	Kay et al. 1991, 1993
<i>Enterobacter agglomerans</i>	PS	Unknown	Kay et al. 1991
<i>Serratia rubidaea</i>	PS	Unknown	Kay et al. 1991
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	PS	Unknown	Kay et al. 1991
<i>Staphylococcus epidermidis</i>	PE	Unknown	Jansen et al. 1991

<sup>a</sup>Enzimas que ya fueron purificadas

<sup>b</sup>Todas estas especies de hongos fueron estudiadas en conjunto.

Fuente: Nakajima-Kambe, T., Shigeno-Akutsu, Y., Nomura, N., Onuma, F., & Nakahara, T. (1999). Microbial degradation of polyurethane, polyester polyurethanes and polyether polyurethanes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 51, 134-140.

Sin embargo, resulta muy interesante que estos microorganismos se estudiaban en esa época con el objetivo de prevenir daños al plástico y no con el enfoque de estudiar sus mecanismos biodegradativos o el metabolismo en general de hongos o bacterias.

Aunque los precursores químicos de los diferentes tipos de poliuretano sean similares, sus características fisicoquímicas son muy distintas, de hecho, resulta difícil comparar la actividad degradativa de los microorganismos en diferentes tipos de poliuretano. Aunado a eso, hubo muchos años de diferencia entre unas investigaciones y otras, aparte de que la composición de los plásticos se diversificó increíblemente durante esos años.

Una manera general de clasificar en dos categorías la degradación del poliuretano en 1999 era: degradación del enlace uretano y degradación de segmentos poliol, de entre estas categorías, la biodegradación del enlace uretano resultaba particularmente interesante, pues es un enlace común en muchos tipos de plástico.

#### **7.1.4 BIODEGRADACIÓN DEL ENLACE URETANO**

El enlace uretano existe tanto en el poliéster-PU como en el poliéter-PU y se sabía que los compuestos de bajo peso molecular son fácilmente hidrolizados por esterasas. Sin embargo, poco se conocía acerca de la degradación en compuestos de gran masa molecular, es a este respecto fue que se comenzó a desarrollar investigación alrededor de cómo las bacterias eran capaces de asimilar polímeros de gran masa. Recordemos que, en 1999, había mucho por investigar aún.

Para poder llevar a cabo estas investigaciones, el plástico que se analizaba era también sintetizado por los mismos científicos, es decir, no se había tomado de un material comercial expuesto al medioambiente y se conocía perfectamente la estructura pura del polímero. Es importante destacar esto, porque algunos de los materiales plásticos que se usan hoy en día tienen varias cubiertas que hacen aún más difícil su biodegradación.

El primer estudio sistemático de degradación de PU por hongos fue el de Darby y Kaplan en 1968, quienes experimentaron con *Aspergillus niger*, *A. flavus*, *A. versicolor*, *Penicillium funiculosum*, *Aureobasidium pullulans*, *Trichoderma sp.* and *Chaetomium globosum*. Algunos de estos hongos necesitaban compuestos orgánicos adicionales

para atacar el poliuretano, sin evidencia de que pudieran sobrevivir únicamente con plástico como única fuente de carbono.

En cuanto a bacterias, *Corynebacterium* sp.B6, B12, y *Enterobacter agglomerans* B7, las cuales fueron encontradas en plástico que estaba enterrado en el suelo por los investigadores Kay, Morton y Prince en 1991. Quienes las cultivaron en su laboratorio por dos semanas utilizando PU como una de las fuentes de carbono, lograron inducir un cambio en la rigidez del plástico, aunque también debían ser agregados nutrientes orgánicos como extracto de levadura, pues las bacterias no eran capaces de utilizar PU como única fuente de carbono. De esta investigación se concluyó que las bacterias generaban hidrólisis de los enlaces éster.

El descubrimiento de la primer bacteria capaz de utilizar PU como única fuente de carbono se llevó a cabo por *Nakajima-Kambe et al.* en 1995, quienes describieron a *Comamonas acidovorans* TB-35, una bacteria Gram negativa y que además se adentraron en conocer los metabolitos producto de esta degradación utilizando el análisis de Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas, concluyendo que los productos eran derivados del segmento éster del PU.

Al adentrarse más en el estudio metabólico de esta bacteria se descubrió una enzima esterasa de particular interés, pues se logró identificar con exactitud qué dominios eran esenciales para la degradación del plástico, encontrando estos dominios en otras enzimas capaces de degradarlo, abriendo la posibilidad de clasificar las enzimas como una nueva familia de enzimas degradadoras de poliéster sólido.

### **7.1.5 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO (PE), FRANCIA**

Otro tipo de plástico ampliamente utilizado es el polietileno (PE), también es de los componentes principales en basureros debido a la dificultad que representa el reciclaje de este plástico. El PE es generalmente utilizado como capa protectora para envolver alimentos. El PE es mundialmente famoso por ser el material con el que se elaboran las bolsas del supermercado y bolsas tipo *Ziploc*®. Otro de los usos que más daño

ambiental causa es la manufactura de lonas, que son materiales multicapa que en su conjunto con pigmentos y adhesivos vuelven el PE un material difícil de degradar (Koutny *et al.*, 2005).

Debido a la gran capacidad del PE para formar capas extremadamente delgadas de hasta 8  $\mu\text{m}$  de grosor, los productos de este plástico son usualmente utilizados por un corto tiempo y sólo una vez antes de volverse basura. Sin embargo el poco tiempo de uso del plástico contrasta con la gran durabilidad del plástico ante factores bióticos y abióticos, lo cual lo ha convertido en un contaminante de gran abundancia.

Uno de los grandes malentendidos entre los especialistas encargados de degradar el plástico surge entre los expertos en polímeros y los microbiólogos, pues tienen diferentes definiciones de “degradación de plástico”. Los expertos en polímeros definen “degradación” como la pérdida de propiedades mecánicas o físicas del material, mientras que los microbiólogos se enfocan en conocer la transformación del material hasta convertirse en  $\text{CO}_2$  o biomasa, para continuar haciendo referencia a esta diferencia, en el presente trabajo se utilizará el término “degradación” cuando corresponda a la definición de los expertos en polímeros y “biodegradación” cuando la definición de la que se hable sea la de los microbiólogos.

Por el lado de los expertos en polímeros, los plásticos se degradan de manera acelerada cuando son expuestos a la luz solar, pues se desintegran en fragmentos. Aun cuando en el 2006 no había datos certeros sobre el destino de estos pequeños fragmentos, la evidencia indicaba que no eran fácilmente biodegradados, pues ni siquiera había información suficiente para hacer una estimación de este proceso.

El PE es un material altamente inerte e incluso hasta 2006 no representaba un riesgo de ecotoxicidad, sin embargo, comenzaba a vislumbrarse el problema de que los animales, especialmente las aves, lo tragaran, afectando notablemente su salud y el ecosistema. Este riesgo fue mitigado produciendo bolsas que se degradaran más rápidamente, los pequeños fragmentos de PE no podían asfixiar aves, sin embargo, ahora sabemos que la contaminación por fragmentos de plástico no se encuentra únicamente en animales si no en casi todos los lugares del planeta.

El problema con la biodegradación del polietileno es similar al de muchos otros plásticos: tienen una masa molecular muy grande, de hasta cientos de miles de gramos por mol y las cadenas de  $-\text{CH}_2-$  que lo componen son demasiado grandes como para entrar en las bacterias, siendo inaccesibles para los sistemas enzimáticos intracelulares. Para otras macromoléculas, normalmente las bacterias desarrollan una batería de enzimas extracelulares que cortan las macromoléculas para hacerlas accesibles al medio intracelular.

Las moléculas de PE contienen únicamente enlaces C–C y C–H no polares, lo cual no permite ataques nucleofílicos o electrofílicos, limitando su reactividad química a reacciones con radicales. De hecho, lo más reactivo del polímero son los defectos en la estructura, algunos carbonos terciarios o dobles enlaces que contienen moléculas de oxígeno.

En la forma sólida del PE, las moléculas están densamente alineadas, formando estructuras semicristalinas altamente hidrofóbicas, lo cual aleja el agua y por lo tanto, presencia de microorganismos en el plástico, considerándolo formalmente como un materia no biodegradable.

Científicos franceses en 2005 estudiaron la capacidad degradativa de *Rhodococcus rhodochrous* y *Nocardia asteroides* para productos de polietileno, utilizando un pretratamiento que incluía foto-oxidación y termo-oxidación para simular las condiciones en las que el plástico se encuentra después de 3 años de estar a la intemperie (Ayala *et al.*, 2018).

Las muestras fueron incubadas por 200 días y durante el período metabólicamente activo de las bacterias la cantidad de adenosín trifosfato (ATP) fue medida. Simultáneamente los cultivos fueron monitoreados por microscopía óptica y por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR).

Se logró observar biodegradación en láminas de polietileno de alta densidad (HDPE) transparente de 20  $\mu\text{m}$  de grosor y láminas de polietileno de baja densidad (LDPE) transparente de 60  $\mu\text{m}$  de grosor, ambos previamente sometidos a un tratamiento térmico de 400 h a 60°C en la oscuridad y posteriormente a radiación UV ( $\lambda \geq 300\text{nm}$ )

por 120 h, como se mencionó anteriormente para simular las condiciones del plástico a la intemperie a después de 3 años.

La cepa fue *Rhodococcus rhodochrous* ATC 29672 y la de *Nocardia asteroides* LAB 911 fue aislada en ese mismo laboratorio. También se hicieron pruebas con *Aspergillus flavus* ATCC 26873, *Mortierella alpina* ATCC 36965, *Cladosporium cladosporoides* ATCC 20251, pero las láminas sometidas al tratamiento con hongos no revelaron diferencia significativa entre la muestra tratada y el control (muestra no tratada).

La incubación se realizó por 200 días a 27°C en medio mínimo con PE como única fuente de carbono y alrededor del día 100 se observó por medio de microscopía óptica la formación de un film para ambas bacterias, como se observa en la Figura 7.7.

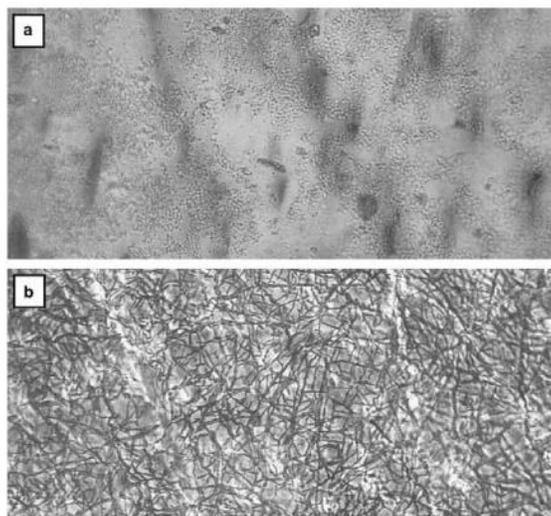


Figura 7.7: Microscopía óptica de los microorganismos en la lámina de LDPE oxidada  
(a) *Rhodococcus rhodochrous* ATC 29672 con 95 días de incubación a 27°C (b)  
*Nocardia asteroides* LAB 911 con 88 días de incubación a 27°C.

Fuente: Koutny, M., Sancelme, M., Dabin, C., Pichon, N., Delort, A. M., & Lemaire, J. (2005). Acquired biodegradability of polyethylenes containing pro-oxidant additives. *Polymer Degradation and Stability*, 91, 1495–1503.

Las observaciones sugieren que el ataque microbiano fue únicamente superficial, probablemente involucrando el final de las cadenas poliméricas, lo cual es fuertemente respaldado por la imagen de la microscopía electrónica de barrido realizada aproximadamente a 100 días de incubación (Figura 7.8).

