PANORAMA GENERAL DE LAS TECNOLOGÍAS DE EL RECICLAJE DE PLÁSTICOS EN MÉXICO Y EN EL MUNDO

DICIEMBRE 2020



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

INECC
INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO

DIRECTORIO

Dra. María Amparo Martínez Arroyo
Directora General del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Dr. Luis Gerardo Ruiz Suárez
Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental

Dr. Arturo Gavilán García
Director de Investigación sobre Contaminación, Sustancias, Residuos Bioseguridad

COORDINACIÓN, INTEGRACIÓN Y REVISIÓN

Dra. Ania Mendoza Cantú
Subdirectora de Investigación sobre Sustancias y Residuos

I.Q. Tania Ramírez Muñoz
Jefa de Departamento de Estudios de Residuos

COLABORADORES

David Fernando Huera Colosia
Jesús Barragán Arredondo
María Alejandra Sánchez Cabañas
Noemí Torres Luna
Ruth García Bravo

CONTENIDO

Índice de Figuras..... iv
Índice de Tablas..... v
Abreviaturas, acrónimos y siglas..... vi
Resumen..... 1
1. Introducción..... 2
2. Antecedentes..... 6
2.1. Problemática internacional de los residuos plásticos y medidas que se han instrumentado..... 6
2.1.1. Origen del problema de los residuos plásticos..... 6
2.1.2. Microplásticos y sus efectos..... 8
2.1.3. Movimientos transfronterizos de residuos plásticos..... 10
2.2. Problemática nacional de los residuos plásticos y medidas que se han instrumentado..... 11
3. Marco teórico..... 27
3.1. Características de los plásticos..... 27
3.2. Tipos de plásticos y su clasificación..... 29
3.3. Fabricación de los plásticos..... 31
3.4. Etapas de la gestión de los residuos plásticos..... 34
3.4.1. Planeación de la gestión de los residuos plásticos..... 34
3.4.2. Generación..... 36
3.4.3. Separación..... 37
3.4.4. Recolección y acopio..... 39
3.4.5. Clasificación..... 41
3.4.6. Reciclaje..... 42
3.4.7. Disposición final..... 42
3.5. Tipos y etapas de los procesos de reciclaje..... 44
3.5.1. Tipos de procesos de reciclaje..... 44
3.5.2. Etapas del reciclaje..... 48
3.5.3. Ejemplos de procesos de reciclaje de residuos plásticos..... 50
3.6. Dificultades para el reciclaje de los residuos plásticos..... 52
3.6.1. Dificultades técnicas..... 52
3.6.2. Dificultades políticas, económicas y sociales..... 55
4. Tecnologías de reciclaje de plásticos existentes en el

mundo..... 56
4.1. En el diseño y la composición de los plásticos..... 56
4.2. Para la recolección y acopio..... 60
4.3. Para la compactación..... 63
4.4. Para la clasificación..... 64
4.5. Para el reciclaje..... 69
4.5.1. Para el reciclaje mecánico..... 69
4.5.2. Para el reciclaje químico..... 72
5. Casos de estudio: tecnologías de reciclaje de residuos plásticos aplicadas en México..... 81
5.1. Reciclaje de PET..... 81
5.2. Reciclaje de unicel..... 83
5.3. Tecnologías para la producción de bioplásticos..... 87
6. Conclusiones..... 95
7. Recomendaciones..... 97
8. Referencias..... 98

8.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ubicación de las cinco islas gigantes de residuos plásticos en los océanos del mundo	4
Figura 2.	Cantidad de polímeros producidos en México	13
Figura 3.	Diagrama de la destilación fraccionada del petróleo	15
Figura 4.	Distribución porcentual de derivados por barril de petróleo	15
Figura 5.	Inundación por residuos en la Ciudad de México	16
Figura 6.	Playa contaminada con residuos plásticos	17
Figura 7.	Estructura de un polímero y tipos de polímeros	27
Figura 8.	Estructura de los polímeros	29
Figura 9.	Código de Identificación de los plásticos	31
Figura 10.	Etapas de la gestión de los residuos plásticos en México	35
Figura 11.	Categorías en las cuales se deben separar los residuos, de acuerdo con la norma ambiental NADF-024-AMBT	39
Figura 12.	Relleno Sanitario de Aguascalientes	43
Figura 13.	Reciclaje primario o re-extrusión y sus etapas	44
Figura 14.	Reciclaje secundario o mecánico	45
Figura 15.	Etapa de pretratamiento del proceso de producción de combustible sólido a gran escala	46
Figura 16.	Etapa de pelletizado del proceso de producción de combustible sólidos a gran escala	46
Figura 17.	Producción de combustible líquido	47
Figura 18.	Producción de combustibles gaseoso	47
Figura 19.	Etapas del reciclaje	48
Figura 20.	Esquema de la despolimerización, activada por la luz, de plástico autodestructible	59
Figura 21.	Funcionamiento de un separador balístico	67
Figura 22.	Principales tecnologías para el reciclaje químico de residuos plásticos	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estimación de la cantidad de residuos plásticos generados en 20 países costeros..... 7
Tabla 2. Avances en la regulación estatal en materia de residuos plásticos..... 19
Tabla 3. Principales polímeros derivados del petróleo..... 33
Tabla 4. Resumen de las tecnologías desarrolladas en México para la producción de bioplásticos a partir de residuos orgánicos 88

ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ABS	Acrylonitrile butadiene styrene – Acrilonitrilo butadieno estireno
ACR	Automatic Compacting Receptacles - Receptáculos de compactación automática
ACV	Análisis de ciclo de vida
ADN	Ácido desoxirribonucleico
ANIPAC	Asociación Nacional de Industrias del Plástico
ANIQ	Asociación Nacional de la Industria Química
BPA	Bisphenol A – Bisfenol A
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
ECOCE	Ecología y Compromiso Empresarial
EP	Epoxy resins – Resinas epóxicas
EPS	Expanded Polystyrene – Poliestireno expandido
EVA	Copolímero de etileno acetato de vinilo
HDPE	High density polyethylene – Polietileno de alta densidad
IA	Inteligencia artificial
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
LDPE	Low density polyethylene – Polietileno de baja densidad
LLDPE	Low linear density polyethylene – Polietileno lineal de baja densidad
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LGPGIR	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
LPGIRSEO	Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos del Estado de Oaxaca
MF	Melamine formaldehyde – Formaldehído de melanina
MP	Microplásticos
Mt	Millones de toneladas
NIR	Near infrared - Infrarrojo cercano
NOx	Nitrogen oxides – Óxidos de nitrógeno
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PBT	Polybutylene terephthalate – Tereftalato de polibutileno
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PET	Polyethylene terephthalate - Tereftalato de polietileno
PF	Polifenoles
PLA	Polylactic acid - Ácido poliláctico

PMMA	Polimetilmetacrilato
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
POM	Polyoxymethylene – Polioximetileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PSU	Polisulfona
PUR	Poliuretano
PURF	Polyurethane foam – Espuma de poliuretano
PVC	Polyvinyl chloride - Cloruro de polivinilo
RME	Residuos de manejo especial
RP	Residuos peligrosos
RSU	Residuos sólidos urbanos
SAN	Styrene acrylonitrile – Acrilonitrilo de estireno
SI	Silicón
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SOx	Sulphur oxides – Óxidos de azufre
SPI	Society of the Plastics Industry - Sociedad de la Industria de Plásticos
UP	Unsaturated Polyester – Poliéster insaturado

RESUMEN

De los distintos materiales creados por el hombre, el plástico es, sin duda, uno de los más versátiles. Sus propiedades fisicoquímicas le confieren varias características ampliamente ventajosas para múltiples aplicaciones industriales y comerciales. Por tal motivo, en la actualidad se emplea para fabricar un sinfín de artículos y productos para nuestra vida cotidiana.

No obstante, esas mismas características han propiciado que este material sea hoy una de los problemas ambientales que más preocupación genera. El ser un material altamente resistente y durable, aunuado a su uso indiscriminado, ha contribuido a la contaminación, en particular de los océanos, en los cuales se han formado varias islas gigantes de residuos plásticos. Asimismo, estos residuos están afectando gravemente a la fauna marina que los confunde con su alimento, además de propiciar la incidencia de inundaciones en las zonas urbanas y la alteración estética de los paisajes naturales, además de otros problemas sociales y políticos en el ámbito nacional e internacional.

Ante esta perspectiva, ha surgido una amplo interés en todos los sectores de la sociedad por lograr una manejo adecuado de los residuos plásticos a través de diversas medidas que reduzcan sus impactos ambientales. Es en este contexto entonces que el impulso al reciclaje y a todas las tecnologías que mejoren las diferentes etapas de este proceso ha cobrado gran relevancia. En varios países del mundo se cuenta ya con diferentes equipos y sistemas para lograr su adecuada recolección, sepración, compactación, clasificación y reciclaje por métodos físicos o químicos, a partir de los cuales se obtiene tanto nueva materia prima a partir de los polímeros reciclados, como combustibles alternos a aquellos derivados directamente de la refinación del petróleo.

Si bien en México varias de estas tecnologías ya se están aplicando, aún nos falta incrementar significativamente el reciclaje de los residuos plásticos para que abarque todos los tipos de polímeros y sus diversas aplicaciones. Para ello, no sólo es necesario ampliar las capacidades técnicas y la infraestructura en nuestro país, sino también acompañarlas con otras medidas sociales, políticas y económicas que favorescan su valorizaciñon y reduzcan significativamente su disposición inapropiada. Sin embargo, es necesario reconocer los casos de éxito que hemos alcanzado, en particular en el caso de las botellas desechables, así como el estímulo al desarrollo de los bioplásticos a partir de residuos orgánicos.

1. INTRODUCCIÓN

La palabra plástico deriva del griego “plastikos” que significa “capaz de ser moldeado” (Sysfix, 2011), propiedad por la cual se comenzó la búsqueda y el desarrollo de este material.

Los plásticos son materiales orgánicos que se obtienen mediante reacciones químicas entre diferentes materias primas de origen sintético o natural. Forman parte de una gran familia de moléculas conocida como polímeros, término en latín que significa poli ”muchas” y meros: “partes” (Sysfix, 2011), dado que se trata de cadenas formadas por la unión de muchos elementos pequeños conocidos como monómeros.

Inicialmente la fabricación del plástico se realizaba a partir de polímeros y resinas vegetales, como la celulosa (del algodón), el furfural (de la cáscara de la avena) o los aceites de semillas. La caseína de la leche fue uno de los materiales no vegetales que también se usó con este fin. Estos materiales ya se utilizaban en Egipto, Babilonia, India, Grecia y China (Sysfix, 2011).

Por su parte, las antiguas culturas americanas, como los mayas, obtenían el jugo lechoso y pegajoso de las plantas del caucho para preparar una pasta elástica y correosa (látex) que usaban para sellar vasijas y confeccionar calzado o las bolas que se usaban en el ritual del juego de pelota (Interempresas, 1999).

Siglos más tarde, en 1860, el plástico sintético se originó en los Estados Unidos como resultado de un concurso cuyo propósito era encontrar un sustituto del marfil para fabricar las bolas de billar (Brunet, 2020).

La baquelita, creada en 1907 por Leo Baekeland, fue el primer plástico totalmente sintético de la historia. Con la fabricación de este material se buscaba sustituir el uso de productos naturales y a su vez responder a las necesidades de contar con un producto sencillo y barato de obtener, lo suficientemente duro como para reemplazar a la cerámica y los abrecartas de metal, pero lo suficientemente bello como para emplearse como joya o incluso para reemplazar al preciado marfil (BBC, 2017).

Como se puede ver, los plásticos sintéticos surgen entonces por la necesidad imperante de obtener un material versátil, resistente, durable, además de ser fácil de transportar.

Se logró así obtener un material que se caracteriza por una relación resistencia/densidad alta, unas propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico, y una gran resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes; además de tener larga vida útil.

De esta manera, la evolución del plástico tuvo un sinfín de aplicaciones industriales que fueron posibles gracias a la intervención en distintos ámbitos sociales, económicos y del sector de la salud, por mencionar algunos. Desde su invención, su intervención en nuestra vida ha sido un fenómeno de tal envergadura que este descubrimiento se ha incorporado en casi todas nuestras actividades cotidianas, como lo demuestras las estadísticas mundiales.

Según el informe titulado Plastics the facts 2018, publicado por Plastics Europe, en 2017 la producción mundial de plásticos alcanzó los 348 millones de toneladas y creció 3.8% con respecto a 2016. En este contexto, destacan las siguientes cifras regionales de producción: Asia 50.1% (que incluye a China como el mayor productor con 29.4%), Europa 18.5%, Norteamérica (Canadá, EUA y México) 17.7%, Oriente Medio y África 7.1%, América Latina 4% y la Comunidad de Estados Independientes formados por las exrepúblicas soviéticas con 2.6% (Plastics Europe, 2018).

Si bien en un principio los plásticos parecían la promesa de una utopía futurista, hoy se han convertido en una grave preocupación por los importantes problemas ambientales que están ocasionando (BBC, 2019). Particularmente por el consumo desmedido de productos que al término de su uso se convierten en residuos. Tal es el caso de los fabricantes de bebidas que producen más de 500 mil millones de botellas de plásticos de un solo uso cada año (Greenpeace, 2017).

Son muchas las evidencias empíricas y científicas que actualmente existen respecto a estos graves problemas ambientales que producen los residuos plásticos, como puede apreciarse en los siguientes casos (Azoulay et al., 2019; BBC, 2019; Global Citizen, 2019; Usón, 2019):

- En la cuidad de Davao, en Filipinas, se encontró una ballena con 40 kg de bolsas plásticas en su estómago.
- En nuestros océanos se localizan cinco enormes islas o parches de plástico flotante (Figura 1), las cuales son el resultado de más de seis décadas de vertidos al mar procedentes de tierra firme y del tráfico marítimo.

- La Ciudad de México es un “gran cuerpo con venas atascadas de plástico”. Los más de 22 millones de habitantes que conviven en ella producen diariamente casi 13,000 toneladas de residuos sólidos, de las cuales 123 toneladas son plásticos. El mal manejo de estos residuos y la costumbre de muchas personas de tirarlos en las calles ocasionan que el drenaje se obstruya y se presenten inundaciones en varios puntos de la ciudad.
- En muchas regiones del mundo, los paisajes urbanos y naturales se encuentran salpicados por plásticos y otros tipos de residuos. Cada vez que salimos de casa con frecuencia nos topamos con una botella o una envoltura de plástico tirada.
- Estudios realizados en 2018 por la organización de periodismo Orb Media y la Universidad Estatal de Nueva York hallaron partículas de microplásticos (MP) en muestras de 11 marcas nacionales e internacionales de agua embotellada.