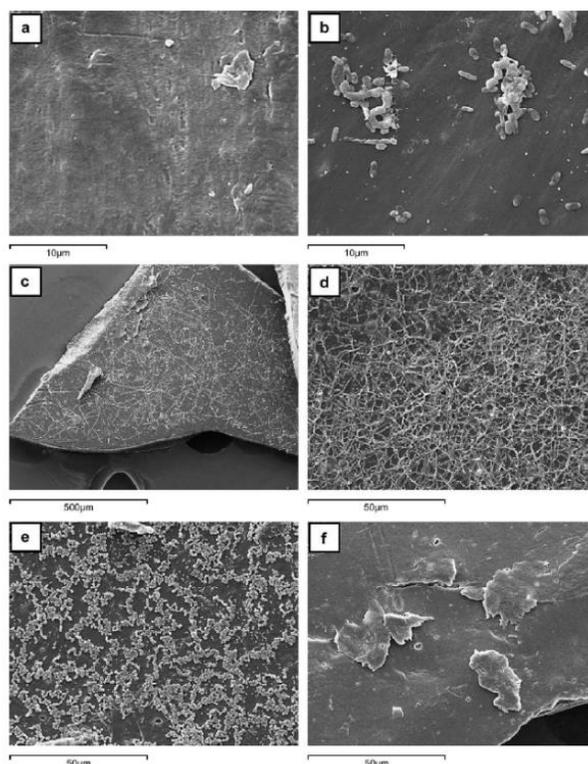


Figura 7.8: Microscopía electrónica de barrido de las laminillas de polietileno aproximadamente 100 días después del inicio de incubación por microorganismos, así como el control abiótico de las laminillas. (a) HDPE en condiciones abióticas; (b) HDPE + *Rhodococcus rhodochrous* ATC 29672; (c) HDPE + *Mortierella alpina* ATCC 36965; (d) LDPE + *Nocardia asteroides* LAB 911; (e) LDPE + *Rhodococcus rhodochrous* ATC 29672; (f) LDPE en condiciones abióticas.

Fuente: Koutny, M., Sancelme, M., Dabin, C., Pichon, N., Delort, A. M., & Lemaire, J. (2005). Acquired biodegradability of polyethylenes containing pro-oxidant additives. *Polymer Degradation and Stability*, 91, 1495–1503.

Durante el inicio de la biodegradación en los primeros días se pudo observar crecimiento rápido de la masa bacteriana o fúngica, atribuida probablemente al consumo de los compuestos de bajo peso molecular que se desprendieron del polímero al contacto con el agua del medio, lo cual generó mayor presencia de grupos funcionales carboxilo, preferidos de los microorganismos para alimentarse. Pues después de esta etapa siguió una metabólicamente idéntica por meses.

Aunque la formación de un film de bacterias favoreció la biodegradación, las bacterias llegaron a su límite biodegradativo después de los 150 días y no pudo haber más biodegradación del plástico. Aunque se contempla la posibilidad de que las bacterias desarrollaron un biosurfactante para poder atacar la parte más hidrofóbica de la molécula. Otras especies de *Rhodococcus* han sido analizadas con resultados similares, como la mostrada en la Figura 7.9 (Sivan, 2011).

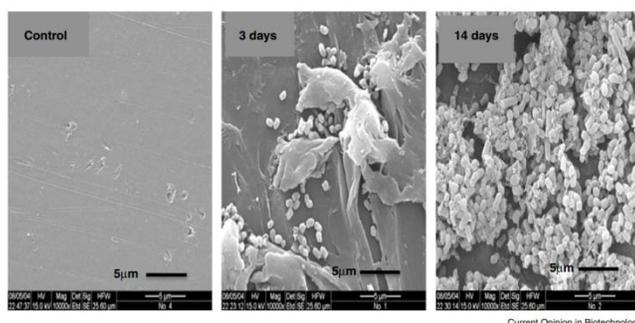


Figura 7.9: Microscopía electrónica de barrido de la biopelícula producida por *Rhodococcus ruber* C208 en la superficie de PE irradiado con UV ( $\lambda \geq 300\text{nm}$ ) por 120 h. El control fue una laminilla de PE irradiada pero no puesta en contacto con el microorganismo.

Fuente: Sivan, A. (2011). New perspectives in plastic biodegradation. *Current Opinion in Biotechnology*, 22, 3, 422-426.

## **7.2 INVESTIGACIONES NACIONALES DE BIODEGRADACIÓN DE PLÁSTICO**

Las investigaciones relacionadas con la biodegradación de plásticos no son exclusivas de países extranjeros, también en México existen investigaciones enfocadas en biodegradación de plástico con diferentes microorganismos. A continuación, se presentarán las más relevantes para los diferentes tipos de plásticos que generan contaminación en México.

### **7.2.1 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILENO (PE), UNAM**

La Dra. Marcela Ayala y su equipo de investigación del departamento de Ingeniería Celular y Biocatálisis en el Instituto de Biotecnología, UNAM, se encuentra, desde 2012, desarrollando una investigación relacionada con la biodegradación del polietileno (PE) con peroxidasas, enzimas provenientes de hongos (DGCS, 2012).

Ha sido ampliamente demostrado que los hongos conocidos como “hongos de podredumbre blanca”, como lo son *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes versicolor* y *Ceriporiopsis subvermispora*, así como otros mencionados en la Tabla 6.1, son buenos candidatos para degradar xenobióticos y aptos para atacar cierto tipo de contaminación, debido a que poseen enzimas lignolíticas.

Los organismos lignolíticos son capaces de metabolizar diversas moléculas incluyendo fenoles, pesticidas, dioxinas, compuestos organofosforados, nitrotoluenos y otros compuestos ambientales. Los hongos de podredumbre blanca son los principales implicados en el proceso de degradación de la madera. La batería enzimática de estos organismos está compuesta, en general por enzimas oxidativas, como lacasas, lignin-peroxidasas (LiP), manganes-peroxidasas (MnP) y peroxidasas versátiles (VP) (Ver Tabla 7.10). Estas peroxidasas son capaces de oxidar una gran gama de sustancias.

Estas enzimas lignolíticas están directamente involucradas con la biodegradación de diversos xenobióticos de uso en el campo y en la ciudad.

Tabla 7.10: Enzimas lignolíticas producidas por hongos de podredumbre blanca

Fungus	Ligninolytic enzymes	Authors, year
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	MnP, LiP	Paszczynski et al., 1988
<i>Trametes versicolor</i>	MnP, laccase	Paice et al., 1993
<i>Ceriporiopsis subvermispora</i>	MnP, laccase	Urzúa et al., 1998
<i>Cyanthus stercoreus</i>	MnP, laccase	Sethuraman et al., 1999
<i>Phlebia radiata</i>	MnP, LiP, laccase	Van Aken et al., 1999
<i>Nematoloma frowardii</i>	MnP, LiP, laccase	Schneegass et al., 1997; Hofrichter et al., 1999
<i>Pleurotus eryngii</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Pleurotus pulmonarius</i>	MnP, VP, laccase	Martínez et al., 1996; Caramelo et al., 1999
<i>Bjerkandera</i> sp.	VP	Mester and Field, 1997; Mester and Field, 1998
<i>Bjerkandera adusta</i>	VP	Wang et al., 2001

Fuente: Ayala, M., Pickard, M. A. & Vazquez-Duhalt, R. (2008). Fungal Enzymes for Environmental Purposes, a Molecular Biology Challenge. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 15, 172–180.

A pesar de su evidente valor biotecnológico, las peroxidasas no han sido explotadas a nivel industrial por la poca estabilidad que presentan, pues su mecanismo en presencia de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no ha sido completamente dilucidado.

Las peroxidasas han sido ampliamente utilizadas en el tratamiento de desulfuración del petróleo, pero la incursión de estas enzimas para biodegradación de plástico es relativamente reciente en el mundo y mucho más en México.

Aunque el equipo de investigación de la Dra. Marcela Ayala del Instituto de Biotecnología no ha publicado aún sus hallazgos, ya han identificado una enzima capaz de oxidar la superficie de bolsas de polietileno, sentando precedentes para la biodegradación de PE en México.

Ese equipo de investigación también ha manifestado sus intenciones de aislar microorganismos que degraden el plástico oxidado enzimáticamente, aunque no han tenido éxito. Ahora trabajan con bacterias aisladas de un río con gran potencial para la

biodegradación de PE, pero al ser un proyecto en proceso, la investigadora declara personalmente que prefiere conservar la confidencialidad al respecto hasta tener conclusiones contundentes y poder hacer una publicación al respecto.

## **7.2.2 BIODEGRADACIÓN DE POLIURETANO (PU), UNAM**

Otro equipo de investigación interesado en la biodegradación de plásticos en México es el liderado por la Dra. Herminia Loza, en el departamento de Bioquímica en la Facultad de Química UNAM. Ellos se encargan del estudio de bacterias, hongos y enzimas capaces de biodegradar PU.

Con las características que se mencionan durante la introducción de este trabajo y cuando se mencionaron las investigaciones del Dr. Nakajima-Kambe, sabemos qué es y cómo está constituido el poliuretano, aunque vale la pena recalcar que debido a su gran versatilidad, puede encontrarse en pinturas, barnices, adhesivos, espumas y ropa elástica.

El equipo de la Dra. Loza descubrió, caracterizó y analizó dos cepas de bacterias de la familia *Alicyclophilus* con la capacidad de degradar poliuretano y utilizar N-metil pirrolidona (NMP), un solvente utilizado en barnices, como única fuente de carbono (Oceguera-Cervantes *et al.*, 2007).

Las bacterias se encontraron en muestras de tapicería vieja y deteriorada recolectadas en el Bordo de Xochiaca, un basurero a cielo abierto en el municipio de Nezahualcóyotl en el Estado de México, llevadas al laboratorio en bolsas de polietileno y posteriormente se colocaron en matraces Erlenmeyer que contenían medio mínimo, con los elementos necesarios para su desarrollo y un barniz de PU llamado Hydroform como única fuente de carbono. Este barniz fue seleccionado, porque literatura anterior reportaba el uso de barnices similares para detectar bacterias poliuretanolíticas.

Es importante mencionar que para poder generar los medios de cultivo para llevar a cabo estos experimentos, el barniz se sometió a condiciones de esterilización por autoclave: 15 libras de presión, a temperatura de 121°C por 15 minutos.

Las cepas capaces de crecer en este medio cuya única fuente de carbono es PU (MM-PUh) fueron caracterizadas con pruebas bioquímicas: Agar MacConkey y papa y diferentes medios, entre ellos: caldo de nitrato, *Salmonella/Shigella*, cetrimida, movilidad con sulfato-indol, urea, arginina; posteriormente se realizó una prueba API.

Las dos cepas bacterianas que mostraron mayor crecimiento en el MM-PUh fueron identificadas por medio de la secuenciación del rRNA 16S. Las cepas se identificaron como *Alicyclophilus* sp. y se les nombró BQ1 y BQ8.

Para determinar su capacidad poliuretanolítica se hicieron pruebas de actividad enzimática para conocidas enzimas que llevan a cabo este tipo de biodegradación: proteasas, ureasas y esterases.

Para la actividad proteasa se inoculó en agar YES, incubados por 48 horas a 37°C y posteriormente se tiñeron con Azul de Coomassie R-250 por 30 minutos y fueron lavados con una combinación 3:1 de ácido acético y metanol. Se observaron claramente zonas de degradación no teñidas alrededor de las colonias bacterianas, lo cual indicó actividad proteolítica.

Para detectar la actividad ureasa, las cepas fueron inoculadas en agar de urea de Christensen y después de 48 horas de incubación a 37°C se observó coloración rosa alrededor de las bacterias, evidenciando actividad ureasas por el viraje del indicador rojo de fenol.

Finalmente para evidenciar actividad esterasa, las cepas fueron cultivadas en agar Tween 80 e incubadas por 120 horas a 37°C. Un halo de precipitación blanca alrededor de las colonias demostró la actividad esterasa de las cepas.

También se hicieron ensayos para detectar la presencia de actividades enzimáticas relacionadas con la degradación del PU. La actividad enzimática fue determinada midiendo espectrofotométricamente la hidrólisis de caseína, siguiendo protocolos antes mencionados en la literatura.

También se realizaron análisis de Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas y Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier para conocer el estado del plástico antes, durante y después del ataque bacteriano.

Como se muestra en la Figura 7.11, se comprueba que las bacterias descubiertas y aisladas en este laboratorio sí inducen un cambio químico en el poliuretano, que se refleja como un cambio físico del material.

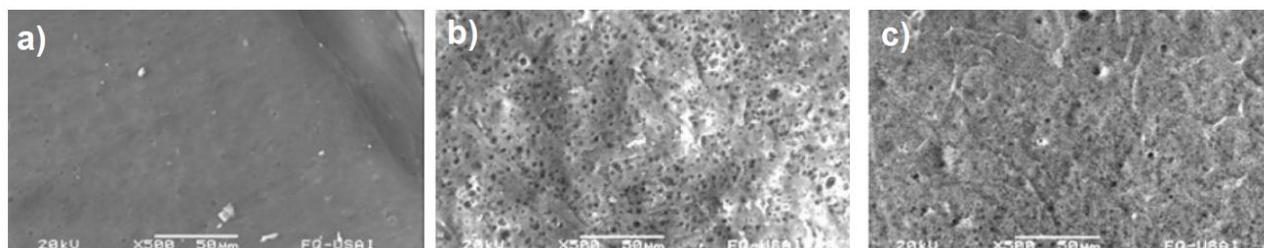


Figura 7.11: Microscopía Electrónica de Barrido que demuestra el ataque físico de *Alicyclophilus* sp. cepas BQ1 (a) y BQ8 (b) comparados con una muestra de PU no inoculada (c).

Fuente: Ocegüera-Cervantes, A., Carrillo-García, A., López, N., Bolaños-Nuñez, S., Cruz-Gómez, M. J., Wachter, C., & Loza-Tavera, H. (2007). Characterization of the Polyurethanolytic Activity of Two *Alicyclophilus* sp. Strains Able To Degrade Polyurethane and N-Methylpyrrolidone. *Applied and Environmental Microbiology*, 73, 19, 6214–6223.

Las bacterias del género *Alicyclophilus* se han reportado como degradadoras de xenobióticos, así como bacterias similares a otras familias, como el caso de *Comamonadaceae acidovorans*, otra bacteria reportada como capaz de utilizar distintos tipos de PU para mantener su crecimiento.

Aunque las enzimas y mecanismo de acción asociadas a esta degradación siguen siendo estudiados, hay grandes sugerencias de que la actividad esterasa es una importante participante en el proceso de biodegradación del PU (Ocegüera-Cervantes *et al.*, 2007).

### **7.2.3 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILEN TEREFTALATO (PET), IPN**

Un estudio de la Ingeniera en Biotecnología Ilse Arciniega se llevó a cabo en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) en el 2008 con el objetivo de identificar microorganismos capaces de degradar uno de los plásticos más abundantes en la industria de empaques: el polietileno tereftalato (PET) que fue ampliamente descrito en la introducción del presente trabajo.

Los lugares de donde se obtuvieron las muestras de las bacterias con potencial capacidad para degradar PET fueron: excremento de animales como ratas, estómago de rumiantes, por su gran microbioma capaz de llevar a cabo la degradación de polímeros naturales como celulosa, hemicelulosa, almidón y proteínas; rellenos sanitarios, tiraderos de basura especialmente la zona donde había mayor concentración de botellas de PET, y finalmente canales de agua contaminada (Arciniega, 2008).

Estas muestras fueron combinadas para generar una sola que fue incubada a 37°C con agitación de 100 rpm hasta que se observó macroscópicamente crecimiento de microorganismos. Las bacterias comenzaron a crecer a partir del día 7 y el medio de cultivo dejó de cambiar su apariencia física después de 14 días.

Los primeros experimentos que se hicieron con este conjunto de microorganismos fue someterlos a un medio de cultivo que contenía ácido tereftálico, uno de los precursores del PET, para corroborar que existían microorganismos capaces de crecer en su presencia, aunque este no fungió como única fuente de carbono; posteriormente se inocularon los microorganismos de la muestra en un medio de cultivo con ácido tereftálico y polietilenglicol, otro precursor del PET, de nuevo con una fuente de carbono alterna descrita en la Tabla 8.2.

Posteriormente se realizó el ensayo utilizando PET molido en el medio de cultivo, pero con sacarosa como compuesto con carbono adicional al PET. Los componentes del medio de cultivo se muestran en la Tabla 7.12. Las condiciones de incubación fueron las mismas para los tres cultivos: 7 días a temperatura ambiente, agitación de 100 rpm.

Tabla 7.12: Formulación de los medios de cultivo utilizados para la identificación de microorganismos capaces de degradar polietilen tereftalato (PET).

Medio con ácido tereftálico		Medio con ácido tereftálico y polietilenglicol		Medio con PET	
Compuesto	Concentración (g/L)	Compuesto	Concentración (g/L)	Compuesto	Concentración (g/L)
Ácido Tereftálico	0.1	Ácido Tereftálico	1	PET	1
Extracto de levadura	10	Polietilenglicol	1	Sacarosa	0.1
Sacarosa	10	Sacarosa	0.1	KNO <sub>3</sub>	0.25
KNO <sub>3</sub>	0.25	KNO <sub>3</sub>	0.25	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.1
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.1	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.1	MgSO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O	0.05
MgSO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O	0.05	MgSO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O	0.05	NaCl	0.05
NaCl	0.05	NaCl	0.05		

Fuente: Arciniega, I. Y. (2008). Aislamiento de microorganismos degradadores de tereftalato polietileno (PET) en medio ambiente combinado. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, México.

Al ser medios líquidos se pudo observar la presencia de microorganismos porque se generó un cambio en la turbidez de los matraces cuando se comparaban con el matraz blanco, el cual en vez de inóculo contenía agua. Posteriormente, por medio de microscopía óptica y tinción de Gram se confirmó su presencia. En la Figura 7.13 se muestran los resultados de la tinción de Gram en el medio de cultivo con ácido tereftálico; en la Figura 7.14, los microorganismos presentes en el medio de cultivo de ácido tereftálico y polietilenglicol.

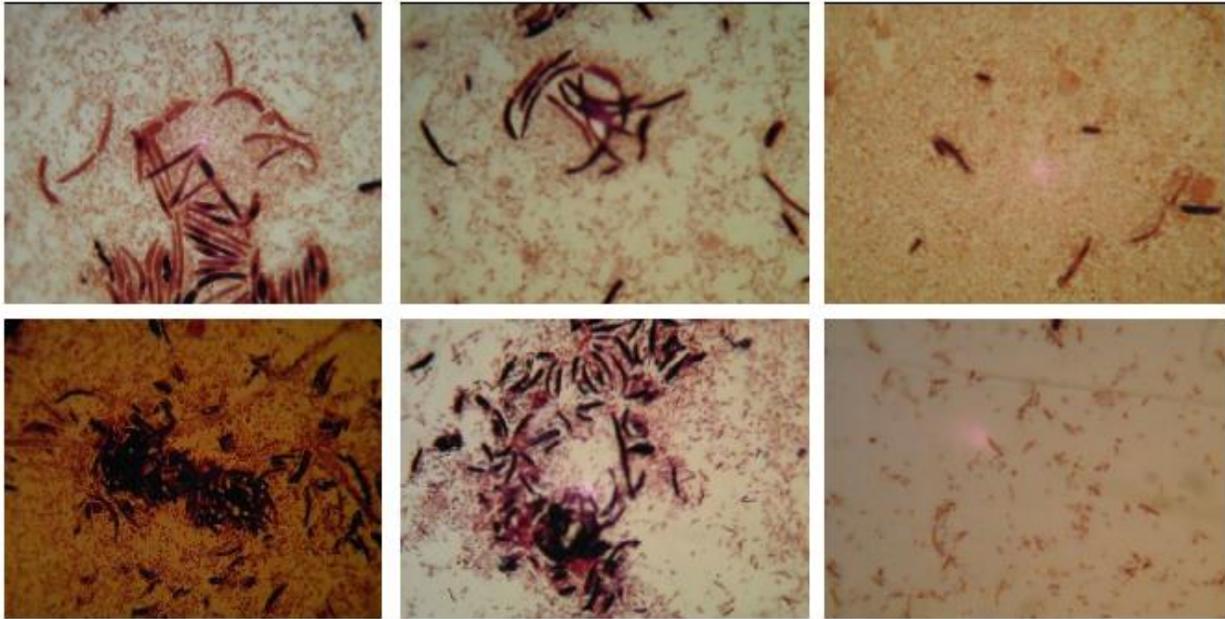


Figura 7.13: Tinción Gram de los microorganismos presentes el día 7 de incubación del medio de cultivo que contiene ácido tereftálico.

Fuente: Arciniega, I. Y. (2008). Aislamiento de microorganismos degradadores de tereftalato polietileno (PET) en medio ambiente combinado. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, México.

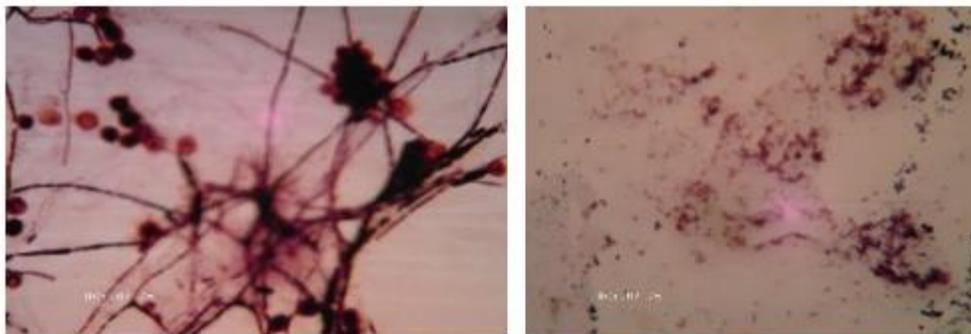


Figura 7.14: Tinción Gram de los microorganismos presentes el día 7 de incubación del medio de cultivo que contiene ácido tereftálico y polietilenglicol.

Fuente: Arciniega, I. Y. (2008). Aislamiento de microorganismos degradadores de tereftalato polietileno (PET) en medio ambiente combinado. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, México.

Al asegurarse que las cepas crecían en presencia de los precursores del PET, el paso siguiente fue corroborar si estos microorganismos eran capaces de utilizar PET como única fuente de carbono, así que se realizó un medio de cultivo con los mismos sustratos inorgánicos y mismas condiciones de cultivo, pero utilizando únicamente PET molido como fuente de carbono, resultando en un óptimo crecimiento de bacterias, lo cual se muestra en la Figura 7.15.



Figura 7.15: Tinción Gram de los microorganismos presentes el día 7 de incubación del medio de cultivo que contiene PET como única fuente de carbono.

Fuente: Arciniega, I. Y. (2008). Aislamiento de microorganismos degradadores de tereftalato polietileno (PET) en medio ambiente combinado. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, México.

Para la determinación de la degradación de ácido tereftálico fue realizada la cuantificación del compuesto utilizando la técnica de cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC), alcanzando porcentajes de hasta 75% de degradación.

Aunque la tasa de degradación de ácido tereftálico es alta, no es del todo confiable, pues las réplicas no se realizaron en las mismas condiciones, no es posible entonces extrapolar esta información para conocer la degradación de PET para estas bacterias, pues aparte de la imprecisión de la información obtenida, son procesos distintos. Pero sí muestra un panorama alentador para seguir investigando al respecto.

Esta investigación concluye dando a conocer que también se encontró un hongo en las muestras y también parece ser un potencial degradador de PET (Ayala *et al.*, 2008).

Esta investigación, aunque presenta algunas deficiencias en sus métodos y desarrollo experimental, resulta de interés para este trabajo porque sienta las bases de la investigación en degradación de plásticos dentro de universidades mexicanas.

#### **7.2.4 BIODEGRADACIÓN DE POLIETILEN TEREFTALATO (PET) Y BIOPET, UNAM**

Otra investigación destacada en México es la liderada por la Dra. Amelia Farrés, del departamento de Biotecnología y Alimentos en la facultad de Química UNAM. Esta investigación está enfocada en estudiar enzimas fúngicas recombinantes capaces de degradar el plástico PET y una variante de este denominada BioPET.

El BioPET parte de una iniciativa promovida por Coca-Cola® que consiste en producir botellas de PET, pero en vez de utilizar etilenglicol a partir de recursos fósiles, se obtiene del etanol proveniente de la fermentación de carbohidratos, como el azúcar de caña o el almidón de maíz (The Coca-Cola® Company, 2012).

Las enzimas encargadas de la degradación son las cutinasas, las cuales han sido estudiadas con anterioridad por su capacidad degradativa de compuestos xenobióticos como ésteres sintéticos e incluso poliésteres. En el grupo de investigación de este laboratorio mexicano se lleva a cabo la expresión y caracterización de cutinasas recombinantes para la degradación de polietilen tereftalato, pues se ha comprobado que la enzima nativa presenta menor actividad catalítica (Morales-García, 2018; Bermúdez-García *et al.*, 2017).

En general, las cutinasas han sido ampliamente utilizadas recientemente para diversas aplicaciones, entre ellas, la degradación de compuestos tóxicos y para la producción de biodiesel (Kim *et al.*, 2005). La demanda de catalizadores es creciente en el mercado y cada vez es necesario que sean más selectivos y termoestables, siendo el campo de las cutinasas un terreno inexplorado, pero con gran potencial de explotación.