Figura 1. Ubicación de las cinco islas gigantes de residuos plásticos en los océanos del mundo. Fuente: Iberdrola, 2020.

A lo largo de las diferentes etapas de su ciclo de vida; es decir, desde la extracción de sus materias primas hasta su disposición final, los plásticos generan diferentes tipos de sustancias, ya sean emisiones durante su producción, liberaciones de aditivos durante su uso o MP en su desecho,

que pueden producir diversos efectos adversos en la salud humana y de otras especies. Aún hacen falta estudios completos para dimensionar los verdaderos riesgos derivados del uso de este material.

Como hemos visto, el uso indiscriminado del plástico es insostenible y es un claro ejemplo de los impactos de la cultura del usar y tirar. Por ello hay que ir al origen del problema. En primer lugar, se debe reducir la cantidad de plástico que se pone en circulación y apostar por su reutilización, al promover sistemas de producción circulares y de circuito cerrado (Greenpeace, 2020). Además, deben enfocarse los esfuerzos en promover su reciclaje.

El reciclaje es un mecanismo por el cual los materiales de desecho, entre ellos el plástico, vuelven a ser introducidos en un proceso de trasformación para devolverles su utilidad como nuevos materiales. La importancia de reciclar está en su contribución a resolver algunos de los problemas creados por el ser humano, como lograr un aprovechamiento más racional de los recursos naturales no renovables, así como disminuir el consumo de energía y generar menos gases de efecto invernadero. Además, las empresas recicladoras pueden ser fuentes de muchos empleos (Ecovale, 2014).
Como ejemplo del rumbo que se debe seguir para “caminar hacia un uso más responsable del plástico” podemos mencionar el caso de Europa, que ha firmado el Pacto Europeo de los Plásticos, cuyo objetivo es impulsar el uso de plásticos reciclados, reducir el empleo innecesario de este material e impulsar la innovación y su reciclaje (Ecoticias, 2020).

Sin embargo, para seguir el ejemplo europeo, es necesario que en nuestro país se cuente con las tecnologías apropiadas para el reciclaje; es decir, con tecnologías que cumplan con criterios de eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social, como lo establece la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (DOF, 2018).

Por lo anterior, el propósito del presente documento, como su nombre lo indica, es mostrar un panorama general de las tecnologías que actualmente se están aplicando en México y en el mundo para reciclar los diferentes tipos de plásticos, resaltando sus ventajas y limitaciones. Este documento está dirigido al público en general, en particular a los estudiantes, profesionistas, autoridades y las personas interesadas en el manejo integral de residuos y en las medidas para fortalecerlo en nuestro país.

Además de esta introducción, el presente documento está integrado por un capítulo en el que se reseñan los antecedentes de la problemática internacional y nacional de los plásticos y las medidas que se han instrumentado para reducir los impactos que generan sus residuos. Posteriormente, se incluye un marco teórico general con los conceptos y principios sobre las características de los plásticos; su clasificación, fabricación y etapas de gestión, incluido el reciclaje, sus condiciones y dificultades. En los capítulos 4 y 5 se describen las tecnologías de reciclaje de plásticos que actualmente se aplican en el mundo y en México. Finalmente, en el capítulo 6 se detallan algunos casos de estudio importantes de destacar en nuestro país.

2. ANTECEDENTES

2.1. Problemática internacional de los residuos plásticos y medidas que se han instrumentado

2.1.1. Origen del problema de los residuos plásticos

En todo el mundo, se compran un millón de botellas de plástico desechables para beber cada minuto, y hasta 5 billones de bolsas de plástico de un solo uso cada año. En total, la mitad de todo el plástico producido está diseñado para usarse solo una vez, y luego desecharse. Se estima que se han producido 8.3 millones de toneladas (Mt) de plástico desde principios de la década de 1950 y alrededor del 60% de estos han terminado en un tiradero o en el medio ambiente (UNEP, 2018).

Una de las mayores preocupaciones es la cantidad de residuos plásticos que ingresan a los océanos. De acuerdo con una estimación realizada por Jambeck y colaboradores (2015), en el año 2010 se generaron 275 Mt en poblaciones dentro de un radio de 50 km de las costas en 192 países, de las cuales ingresaron al océano entre 4.8 y 12.7 Mt. Los principales plásticos que podrían están flotando en los océanos son el polietileno (PE) y polipropileno (PP) debido a que en 2010 estas resinas representaron el 53% de la producción de plástico en América del Norte y el 66% de plástico en la corriente de residuos de Estados Unidos. De acuerdo con este mismo estudio, aproximadamente entre 1.1 y 8.8 Mt de residuos plásticos son manejados inadecuadamente en el mundo; los 20 países que encabezan la lista y representaron el 83% del total en el año 2010, se muestra en la Tabla 1.

De los 20 países identificados, 16 tienen una economía intermedia y únicamente se enlistan dos países de América, aunque Estados Unidos cuenta con una economía avanzada, este país se incluye dada la cantidad de residuos por habitante que genera.

Además de la contaminación terrestre, otra fuente de generación de residuos plásticos son las embarcaciones marítimas. En este contexto, el primer instrumento multilateral concertado para evitar la contaminación de los mares y zonas costeras fue el Convenio Internacional para prevenir la contaminación de las aguas del mar por hidrocarburos", de 1954. A raíz del derrame de petróleo crudo ocasionado por el Buque Torrey Cannion se vio la necesidad de crear un nuevo convenio internacional que tuviese en cuenta los riesgos que implica el transporte de productos

contaminantes; por lo tanto, en 1973 se adoptó el Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación de los buques, comúnmente llamado Convenio MARPOL 73/78 (Martín Pantoja, 2007). Salvo disposición expresa en otro sentido, el anexo V de este convenio se aplica a todos los buques, lo que comprende a todos los tipos que naveguen en el medio marino, lo que abarca desde buques mercantes, plataformas fijas o flotantes hasta buques no comerciales; por ejemplo, naves o yates de recreo.

Tabla 1. Estimación de la cantidad de residuos plásticos generados en 20 países costeros (millones de toneladas por año). Fuente: Jambeck et al., 2015.

Ranking	País	Población (millones)	Generación residuos (kg/día/persona)	% residuos plásticos	Residuos plásticos manejados inadecuadamente (Mt/año)	Residuos plásticos al océano (Mt/año)
1	China	262.9	1.10	11	8.82	1.32-3.53
2	Indonesia	187.2	0.52	11	3.22	0.48-1.29
3	Filipinas	83.4	0.5	15	1.88	0.28-0.75
4	Vietnam	55.9	0.79	13	1.83	0.28-0.73
5	Sri Lanka	14.6	5.1	7	1.59	0.24-0.64
6	Tailandia	26	1.2	12	1.03	0.15-0.41
7	Egipto	21.8	1.37	13	0.97	0.15-0.39
8	Malasia	22.9	1.52	13	0.94	0.14-0.37
9	Nigeria	27.5	0.79	13	0.85	0.13-0.34
10	Bangladesh	70.9	0.43	8	0.79	0.12-0.31
11	Sudáfrica	12.9	2.0	12	0.63	0.09-0.25
12	India	187.5	0.34	3	0.60	0.09-0.24
13	Argelia	16.6	1.2	12	0.52	0.08-0.21
14	Turquía	34	1.77	12	0.49	0.07-0.19
15	Pakistán	14.6	0.79	13	0.48	0.07-0.19
16	Brasil	74.7	1.03	16	0.47	0.07-0.19
17	Birmania	19	0.44	17	0.46	0.07-0.18
18	Marruecos	17.3	1.46	5	0.31	0.05-0.12
19	Corea del Norte	17.3	0.6	9	0.30	0.05-0.12
20	Estados Unidos	112.9	2.58	13	0.28	0.04-0.11

En la versión original del anexo V se prohibía totalmente tirar plásticos en cualquier lugar del mar y se limitaba drásticamente las descargas de otros tipos de residuos desde los buques en las aguas costeras y las "zonas especiales". Sin embargo, éste ha sido revisado por las partes y actualmente se prohíbe la descarga de todo tipo de residuos en el mar, salvo las excepciones establecidas en las reglas 4, 5 y 6 del propio anexo, que se

relacionan con residuos de alimentos, agentes o aditivos de limpieza y cadáveres de animales. Asimismo, realiza excepciones relacionadas con la seguridad del buque y con la de las personas a bordo, así como con la pérdida accidental de residuos (OMI, 2020).

El Secretariado del Convenio MARPOL emitió en 2012 la Resolución MEPC.220(63)[1], en la cual se establecen las Directrices para desarrollar planes de manejo de residuos en buques y considera los siguientes puntos:

- Reducción en fuente.
- Reúso o reciclaje.
- Tratamiento a bordo.
- Descarga en el océano, sólo en situaciones permitidas.
- Descarga en instalaciones portuarias de recepción de residuos.

Dada esta presencia ubicua de los residuos plásticos, actualmente se están presentado diversos problemas de relevancia a diferentes escalas espaciales, desde lo global hasta lo local. En lo que relativo a los principales impactos que han provocado preocupación mundial, a continuación se describe la situación de los MP y de los movimientos transfronterizos de plásticos.

2.1.2. Microplásticos y sus efectos

Aunque se han propuesto varias definiciones de los MP en función de su tamaño, la definición actualmente aceptada por la comunidad científica es un tamaño de partícula en un rango de 0.001–5 mm (GESAMP, 2015). Mientras tanto, las partículas de plástico menores a 0.001 mm se clasifican como nanoplásticos, las mayores a 5 mm son mesoplásticos (5–25 mm) y finalmente aquellos mayores a 25 mm son macroplásticos (Lee et al., 2013a). Adicionalmente los MP se dividen en primarios y secundarios en función de su origen:

- Primarios. Los MP primarios se fabrican intencionalmente como partículas de pequeño tamaño para fines industriales e incluyen la preproducción, pellets de resina, microperlas para abrasivos en cosmética, pasta de dientes y granallado, microsized, polvos para recubrimientos textiles y medios de suministro de medicamentos.

[1] Resolución MEPC.220(63). Directrices de 2012 para la elaboración de Planes de Gestión de Basuras.
https://www.directemar.cl/directemar/site/artic/20170307/asocfile/20170307142142/220_63.pdf

- Secundarios. Partículas fragmentadas derivadas de cualquier producto de polímero sintético orgánico en uso y en el medio ambiente como residuos e incluyen fragmentos de plástico sólido, microfibras de tela o cuerda, revestimientos que se han desprendido o restos del desgaste de los neumáticos.

Los MP son un tema de alta relevancia internacional, actualmente existe un auge en su estudio y monitoreo en el medio ambiente, particularmente las investigaciones sobre su presencia en ecosistemas acuáticos, sedimentos y diferentes organismos; asimismo se han comenzado a estudiar las implicaciones que tienen en la cadena alimenticia.

Los MP entran al ambiente marino por diversas vías, que pueden ser directas o indirectas, como, por ejemplo, aguas residuales que se descargan al océano, escorrentía terrestre o la degradación de macroplásticos que son transportados al mar en caso de condiciones climáticas adversas, desde puntos de disposición de residuos en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto clandestinos, o por su disposición directa en la costa o en el mar (Alomar et al., 2016). Las fuentes en tierra están relacionadas con muchas actividades, entre ellas el transporte terrestre (es decir, MP generados por el desgaste de los neumáticos), actividades agrícolas, plantas de aguas residuales o degradación de residuos plásticos en las playas (FAO, 2017).

Shim y colaboradores (2018) identificaron un total de 73 trabajos de investigación sobre MP en diferentes matrices ambientales, de los cuales 65 se publicaron después de 2010. La mayoría de los estudios de monitoreo de agua se enfocaron en aguas superficiales donde se estudian los MP flotantes acumulados, utilizando redes de arrastre neuston o manta. La presencia de MP en aguas de mar registrada en todo el mundo oscila entre 4.8 y 106 n/m^3 en el Pacífico Ecuatorial y de 8.6 a 103 n/m^3 frente a la costa sueca. En estos estudios se identificó que los plásticos más densos que el agua, como el poliestireno (PS) y el cloruro de polivinilo (Polyvinyl chloride - PVC), tienden a asentarse en el fondo marino; sin embargo, la tensión superficial del mar puede influir en la velocidad del hundimiento.

Hasta hace poco se desconocía la distribución de MP en los sistemas de agua dulce debido a que existen relativamente pocos estudios que aborden su presencia en cuerpos de agua continentales, incluidos lagos, ríos y estuarios.

Sin embargo, se ha identificado una gran variabilidad espacial en la distribución de MP en estos ambientes, con resultados que muestran diferencias de varios órdenes de magnitud. En general, en los sedimentos se encuentran concentraciones mayores que en las muestras de agua, y los resultados son comparables a los obtenidos en hábitats marinos costeros (FAO, 2017). Por otro lado, en ambientes lacustres, los MP tienden a mostrar una mayor abundancia cerca de los centros urbanos e industriales, pero en algunos sistemas fluviales esta relación no se cumple y puede ser el resultado de la dinámica del flujo del río e inundaciones (Klein et al., 2015).

Por otra parte, los organismos depredadores pueden acumular indirectamente MP durante la ingesta de presas contaminadas con estos residuos, lo cual posteriormente conduce a la bioacumulación en los niveles tróficos superiores (FAO, 2017).

Los bivalvos son, por mucho, los organismos más utilizados en los estudios de exposición a MP. En ellos, los efectos celulares asociados con la ingesta incluyen alteraciones inmunológicas, efectos neurotóxicos e indicios de genotoxicidad (Avio et al., 2015). También se observan mayores tasas de mortalidad en crustáceos cuando éstos se exponen crónicamente a MP (Lee et al., 2013b) y se ha visto que los cangrejos verdes también absorben a MP a través de las branquias (Watts et al., 2015).

Las investigaciones de laboratorio sobre las interacciones de peces y MP son menos comunes que las de bivalvos. Puede ser difícil obtener licencias éticas para llevar a cabo algunas de estas investigaciones (FAO, 2017).

Los peces pueden ingerir MP por varias razones, pueden confundirlos con presas o, en el caso de especies filtradoras, succionarlos del agua o los sedimentos. Los efectos fisiológicos de su exposición a MP incluyen alteraciones del tracto intestinal, cuya función se puede ver comprometida, como se observó en la lubina europea (Dicentrarchus labrax) después de 90 días de exposición a través de la alimentación con gránulos que contenían 0.1% de PVC (Pedà et al., 2016). De igual manera, el gobio común (Pomatoschistus microps) mostró letargo y un comportamiento anormal de nado (De Sá et al., 2015).