Como su nombre lo indica, las cutinasas actúan sobre la cutina, que es un polímero presente en la capa más externa de plantas y vegetales que sirve como mecanismo de protección de factores ambientales y daños por microorganismos (Chen *et al.*, 2013). Por lo general este polímero está formado, casi en su mayoría, por ácidos grasos de cadenas de 16 carbonos y presenta enlaces éster (Bessire *et al.*, 2007).

En el medio ambiente existen microorganismos capaces de degradar la pared celular de las plantas, entre ellos algunos hongos, por medio de la generación de cutinasas.

Las cutinasas estudiadas en este laboratorio son denominadas AN CUT1 y AN CUT2 procedentes del hongo *Aspergillus nidulans*. Este hongo es utilizado como modelo biotecnológico por tener un ciclo sexual bien caracterizado un genoma completamente secuenciado.

Para producir la enzima recombinante, se utilizó la levadura *Pichia pastoris*, que es un organismo ampliamente utilizado para estos fines según la literatura contemporánea, pues es capaz de producir modificaciones post-traduccionales similares a eucariontes superiores (Jordá *et al.*, 2012).

Por medio del vector de clonación pPICZ $\alpha$  se llevó a cabo la expresión de proteínas recombinantes en *P. pastoris*, posteriormente las enzimas se purificaron y caracterizaron y se comprobó su actividad enzimática por medio de un zimograma.

Es importante destacar que este desarrollo tecnológico está en proceso de patentamiento, por lo que por el momento no es posible reportar en este trabajo fotografías, resultados o datos adicionales a los exhibidos.

Para poder estudiar los cambios físicos y químicos en el plástico causado por la enzima se caracterizaron polímeros de PET y BioPET, determinando su cristalinidad por medio de una Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), entre otras.

Las muestras de polímeros provenían directamente de botellas de agua de PET y BioPET comerciales, fueron cortadas con tijeras y posteriormente trituradas con una

licuadora industrial hasta obtener polvo fino que se hizo pasar por un tamiz 60, es decir, las partículas eran menores a 0.25 mm.

El proceso de degradación del plástico se realizó adicionando 50 mg del polvo de plástico y el volumen equivalente a 500 U de actividad del extracto enzimático filtrado. Se realizaron experimentos a distintas temperaturas que iban desde los 30°C hasta los 50°C, por hasta 5 semanas, tomando muestras semanales para analizar el progreso. La agitación fue una variable que también se tomó en cuenta, llevando a cabo experimentos sin agitación y con agitación. El blanco utilizado fue extracto enzimático de *P. pastoris* sin transformar.

Después de dos semanas de mantener el contacto entre la enzima recombinante y el plástico, los cambios morfológicos del PET y BioPET eran evidentes, aparte de que la viscosidad en la fase líquida se incrementó considerablemente.

Para corroborar la degradación de los dos tipos de plástico, se empleó la técnica de Micrografía Electrónica de Barrido para los plásticos antes y después de la degradación enzimática. En las micrografías se puede observar el cambio morfológico del plástico, que varía dependiendo del tiempo que el plástico estuvo en contacto con la cutinasa.

Posteriormente se hicieron las mismas pruebas que se utilizaron para caracterizar los plásticos, pero ahora para verificar y cuantificar los cambios que ocurrieron los materiales después de la degradación enzimática.

Según la literatura, algunos de los monómeros y oligómeros que se obtienen de la degradación de PET son el ácido tereftálico (TPA), el etilenglicol (EG), el mono-(2-hidroxietil) tereftalato (MHET), el bis-(2-hidroxietil) tereftalato (BHET), que han sido identificados como los principales productos de degradación enzimática de hidrolasas de poliésteres. En el caso de esta investigación, después de la degradación se pudieron identificar los compuestos TPA, BHET, entre otros que aún están por identificar (Bermúdez-García *et al.*, 2017).

## 7.2.5 BIODEGRADACIÓN DE DI(2-ETIL HEXIL) FTALATO (DEHP) – MÉXICO 2008 CICB

Aparte de la biodegradación de plástico *per se*, es importante entender que la composición de los productos comerciales hechos de plástico no simplemente se limitan a un solo tipo de plástico. Existen envases o productos multicapa que, como su nombre lo indica, contienen dos o más tipos de plástico, lo cual los vuelve productos muy complejos de reciclar y más aún de biodegradar, pues como se ha podido observar en las investigaciones anteriores, las enzimas son altamente específicas.

En este contexto es importante que también se hagan estudios de biodegradación acerca de los diferentes plastificantes y adhesivos que se utilizan en la industria para hacer productos multicapa. Uno de los plastificantes más utilizados en la industria del policloruro de vinilo (PVC) es el di(2-etil hexil) ftalato (DEHP) (Figura 7.16), un aliado importante que dota al PVC de flexibilidad (Cartwright *et al.*, 2000), el cual es utilizado en la manufactura de tubos, cables, revestimientos de suelos, techos, materiales utilizados para imprenta, entre otros (Nalli *et al.*, 2002).

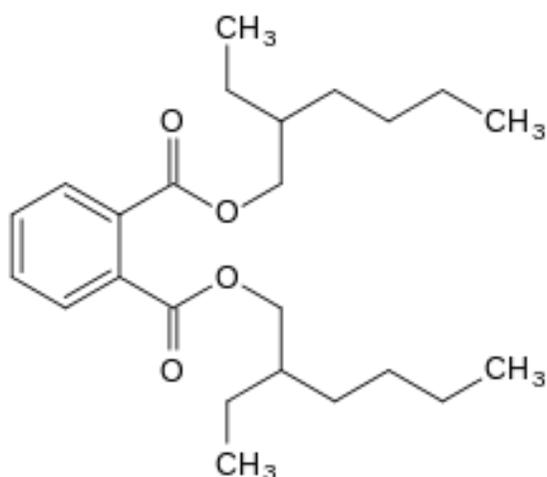


Figura 7.16: Molécula de di(2-ethyl hexil) ftalato (DEHP)

Fuente: Fernandes, B., Maria, F., Nakao, L., Ingberman, M. & Cubas, R. (2018) Determination of Di(2-ethylhexyl phthalate) released in the blood from PVC line during the hemodialysis procedure. *Materia*. 23, 01.

Este compuesto, aparte de ser un plastificante de uso común, también se ha catalogado como una molécula carcinogénica, mutagénica y teratogénica que consumimos diariamente. Existen reportes de que cada humano consume cerca de 8 miligramos de ftalatos al día (Loftus *et al.*,1993) por lo que su biodegradación, aparte de beneficiar al medio ambiente, beneficia también en gran medida a la salud humana.

La Dra. Carmen Sánchez, investigadora del Centro de Investigación de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (UAT) lidera un proyecto de biodegradación de di(2-ethyl hexil) ftalato (DEHP) en colaboración con otros importantes centros de investigación del país, como la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) Unidad Iztapalapa, y la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP).

El microorganismo empleado para llevar a cabo esta biodegradación es *Fusarium culmorum*. Las enzimas asociadas a esta biodegradación son, de nueva cuenta las cutinasas, cuyas características se especificaron al retomar la investigación de biodegradación de PET y BioPET de la Dra. Farrés.

El descubrimiento de que los hongos del género *Fusarium* son capaces de degradar polímeros es relativamente nuevo, los primeros reportes de este fenómeno surgieron en 2007, pero se ha posicionado como un organismo altamente eficiente para esta tarea por su abundante secreción de enzimas como esterases y lacasas.

Las esterases catalizan la hidrólisis de enlaces éster y los convierten en ácidos carboxílicos (Benjamin *et al.*, 2015); mientras que las lacasas oxidan compuestos que contengan difenoles (Mayer *et al.*, 2002). Es importante que ambas enzimas se encuentren en el medio líquido o sólido para que la degradación del diftalato pueda ocurrir.

*Fusarium culmorum* es un hongo fitopatógeno que infecta las plantas dada su habilidad de producir cutinasas. La producción de estas enzimas hace que la cutina que se encuentra en la pared de las plantas sea degradada, lo que facilita el proceso de infección en estas.

Para encontrar la cepa de *Fusarium culmorum* que se estudia en esta investigación, se tomaron muestras de una empresa recicladora de papel, pues ahí podría haber indicio

de crecimiento de microorganismos capaces de degradar DEHP, ya que este compuesto se encuentra presente en tintas y adhesivos de sobres o cajas de cartón que se manejan en esta industria.

Las cutinasas de *Fusarium culmorum* son capaces de romper los enlaces éster que se encuentran en los plastificantes como di (2-etilhexil) ftalato y dibutil ftalato, de esta manera inician el proceso de degradación de algunos plásticos como el PVC (Ahuactzin-Pérez *et al.*, 2016).

Para estudiar la biodegradación producida por este hongo se realizaron medios de cultivo líquidos que contenían extracto de levadura y DEHP en cantidades crecientes.

El primer medio (medio base) no contenía DEHP solo extracto de levadura y compuestos inorgánicos fundamentales para el crecimiento del hongo, el siguiente era medio base adicionado con 500 miligramos de DEHP por litro y finalmente el tercero era medio base más un gramo de DEHP por litro. A todos los medios, se les fueron adicionados tres cortes de micelio de 10 milímetros de diámetro tomados de la periferia de una colonia que contaba con 7 días de crecimiento en agar papa-dextrosa.

Los cultivos fueron incubados a 28°C por 10 días en una incubadora rotatoria a 120 rotaciones por minuto. Se realizaron análisis de los medios de cultivo cada 12 horas. Las cantidades de DEHP utilizadas fueron seleccionadas por haber sido descritas previamente descritas en la literatura.

Con los datos de biomasa para cada experimento, obtenidos gracias a la filtración del medio después de los intervalos de tiempo anteriormente descritos y los ensayos de actividad enzimática para lacasas y esterases, se calcularon los datos necesarios para hacer aproximaciones cuánticas para conocer la cinética y proponer una vía metabólica.

Se realizó una Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas para identificar los productos de la biodegradación después de los diferentes intervalos de tiempo en los que se puso en contacto el microorganismo y el DEHP.

Finalmente se llegó a la conclusión de que *Fusarium culmorum* es capaz de degradar 95% de DEHP en el medio de cultivo con mayor abundancia del plastificante (1000mg/

L) en 60 horas; lo que indica una eficiencia excelente y un gran potencial para seguir investigando a este microorganismo y sus enzimas, pues presentan una solución viable para el problema de contaminación por plástico y un gran beneficio para la salud humana.

El hongo *Fusarium culmorum* mineraliza completamente el plastificante, es decir, lo degrada por completo.

La investigadora ha incursionado en investigaciones con el mismo objetivo, pero empleando distintos hongos como *Pleurotus ostreatus*, el cual también degrada el compuesto, pero no lo mineraliza totalmente. Esto es debido a que *Fusarium culmorum* produce mayor cantidad de cutinasas que *Pleurotus ostreatus* (Ahuactzin-Pérez *et al.*, 2016).

Es importante destacar una característica muy singular de esta investigación: para el modelado de las actividades enzimáticas se utilizaron herramientas de modelaje de rutas metabólicas por medio de química cuántica, lo cual representa un gran engranaje entre las ciencias aplicadas y las aproximaciones teóricas en el estudio de la química de materiales.

En cuanto a la posibilidad de escalar el proceso para llevarlo a la industria, la investigadora ha señalado que la investigación se encuentra aún en etapas muy tempranas, estudiando a fondo las enzimas implicadas y el mecanismo de acción, así como las condiciones a las que el microorganismo y la enzima trabajan óptimamente. Aunque no descartan que eventualmente transferirán la tecnología para degradar el DEHP a nivel industrial.

## **7.3 INVESTIGACIONES RELEVANTES EN LA BIODEGRADACIÓN DE POLÍMEROS**

### **7.3.1 BIODEGRADACIÓN DE CELULOSA EN PAÑALES, MÉXICO**

Como se menciona anteriormente, los productos de plástico multicapa presentan mayor problemática al momento de ser reciclados o biodegradados, un gran ejemplo de esto son los pañales desechables. Los pañales desechables son, generalmente compuestos no sólo por láminas multicapa, si no que aparte de las capas constitutivas, también tienen otros elementos adicionales al clásico campo de absorción, como lo son las telas elásticas, cintas adhesivas, material absorbente e incluso decoraciones impresas, que dificultan aún más el reciclaje de estos productos.

Otro reto que enfrenta la biodegradación de pañales es la manera de envolverlos al momento de desecharlos, pues impide que la celulosa contenida en los mismos tenga contacto directo con microorganismos que pudieran acelerar su degradación.