La presencia de MP y nanoplásticos en peces y otras especies puede suponer un riesgo para los humanos derivado del consumo de alimentos contaminados que pueden ingresar al tracto gastrointestinal.
Sin embargo, es necesario desarrollar más investigación sobre los efectos, particularmente sobre los mecanismos de absorción (FAO, 2017).

Los primeros estudios de MP en las superficies acuáticas datan de la década de 1970 (Carpenter et al., 1972); sin embargo, los estudios sobre su presencia en sedimentos se dieron a conocer hasta 2004 (Thompson et al., 2004).

Los MP con mayor densidad que el agua de mar (1.02 g/cm^3) tienden a hundirse y acumularse en el sedimento, mientras que los MP de densidad menor pueden llegar a sedimentar debido al fenómeno denominado "biofouling de procariontes, eucariontes o invertebrados", el cual consiste en la adhesión del plástico a los grupos de organismos mencionados y su consecuente hundimiento debido al aumento de masa del objeto (Castro Zarate, 2019).

El origen de estos MP en los sedimentos es diverso; de acuerdo con algunos estudios, se han detectado altas concentraciones de microesferas de plástico, las cuales parecen derivarse de efluentes de drenaje tanto municipales como industriales. Estas microesferas pueden provenir de detergentes para el lavado de textiles, a las cuales se adicionan las fibras que se desprenden de las telas. De acuerdo con Brown y colaboradores (2011), una sola prenda de vestir puede desprender hasta 1900 fibras, principalmente de poliéster o acrílico.

2.1.3. Movimientos transfronterizos de los residuos plásticos

Hasta principios de 2018, la mayoría de los residuos plásticos generados en el mundo fueron enviados a China, ahí los residuos se procesaban en productos de alto valor por diferentes fabricantes. Sólo en 2016, las importaciones de residuos en China agregaron 8.1 Mt (12%) a las 67 Mt de residuos domésticos que se generaron en ese país. Ante ello, China implementó la prohibición de las importaciones de plástico que no fuera 99.5% puro, para proteger el medio ambiente en su país; como consecuencia, algunos de los residuos plásticos comenzaron a desviarse a países del sudeste asiático, como Indonesia, Tailandia, Vietnam y Malasia, los cuales a su vez fueron abrumados por los enormes volúmenes que China solía absorber (Mazhandu y Muzenda, 2019).

De acuerdo con los registros, entre 2016 y 2018, las importaciones de residuos plásticos en Malasia se triplicaron a 870,000 toneladas; sin embargo, las instalaciones parecían estar mal equipadas para manejar los contaminantes generados por el procesamiento de estos residuos, además algunas plantas estaban operando ilegalmente. Por lo anterior, el gobierno tuvo que introducir un congelamiento temporal en los permisos de importación de plástico (Brooks et al., 2018).

Debido a los elevados y crecientes niveles de residuos plásticos y MP, el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación ha puesto a consideración de sus países miembros medidas para afrontar la contaminación marina por residuos plásticos. Asimismo, también señala que la prevención, la reducción al mínimo, la gestión ambientalmente racional de los residuos plásticos y el control efectivo de sus movimientos transfronterizos reducirá la cantidad de los residuos que se liberan en el medio ambiente. Algunas de las medidas que han recomendado los grupos científicos del convenio son las siguientes:

- Reducir el vertido de MP en el medio marino, en especial, cuando sea posible, mediante la eliminación de los productos que los contienen.
- Fomentar la innovación en el diseño de productos para reducir las liberaciones secundarias de MP procedentes de fuentes terrestres y marítimas, y mejorar la gestión de los residuos cuando sea necesario.
- Prevenir las pérdidas de MP plásticos primarios, en particular los gránulos de preproducción (copos y polvos), para evitar que se derramen en el medio ambiente en toda la cadena de fabricación y suministro.
- Concienciar acerca del problema a una amplia variedad de destinatarios mundiales, entre otros, a los gobiernos encargados de formular políticas, administradores de recursos, educadores, entidades del sector privado y el público en general.
- Establecer y mantener una base de datos de información técnica y científica sobre los residuos marinos, como inventarios de vertidos en el medio marino, estudios científicos e innovaciones para la lucha contra la contaminación marina.

2.2. Problemática nacional de los residuos plásticos y medidas que se han instrumentado

En la década de 1930 se introdujeron industrialmente los plásticos en países desarrollados. En el caso de México, éstos se empezaron a comercializar poco más de una década después, únicamente en el sector industrial, principalmente en el automotriz. Este sector comenzó a utilizar polímeros termoestables de alta densidad en la composición interior de automóviles (tableros, palancas y manijas), incursión que abrió para estos materiales un camino para ampliar rápidamente su mercado. Así, su utilidad económica y funcional, y su practicidad, los popularizaron e impulsaron su introducción en otros sectores, como el de la agricultura, en la cual, a partir de la década de 1950, se comenzaron a fabricar costales para diferentes usos a partir del PE, que anteriormente eran producidos con componentes naturales (fibra de ixtle). Tal aplicación demandó que se produjera el PE en nuestro país y promovió que en 1989 se construyera la primera planta nacional productora de polímeros. Con el paso de los años el plástico se fue introduciendo en nuevos sectores, como el alimenticio, médico, doméstico, etc.

No obstante, conforme fue creciendo la industria plástica, también fueron apareciendo problemas, tales como la sobreproducción de éstos, las emisiones derivadas de su fabricación, la incapacidad de la industria para tratar los residuos y la contaminación de ambientes naturales, urbanos y rurales.

La problemática que se generó a partir de dichos antecedentes involucra per se tres factores que a continuación se presentan y que, a su vez, ayudarán a comprender por qué los plásticos hoy en día son un dilema ambiental en México.

Factor económico-industrial

Como ya se mencionó, la industria del plástico creció de forma muy rápida al grado de ser imprescindible para la economía mundial en casi cualquier sector manufacturero. En nuestro país se estima que se producen más de 4 Mt al año de polímeros, como PE, PP y PS entre otros. La Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ) reportó que entre 2013 y 2018 se produjeron aproximadamente un total de 21,353,005 toneladas de derivados de polímeros, incluidas resinas termoestables, acetatos de fibra corta, resinas alcídicas y resinas de poliéster, por mencionar algunos.

En la Figura 2 se muestran las cantidades aproximadas de la producción de plásticos en México en el periodo de 2013 a 2018.

Factor político-legislativo

En el marco legal, la historia nos ha enseñado que las políticas regularmente se han caracterizado por su desarrollo posterior a un suceso que debe atenderse con suma importancia. La experiencia en México no es la excepción, la industria del plástico ha tenido que adaptarse a los diferentes cambios legislativos a raíz de problemáticas ambientales que han surgido, principalmente las que tienen que ver con los modos de producción, el impacto ambiental que ello ocasiona y los residuos que se generan por su consumo.

En la actualidad poco más de 20 estados de toda la república mexicana han modificado sus leyes en materia de manejo de residuos; algunos, como Baja California Sur (Boletín Oficial del Estado de Baja California Sur, 2018), Chihuahua, Ciudad de México entre otros, han puesto como premisa la estricta prohibición del uso de polímeros de alta, media y baja densidad de un solo uso, haciendo principal hincapié en las bolsas de un solo uso.

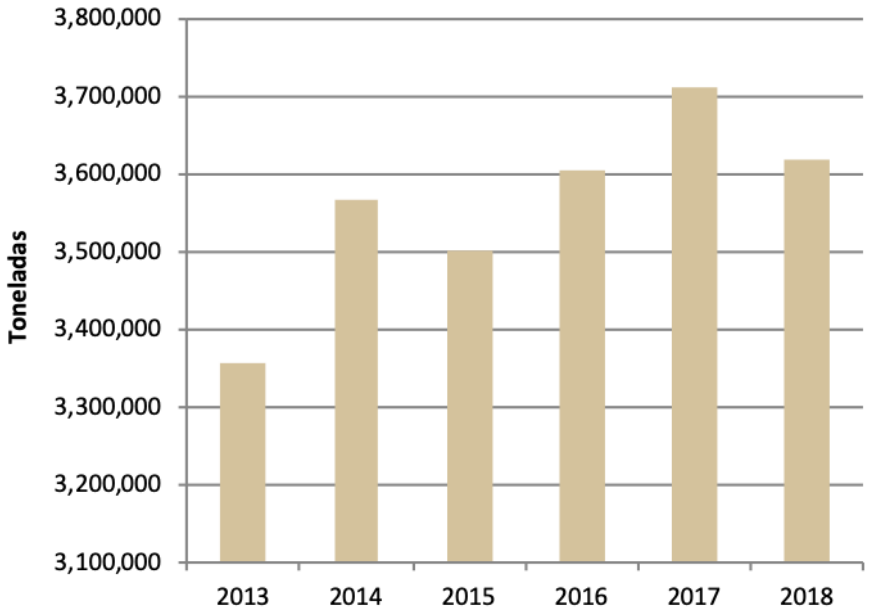


Figura 2. Cantidad de polímeros producidos en México.
Fuente: elaboración propia con base en cifras de ANIQ, 2019.

Factor cultural

A partir de la introducción de los productos a base de plásticos de un solo uso (1988), la sociedad fue modificando sus hábitos de consumo para incluirlos como parte importante de su estilo de vida. La consecuencia de este cambio en el comportamiento fue un abandono paulatino de la responsabilidad sobre la disposición final de los residuos derivados de esos productos. Por consiguiente, la sociedad mexicana se hizo dependiente del consumo de plástico, lo que ocasionó una capacidad inferior para el manejo adecuado y el aprovechamiento racional de los residuos plásticos. Como se puede observar en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos 2012 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), se estima que en nuestro país únicamente el 9.2% de los plásticos desechados se recolectan para reciclaje y el 15.8% para el caso del PET (Polyethylene terephthalate - Tereftalato de polietileno) (SEMARNAT, 2012). No obstante, esta cantidad recolectada no necesariamente refleja el porcentaje real de residuos plásticos reciclados. Asimismo, para años más recientes, no existen estimaciones oficiales de la cantidad total de estos residuos que son acopiados y recuperados a nivel nacional a partir de todas las fuentes; es decir, de los sistemas de limpia municipales, los centros de acopio autorizados y el sector informal (pepenadores y puntos de acopio sin registro). Los datos con los que se cuenta corresponden a la cantidad promedio de residuos plásticos recibidos en los centros de acopio autorizados, cuya cifra es de 8,251 kg/día (22.17%) para el caso del PET y de 3,940 kg/día (10.25%) para otros tipos de plásticos; así como de la cantidad de residuos plásticos reciclables recuperados en plantas de separación, que alcanzan un valor de 86,228 t/día para el PET y 47,621 t/día para otros plásticos (SEMARNAT/INECC, 2020). Estas cifras realmente se quedan cortas si consideramos, como se mencionó previamente, que la generación diaria de residuos plásticos tan sólo en la Ciudad de México es de al menos 123 t.

La sociedad juega un papel importante por ser quien consume los plásticos. El cambio en sus hábitos y comportamientos es determinante para ayudar a solucionar los problemas que estos residuos generan. Para ello se han impulsado programas por parte del gobierno mexicano para contribuir a su uso responsable y disposición final. Ejemplos de ello son las campañas de concientización sobre la reducción en el consumo de productos que no sean de primera necesidad, el uso de bolsas de tela para transportar productos de la canasta básica, entre otros. Los tres factores antes mencionados están estrechamente interrelacionados,

puesto que las oportunidades para solucionar el problema ambiental derivado de los residuos plásticos dependen de todos ellos, así como de cada uno de los actores involucrados en su gestión.

El impacto adverso al medio ambiente por el uso inadecuado de los plásticos lleva aproximadamente 25 años en nuestro país. Los factores más comunes por los que los plásticos son un residuo problemático son su incorrecta disposición final, el porcentaje bajo de reciclaje, así como el tiempo de degradación de los polímeros.

Su impacto sobre el ambiente se inicia desde las primeras etapas de su ciclo de vida. La etapa inicial de "producción de cero" implica dos procesos: por una parte, se tiene a la destilación, y por otra a la polimerización y la policondensación, ambos requieren de un control adecuado para evitar contaminantes nocivos. En la industria petrolera la destilación es el proceso más común para separar los diferentes derivados del petróleo, el cual se somete a altas temperaturas de forma gradual para separar sus compuestos de manera fraccionada, dependiendo de la cantidad de átomos de carbono que contengan; a menor cantidad de estos átomos, los compuestos se ubicarán arriba en la torre de destilación (Figura 3). Durante dicho proceso se emiten gases a la atmosfera, como óxidos de azufre (SOx) y de nitrógeno (NOx), que difícilmente se pueden utilizar o almacenar para su correcta degradación sin causar daños (Ecologistas en Acción, 2012). Datos reportados por la plataforma ZEO estiman que por cada kilogramo de plástico producido desde cero se emiten 3.5 kg de bióxido de carbono (CO_2) directamente a la atmosfera, a diferencia de 1.7% de CO_2 por kilogramo que se emiten cuando se utiliza materia prima reciclada (ZEO, 2020).

Una de las fracciones del petróleo más utilizadas para obtener resinas y otras materias primas con las que se produce el plástico es la nafta, un compuesto esencial para formar la unión polimérica de monómeros y catalizadores que generan polímeros termoestables (composición rígida) y termoplásticos (de composición moldeable). Este compuesto ocupa tan sólo el 10% por barril de todas las demás fracciones que resultan de la refinación (Figura 4); por ello su demanda está contribuyendo a la explotación acelerada de las reservas petroleras de nuestro país.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía existen poco más de 5 mil empresas dedicadas a la manufactura y producción de plásticos en México (INEGI, 2019), a diferencia de la cantidad de empresas que se dedican al reciclaje (menos del 1%).

La ciudad de México y su área conurbada encabezan la lista de empresas de giro plástico (tanto reguladas como no reguladas).