Según la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO) en 2011, un bebé gasta en promedio 6 pañales diarios, es decir 2,190 piezas al año, lo cual significa ser del 5–15% del total de residuos sólidos generados en la Ciudad de México (Espinosa-Valdemar *et al.*, 2001).

El problema generado por la falta de tratamiento de los pañales desechables debido a su complejidad los ha llevado a acumularse en basureros a cielo abierto o rellenos sanitarios.

Un punto a favor de los pañales desechables es que más de 80% de su peso está constituido por algodón, es decir celulosa, un polímero orgánico natural presente en árboles y plantas, por lo que hongos y bacterias podrían ser capaces de reconocer esta molécula y biodegradarla. Al eliminar este polímero, el volumen de un pañal degradado disminuye notablemente, por ejemplo, de un kilogramo a 300 gramos.

Este hecho fue aprovechado para crear una nueva tecnología para lidiar con la contaminación generada por pañales desechables usados. Este desarrollo se llevó a

cabo por el equipo de investigación liderado por la Dra. Rosa María Espinosa Valdemar en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A) (Cacho, 2016).

El hongo capaz de llevar a cabo la biodegradación de la celulosa de pañales usados es *Pleurotus ostreatus*, el cual aparte de tener esta capacidad biodegradativa, es la segunda especie de mayor importancia comercial en México pues este país es uno de los mayores productores a nivel mundial. La investigadora incluso afirma que este hongo puede ser cultivado en ecosistemas domésticos, pues no requiere instalaciones sofisticadas (Espinosa-Valdemar *et al.*, 2001).

El desarrollo tecnológico consta de un nuevo proceso que utiliza el hongo *Pleurotus* (Figura 7.17) para degradar de forma acelerada la celulosa contenida en el pañal desechable. La investigación de esta institución mexicana no se conforma únicamente con reducir a gran escala el volumen de pañales usados, si no que al mismo tiempo pretende generar una fuente de alimento alta en proteína.



Figura 7.17: Hongo *Pleurotus ostreatus* creciendo en pañales usados.

Fuente: Cacho, Y. (2016, 3 de marzo). Innovadora tecnología biológica para tratar pañales desechables. Ciencia MX. Recuperado el 27 de septiembre de 2018, de <http://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/biotecnologia/5587-planta-de-tratamiento-de-panales-desechables-nota>

Con una cepa de *Pleurotus ostreatus* donada por el Instituto de Ecología de Xalapa, se realizaron experimentos utilizando como sustrato pañales usados junto con desechos de uva para completar los requerimientos nutricionales del hongo.

Los estudios de biodegradación de celulosa se hicieron en residuos sólidos de guarderías y centros de desarrollo infantil y hasta el momento solo se han degradado pañales que contienen orina, debido a que la cantidad de pañales con orina generada por los niños, en comparación con los pañales que contienen residuos fecales, es mucho mayor, pues de seis o siete pañales diarios, cinco contienen exclusivamente orina; además de que el tratamiento de pañales con residuos fecales requiere otras condiciones de mayor control y complejidad.

Se tomó una muestra de 30 kg de pañales desechables, de diferentes tamaños y marcas, posteriormente fueron fragmentados hasta lograr tener piezas de 10 a 15 centímetros, colocados en agua por 24 horas para aumentar al máximo su hidratación y finalmente el exceso de agua fue filtrado.

Distintas condiciones fueron probadas para obtener la mayor tasa de degradación, algunas de las condiciones fueron quitar el plástico a los pañales y únicamente dejar la celulosa, triturado mecánico o manual, con o sin suplementos de uva, aparte de diferentes condiciones de humedad y temperatura.

Los fragmentos de pañal se esterilizaron por autoclave colocándolos en bolsas termorresistentes antes de la inoculación de 16 gramos de semilla de *Pleurotus ostreatus*.

Durante el proceso de invasión del microorganismo, la temperatura se mantuvo entre 25–29°C, posteriormente descendió a 22–25°C. La humedad se mantuvo entre 70–80% en todo momento, al igual que la oscuridad y los cultivos contaban con circulación de aire en la cámara de crecimiento para evitar la acumulación excesiva de CO<sub>2</sub>.

Después de 21 días los pañales estaban completamente cubiertos de micelio, entonces se les dejó bajo luz natural por 47 días. Siendo el tiempo total del experimento de 68 días. Finalmente se recolectaron los cuerpos fructíferos de los hongos y se analizaron según diversas Normas Oficiales Mexicanas para verificar si eran aptas para consumo

humano. También se analizaron para posibles productos de degradación para descartar moléculas nocivas para la salud.

Se obtuvo el peso seco del sustrato antes y después del experimento para calcular su eficiencia, obteniendo pérdida de peso de hasta de hasta 85% para el experimento al que se le adicionó desechos de uva, mientras que los pañales sin inocular no perdieron ni el 5% de su peso seco después de 68 días.

Finalmente, los hongos obtenidos después de la cosecha el día 68 son aptos para su consumo humano o animal.

Este desarrollo podría aplicarse también en empresas fabricantes de pañales, porque en lugar de tirar la merma del producto que, por motivos de calidad u otros, no se comercializa, podrían reciclarla.

El desarrollo está protegido por derechos de propiedad industrial en México bajo la figura de patente con el título número 205107.

El equipo de investigación recomienda que las autoridades de los municipios y las delegaciones realicen una recolección selectiva de pañales desechables usados y después transportarlos a una planta para su tratamiento. De esta manera, a través del reciclaje y reaprovechamiento de materiales, el volumen de residuos que se deposita en los rellenos sanitarios sería mucho menor.

Esta investigación logra deshacerse de más del 80% de los componentes de un pañal, aunque no sean precisamente plásticos lo que se degrada. Es muy importante que grupos de investigación de distintos polímeros trabajen en conjunto para encontrar soluciones a la contaminación por distintos productos plásticos. En este caso, el plástico de los pañales aún debe ser degradado para no contaminar, pero sin duda, deshacerse de la celulosa de un pañal es un excelente primer paso.

## **CAPÍTULO VIII**

# **PROSPECTIVA DE LOS DESECHOS PLÁSTICOS**

*“En el mundo están sucediendo cosas increíbles.”*

Gabriel García Márquez

## 8.1 ¿QUÉ PASARÁ CON LOS DESECHOS PLÁSTICOS EN EL MUNDO?

Como se mencionó en este trabajo, los recursos más utilizados para tratar los desechos plásticos son la incineración, los rellenos sanitarios y apenas se comienzan a implementar planes de reciclaje (Figura 8.1).

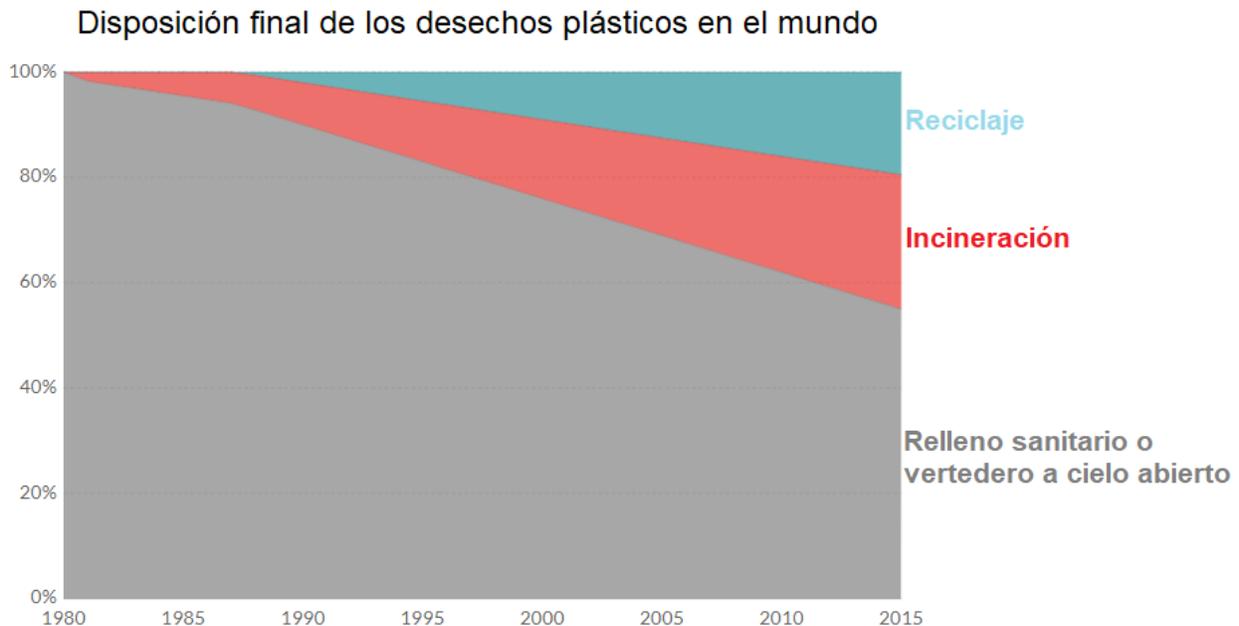


Figura 8.1: Disposición final de los desechos plásticos en el mundo.

Modificado de: Ritchie, H. & Roser, M. (2020). Plastic Pollution [en línea]. Publicado en: [ourworldindata.org](https://ourworldindata.org). Recuperado el 9 de enero de 2020 de: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

En el caso de la incineración, se requiere de maquinaria especializada, lo cual la hace una alternativa de alta inversión inicial y de mantenimiento. En un principio, únicamente se utilizaba para deshacerse de los desechos y con el tiempo evolucionó hasta convertirse en una fuente generadora de energía, que permite utilizar la energía térmica liberada para calderas industriales e incluso convertirse en energía eléctrica. Sin embargo, esta opción genera gases de efecto invernadero, específicamente CO<sub>2</sub> (Ritchie & Roser, 2020).

Para poder decidir si la incineración es una buena o mala opción para tratar los desechos se debe revisar caso por caso, pues la eficiencia de incineración depende de

qué tipo de desechos se quemen, la tecnología utilizada en la planta, la capacidad de recuperar cenizas y gases sin liberarlas al ambiente y cuánta energía es recuperable de este proceso.

Por ejemplo, en países donde impera el uso de combustibles fósiles, el hecho de utilizar la energía recuperada de procesos de incineración puede reducir emisiones. Pero en casos como los de algunos países europeos, donde la energía que impera es renovable, el proceso de incineración es únicamente una fuente de gases de efecto invernadero.

Una de las más grandes preocupaciones de la sociedad acerca de la incineración de desechos son las emisiones tóxicas que se generan, específicamente al quemar plásticos. La combustión incompleta de polietileno (PE), polipropileno (PP), y poliestireno (PS) pueden generar monóxido de carbono (CO), mientras que la incineración de cloruro de polivinilo (PVC) puede producir dioxinas; sustancias que resultan altamente tóxicas para los humanos o los ecosistemas (Ritchie & Roser, 2020).

Lo que es un hecho es que la práctica no controlada de quema de plásticos debe estar absolutamente prohibida, lo cual lamentablemente no ocurre en países de bajo desarrollo. La única manera en la que la incineración sea una alternativa viable es que se encuentre estrictamente controlada respecto a los gases que se liberan y potenciales cambios del ecosistema circundante.

La mayoría de los países desarrollados optan por enterrar sus desechos plásticos (en realidad todos sus desechos combinados) ya sea en su país en lugares altamente controlados o bien, exportar su basura a países menos desarrollados que asepten hacerse cargo de enterrarlos en su territorio (Ritchie & Roser, 2020). Sin embargo, la mayoría de estos rellenos sanitarios están pobremente regulados y la mayoría de las veces, lo que inicia como un relleno sanitario, se vuelve un basurero a cielo abierto sin estrategias de planificación, que contamina cauces fluviales, aire, suelo y es un foco de fauna nociva y enfermedades asociadas a la falta de higiene.

Dentro de un relleno sanitario, el plástico no hace más que combinarse con otro tipo de residuos y degradarse a un ritmo muy lento, rompiéndose en pedazos más pequeños y aumentando su posibilidad de llegar al océano.

Los rellenos sanitarios bien manejados, tienen el propósito de reunir, compactar y almacenar de forma segura los desechos. En muchas ciudades esto incluye volverlos sitios recreativos al alcanzar su máxima capacidad, sin embargo, incluso con una perfecta práctica de relleno sanitario, se seguirán emitiendo gases de efecto invernadero, como metano (CH<sub>4</sub>) o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y lixiviados.

Si no son correctamente manejados algunos plásticos, como el PVC, corren el riesgo de liberar al ambiente aditivos o plastificantes (Asakura, 2004).

No hay que olvidar que todos estos procesos deben estar inmersos en una sociedad. Y todas las sociedades a través del mundo son diferentes y por lo tanto, ponderan diferente sus prioridades. Algunos prefieren hacer lo que es mejor para el ambiente, otros prefieren anteponer la salud pública como prioridad y hay algunos que simplemente optan por hacer lo que resulte económicamente más rentable. El tipo de desechos producidos en cada región también influye en esta toma de decisión.

En el año 2016 Bernardo *et al.* realizaron un estudio tratando de decidir qué es mejor para el medio ambiente: incinerar, enterrar o reciclar los desechos, estudiando casos específicos en diferentes ciudades del mundo, basándose en el potencial generador de cambio climático que las tres opciones tienen y el total de energía utilizada.

Los resultados no son sorprendentes, posicionándose el reciclaje como el mejor método para plásticos como PET, HDPE, PVC, PE y PS. Y para aquellos plásticos que no son reciclables, la incineración resulta la mejor opción. Para el caso del PET, HDPE y PVC la segunda mejor opción es almacenarlos en un relleno sanitario y la última, la incineración, mientras que para PE y PS, es lo contrario (Bernardo *et al.*, 2016).

Para este estudio se asumieron aspectos importantes que podrían variar dependiendo el sitio donde se tiene que tomar la decisión del tratamiento de plástico, por ejemplo:

- Se consideró que cada tonelada de plástico reciclado prevenía la producción de una tonelada de plástico, lo cual no siempre es así, pues el plástico resultante del reciclaje suele ser de menor calidad y de menor valor económico, retomado por el concepto “downcycling” que señala justamente este fenómeno.
- A veces el plástico solo puede ser reciclado una o dos veces, después de eso terminará incinerado o almacenado en un relleno sanitario. Por lo que a pesar de que el reciclaje en un inicio la opción más adecuada, realmente sólo retrasa la disposición final del plástico en algunas de las otras dos opciones.
- A pesar de que reciclar es lo mejor ambientalmente hablando, no siempre es lo más favorable económicamente, en realidad, la relación económica entre producir plástico nuevo o reciclar el existente depende en gran medida del precio del petróleo. De hecho en 2015 y 2016 los precios del petróleo eran bajos y hacían realmente difícil el desarrollo de reciclaje de plástico.

Sin embargo en este estudio sí se concluye que reciclar es la mejor opción de tratamiento que se le puede dar a los plásticos.

Es entonces donde nos preguntamos qué ocurre con los plásticos cuyo protocolo de reciclaje aún no existe. La respuesta depende de nuevo del contexto de la región donde se generan los desechos y se espera que se generen regulaciones que minimicen su impacto ambiental.

Aunque existen diversas opciones para tratar los plásticos, existen muchos factores que desaceleran su desaparición en el medio ambiente: mala gestión de residuos, falla en la recolección, desinformación acerca de la separación en la sociedad y falta de conciencia ambiental. A continuación, se presenta la Figura 8.2 en la que se señala el destino de los plásticos considerados residuos a escala mundial y las predicciones que pueden hacerse basándose en nuestros hábitos de consumo y tratamiento para los siguientes años (Geyer *et al.*, 2017).

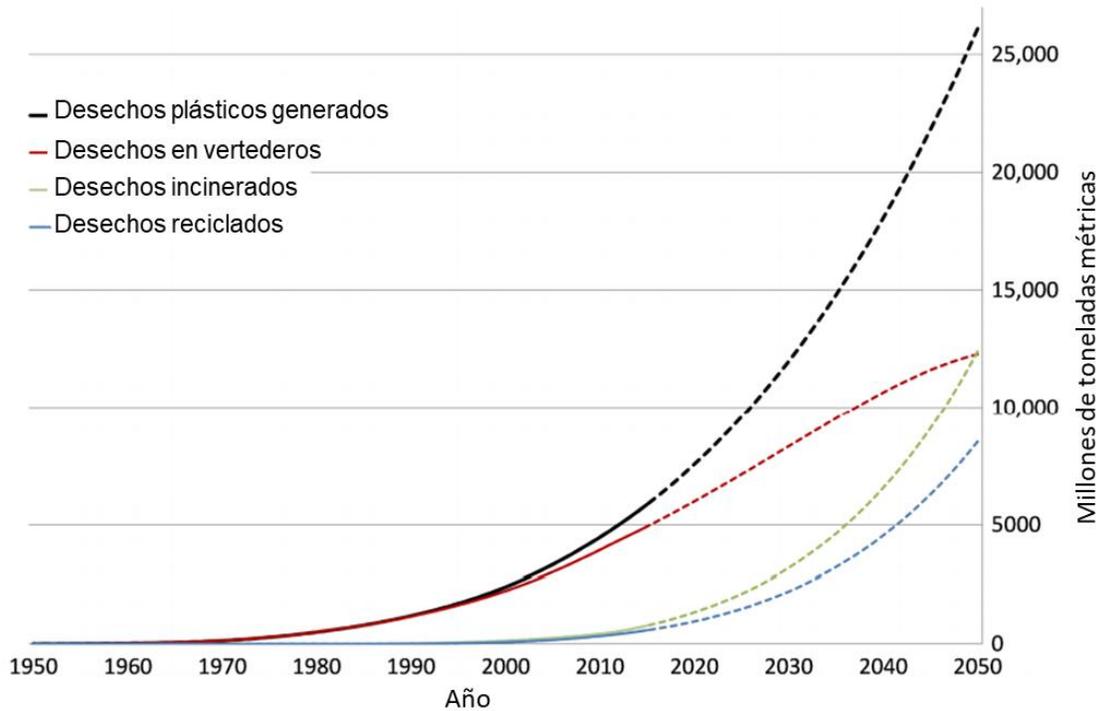


Figura 8.2: Desechos plásticos acumulados y eliminados en millones de toneladas en el mundo. Las líneas sólidas indican los datos históricos reales desde 1950 hasta el 2015, las líneas punteadas muestran proyecciones según las tendencias históricas hasta el 2050.

Fuente: Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science*.

## 8.2 ¿QUÉ ACCIONES Y OPCIONES NOS QUEDAN POR EXPLORAR?

Como humanidad estamos en el momento exacto en el que la sociedad puede colaborar pues es el mercado de un producto. Es absolutamente crucial que las personas se cuestionen acerca del origen de los productos que compran y sus hábitos de consumo. Muy probablemente hay varias opciones que reemplazan los productos hechos de plásticos no reciclables y que sí pueden ser procesados con menor impacto ambiental y son justo esos los que deberíamos consumir, para evitar que continúen produciéndose plásticos cuya degradación no entendemos aún.

No basta con comprar un producto “biodegradable, compostable o reciclable” si no nos aseguramos de que realmente sea tratado como debe para tener mínimo impacto ambiental.

Ha habido casos de cubiertos “biodegradables” que únicamente se degradan a condiciones específicas de laboratorio que son absolutamente imposibles en los basureros en donde realmente terminan esos productos.

La solución está en cambiar lo “reciclable” por lo “reciclado” y en caso de adquirir productos “compostables” realmente analizar si son desechables y es posible llevar a cabo dicho compostaje. Hacernos cargo de lo que consideramos desechos y entender que la basura no existe es el primer paso para cambiar nuestra actitud ante el gran problema de contaminación por plástico.

El primer paso para acabar con la contaminación es dejar de generarla.

Opciones como biodegradar el plástico por medio de bacterias, hongos o sus enzimas se han puesto sobre la mesa, pero lamentablemente muchas de las investigaciones que están siendo desarrolladas, están en etapas muy tempranas y no es posible predecir si su impacto ambiental será positivo en comparación a las otras opciones de tratamiento hasta dentro de unos años. Sin embargo es un hecho destacable que México cuente con investigaciones enfocadas en esta materia, pues está contribuyendo a combatir el problema de la contaminación por plástico.

Entender profundamente el mecanismo por medio del cual se degrada el plástico es tan importante como enfocarse en escalar el proceso. El mundo está inundado en plástico y se produce más a diario. Es necesario que academia, industria y gobierno reaccionen en consecuencia y se generen políticas públicas que impulsen a los investigadores a las personas clave de la industria a trabajar en conjunto para contrarrestar el daño generado al planeta.

La basura no existe, es sólo la materia prima del siguiente proceso productivo.

## CONCLUSIONES

Mediante el presente trabajo se expusieron los métodos actuales de tratamiento, eliminación y revalorización de los desechos plásticos, que son la incineración y la acumulación en rellenos sanitarios. Por otra parte, se presentaron alternativas de nuevos tratamientos no convencionales que podrían tener menor impacto ecológico, como el reciclaje y la biodegradación.

Se expuso la magnitud del problema de contaminación por plástico a nivel mundial, pues de las 350 millones de toneladas de plástico que se producen en el mundo, el 85% se convierte en desecho anualmente. Tomando en cuenta que desde su invención, se han producido 7.8 billones de toneladas de plástico, se puede afirmar que existe más de una tonelada de plástico por cada ser humano vivo en la actualidad.

Se determinó que es factible reemplazar opciones de revalorización como rellenos sanitarios con incineradores o plantas de reciclaje, siempre y cuando exista una correcta gestión, separación y tratamiento de los desechos, lo cual, permitiría generar mayor ganancia energética y económica, a pesar del mayor costo de inversión inicial en infraestructura.

Se exploró la normativa existente en México para los métodos de incineración, relleno sanitario y reciclaje, aunque lamentablemente no existen plantas de incineración de desechos en el país que cumplan con lo establecido; en el tema de reciclaje México se encuentra rezagado en comparación a otros países con normas recién generadas a pesar de contar con la planta de reciclaje de PET más grande en Latinoamérica, mientras los rellenos sanitarios siguen siendo la opción número uno como método de disposición final de los desechos, propagándose a través del territorio nacional sin estrategia de planificación.

Se identificaron grupos de investigación nacionales e internacionales enfocados en disminuir la contaminación por plástico o revalorizar los desechos por medio de hongos, bacterias o sus enzimas, capaces de biodegradar distintos tipos de polímeros (PE - polietileno, PU - poliuretano, PET - polietileno tereftalato, DEHP - diftalato y celulosa.), dando una opción innovadora para el tratamiento de los desechos. Aunque no fue posible determinar si estas investigaciones son económicamente rentables o generarán menor impacto ecológico a largo plazo, pues apenas se investiga el mecanismo a nivel biológico y no su escalamiento o plan de negocios viable.

Los grupos de investigación relacionados con esta área tienen un amplio campo de acción en el sector industrial del reciclaje plástico, así como enfoque en operar de manera alineada a la economía circular dentro de las empresas del futuro.

Se presentó el panorama de las tendencias de revalorización de desechos de plástico por medio del reciclaje y biodegradación, exponiendo alternativas a los métodos convencionales de incineración y almacenamiento.