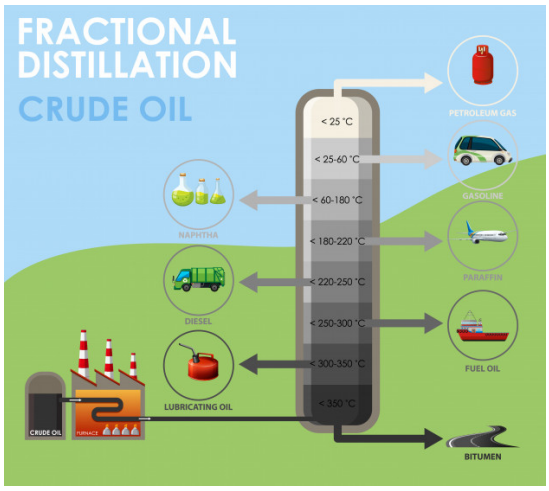


Figura 3. Diagrama de la destilación fraccionada del petróleo.
Fuente: Freepik, 2019.

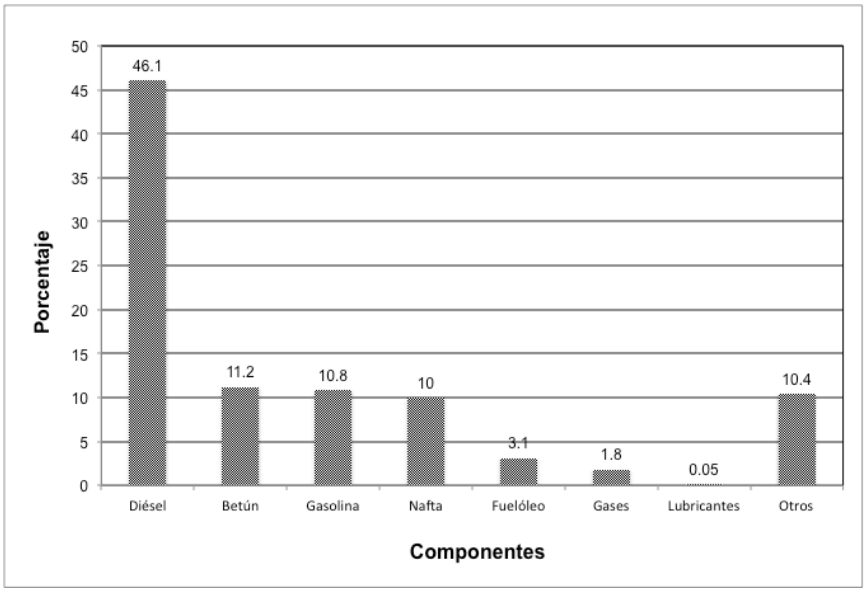


Figura 4. Distribución porcentual de derivados por barril de petróleo.
Fuente: elaboración propia a partir de cifras de ANIQ, 2017.

No obstante, la generación de gases contaminantes no es el único problema que se deriva de la fabricación de plástico, cuando los residuos de este material se exponen a la intemperie (rayos del sol, agua, etc.) o cuando se les da un mal uso (exposición a altas o bajas temperaturas) también se liberan sustancias dañinas a la salud humana y al ambiente.

Un estudio realizado en el año 2018 reveló que la exposición de distintos polímeros (particularmente PS y PET) a la radiación solar natural genera gases como el metano y etileno en cantidades que van desde los 10 a 5100 pmol/g por día (Royer et al., 2018).

Aunado a lo anterior, la sobre producción y el desecho irresponsable de los plásticos provoca que los sistemas de drenaje en algunos asentamientos humanos (urbanos o rurales) se tapen y ello ocasiona inundaciones recurrentes. Las grandes ciudades de nuestro país padecen dicho problema en épocas de lluvias por la acumulación de residuos, la cual en su mayoría contiene más del 70% de material plástico. El Centro Nacional de Prevención de Desastres reportó que en 2018 (CENAPRED, 2018), del total de residuos que se produjo (86,000 toneladas), el 13% se encontró en las calles, provocando el 50% de las inundaciones y los encharcamientos (Figura 5).



Figura 5. Inundación por residuos en la Ciudad de México.
Fuente: El informante, 2018.

Otra consecuencia de la contaminación por plásticos es la alteración de los paisajes naturales por abandono de residuos. Normalmente, en países altamente desarrollados se realiza una separación adecuada y correcta entrega a un tercero responsable, que a su vez la canaliza hacia su disposición final; sin embargo, la situación en México es distinta. Se han detectado casos de playas, reservas ecológicas y en algunos casos áreas verdes urbanas con presencia de residuos sólidos urbanos (RSU), ello se debe en gran parte a distintas variables que ponen en una situación de vulnerabilidad diferentes ecosistemas; por ejemplo, la excesiva generación de residuos plásticos derivada de la gran explosión

demográfica y el desarrollo turístico. El trabajo realizado por Rubio Maldonado y colaboradores (2010) muestra que se debe trabajar con regularidad en la reestructuración de políticas de desarrollo sustentable, puesto que el ritmo acelerado del crecimiento poblacional y turístico rebasa a la normatividad y en algunos casos favorece la aparición de afectaciones sustanciales en los ecosistemas, en particular por los residuos que están compuestos en gran medida por plásticos.

En las zonas costeras igualmente se presentan problemas. De acuerdo con la SEMARNART (2018) “entre el 60 y el 80 por ciento de los residuos marinos son plásticos. En su mayoría son fragmentos menores a los cinco milímetros; es decir MP” (Figura 6). Este hecho ocasiona que distintas especies de la fauna marina, al confundirlos con su alimento, los ingieran y les cause la muerte. De forma similar algunos de nuestros bosques, ríos y reservas naturales también han sido aectados al convertirse en basureros clandestinos.



Figura 6. Playa contaminada con residuos plásticos.
Fuente: UNAM, 2017.

En este contexto y como una de las primeras medidas, el gobierno mexicano, con base en el artículo 4° constitucional, publicó a finales de la década de 1980 la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, la cual enunciaba conceptos como impacto ambiental, mejoramiento, residuo, entre otros, y buscaba atender la recuperación y restablecimiento de las condiciones óptimas para un medio ambiente limpio. Por consiguiente, todas las entidades federativas se apegaron a las normas contenidas en dicha ley. Años más tarde se fue perfeccionando y reformando dicha ley, añadiendo categorías nuevas, completando la forma en que se debía llevar a cabo una disposición final

y tratamiento adecuado de los residuos generados por la población. En el año 2003, a partir de la publicación de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, México contó con una legislación previsora, apoyada por planes de manejo, que estableció el ciclo que debían seguir los distintos RSU, entre ellos los plásticos (incluidos los de un solo uso, como envases, empaques, bolsas, entre otros), y las obligaciones que debía cumplir el sector privado (industrial, de comercio, salud, entre otros) en la elaboración de sus propios planes de manejo. Tres años más tarde (2006) se logra instrumentar, con la participación del sector privado y el gobierno, un plan de manejo colaborativo dirigido a la reutilización de los envases plásticos, hecho que convirtió a México en líder de América en el acopio y reciclaje de PET. La unidad económica más representativa que se sumó a dicho cambio fue Asociación Civil Ecología y Compromiso Empresarial (ECOCE) (Castillejos, 2019).

Por su parte, los organismos internacionales empezaron a hacer hincapié en la concientización de los principales países productores de plástico, sobre su manejo y cultura hacia la mitigación de plásticos de un solo uso. En este sentido, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), desde los inicios de la década de los 2000, ha realizado campañas para promover el uso consiente de plásticos (Montes, 2018), ejemplo de ello fue la conformación del Pacto Mundial de las Naciones Unidas (2000) basado en principios de sostenibilidad y desarrollo económico enfocados al sector privado, entre los cuales se encuentran el “Principio 7. Las empresas deben apoyar un enfoque preventivo a los desafíos ambientales” y el “Principio 9. Fomentar el desarrollo y la difusión de tecnologías respetuosas con el medio ambiente” (United Nations Global Compact, 2012). Otra iniciativa creada para atender problemáticas ambientales referentes a la basura plástica fue el acuerdo global para reducir el consumo de plásticos de un solo uso, impulsada por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el cual fue firmado por los más de 200 países adscritos a las Naciones Unidas (entre ellos México) y en el que se comprometieron a implementar políticas de reducción de uso (ONU, 2019). De forma similar, la Organización Mundial de la Salud (OMS) junto con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) han contribuido con políticas de regulación empresarial y ambiental de la mano con el gobierno mexicano a través de sugerencias y acuerdos firmados en busca de una notable reducción de la producción de plásticos, así como del uso de tecnologías amigables con el ambiente.

Frente a dicho panorama internacional, los gobiernos locales de nuestro país comenzaron a regular el uso de los plásticos de un solo uso. De esta manera, el gobierno del Estado de Veracruz logró firmar un acuerdo entre empresas particulares en el que se comprometen a eliminar gradualmente los plásticos de un solo uso; a través de una medida publicada en su gaceta oficial, se estableció que se debe “prevenir, controlar y abatir la contaminación por el uso de bolsas de plástico de uso único, que se entreguen a título gratuito, de manera onerosa o con motivo de cualquier acto comercial, para transportación, carga o traslado al consumidor final" (Gaceta Oficial del Estado de Veracruz, 2019). Por su parte el gobierno de Nuevo León destaca entre todas las entidades federativas al implementar una medida con carácter de obligatoriedad hacia la prohibición del uso y comercialización de popotes a base de plástico (Periódico Oficial del Estado de Nuevo León, 2019).

En la Tabla 2 se muestran los avances más representativos que se han tenido en la regulación estatal en materia residuos plásticos.

Tabla 2. Avances en la regulación estatal en mareria de residuos plásticos.

ESTADO	MARCO REGULATORIO	FECHA DE PUBLICACIÓN	MEDIDAS	ACCIONES DESTACABLES	FUENTE DE CONSULTA
Baja California	Decreto No. 276 mediante el cual se aprueba la reforma a los artículos 8 y 141 de la Ley de Protección al Ambiente para el Estado de Baja California.	23 de febrero de 2019	• Medida: Se prohíbe el obsequio y la venta de Plásticos de un solo uso en comercios y autoservicios • Plazo máximo: 22 de febrero de 2020. • Sujetos Regulados: Productores de Bolsas de plástico, distribuidores, comerciantes, consumidores y generadores de dichos residuos.		H. XXII Legislatura Constitucional del Estado Libre y Soberano de Baja California. (2019). Periódico Oficial del Estado de Baja California Tomo CXXVI 22 de febrero de 2019 No. 10 Sección III (pp. 5–6). Baja California México: Órgano del Gobierno Constitucional del Estado de Baja California.
Baja California Sur	Ley de Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente del Estado de Baja California Sur Artículos: 1° Fracción VIII, 2° Fracción V a XXI, 3° Fracción VII, 4° Fracción XVIII y 77 BIS, 77 TER.	18 de julio de 2018	• Medida: "Restricción definitiva de venta, facilitación y obsequio de bolsas plásticas y contenedores de EPS para fines de envoltura transportación, carga o traslado de alimentos y bebidas, así como de popotes plásticos [...]" (p. 25)	Se logra incluir en la fracción V y IXBIS del artículo 2° las categorías de biodegradable y compostable.	Comisión Permanente de Ecología. (2018). Boletín Oficial del Estado de Baja California, Tomo XLV, No 38 (pp. 19,25). Baja California Sur, México: Secretaría General de Gobierno.
Chihuahua	Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos del Estado de Chihuahua Artículos: 21 Fracción IX y 22 Fracción X	29 de agosto de 2018	• Medida: "Utilizar únicamente materiales biodegradables en las bolsas plásticas que se distribuyan al consumidor final [...]" (p. 17 Ley) • Plazo máximo: 29 de agosto de 2019 • Sujetos Regulados: Personas		Sexagésima Legislatura del Honorable Congreso del Estado de Chihuahua. (2018). Ley para la prevención y gestión integral de los

ESTADO	MARCO REGULATORIO	FECHA DE PUBLICACIÓN	MEDIDAS	ACCIONES DESTACABLES	FUENTE DE CONSULTA
			Físicas (consumidores finales) y Jurídicas (Tiendas de autoservicio, mercados, restaurantes, etcétera).		residuos del estado de Chihuahua (pp. 17–18). Chihuahua, México: Congreso del Estado de Chihuahua.
Ciudad de México	Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal	25 de junio de 2019	• Medida: "Queda prohibido por cualquier motivo: XIBIS. 1.-La comercialización, distribución, y entrega de bolsas de plástico al consumidor, en los puntos de venta, excepto si son compostables. 2.- La comercialización, distribución, y entrega de tenedores, cuchillos, cucharas, palitos mezcladores, platos, popotes o pajitas, bastoncillos para hisopos de algodón, globos y varillas para globos, vasos y sus tapas, charolas para transportar alimentos, aplicadores de tampones, fabricados total o parcialmente de plásticos, diseñados para su desecho después de un solo uso, excepto los que sean compostables." (P. 6 decreto). • *Plazo máximo: 15 de enero del 2020	Esta iniciativa fue un trabajo promovido en conjunto con la organización Greenpeace. Se adicionan las definiciones de las siguientes categorías; biodegradable, biopolímero, compostable y MP. Para el 2021 se añadirá la prohibición en el mismo sentido de los MP.	H. Congreso de la Ciudad de México I Legislatura. (2019). Decreto por el que se adicionan las fracciones IV Bis, VIII Bis, XXIII Bis, XXVI Bis, XXVI Ter, XXVI Quater al Artículo 3 y una Fracción XI Bis al Articulo 6; asimismo, se reforman las fracciones VI del Artículo 3, XI del Articulo 6 y XI Bis del Articulo 25, Todas en la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (pp. 6–7). Ciudad de México, México: Gobierno de la Ciudad de México.

ESTADO	MARCO REGULATORIO	FECHA DE PUBLICACIÓN	MEDIDAS	ACCIONES DESTACABLES	FUENTE DE CONSULTA
Coahuila de Zaragoza	Decreto No. 187-18 del Congreso del Estado Independiente, Libre y Soberano de Coahuila De Zaragoza	16 de diciembre de 2018	• Medida: "se restringe la venta, facilitación y obsequio de bolsas plásticas y contenedores de EPS para fines de envoltura, transportación, carga o traslado de alimentos y bebidas, así como de popotes plásticos en supermercados, tiendas de autoservicio, farmacias, tiendas de conveniencia, mercados, restaurantes y similares" (p 6 Decreto). • Plazo máximo: 1 de enero de 2020		Congreso del Estado Independiente, Libre y Soberano de Coahuila de Zaragoza. (2018). Decreto No. 187-18 Del Congreso del Estado Independiente, Libre y Soberano de Coahuila De Zaragoza (pp. 4,6). Coahuila de Zaragoza: El Gobierno del Estado de Coahuila.
Colima	Decreto Número 114 Por el que se reforman la Fracción XXV BIS del Artículo 3°, La Fracción XIV del Artículo 25 y El Artículo 26BIS, Todos de la Ley de Residuos Sólidos del Estado de Colima	14 de septiembre de 2019	• Medida: "Se prohíbe proporcionar a título gratuito u oneroso, así como su uso para eventos de carácter público o privado, cualquier tipo de plásticos de un solo uso descartables para fines de envoltura, carga o traslado de productos o mercancías, incluyendo sus similares de EPS [...]" (p. 6 decreto) • Plazo máximo: 13 de septiembre de 2020		Honorable Congreso Constitucional del Estado libre y Soberano de Colima. (2019). Decreto Núm. 114 (p. 6). Colima, México: Gobierno de Estado de Colima.
Durango	Ley de Gestión Ambiental Sustentable para el Estado de Durango. Artículo: 5° Fracción XXXIX y Fracción XLI	17 de noviembre de 2019	• Medida: "Prevenir, controlar y abatir la contaminación por el uso de bolsas de plástico de uso único, así como del EPS que se entreguen a título gratuito, de manera onerosa o con motivo de cualquier acto comercial [...]"(p.13 Ley)		Congreso del Estado de Durango. (2010). (p. 13). Ley de Gestión Ambiental Sustentable para el Estado de Durango-. Gobierno del Estado de Durango.

ESTADO	MARCO REGULATORIO	FECHA DE PUBLICACIÓN	MEDIDAS	ACCIONES DESTACABLES	FUENTE DE CONSULTA
			• Prohibir que se entreguen para transportación, carga o traslado del consumidor final a título gratuito, de manera onerosa, o con motivo de cualquier acto comercial, bolsas de plástico que no estén sujetas a los criterios y normas para la producción y el consumo sustentable"(p.13 Ley)		
Hidalgo	Decreto Número 178 que Reforma Diversas Disposiciones de la Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos del Estado de Hidalgo Art. 44 Fracción XVI	15 de abril de 2019	• Medida: "Artículo 44. Queda prohibido por cualquier motivo: [...] • Proporcionar a título gratuito u oneroso, en supermercados, en tiendas departamentales, de autoservicio, de conveniencia, farmacias, mercados, centrales de abasto, tianguis, comercios en general y establecimientos donde se comercialicen alimentos y bebidas, plásticos de un solo uso descartables a título gratuito u oneroso, para fines de envoltura, transportación, carga o traslado de productos o mercancías." (pp.20-21 Ley) • Plazo máximo: 15 de octubre de 2019		Gobierno del Estado de Hidalgo. Poder Ejecutivo. (2019). Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos del Estado de Hidalgo. (pp. 20–21). Hidalgo, México: Gobierno del Estado de Hidalgo.
Jalisco	Norma Ambiental Estatal NAE-SEMADET-010/2019; que Establece Criterios y Especificaciones Técnicas Ambientales para la Producción de Bolsas de Plástico para Acarreo y		• Medida: "[...] establecer los criterios y especificaciones técnicas ambientales para la producción de bolsas de plástico para acarreo y popotes de un solo uso que vayan a ser distribuidas y/o	El Gobierno de Jalisco no se limitó a prohibir el uso de PE en sus diferentes presentaciones (bolsas, popotes, unicel) si no que implemento	LXII Legislatura del H. Congreso del Estado de Jalisco. (2019). Periódico Oficial (pp. 10). Jalisco, México: Gobierno del Estado

ESTADO	MARCO REGULATORIO	FECHA DE PUBLICACIÓN	MEDIDAS	ACCIONES DESTACABLES	FUENTE DE CONSULTA
	Popotes de un Solo Uso que Vayan a Ser Distribuidas y/o Comercializadas en el Estado de Jalisco.		comercializadas" en el Estado de Jalisco." (p.10).	normas favorables con el medio ambiente para la producción y uso de estas dentro de su territorio geográfico.	de Jalisco.
Michoacán	Decreto Artículo Primero. Se expide la Ley para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el Estado de Michoacán de Ocampo. Artículo 1° Fracción XIV.	11 de octubre de 2018	• Medida: "prohibir gradualmente el uso de bolsas, popotes de plástico y unicel" (p. 4 Gaceta) • Plazo máximo: 11 de enero de 2019 • Sujetos Regulados: establecimientos mercantiles y comerciales		LXXIV Legislatura del H. Congreso del Estado Libre y Soberano de Michoacán de Ocampo. (2018). Gaceta Parlamentaria (p. 4). Michoacán, México: Gobierno del Estado de Michoacán.
Nayarit	Decreto que Reforma y Adiciona Diversas Disposiciones de la Ley Estatal de Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente del Estado de Nayarit	3 de junio de 2019	• Medida: "Quienes comercialicen productos desechables o de un solo uso con materiales distintos al plásticos, unicel o similares debido al proceso de desintegración, al empaquetar sus productos deberán incluir una ficha técnica que garantice que dicho producto está elaborado con materias primas que permiten que sea compostable, para otorgarle la certeza al consumidor de que el producto que está comprando cumple con los lineamientos de protección al medio ambiente." (p.5 periódico oficial)	Promoverá que sea obligatorio el uso de bioplásticos que permitan pronta degradación	Órgano de Gobierno del Estado de Nayarit. (2019). Decreto que Reforma y Adiciona Diversas Disposiciones de la Ley Estatal de Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente del Estado de Nayarit (pp. 5–6). Nayarit, México: Periódico Oficial del Estado de Nayarit.

ESTADO	MARCO REGULATORIO	FECHA DE PUBLICACIÓN	MEDIDAS	ACCIONES DESTACABLES	FUENTE DE CONSULTA
Nuevo León	Ley Ambiental del Estado de Nuevo León. Última Reforma Publicada en el P.O. Número 124-III del 09 de octubre de 2019. Artículos 168 y 168 BIS	10 de mayo de 2019	• Medida: "se prohíbe la venta y la dadiva de bolsas [...] se prohíbe la venta, dádiva y uso de popotes elaborados con LDPE, LLDPE, HDPE, PP, polímero de plástico y cualquier otro de sus derivados" (p.80 Ley) • Plazo máximo: 25 de enero de 2020	Primer estado en prohibir el uso de popotes	H. Congreso del Estado de Nuevo León LXXV Legislatura. (2019). P.O. NÚMERO 124-III del 09 de octubre de 2019. Ley Ambiental del Estado de Nuevo León (p. 80). Nuevo León, México: Gobierno del Estado de Nuevo León.
Oaxaca	Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos artículo 4; se adicionan una Fracción XXIX al Artículo 8 recorriéndose la subsecuente pasando a ser la Fracción XXX; y los párrafos segundo y tercero al Artículo 28; se reforma el segundo párrafo del Artículo 68; se adicionan el Artículo 68 bis; y las Fracciones XI y XII al Artículo 98; se reforma el Artículo 99; y la Fracción I del Artículo 107.	11 de abril de 2019	• Medida: “queda prohibido el obsequio, venta o entrega al consumidor final de bolsas de plástico y uso de popotes que sean elaboradas con LDPE, LLDPE, HDPE, PP, polímero de plástico y cualquier otro de sus derivados” (p. 40)	Primer estado en prohibir el uso del unicel, Art 68BIS de la Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos.	H. Congreso del Estado Libre y Soberano de Oaxaca LXIV Legislatura Constitucional. (2019). Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos (pp.31, 40). Oaxaca, México: Gobierno del Estado de Oaxaca.
Puebla	Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el Estado de Puebla. Artículo 40 Bis.	12 de julio de 2019	• Medida: "Se prohíbe a los establecimientos el uso y entrega de bolsas de plástico a título gratuito u oneroso, para transportación, carga o traslado de productos o		Secretaría de Gobernación del Estado de Puebla. (2019). Ley para la Prevención y Gestión Integral de los

ESTADO	MARCO REGULATORIO	FECHA DE PUBLICACIÓN	MEDIDAS	ACCIONES DESTACABLES	FUENTE DE CONSULTA
			mercancías." (p.37 Ley) • Plazo máximo: 1 de mayo de 2021		Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el Estado de Puebla (p. 37). Puebla, México: Gobierno del estado de Puebla.
Querétaro	Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos del Estado de Querétaro. Título Cuarto de la Generación de Residuos. Capítulo I de las Obligaciones Generales. Artículo 44. Fracción XIV	18 de octubre de 2019	• Medida: "Queda prohibido por cualquier motivo: [...] La venta, facilitación y obsequio de bolsas de plástico desechable para acarreo, así como de popotes..." (p.17-18 ley) • Plazo máximo: 18 de octubre de 2020		LIX legislatura del estado de Querétaro. (2019). Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos del Estado de Querétaro (pp. 17–18). Querétaro, México: Gobierno del Estado de Querétaro.
Quintana Roo	Ley para la Prevención, Gestión Integral y Economía Circular de los Residuos del Estado de Quintana Roo. Artículo 22 Fracción II y IV	18 de junio de 2019	• Medida: "Se prohíbe en el Estado y sus zonas de exclusión previstas en esta Ley, el uso, comercialización y distribución de los productos siguientes: Popotes de plástico; Envases para bebidas, platos, vasos, tazas, copas, charolas y cubiertos desechables de plástico; Los productos derivados del EPS; Bolsas de plástico desechables Los anillos de plástico para envases.		XV Legislatura del H. Congreso de Quintana Roo. (2019). Ley para la Prevención, Gestión Integral y Economía Circular de los Residuos del Estado de Quintana Roo (p. 24). Quintana Roo, México: Gobierno del Estado de Quintana Roo.

ESTADO	MARCO REGULATORIO	FECHA DE PUBLICACIÓN	MEDIDAS	ACCIONES DESTACABLES	FUENTE DE CONSULTA
San Luis Potosí	Ley Ambiental Del Estado De San Luis Potosí. Artículo 104	1 de octubre de 2018	• Medida: Se prohíbe "proporcionar bolsas de plástico desechable para el traslado de mercancías, ya sea de manera gratuita o a la venta para ese propósito." (p. 57 ley) • Prohibido proporcionar popotes (p.58 ley) • Plazo máximo: 1 de octubre de 2019		H. Congreso del Estado de San Luis Potosí. (2020). Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí (pp. 57–58). San Luis Potosí: Gobierno del Estado de San Luis Potosí.
Sonora	Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Sonora. Párrafo 1º del Artículo 143 BIS y Fracción I del Artículo 143 BIS	25 de junio del2018	• Medida: "A fin de proteger el medio ambiente en el Estado, las personas físicas o morales que otorguen bolsas de plástico a título gratuito, de manera onerosa o por cualquier acto comercial, para la transportación, carga o traslado de productos vendidos, deberán garantizar: I. Que en su composición cuenten al menos con 10% de plástico reciclado." (p. 76 ley). • Plazo máximo: 25 de agosto de 2018		H. Congreso del Estado de Sonora LXII Legislatura. (2020). Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Sonora. (p. 76). Sonora, México: Gobierno del Estado de Sonora.
Tabasco	Ley de Protección Ambiental del Estado de Tabasco. Artículo 196 Fracciones IX, X y XI	8 de mayo de 2019	• Medida: Prohibir se otorgue de manera gratuita bolsas de plástico a los consumidores, que no sean consideradas biodegradables [...] • Prohibir [...] se ofrezca u otorgue a los consumidores popotes de plástico; • Prohibir que, [...] la venta de alimentos y bebidas se sirva en recipientes de EPS, conocido como unicel." (p.78 Ley)		LX Legislatura del H. Congreso del Estado de Tabasco. (2019). Ley de Protección Ambiental del Estado de Tabasco (p. 78). Tabasco, México: Gobierno del Estado de Tabasco.

ESTADO	MARCO REGULATORIO	FECHA DE PUBLICACIÓN	MEDIDAS	ACCIONES DESTACABLES	FUENTE DE CONSULTA
			• Plazo máximo: 31 de diciembre de 2019		
Tamaulipas	Decreto Número LXIII 461 mediante el cual se adicionan los párrafos 6 Y 7 al Artículo 36, del Código para el Desarrollo Sustentable del Estado de Tamaulipas.	28 de septiembre de 2018	• Medida: "se restringe la venta, dádiva y uso de bolsas [...] elaboradas con LDPE, LLDPE, HDPE, PP, polímero de plástico y cualquier otro de sus derivados." (p.12 decreto) • Plazo máximo: 29 de septiembre del 2018		LXIII Legislatura del Congreso Constitucional del Estado Libre y Soberano de Tamaulipas. (2019). Decreto No. LXIII 461 mediante el cual se adicionan los párrafos 6 Y 7 al Artículo 36, del Código ara el Desarrollo Sustentable del Estado de Tamaulipas. (p. 10,11). Tamaulipas, México: Gobierno del Estado de Tamaulipas.
Veracruz	Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Artículo 1º, Fracción XIV, Artículo 4 Fracción XXV y Artículo 23 Ter.	28 de mayo de 2018	• Medida: "Prevenir, controlar y abatir la contaminación para el uso de bolsas de plástico de uso único, que se entreguen a título gratuito, de manera onerosa o con motivo de cualquier acto comercial, para transportación, carga o traslado al consumidor final" (p. 19 Gaceta) • La utilización de bolsas de plástico sólo se permitirá en caso de que sean creadas bajo procedimientos tecnológicos que les den la calidad de biodegradables." (p. 20	Se logra firmar un acuerdo entre empresas particulares (Cinépolis, Cinebox, Cinemex, CICE, ADN, Farmacias del Ahorro, Yepas, OXXO, The Italian Coffee, Nestlé, Aceitera Patrona, Grupo Porres, Chedraui y la Fundación Chalchi) y el gobierno del Estado de Veracruz se comprometen a eliminar los plásticos de un solo uso.	LXIV Legislatura del Honorable Congreso del Estado Libre y Soberano de Veracruz. (2018). Gaceta Oficial (pp. 19–20). Veracruz, México: Gobierno del Estado de Veracruz.