## REFERENCIAS

1. Academia Mexicana de las Ciencias AMC. (2008). *Reconoce la AMC al líder del proyecto que estudia catalizadores para acelerar la degradación de contaminantes en acuíferos*. Recuperado el 23 de septiembre de 2018, de <http://www.comunicacion.amc.edu.mx/comunicados/reconoce-la-amc-al-lider-del-proyecto-que-estudia-catalizadores-para-acelerar-la-degradacion-de-contaminantes-en-acuiferos>
2. Ahuactzin-Pérez, M., Tlecuitl-Beristaine, S., García-Dávila, J., González-Pérez, M., Gutiérrez-Ruiz, M. C., & Sánchez, C. (2016). Degradation of di(2-ethyl hexyl) phthalate by *Fusarium culmorum*: Kinetics, enzymatic activities and biodegradation pathway based on quantum chemical modeling pathway based on quantum chemical modeling. *Science of the Total Environment*, 556–567, 1186–1193.
3. Arciniega, I. Y. (2008). Aislamiento de microorganismos degradadores de tereftalato polietileno (PET) en medio ambiente combinado. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, México.
4. Arvizu-Fernández, J. (2010). La basura como recurso energético, situación actual y prospectiva en México. *Ingeniería Civil*. Recuperado el 27 de enero de 2020 de <https://www.ineel.mx/boletin012011/inves.pdf>
5. Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C. ANIPAC (2018). *Información de plásticos*. México. Recuperado el 1 de septiembre de 2018, de <https://anipac.com/informacion-de-plasticos/>
6. Asakura, H., Matsuto, T., & Tanaka, N. (2004). Behavior of endocrine-disrupting chemicals in leachate from MSW landfill sites in Japan. *Waste Management*, 24(6), 613-622.
7. Ayala, M., Pickard, M. A., & Vazquez-Duhalt, R. (2008). Fungal Enzymes for Environmental Purposes, a Molecular Biology Challenge. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, 15, 172–180.
8. BBC News. (2017, 8 de junio). Poolbeg incinerator workers hospitalised after incident [en línea]. BBC News. Recuperado el 12 de septiembre de 2018, de <https://www.bbc.com/news/world-europe-40199683>

9. Beltrán-Rico, M. & Marcilla-Gomis, A. (2012). Cap. Tecnología de polímeros. En *Estructura de polímeros* (pp. 17-32). Universidad de Alicante, España.
10. Benjamin, S., Pradeep, S., Josh, M. K. S., Kumar, S., & Masai, E. (2015). A monograph on the re-mediation of hazardous phthalates. *Journal of Hazardous Materials*, 298, 58–72.
11. Bermúdez-García, E., Peña-Montes, C., Castro-Rodríguez, J. A., González-Canto, A., Navarro-Ocaña, A., & Farrés, A. (2017). ANCUT2, a Thermo-alkaline Cutinase from *Aspergillus nidulans* and Its Potential Applications. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 182, 3, 1014–1036.
12. Bernardo, C., Simões, C., & Pinto, L. (2016). Environmental and economic life cycle analysis of plastic waste management options. A review [en línea]. *AIP Conference Proceedings*, 1779, 140001. Recuperado el 30 de enero de 2020, de <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4965581>.
13. Bessire, M., Chassot, C., Jacquat, A. C., Humphry, M., Borel, S., MacDonald-Comber Petétot, J., Métraux, J. P., & Nawrath, C. (2007). A permeable cuticle in *Arabidopsis* leads to a strong resistance to *Botrytis cinerea*. *EMBO Journal*, 26, 8, 2158–2168.
14. Blight, G. (2014, 6 de octubre). The world's biggest and most dangerous dump sites [en línea]. The Guardian. Recuperado el 15 de septiembre de 2018, de <https://www.theguardian.com/global-development/ng-interactive/2014/oct/06/world-biggest-most-dangerous-dump-sites-interactive>
15. Booma, M., Selke, S.E., & Giacin, J.R. (1994). Degradable Plastics. *Journal of Elastomers & Plastics*, 26, 2, 104-142.
16. Cacho, Y. (2016, 3 de marzo). Innovadora tecnología biológica para tratar pañales desechables. *Ciencia MX*. Recuperado el 27 de septiembre de 2018, de <http://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/biotecnologia/5587-planta-de-tratamiento-de-panales-desechables-nota>
17. Cartwright, C.D., Owen, S. A., Thompson, I. P., & Burns, R. G. (2000) Biodegradation of diethyl phthalate in soil by a novel pathway. *FEMS Microbiology Letters*, 186, 27–34.

18. Chen, S., Su, L., Chen, J., & Wu, J. (2013). Cutinase: Characteristics, preparation, and application. *Biotechnology Advances*, 31, 1754–1767.
19. Cheremisinoff, N. & Rosenfeld, Paul. (2010). Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production. Best Practices in the Wood and Paper Industries (pp.83-134) Estados Unidos de América. Elsevier
20. CNN en Español. (2013, 11 de junio). China, el basurero electrónico del mundo [en línea]. CNN en Español. Recuperado el 11 de septiembre de 2018, de <https://cnnespanol.cnn.com/2013/06/11/china-el-basurero-electronico-del-mundo/>
21. Darby, R.T., & Kaplan, A. M. (1968). Fungal susceptibility of polyurethanes. *Applied Microbiology*, 16, 900-905.
22. Degrémont S.A. (2011). Procesos térmicos de destrucción de materia orgánica. Manual Técnico del Agua Degrémont. Recuperado el 20 de enero de 2020, de <http://www.degremont.es/es/images/pdf/ft-manual%20tecnico%20degremont-n3-thermylis.pdf>
23. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) (2011). *Plantas de incineración de residuos sólidos urbanos. Revisión de costos y emisiones a la atmósfera, con una aproximación a los rellenos sanitarios. Recuperado el 10 de enero de 2020*, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279569/Costos\\_y\\_emisiones\\_plantas\\_de\\_incineracion.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279569/Costos_y_emisiones_plantas_de_incineracion.pdf)
24. Di Serio, M., Tesser, R., Ferrara, A. & Santacesaria, A. (2004) Heterogeneous basic catalysts for the transesterification and the polycondensation reactions in PET production from DMT. *Journal of Molecular Catalysis*, 212, 251–257.
25. Diario Oficial de la Federación México DOF. (2015). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Recuperado el 24 de enero de 2020, de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/148.pdf>
26. Diario Oficial de la Federación México DOF. (2003). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgpgir/LGPGIR\\_orig\\_08oct03.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgpgir/LGPGIR_orig_08oct03.pdf)
27. Diario Oficial de la Federación México DOF. (2014). *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera*. Recuperado el 24 de enero de 2020,

- [https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1157/1/reglamento\\_de\\_la\\_lgeepa\\_en\\_materia\\_de\\_preencion\\_y\\_control\\_de\\_la\\_contaminacion\\_de\\_la\\_atmosfera.pdf](https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1157/1/reglamento_de_la_lgeepa_en_materia_de_preencion_y_control_de_la_contaminacion_de_la_atmosfera.pdf)
28. Dirección General de Comunicación Social DGCS. (2012, 11 de agosto). Prueban enzimas para degradar plásticos y retirar azufre al petróleo. Boletín DGCS. Recuperado el 26 de septiembre de 2018, de [http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2012\\_492.html](http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2012_492.html)
29. El Clarín. (2018, 23 de enero). Cierran el basurero más grande de Latinoamérica, en el que viven 40.000 personas [en línea]. El Clarín. Recuperado el 19 de septiembre de 2018, de [https://www.clarin.com/mundo/cierran-basurero-grande-latinoamerica-viven-40-000-personas\\_0\\_S1PpDhESz.html](https://www.clarin.com/mundo/cierran-basurero-grande-latinoamerica-viven-40-000-personas_0_S1PpDhESz.html)
30. El Comercio. (2018, 9 de diciembre). Los haitianos que se ganan la vida en un infernal vertedero de basura [en línea]. El Comercio. Recuperado el 19 de septiembre de 2018, de <https://elcomercio.pe/mundo/actualidad/haitianos-ganan-vida-hurgando-basura-fotos-noticia-556770-en-aprietos/115-kara-kara>
31. El Economista. (2018, 21 de junio). En 2020 comenzara a operar planta de termovalorización [En línea]. El Economista. Recuperado el 27 de enero de 2020, de <https://www.economista.com.mx/estados/En-2020-comenzara-a-operar-planta-de-termovalorizacion-20180622-0020.html>
32. Espinosa-Valdemar, R. M., Turpin-Marion, S., Delfín-Alcalá, I., & Vázquez-Morillas, A. (2001). Disposable diapers biodegradation by the fungus *Pleurotus ostreatus*. *Waste Management*, 31, 8, 1683–1688.
33. European Commission EC (2016). *The waste Incineration Directive*. Recuperado el 5 de septiembre de 2018, de <http://ec.europa.eu/environment/archives/air/stationary/wid/legislation.htm>
34. European Commission EC. (2016). *Environment Waste*. Recuperado el 14 de septiembre de 2018, de [http://ec.europa.eu/environment/waste/landfill\\_index.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/landfill_index.htm)
35. Excelsior. (2018, 10 de mayo). Planta de termovalorización no va: Sheinbaum [En línea]. Excelsior. Recuperado el 27 de enero de 2020, de <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/planta-de-termovalorizacion-no-va-sheinbaum/1238187>

36. Farzi, A., Dehnad, A., & Fotouhi, A.F. (2019). Biodegradation of polyethylene terephthalate waste using *Streptomyces* species and kinetic modeling of the process. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 25–31.
37. Fernandes, B., Maria, F., Nakao, L., Ingberman, M. & Cubas, R. (2018) Determination of Di(2-ethylhexyl phthalate) released in the blood from PVC line during the hemodialysis procedure. *Materia*. 23, 01.
38. Filiatreau, J., & Hornblower, M. (1979, 4 de febrero). Kentucky Hunts Cleanup Funds for Valley of the Drums [en línea]. *The Washington post*. Recuperado el 8 de septiembre de 2018, de [https://www.washingtonpost.com/archive/politics/1979/02/04/kentucky-hunts-cleanup-funds-for-valley-of-the-drums/ea2fabcc-ccb4-4d1c-8c85-b9d3b58fe7d4/?noredirect=on&utm\\_term=.8fab29901a50](https://www.washingtonpost.com/archive/politics/1979/02/04/kentucky-hunts-cleanup-funds-for-valley-of-the-drums/ea2fabcc-ccb4-4d1c-8c85-b9d3b58fe7d4/?noredirect=on&utm_term=.8fab29901a50)
39. GAIA Consultoría de Gestión Ambiental Integrada (2015). *5 reasons why Europe's garbage burning is a big problem*. Recuperado el 7 de septiembre de 2018, de <http://www.no-burn.org/europewasteburning/>
40. GAIA Consultoría de Gestión Ambiental Integrada (2017). *Análisis de Tecnologías de Riesgo. Gasificación y pirólisis de residuos: Procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos*. Recuperado el 4 de septiembre de 2018, de <http://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificaci%C3%B3n-y-pir%C3%B3lisis-2017-ESP-1.pdf>
41. Gewert, B., Plassmanna, M. M., & MacLeod, M., (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 17, 1513-1521.
42. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3, (7), e1700782.
43. Government of Ontario. (2018). *Landfill Standards: A guideline on the regulatory and approval requirements for new or expanding land*. Canadá. Recuperado el 12 de septiembre de 2018, de <https://www.ontario.ca/page/landfill-standards-guideline-regulatory-and-approval-requirements-newexpanding-land>

44. Huo, X., Peng, L., Xu, X., Zheng, L., Qiu, B., Qi, Z., Zhang, B., Han, D., & Piao, Z. (2007). Elevated blood lead levels of children in Guiyu, an electronic waste recycling town in China. *Environmental health perspectives*, 115(7), 1113–1117.
45. INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). *Análisis de estadísticas del INEGI sobre residuos sólidos urbanos* [en línea]. Recuperado el 27 de enero del 2020, de <https://www.inegi.org.mx/rde/2015/01/09/analisis-de-estadisticas-del-inegi-sobre-residuos-solidos-urbanos/>
46. INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2013* [en línea]. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2013/>
47. Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347, 768–771.
48. Jordá, J., Jouhten, J., Cámara, E., Maaheimo, H., Albiol, J., & Ferrer, P. (2012). Metabolic flux profiling of recombinant protein secreting *Pichia pastoris* growing on glucose: methanol mixtures. *Microbial Cell Factories*, 11, 57.
49. Kay, M. J., Morton, L. H. G., & Prince, E. L. (1991). Bacterial degradation of polyester polyurethane. *International Biodeterioration*, 27, 2, 205–222.
50. Kim, Y. H., Ahn, J. Y., Moon, S. H., & Lee, J. (2005). Biodegradation and detoxification of organophosphate insecticide, malathion by *Fusarium oxysporum*. *Chemosphere*, 60, 10, 1349–1355.
51. Koutny, M., Lemaire, J., & Delort, A. M. (2006). Biodegradation of polyethylene films with pro-oxidant additives. *Chemosphere*, 64, 1243–1252.
52. Koutny, M., Sancelme, M., Dabin, C., Pichon, N., Delort, A. M., & Lemaire, J. (2005). Acquired biodegradability of polyethylenes containing pro-oxidant additives. *Polymer Degradation and Stability*, 91, 1495–1503.
53. Lars-Bevanger, L. (2015, 23 de noviembre). First-world problem? Norway and Sweden battle over who gets to burn waste [en línea]. Periódico digital DW. Recuperado el 7 de septiembre de 2018, de <https://www.dw.com/en/first-world-problem-norway-and-sweden-battle-over-who-gets-to-burn-waste/a-18772064>