ESTADO	MARCO REGULATORIO	FECHA DE PUBLICACIÓN	MEDIDAS	ACCIONES DESTACABLES	FUENTE DE CONSULTA
			Gaceta) • Plazo máximo: 28 de agosto de 2018		
Yucatán	Ley para la Gestión Integral de los Residuos en el Estado de Yucatán. Artículo 9 Fracción II y Artículo 13 Bis.	18 de junio de 2019	• Medida: "El Poder Ejecutivo [...] establecerá un plan de manejo para la gestión de los residuos derivados de bolsas plásticas de acarreo de un solo uso y contenedores de PS entregadas a título gratuito o de manera onerosa en establecimientos mercantiles al consumidor final, , así como popotes plásticos a fin de propiciar su manejo, producción y consumo responsable; su reducción, reciclaje y reutilización [...] ; y promover el uso de materias primas provenientes de recursos naturales renovables y reciclables." (pp. 32-33) • Plazo máximo: 19 de junio de 2019		H. Congreso del Estado de Yucatán. (2019). Ley para la Gestión Integral de los Residuos en el Estado de Yucatán (pp. 29, 32, 33). Yucatán, México: Gobierno del Estado de Yucatán.
Zacatecas	Norma Técnico Ecológica Municipal NETM-002-ZAC19 apartado V.24.A	13 de junio de 2019	• Medida: "[...] Prohibido vender o proporcionar alimentos [...] en contenedores de EPS, así como el suministro de popotes y bolsas de plástico" (pp10-11). • Plazo máximo: 1 de enero de 2020		H. Ayuntamiento de Zacatecas. (2019). Norma Técnico Ecológica Municipal NETM-002-ZAC19 (pp. 10,11). Zacatecas, México: Gobierno del Municipio de Zacatecas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Características de los plásticos

Un plástico es un polímero; es decir, un material formado por la unión repetitiva de miles de átomos hasta formar moléculas de gran tamaño, conocidas como macromoléculas (Santillán, 2018). Las moléculas que se combinan para formar los polímeros se llaman monómeros y las reacciones a través de las cuales se obtienen son conocidas como reacciones de polimerización. Cuando se parte de un solo tipo de molécula se define como homopolímero (Figura 7) y cuando son dos o más moléculas diferentes se define como un copolímero (López, 2004).

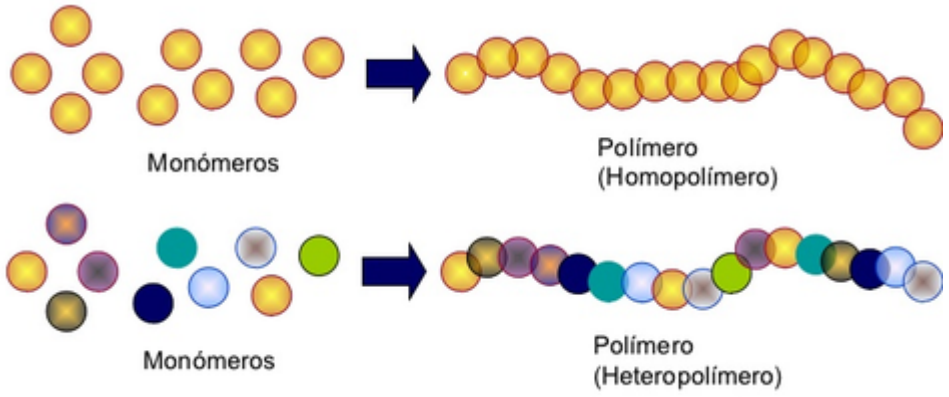


Figura 7. Estructura de un polímero y tipos de polímeros.
Fuente: Barragán, 2018.

Dependiendo de su origen, los polímeros pueden ser naturales o sintéticos. Los sintéticos contienen normalmente entre uno y tres tipos diferentes de unidades que se repiten, mientras que los naturales o biopolímeros, como la celulosa, el ácido desoxirribonucleico (ADN) o las proteínas, presentan estructuras mucho más complejas (Beltrán y Marcilla, 2012).

Los plásticos se caracterizan por su resistencia mecánica y excelentes propiedades para el aislamiento térmico y eléctrico, así como una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes. Las enormes moléculas de las que están compuestos pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas, dependiendo del tipo de plástico.

Las moléculas lineales y ramificadas son termoplásticas (se ablandan con el calor), mientras que las entrecruzadas son termoendurecibles (se endurecen con el calor).

Las características favorables más importantes que ofrecen los plásticos con respecto a otros materiales son las siguientes (Cornish, 1997):

- Ligereza. Aunque depende del tipo de plástico, una buena parte de estos materiales pesa poco. Tienen densidades bajas, en el rango de 830 a 2500 kg/m^3; sin embargo, estas cifras pueden variar. Por ejemplo, las espumas pueden tener densidades de 10 kg/m^3 y los plásticos reforzados hasta de 3500 kg/m^3. Para tener un punto de comparación, el acero tiene una densidad de 7900 kg/m^3 y el aluminio de 2700 kg/m^3.
- Elasticidad. Soportan grandes esfuerzos sin fractura y recobran su firmeza original y dimensiones cuando la fuerza es removida.
- Bajo coeficiente de fricción. No se calientan mucho ante la fricción, aunque no estén lubricados. Esta propiedad puede utilizarse en baleros o engranes.
- Aislamiento térmico. La conductividad térmica de los plásticos no es buena, por lo que pueden ser utilizados para mangos de utensilios de cocina o envases para transportar líquidos calientes.
- Resistencia a la corrosión. Son muy buenos para soportar los ácidos débiles y soluciones acuosas salinas.
- Bajo costo. Son muy económicos; tomando en cuenta su producción en volumen, la materia prima del plástico es considerablemente más barata que la del metal.
- Fáciles de fabricar. Requieren poca mano de obra y la pieza sale con un alto nivel de acabado.
- Aislamiento acústico. Absorben la vibración y el sonido.
- Reciclables. Muchos de ellos pueden ser sometidos a reciclaje mecánico o químico.

Asimismo, como cualquier otro material, los plásticos tienen desventajas, pero estas limitaciones, en muchos casos, dependen del proceso en el que se desean emplear (Cornish, 1997). Algunas de sus desventajas se describen a continuación:

- Baja resistencia a la temperatura. Muchos de los plásticos más comunes son inservibles a temperaturas de 150°C o mayores. El uso contino de este material a temperaturas elevadas puede causar una gran pérdida de sus propiedades.

- Baja resistencia a los rayos UV. Hay plásticos que se decoloran y degradan con la exposición continua al sol.
- Poca dureza superficial y resistencia a la abrasión. La mayoría de los plásticos pueden rayarse con un lápiz duro y su resistencia a la abrasión depende de sus condiciones de uso, pero en general es muy poca.
- Inflamables. Se pueden prender y los gases que desprenden pueden llegar a ser tóxicos.
- Expansión térmica. Con el calor son de tres a diez veces más expandibles que los metales. Esto puede ser un problema, ya que complica el diseño de piezas que deben embonar.
- Orientación. Los plásticos tienen betas, por lo que debemos saber orientarlas. Su orientación es análoga a la de la madera, pues el material es mucho más resistente a lo largo del grano que a través de él.
- Fragilidad al frío. Son propensos a volverse quebradizos a bajas temperaturas.
- Impactos en el medio ambiente y la salud. La mayoría de los plásticos no son biodegradables, por lo cual persisten en el ambiente por muchos años, y algunos pueden liberar sustancias que son tóxicas para la salud humana.

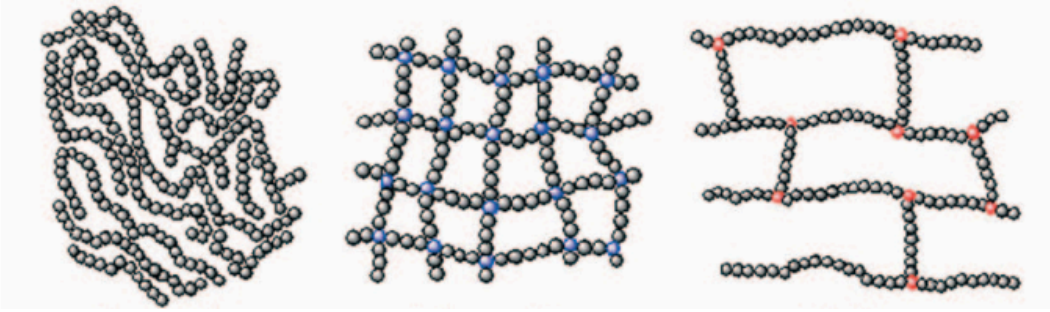
3.2. Tipos de plásticos y su clasificación

De acuerdo con sus propiedades, los plásticos se pueden clasificar en las siguientes categorías (Alfonso,2002):

- Termoplásticos. Se denominan como termoplásticos a aquellos que, al estar en contacto con altas temperaturas, pueden ser moldeables y obtener distintas formas. Este proceso puede ser reversible. Algunos ejemplos de este tipo de plásticos son: PE de alta densidad (High density polyethylene - HDPE) y PE de baja densidad (Low density polyethylene – LDPE), polipropileno (PP), PVC, PS, PET, policarbonato (PC) y polimetilmetacrilato (PMMA).
- Termofijos o termoestables. Son aquellos que, una vez adquirida su rigidez, ya no pueden ser moldeables, debido a que se produce una reacción química irreversible, de modo que las moléculas quedan entrelazadas de forma permanente. Algunos ejemplos de este tipo incluyen a polifenoles (PF), resinas de formaldehído de melamina (MF), resinas de poliéster insaturado (Unsaturated Polyester – UP) y resinas epóxicas (EP).

- Elastómeros. Son de origen vegetal o sintético, y se caracterizan por tener la capacidad de ser elongados o alargados hasta 30 veces con respecto a su tamaño normal y luego pueden volver a su forma original sin tener ningún cambio. Forman una red de malla con pocos enlaces, lo que les permite deformarse elásticamente. Algunos ejemplos de ellos son el caucho natural y sintético y el neopreno.

En la Figura 8 se muestra un esquema de las diferentes estructuras que presentan las tres categorías de plásticos antes descritas.



a) b) c)

Figura 8. Estructura de los polímeros. a) termoplásticos, b) termoestables y c) elastómeros. Fuente: San Andrés et al, 2010.

De acuerdo con el grado de resistencia al doblarse, los plásticos también pueden clasificase en los siguientes tipos:

- Plásticos rígidos. Estos plásticos se caracterizan porque cuando se doblan, inmediatamente se rompen. Ejemplos de este tipo son el PMMA, el Acrilonitrilo de estireno (Styrene acrylonitrile – SAN) y el MF.
- Plásticos semirrígidos. Este tipo se suele confundir con los plásticos rígidos, pero se trata de materiales que al doblarse no presentan fractura, aunque al final si llegan a romperse. El acetal o polioximetileno (POM) es un ejemplo de ellos.
- Plásticos flexibles. Este tipo de plásticos, tras ser manipulados, regresan a su forma normal, pero si se rayan o se les pasa una navaja no presentan una dureza suficiente, en comparación con los plásticos rígidos y semirrígidos que sí mostrarán dureza en la superficie.

Ejemplos de los plásticos flexibles son el copolímero de etileno acetato de vinilo (EVA), la espuma de poliuretano flexible (Polyurethane foam - PURF) y el silicón (SI).

Finalmente, el comportamiento de los materiales con respecto a la luz; es decir, de acuerdo con sus propiedades ópticas, también es una manera de clasificar a los plásticos, como se muestra a continuación (Bordón, 2012):

- Plásticos transparentes. Se puede ver a través de éstos, como en el caso del acrílico, el PC y las EP.
- Plásticos translúcidos. Permiten el paso de una pequeña cantidad de luz, al ver a través de ellos sólo se perciben sombras. Como ejemplo de ellos tenemos al POM y PP.
- Plásticos opacos. Es imposible que la luz atraviese este tipo de plásticos. Son ejemplo de ellos la melamina, las resinas fenólicas y el SI.

Además de las clasificaciones anteriores, los plásticos han sido separados e identificados para facilitar su reciclaje. A medida que un número creciente de comunidades ponía en práctica programas de reciclaje en la década de 1980, se hizo evidente la necesidad de un código coherente y uniforme que identificará el tipo de plástico de una manera rápida. En 1988, la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI, por sus siglas en inglés), en Estados Unidos desarrolló el Código de Identificación de Resinas para facilitar el reciclaje en ese país. En el Reino Unido y China se han adoptado algunas variaciones al SPI, asimismo la Federación Británica de Plásticos y Plastics Europe (antes Asociación de Fabricantes de Plásticos en Europa) recomiendan el uso del código SPI (Wilhelm, 2008). En México, este código ha sido adoptado.

En la Figura 9 se muestra dicho código que clasifica a los plásticos en 7 categorías (Gestores de Residuos, 2020; BPF, 2020).



Figura 9. Código de Identificación de los plásticos.
Fuente: Tecnología de los plásticos, 2011.

1. PET. Se utiliza principalmente en la producción de botellas para bebidas. A través de su reciclado se obtiene principalmente fibras para relleno de bolsas de dormir, alfombras, cuerdas y almohadas.
2. HDPE. Se utiliza en envases de leche, detergente, aceite para motor, etc. Tras reciclarse, se utiliza para macetas, contenedores de basura y botellas de detergente.
3. PVC. Es utilizado en botellas de champú, envases de aceite de cocina, artículos de servicio para empresas de comida rápida, recubrimientos de cables eléctrivos, etc. Puede ser reciclado como tubos de drenaje e irrigación.
4. LDPE. Se encuentra en bolsas de supermercado y de pan, y plástico para envolver. Puede ser reciclado como bolsas de supermercado nuevamente.
5. PP. Se utiliza en la mayoría de los recipientes para yogurt, helados, tapas de botella, ollas o hervidores eléctricos, etc. Tras el reciclado se utiliza como viguetas de plástico, peldaños para registros de drenaje y cajas de baterías para autos.
6. PS. Se encuentra en vasos desechables de bebidas calientes y charolas de carne, charolas y revestimientos de refrigerados y gabinetes para televisiones. Puede reciclarse en viguetas de plástico, cajas de cintas para casetes y macetas.
7. Otros. Generalmente indica que es una mezcla de varios plásticos. Algunos de los productos de este tipo de plástico son, por ejemplo, las botellas de kétchup para exprimir o los platos para hornos de microondas, así como diversos componentes de equipos eléctricos y electrónicos (como cubiertas de teléfonos celulares, caracasas de computadoras, aparatos de ilumunación, cajas de fusibles, tableros de circuitos), etc. Estos plásticos no se reciclan porque no se sabe con certeza qué tipo de resinas contienen.

3.3. Fabricación de los plásticos

Como ya se mencionó en la introducción, los plásticos están formados por moléculas gigantes (macromoléculas), las cuales se forman por reacciones en las que se unen muchas unidades de otras moléculas pequeñas (monómeros) formando una larga cadenas (polímeros) (Aliso, 2007). Dichas reacciones se pueden llevar a cabo por procesos naturales (como en el caso de la celulosa) o por procesos industriales.