54. Loftus, N. J., Laird, W. J. D., Steel, G. T., Wilks, M. F., & Woollen, B. H. (1993). Metabolism and pharmacokinetics of deuterium-labeled di-2- (ethylhexyl) adipate (DEHA) in humans. *Food and Chemical Toxicology*, 31, 609–614.
55. López-Camacho, S. (2018). Planta de incineración de residuos sólidos urbanos a partir de una tecnología de parrilla. Tesis de maestría. Universidad de Sevilla, España.
56. Mayer, A. M., & Staples, R. C. (2002). Laccase: new functions for an old enzyme. *Phytochemistry*, 60, 551–565.
57. Ministry of Environment of South Korea. (2007). *Sudokwon Landfill Site Management*. Corea del Sur. Recuperado el 13 de septiembre de 2018, de <http://eng.me.go.kr/eng/web/index.do?menuId=54>
58. Morales-García, S. L. (2018). Degradación de polietileno tereftalato (PET) con las cutinasas recombinantes ANCUT1 y ANCUT2 de *Aspergillus nidulans*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
59. MSCR Ministerio de Salud de Costa Rica. (1997). Disposición correcta de la basura: El relleno sanitario [en línea]. Recuperado el 28 de enero de 2020, de <https://www.binasss.sa.cr/poblacion/rellenosanitario.htm>
60. Müller, R. J., Kleeberg, I., & Deckwer W. D. (2001). Biodegradation of polyesters containing aromatic constituents. *Journal of Biotechnology*, 86, 2, 87-95.
61. Nakajima-Kambe, T., Onuma, F., Kimpara, N., & Nakahara, T. (1995) Isolation and characterization of a bacterium which utilizes polyester polyurethane as a sole carbon and nitrogen source. *FEMS Microbiology Letters*, 129, 39-42.
62. Nakajima-Kambe, T., Shigeno-Akutsu, Y., Nomura, N., Onuma, F., & Nakahara, T. (1999). Microbial degradation of polyurethane, polyester polyurethanes and polyether polyurethanes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 51, 134-140.
63. Nalli, S., Cooper, D. G., & Nicell, J. A. (2002) Biodegradation of plasticizers by *Rhodococcus rhodochrous*. *Biodegradation*, 13, 5, 343–352.
64. Notimex (2019, 5 de abril). CDMX construirá planta para separar basura en Vallejo [en línea]. Milenio. Recuperado el 10 de abril de 2018, de <https://www.milenio.com/politica/comunidad/vallejo-cdmx-construira-planta-separar-basura>

65. Ocegüera-Cervantes, A., Carrillo-García, A., López, N., Bolaños-Nuñez, S., Cruz-Gómez, M. J., Wacher, C., & Loza-Tavera, H. (2007). Characterization of the Polyurethanolytic Activity of Two *Alicyclophilus* sp. Strains Able To Degrade Polyurethane and N-Methylpyrrolidone. *Applied and Environmental Microbiology*, 73, 19, 6214–6223.
66. Ortega, M. (2016, 12 de enero). PetStar, la estrella del reciclaje de PET [en línea]. Plastics Technology Mexico. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <https://www.pt-mexico.com/columnas/petstar-la-estrella-del-reciclaje-de-pet>
67. PetStar® Company. (2019). *Recorrido virtual*. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <http://www.petstar.mx/>
68. Pielichowski, K., & Njuguna, J. (2005). Thermal degradation of polymeric materials. Rapra Technology. Recuperado el 25 de septiembre de 2018, de <https://es.scribd.com/doc/92634859/Thermal-Degradation-of-Polymeric-Materials>
69. Plastics Europe (2018). *How plastics are made?* Unión Europea. Recuperado el 11 de octubre de 2018, de <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics/how-plastics-are-made>
70. Plastics Europe (2018). *What are plastics?* Unión Europea. Recuperado el 11 de octubre de 2018, de <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics>
71. Pollution Solution. (2015). *What is Plastic Photodegradation?*. Pollution Solutions. Recuperado el 24 de septiembre de 2018, de <https://www.pollutionsolutions-online.com/news/waste-management/21/breaking-news/what-is-plastic-photodegradation/35801>
72. Procuraduría Federal del Consumidor PROFECO. (2011). Comparativo de pañales. Recuperado el 27 de septiembre de 2018, de <https://www.gob.mx/profeco/documentos/comparativo-de-panales>
73. Real Academia Española (2001). *Diccionario de la lengua española* (22a ed.). Recuperado el 10 de octubre de 2018, de <http://www.rae.es/rae.html>
74. Real Academia Española (2001). *Diccionario de la lengua española* (22a ed.). Recuperado el 12 de septiembre de 2018, de <http://www.rae.es/rae.html>

75. Recimex® Company. (2019). *Introducción al reciclaje de plásticos*. Recuperado el 22 de septiembre de 2018, de <http://www.recimex.com.mx>
76. Ritchie, H. & Roser, M. (2020). Plastic Pollution [en línea]. Publicado en: [ourworldindata.org](http://ourworldindata.org). Recuperado el 9 de enero de 2020 de: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
77. Sarmiento-Torres, R. (2000). Incineración de residuos urbanos y generación de electricidad [en línea]. *Revista Energía a Debate*. Recuperado el 10 de enero de 2020, de <https://www.potencianatural.com.mx/energia/Articulos/enero2008/Sarmientoene2008.htm>
78. SECOFI Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1976). NMX-AA-035-1976 Determinación de Bióxido de Carbono, Monóxido de Carbono y Oxígeno en los gases de combustión. Recuperado el 24 de enero de 2020, de <http://www.inesa.com.mx/NORMAS/NORMAS%20EMISIONES/nmx-aa-035-1976.pdf>
79. SEDEMA Secretaría del Medio Ambiente. (2013). *Norma Ambiental NADF-024-AMBT 2013 sobre Separación, Clasificación, Recolección Selectiva y Almacenamiento de los Residuos del Distrito Federal*. Recuperado el 22 de septiembre de 2018, de <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/images/infografias/NADF-024-AMBT-2013.pdf>
80. SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Acciones y Programas: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Clasificación, reciclaje y valoración de los RSU*. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/clasificacion-reciclaje-y-valoracion-de-los-rsu>
81. SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). Informe del medio ambiente [en línea]. Recuperado el 21 de septiembre de 2018, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>
82. SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). Norma Oficial Mexicana, NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño y construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos

- urbanos y de manejo especial. Recuperada el 28 de enero de 2020, de <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1306/1/nom-083-semarnat-2003.pdf>
83. SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana, NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. Recuperada el 24 de enero de 2020, de <http://cdam.unsis.edu.mx/files/Gestion%20ambiental/Otras%20disposiciones/NOM-098-SEMARNAT-2002.pdf>
84. SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Residuos sólidos urbanos [en línea]. Recuperado el 28 de enero de 2020, de [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_resumen14/07\\_residuos/7\\_1\\_2.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_2.html)
85. SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). Visión nacional hacia una gestión sustentable [en línea]. Recuperado el 28 de enero de 2020, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/435917/Vision\\_Nacional\\_Cero\\_Residuos\\_6\\_FEB\\_2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/435917/Vision_Nacional_Cero_Residuos_6_FEB_2019.pdf)
86. Seoul Metropolitan Government. (2015). *Seoul solution: Landfill Recovery Project. Transformation of Landfill to Ecological Park*. Corea del Sur. Recuperado el 14 de septiembre de 2018, de <https://seoulsolution.kr/en/content/landfill-recovery-project-transformation-landfill-ecological-park>
87. Sivan, A. (2011). New perspectives in plastic biodegradation. *Current Opinion in Biotechnology*, 22, 3, 422-426.
88. Somos Sur. (2009). K'ara K'ara [en línea]. Somos Sur. Recuperado el 18 de septiembre de 2018, de <https://www.somossur.net/index.php/economia/cochabamba>
89. The Coca-Cola® Company (2012). PlantBottle Basics. Recuperado el 22 de septiembre de 2018, de <https://www.coca-colacompany.com/stories/plant-bottle-basics>
90. The New York Times. (1988, 27 de noviembre). After 2 Years, Ship Dumps Toxic Ash [en línea]. The New York Times. Recuperado el 9 de septiembre de 2018, de <https://www.nytimes.com/1988/11/28/us/after-2-years-ship-dumps-toxic-ash.html>
91. The Organization for Economic Co-operation and Development OECD. (2016). *Environment Dataset: Municipal Waste, Generation and Treatment*. Recuperado el

20 de septiembre de 2018, de  
<https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=MUNW>

92. Thomas, S., & Visakh, P. M. (2011). *Handbook of Engineering and Speciality Thermoplastics: Polyethers and Polyesters*. Estados Unidos de América: John Wiley & Sons Inc. Recuperado el 26 de septiembre de 2018, de [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=crsa4udZf\\_MC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Handbook+of+Engineering+and+Speciality+Thermoplastics:+Polyethers+and+Polyesters+&ots=LUsx\\_c\\_Vfc&sig=6Yb-P4yJ2TjHuKtDDnIx06dTycc#v=onepage&q=Handbook%20of%20Engineering%20and%20Speciality%20Thermoplastics%3A%20Polyethers%20and%20Polyesters&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=crsa4udZf_MC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Handbook+of+Engineering+and+Speciality+Thermoplastics:+Polyethers+and+Polyesters+&ots=LUsx_c_Vfc&sig=6Yb-P4yJ2TjHuKtDDnIx06dTycc#v=onepage&q=Handbook%20of%20Engineering%20and%20Speciality%20Thermoplastics%3A%20Polyethers%20and%20Polyesters&f=false)
93. UNEP United Nations Environment Programme (2015). *Global Waste Management Outlook*. Recuperado el 3 de septiembre de 2018, de <https://www.uncclearn.org/sites/default/files/inventory/unep23092015.pdf>
94. UN-habitat United Nations Habitat. (2011). *UN-Habitat Annual Report 2010*. Recuperado el 22 de septiembre de 2018, de <https://unhabitat.org/un-habitat-annual-report-2010/>
95. UNU United Nations University. (2013). *UNU Releases China E-Waste Study*. Recuperado el 10 de septiembre de 2018, de <https://unu.edu/news/news/unu-releases-china-e-waste-study.html>
96. United States Environmental Protection Agency EPA Press release. (1981, 18 de septiembre). *EPA Schedules Emergency Cleanup at Valley of the Drums* [en línea]. EPA Press Release. Recuperado el 14 de septiembre de 2018, de <https://archive.epa.gov/epa/aboutepa/epa-schedules-emergency-cleanup-valley-drums.html>
97. United States Environmental Protection Agency EPA. (2017). *Basic Information about Landfills*. Estados Unidos Recuperado el 13 de septiembre de 2018, de <https://www.epa.gov/landfills/basic-information-about-landfills>
98. USGS United States Geological Survey (2017). *Cement Statistics and Information*. Recuperado el 3 de septiembre de 2018, de <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/>

99. Valdéz, I. (2018, 9 de julio). Disminuye en CDMX envío de basura a rellenos sanitarios [en línea]. Milenio. Recuperado el 22 de septiembre de 2018, de <https://www.milenio.com/politica/comunidad/disminuye-cdmx-envio-basura-rellenos-sanitarios>
100. Venkatachalam, S., Nayak, S. G., Labde, J. V., Gharal, P. R., Rao, K., & Kelkar A. K. (2012). Degradation and Recyclability of Poly (Ethylene Terephthalate). *Polyester InTech*. DOI: 10.5772/48612.
101. Wagner, M., Scherer, C., Alvarez-Muñoz, D., Brennholt, N., Bourrain, X., Buchinger, S., Fries E., Grosbois, C., Klasmeier, J., Marti, T., Rodriguez-Mozaz, S., Urbatzka, R., Vethaak, A. D., Winther-Nielsen, M., & Geifferscheid, G. (2014). Microplastics in freshwater ecosystems: What we know and what we need to know. *Environmental Sciences Europe*, 1(26), 12.
102. Webb, H.K., Arnott, J., Crawford, R.J., & Ivanova, E.P. (2012). Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly(ethylene terephthalate). *Polymers*, 5, 1-18.
103. World Business Council for Sustainable Development WBCSD. (2005). *Eco-efficiency Learning Module*. Recuperado el 20 de septiembre de 2018, de <https://docs.wbcsd.org/2006/08/EfficiencyLearningModule.pdf>
104. WSA World Steel Association (2006). *Steel Statistical Yearbooks 1978 to 2016*. Recuperado el 3 de septiembre de 2018, de [www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook-.html](http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook-.html)
105. Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351, 6278, 1196-1199.

"EL SECRETO DEL GENIO  
ES LLEVAR EL ESPÍRITU DE UN NIÑO  
DURANTE TODA LA VIDA,  
LO QUE SIGNIFICA  
NUNCA PERDER EL ENTUSIASMO."

- ALDOUS HUXLEY