En términos generales, para la fabricación de los plásticos se usan dos materias primas básicas: el petróleo, por un lado, y los materiales naturales, por el otro. En este último caso, es común el aprovechamiento de distintos residuos orgánicos para fabricar materiales que se conocen como bioplásticos.

Plásticos derivados del petróleo

El petróleo es una mezcla compleja de miles de compuestos y debe procesarse antes de ser utilizado. La producción del plástico empieza con su destilación en una refinería, donde el petróleo crudo se separa en grupos de componentes más ligeros, denominados fracciones (Plastics Europe, 2020).

Para fabricar plástico a partir de las fracciones refinadas del petróleo, se utilizan dos procesos principales: la polimerización (o adición) y la policondensación, ambos requieren unos catalizadores específicos. La polimerización consiste en la suma de unas moléculas a otras, unos monómeros a otros, como si fuesen cuentas de un collar que se van uniendo, dando lugar al polímero. Por su parte, la policondensación es un proceso parecido, pero en el cual, por cada nuevo monómero que se une a la cadena, se libera una molécula de pequeño tamaño (Aliso 2007).

Cada polímero resultante tiene sus propias propiedades, su estructura y sus dimensiones en función del tipo de monómero básico que se haya utilizado. En la Tabla 3 se enlistas los principales polímeros que se obtienen del petróleo y sus aplicaciones.

Bioplásticos o plásticos derivados de materias primas naturales

En la naturaleza existen varios polímeros que se han usado desde la antigüedad para fabricar materiales con propiedades plásticas, tal es el caso de la celulosa, el almidón, el caucho u otras resinas, derivados de

varias especies de plantas. En particular, el almidón es uno, de los ingredientes más importantes a la hora de fabricar este tipo de plásticos, ya que aporta las mismas propiedades fisicoquímicas que tienen los plásticos sintéticos (Twenergy, 2019a).

Los bioplásticos hechos de almidón y de celulosa se obtienen por fermentación bacteriana; aunque, debido a que son quebradizos, no sirven para fabricar películas flexibles y resistentes; pero se usan para producir cubiertos, contenedores o bandejas rígidas para envasar productos secos; ya que, desde el punto de vista de su degradación, prácticamente se disuelven en agua. No obstante, si la celulosa es modificada químicamente para obtener acetato de celulosa, se obtiene un plástico flexible y resistentes a rupturas y perforaciones, que se puede usar para hacer bolsas y otros productos (Salgado, 2014).
Sin embargo, actualmente, debido al interés de obtener materiales que se degraden fácilmente y de aprovechar la gran cantidad de residuos orgánicos que generamos, se ha impulsado la fabricación de bioplásticos a partir de residuos orgánicos, como paja, restrojo, cáscaras y orujo de frutas y semillas, aceites comestibles usados e incluso desechos animales, como sangre, grasa o suero de quesos (Tsang et al., 2019)

Tabla 3. Principales polímeros derivados del petróleo (Toppr, 2020).

POLÍMERO	MONÓMERO BASE	APLICACIONES
PVC	Cloruro de vinilo	Productos y artículos eléctricos, para la construcción, el transporte y empaque.
PET	Tereftalato de etileno	Todo tipo de envases, principalmente para alimentos y bebidas, como botellas de agua y refrescos.
PP	Propileno	Muebles, equipaje, juguetes, carcasas para baterías y otros artículos duraderos para el hogar, el jardín o el entretenimiento.
PS	Estireno	Como sólido, en envases rígidos, juguetes, botellas,

		tapas, charolas y cajas de refrigeradores, cubiertos desechables; y como espuma, en muebles, colchones, aislantes, tablas de surf, envases para alimentos.
Nylon	Ácido adípico y hexametilendiamina[1]	Tejidos, telas, medias, ropa, alfombras, redes.
Politetrafluoroetileno (Teflón)	Tetrafluoretileno	Utensilios de cocina como sartenes antiadherentes
Neopreno	Cloropreno	Fundas para laptop, aparatos ortopédicos y aislamiento eléctrico.

[1]Para el nylon 6.6.

A manera de ejemplo, a continuación, se describe el proceso desarrollado por Scott Murguía, fundador de la empresa Biofase, para fabricar bioplástico a partir de desechos de semillas de aguacate, de las cuales se generan unas 300 mil toneladas anuales en nuestro país (Bonilla, 2015; Biofase, 2020):

1. Primero se extrae el biopolímero de la semilla de aguacate, el cual es un compuesto termoplástico y biodegradable.
2. Posteriormente el biopolímero pasa por procesos de modificación química para convertirlo en un insumo viable para la producción de bioplástico, al mezclarlo con varios productos orgánicos sintéticos, como agentes de acoplamiento, pigmentos y otros aditivos, que le confieren las propiedades mecánicas y físicas requeridas (flexibilidad, resistencia a la tensión y elongación, etc.), muy similares a las de los plásticos derivados del petróleo.
3. El resultado de estos procesos es un material biobasado, constituido de 60% del biopolímero y 40% de los compuestos sintéticos, que se obtienen en forma de pellets y que luego es sujeto a los métodos y equipos convencionales de extrusión, inyección y moldeado.

Los bioplásticos tienen la ventaja de que, al entrar en contacto con microorganismos, pueden ser degradados y terminan desapareciendo completamente. A pesar de estas grandes ventajas, el costo de su fabricación no es desdeñable, puede ser cuatro o cinco veces más alto que el de los plásticos derivados del petróleo. Además, para su producción muchas empresas han requerido la ampliación y la readaptación de su infraestructura y el reacondicionamiento de sus procesos (Automated, 2014).

Como se vio en el ejemplo del bioplástico derivado de desechos de aguacate, para la fabricación de los bioplásticos, además de los polímeros naturales, se usan otras sustancias o aditivos, como la glicerina, que confieren flexibilidad y otras propiedades importantes a los plásticos resultantes (Twenergy, 2019a).

3.4. Etapas de la gestión de los residuos plásticos

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión de los Residuos, la gestión integral de los residuos es el conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación para el manejo de los residuos, desde su generación hasta su disposición final.

En la Figura 10 se enuncian las etapas principales de la gestión de los residuos sólidos RSU y de manejo especial (RME), y de los residuos plásticos que pueden ser parte de ambas corrientes.

3.4.1. Planeación de la gestión de los residuos plásticos

El artículo 10 de la LGPGIR establece que “Los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de RSU, que consisten en la recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final” (DOF, 2018), a fin de dar cumplimiento al artículo 1 fracción I de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), cuyo mandato es “Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar”. En consecuencia, dentro de la misma LGPGIR, se han incluido a los planes de manejo como los mecanismos para facilitar la gestión de los residuos. De acuerdo con ella, un plan de manejo se define como el :

"Instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de RSU, RME y residuos peligrosos (RP) específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social [...], diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de subproductos y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno" (DOF, 2018).

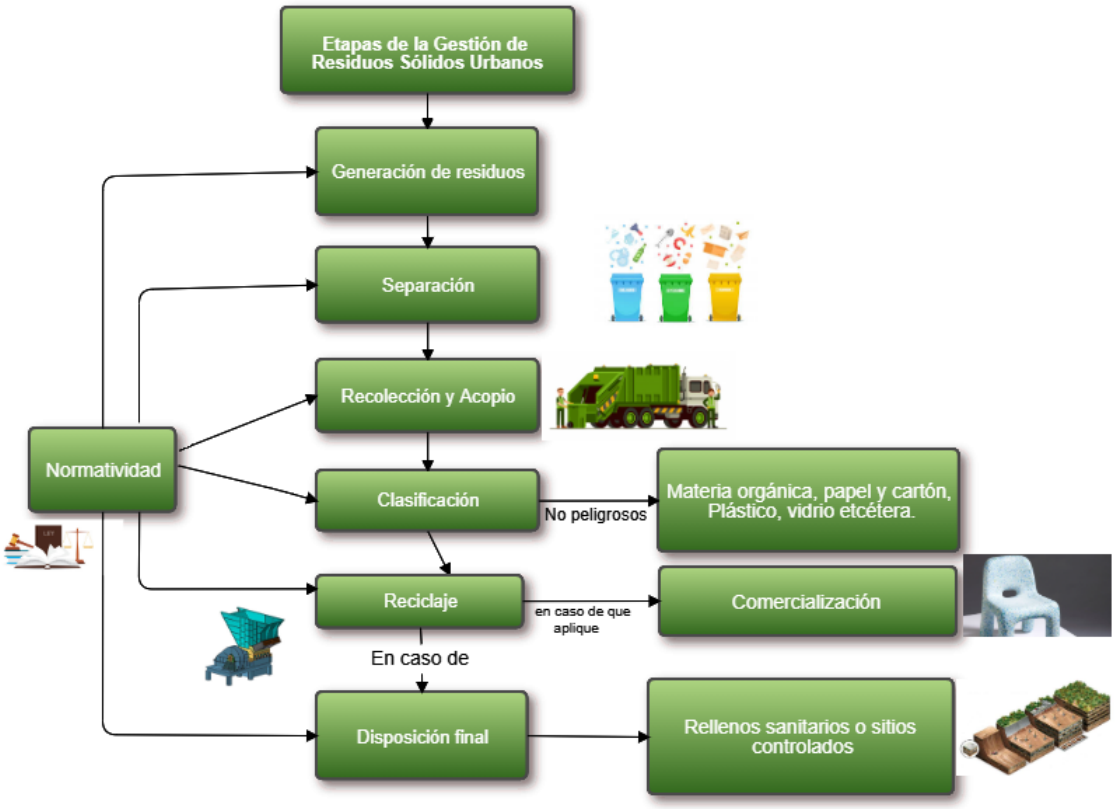


Figura 10. Etapas de la gestión de los residuos plásticos en México.
Fuente: elaboración propia

Conforme a lo anterior, cada entidad federativa y municipal debe establecer de forma clara los lineamientos para la correcta elaboración de los planes de manejo, con la especial característica que deben elaborarse con base en las necesidades de cada localidad y van dirigidos a los responsables que manipulan los residuos. Los gobiernos locales, como ya ha ocurrido en el caso de la Ciudad de México, definen los

aspectos que debe contener un plan de manejo, de entre los cuales se incluyen los siguientes: objetivos, justificación, sujetos relacionados con la actividad del manejo, descripción de procedimiento, metodologías empleadas, informes, bitácoras, etc. (SEDEMA, 2019).

Dentro del diseño de los objetivos (generales y específicos) de un plan de manejo se debe establecer claramente cuál es su finalidad y las metas por alcanzar. Asimismo, se debe justificar el por qué y para qué de las distintas medidas que se adoptarán, de acuerdo con el tipo de residuos (los cuales pueden ser RME o RP), tomando en cuenta dos aspectos: el giro de la empresa y, en caso de que exista, el plan predecesor que se presentó. Por otra parte, cuando el plan de manejo sea para RSU, además se deben referir las empresas autorizadas u organismos municipales participantes. Como parte de las acciones a implementar se deben describir a detalle las etapas de generación o recepción, recolección, almacenamiento, condiciones en las que se transportan, así como su destino final. Entre los puntos de esa descripción se debe medir el alcance de la generación de residuos, la capacidad de acopio y reciclaje, expresados en porcentajes (%). Para contar con esos datos y realizar ajustes futuros a los planes de manejo, es importante que, a través de los informes que están obligados a presentar, los responsables de operar estos instrumentos den a conocer en cifras concretas los resultados que van obteniendo. Finalmente, otro punto importante es el llenado continuo de bitácoras, cuyo objeto es llevar un control de los procesos de recepción y entrega de los residuos. En ellas se debe registrar cualquier eventualidad del mismo proceso de manejo, y así proceder con su correcta evaluación (SEDEMA, 2019).

3.4.2. Generación

Para programar adecuadamente la gestión de los RSU es necesario conocer la cantidad que se genera, dónde se producen, su clasificación, así como el porcentaje que puede ser reutilizado, con la finalidad de darles un correcto reciclaje, tratamiento o, en último caso, disposición final.

En un panorama general se pueden diferenciar los distintos RSU que se generan en un ambiente urbano/industrial en las siguientes categorías:

- Residuos industriales. Se refirieren a los que se generan en algunos complejos de producción, ya sea de pequeñas o medianas industrias.

- Residuos sanitarios. Son considerados los de menor cantidad, pero con la especial característica de ser altamente contaminantes y por ello, en algunos casos, requieren de medidas de gestión particulares.
- Residuos comerciales. La actividad comercial genera una importante cantidad de RSU. Los pequeños, medianos y grandes negocios son los responsables de su generación.
- Residuos domésticos. Son aquellos que se generan en los hogares (casa habitación).

De estas categorías, las que generan mayor cantidad de residuos plásticos son los establecimientos comerciales que proveen servicios de alimentos en contenedores desechables, así como las casas habitación que, como consumidores finales, adquieren muchos productos con embalajes plásticos. Las plantas industriales, dependiendo de su giro, también pueden producir este tipo de residuos en forma de remanentes, rebabas, sobrantes, subproductos o artículos fuera de especificaciones.

Todo lo anterior es estimado de forma aleatoria tomando como base la población per cápita de cualquiera que sea la entidad y medido en kilogramo al día, de acuerdo con la norma mexicana vigente NMX-AA-61-1985 (DOF, 1985). En dicho documento se sugieren utilizar pruebas estandarizadas, así como métodos estadísticos que ayudan a las localidades mexicanas a conocer la cantidad aproximada que se genera de RSU y por ende los tipos de residuos que se producen.

De forma complementaria se realiza un análisis de confiabilidad estadística empleando la prueba de hipótesis de dos colas. La cual consiste en elaborar una hipótesis nula y una hipótesis alternativa que representará un parámetro poblacional menor, mayor o diferente al de la hipótesis nula, y su finalidad es comparar los muestreos obtenidos de la generación de RSU y aceptar lo que plantea la hipótesis nula como válida, para usarse como parámetro en el universo de trabajo. Consecuentemente se utilizará la distribución “t de Student” para observar las diferencias y los márgenes de error entre los muestreos obtenidos en los diferentes sectores socioeconómicos de la población, para darle confiabilidad a la muestra que será elegida como parámetro, a fin de que tenga validez.

Por último, se podrá realizar la prueba de la razón de varianza que tiene como finalidad, demostrar que se puede emplear un valor promedio de los muestreos de la generación per-cápita, para cualquier estrato socioeconómico de la población muestreada.

3.4.3. Separación

Una vez obtenidos los datos de qué cantidad de residuos se está generando, el siguiente paso en el ciclo de los RSU es la separación. Este proceso suele ser distinto en algunas entidades porque las normas locales consideran distintos agentes responsables de la separación, en este sentido puede ser que se designe algún particular para llevar a cabo esta tarea o a los individuos generadores. No obstante, a nivel federal se busca fomentar que la fuente generadora (sociedad e industria) sea la primera responsable de la separación, y en segundo término las instituciones gubernamentales o empresas particulares autorizadas (INECC, 2007).

La separación desde la fuente contribuye a una valorización más eficiente y, para ello, se consideran, en general, las siguientes categorías que normalmente son segregadas por el personal encargado de la recolección al momento en que se entregan al camión de limpia o por pepenadores en los sitios de disposición final:

- Vidrio. Este residuo en su mayoría se compone de sílice (arena) y óxidos formadores, como óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y óxido de aluminio (Al_2O_3) (Rincón. 2008). Suele ser apto para su reciclaje y lo podemos encontrar en residuos de botellas, vasos, ventanas o fachadas de edificios.
- Materia orgánica. Se compone de residuos de alimentos; es decir, comida desechada y cualquier parte no comestible de un alimento, desechos de jardín (por ejemplo, hojas y recortes de hierba), y desechos de mascotas (CCA, 2017).
- Papel y cartón. Existen más de 3000 tipos de papel, pero en general se distinguen cuatro grandes grupos: papeles gráficos; papel y cartón para envases y embalaje; papel tisú, papeles higiénicos; y papeles y cartones para uso técnico específico. (Usa la Basura, 2010).
- Metales. Estos residuos se distinguen por su completa reutilización. Entre los más rentables se encuentran cobre, aluminio, estaño, plomo, zinc, níquel, cromo, titanio, magnesio y cobalto. Estos se pueden encontrar en forma de filamentos de focos, cableado industrial y doméstico, material de soldadura, herramientas, entre otros.
- Plásticos. Existen más de 50 variedades de plásticos, ubicados en tres grandes familias: termoplásticos, termofijos y elastómeros.

Los polímeros termoplásticos son los que más RSU generan debido a su rentabilidad en distintas aplicaciones para la población civil, tales como botellas desechables, embalajes, platos, vasos y prácticamente cualquier objeto de uso doméstico.

Para aumentar la valorización de los residuos, el gobierno mexicano ha impulsado iniciativas de separación de los RSU en sus distintos niveles (municipal y estatal) descritas en el artículo 18 de la LGPGR, el cual establece que "los RSU, podrán clasificarse en orgánicos e inorgánicos 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". Con base en lo anterior, el primer criterio de separación será dividir los residuos en orgánicos e inorgánicos, puesto que, cuando sus características y condiciones lo permiten, éstos pueden ser aprovechados a través de acciones de compostaje, reúso o reciclaje, según sea el caso. Sirva de ejemplo de ello la norma ambiental NADF-024-AMBT publicada en la gaceta oficial de la Ciudad de México desde el año 2013, modificada y puesta con carácter de obligatoriedad en el año 2017 (SEDEMA, 2017), que tiene por objetivo reducir la cantidad de residuos que llegan a los distintos rellenos sanitarios. Para ello se promueven las separaciones en cuatro tipos de residuos "orgánicos, inorgánicos reciclables e inorgánicos no reciclables y residuos electrónicos domésticos", como se puede observar mejor en la Figura 11.

3.4.4. Recolección y acopio

Como ya se mencionó, la mayoría de los municipios de la República Mexicana cuentan con el servicio de recolección en casa habitación, así como también para pequeños, medianos y grandes generadores de residuos comerciales no peligrosos, ya sea a cargo de empresas privadas o de instituciones gubernamentales. Para ello se emplean vehículos de recolección que llevan los residuos a depósitos temporales o directamente a los sitios de disposición final.



Figura 11. Categorías en las cuales se deben separar los residuos, de acuerdo con la norma ambiental NADF-024-AMBT. Fuente: SEDEMA, 2017.

En algunas entidades municipales este proceso se desarrolla de forma protocolaria, tomando como base la normatividad municipal y federal, plasmada en manuales o planes de manejo. En el caso de los planes de manejo se debe incluir a los sujetos involucrados (sus responsabilidades y actividades), así como la planeación de itinerarios para la recolección y traslado a sitios de disposición.

Por otro lado, y a manera de ejemplo, para el caso de los manuales, a continuación, se muestran algunos puntos representativos del “Manual de Procesos de Recolección y Disposición de RSU” del municipio de Chapultepec Estado de México (Gobierno del Estado de México, 2017), que señalan de forma más específica cómo se lleva a cabo dicho proceso, y las responsabilidades operativas del personal involucrado:

- Director de Servicios Públicos: realiza el micro ruteo y traza las rutas óptimas a seguir entre dos puntos determinados donde señala el recorrido específico que deben cumplir diariamente las unidades recolectoras en las áreas de la población donde han sido asignados, tomando en cuenta las restricciones de cada ruta como: el método de recolección, tránsito de las vialidades, los horarios etc.
- Tripulación de recolección: ejecuta el recorrido de las rutas de recolección planeadas. Con actitud de servicio anuncia el paso de la unidad recolectora con la campana, compacta y separa los residuos de forma parcial, principalmente lo fácil de maniobrar, como puede ser, PET, cartón, vidrio, aluminio, etc.
- Operador de los centros de transferencia: verifica el ingreso de las unidades recolectoras y asegura que las actividades de manipulación de los RSU susceptibles de recuperación, sean separados de acuerdo con sus características que cumplan con los lineamientos establecidos por el marco normativo. Selecciona los residuos sólidos reciclables, y coloca en contenedores utilizados para su almacenamiento temporal hasta que sean entregados para la comercialización o disposición final, evitando a toda medida que, durante el procedimiento de recuperación, existan mezcla o contaminación con otros materiales con el propósito fundamental de preservar el valor económico de dichos materiales, así como el cumplimiento a las condiciones o características de calidad para los clientes o usuarios finales.

Las estaciones de transferencia por su parte son los lugares encargados del almacenamiento temporal de los residuos para ser transportados posteriormente a un sitio de disposición final o bien en caso de que algún residuo sea apto para su reciclaje puesto a disposición de alguna empresa recicladora. Eventualmente se podría aplicar algún otro proceso a los materiales recibidos, como la separación, compactación y trituración, lo cual dependerá en gran medida de la infraestructura del sitio de trasferencia.

En todo el territorio mexicano existen 133 estaciones de transferencia de RSU y RME (INEGI. 2018). De ellas, en 24 estaciones se lleva a cabo el proceso de separación primaria y secundaria (manual), compactación y trituración, en 6 la compactación o selección de materiales. Únicamente en 2 estaciones se realiza reciclaje y molido de PET (Puebla y Veracruz) y 13 de ellas están ubicadas solamente para atender la demanda de la Ciudad de México (SEMARNAT. 2020). Aunado a lo anterior, el medio más utilizado para la separación secundaria de los residuos sigue siendo

manual, debido a que las normas mexicanas impulsan la separación secundaria desde las fuentes generadoras (casa habitación y cualquier espacio de concurrencia).

El acopio de residuos sucede de forma distinta, ya que esta actividad tiene mayor enfoque en empresas particulares autorizadas por los gobiernos municipales o locales, a diferencia de la recolección que pudiera entenderse como una tarea casi exclusiva de las autoridades. Sin embargo, existen también campañas de acopio de RSU impulsadas por algunas instituciones gubernamentales de forma local como pudiera ser el caso de centros de educación básica, universidades y los mismos ayuntamientos (gobiernos locales), tomando en cuenta de forma específica cierto tipo de residuos sólidos (pilas desechables, cartón, PET, unicel y periódico).

Los centros de acopio autorizados comparten funciones con los sitios de transferencia al cumplir con ciertas normas de compactación, almacenamiento y transporte. Pero sus funciones principales son recibir y comercializar los residuos.

Algunas entidades federativas como la ciudad de Oaxaca toman como referente la LGPGR para ser aplicada en los centros de acopio de residuos no peligrosos, ya que por principio son considerados generadores de residuos y deberán suscribirse a lo dispuesto en su Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos del Estado de Oaxaca (LPGIRSEO), en el artículo 28, el cual señala que “la formulación y presentación de los Planes de Manejo es obligación de los grandes generadores, los productores, importadores, exportadores y distribuidores de los productos que al desecharse se convierten en RSU o RME, así como los organismos públicos y privados, entidades de la administración pública y personas físicas y morales que generen RSU en un volumen igual o mayor a 10 toneladas” (Periódico Oficial del Estado de Oaxaca, 2019). Posteriormente, tal como lo marca la LGPGR, todo generador de residuos debe presentar un plan de manejo que contendrá la descripción detallada de lo que se hará con los RSU, y el cumplimiento de la infraestructura adecuada del inmueble para garantizar que no se generen más residuos.

Hasta este punto, se puede observar que parte del manejo y control de los residuos termina siendo una actividad económica, hablando del acopio, al ser visto como un intermediario entre la recolección y el reciclaje de los residuos.

Esta etapa de la gestión no comprende un proceso tan minucioso como los anteriores, pero complementa y ayuda al gobierno a lograr un control de los RSU.

3.4.5. Clasificación

Es importante enfatizar que el ciclo de los RSU no sucede de forma consecutiva al cien por ciento, dado que cada una de las entidades de nuestro país realiza con ciertas particularidades su gestión. Por lo que en algunas ocasiones los procesos pueden estar interrelacionados entre sí y, al mismo tiempo, retomarse en cierta fase de su manejo.

En este sentido, la etapa de clasificación pareciera estar presente en forma tácita desde la separación, puesto que implica agrupar a los residuos en grupos específicos. Sin embargo, esto no sucede así cuando los RSU se mezclan en las fuentes generadoras o cuando la separación no se lleva a cabo a un grado en que los residuos se segregan en corrientes homogéneas para lograr su valorización.
Este último caso es lo que normalmente ocurre con los residuos plásticos que se separan desde las casas habitación, en donde se dividen por su material de base; es decir, como plástico, pero no por su tipo de polímero. Por tal motivo, antes de iniciar propiamente los procesos de reciclaje, es necesario identificar la composición química de los polímeros formadores de los residuos y para ello se requieren tecnologías especializadas para su clasificación.

En este contexto, la práctica común es que la clasificación de los residuos plásticos se realice propiamente en las plantas de reciclaje con varias tecnologías basadas en métodos manuales, mecánicos u ópticos.

3.4.6. Reciclaje

Una vez clasificados los residuos, el siguiente paso es el reciclaje. Este proceso implica su valorización a través de distintos tratamientos físicos, químicos o biológicos, dependiendo de la tecnología empleada.

El gobierno mexicano impulsa y promueve que instituciones y particulares se involucren en esta tarea, para desarrollar tratamientos alternativos, socialmente responsables y comprometidos con el medio ambiente. Dicho mandato se encuentra establecido en el artículo 7, fracción XXIII de la LGPGIR, el cual dice que es facultad de la Federación “Promover y aplicar, en colaboración con las entidades federativas y

municipales, instrumentos económicos que incentiven el desarrollo, adopción y despliegue de tecnología y materiales que favorezcan la reducción, el reúso, y reciclaje de residuos" (DOF, 2018).

Los residuos plásticos se consideran unos de los más rentables desde el punto de vista económico, debido a que son fáciles de manipular para ser reutilizados en un sin fin de nuevos artículos y materiales. Los tratamientos de reciclaje de plástico mayormente utilizados son los de tipo mecánico y químico. El primero tiene como procesos principales la trituración, lavado y extrusionado (Recytrans, 2013), mientras que el segundo se lleva a cabo mediante el uso de calor, hasta que las moléculas de los polímeros queden completamente separadas es decir monómeros simples (Twenergy, 2019b).

3.4.7. Disposición final

La disposición final se considera la última etapa del ciclo de los RSU, definida como "la acción de depositar permanentemente los residuos en sitios e instalaciones, cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas" (Figura 12). Para ello se ocupan algunos tratamientos estrictamente regulados y especificados en la NOM-083-SEMARNAT-2003 que garantizaran un menor impacto ambiental (DOF, 2015).

Las cifras actualizadas al 2019, que se reportaron por la SEMARNAT, muestran que existen un total de 260 rellenos sanitarios (SEMARNAT, 2019). Pese a ello, la misma secretaría añade que la Ciudad de México, al enfrentarse a la gran problemática de generación de RSU y RME, actualmente no cuenta con rellenos sanitarios y, por ello, sus residuos son llevados a rellenos sanitarios y sitios de disposición no controlados en el Estado de México, particularmente en los municipios de La Cañada, Cuautitlán, El milagro y Chicoloapan (SEMARNAT, 2018).



Figura 12. Relleno Sanitario de Aguascalientes.
Fuente: LJA.MX, 2013.

A pesar de que la LGPGIR tiene como enfoque básico la reducción de la generación y la valorización de los residuos, en nuestro país la disposición final sigue siendo el destino último de la mayoría de los RSU y RME. Esta actividad tiene como principal ventaja un bajo costo de instalación y funcionamiento, en comparación con otras alternativas; sin embargo, implica grandes desventajas, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

Aún existe una gran cantidad de sitios de disposición que no cumplen con los lineamientos legales y normativos y, por tanto, representan impactos negativos significativos para el medio ambiente y la salud humana.

Los sitios de disposición tienen un tiempo de vida limitado y cada vez es más complicado encontrar lugares donde ubicar nuevos rellenos sanitarios.
La disposición final implica un derroche de recursos naturales y la falta de aprovechamiento de todos los materiales útiles contenidos en los residuos. Asimismo, significa mantener una visión lineal de la economía, en lugar de cerrar ciclos para promover un aprovechamiento racional de todos los recursos y proteger el medio ambiente y la salud.

3.5. Tipos y etapas de los procesos de reciclaje

Diversos autores utilizan diferentes clasificaciones de los procesos de reciclaje en función de sus necesidades. No obstante, de manera general el reciclaje de residuos plásticos se puede dividir en las 4 categorías que se describen a continuación (Al-Salem et al., 2009).

3.5.1. Tipos de procesos de reciclaje

Reciclaje primario o re-extrusión

También conocido como reciclaje in-situ, de ciclo cerrado o reprocesamiento. Consiste en reintroducir los residuos de origen postindustrial durante la producción, en el propio proceso de extrusión que se lleva a cabo durante la manufactura, con el fin de fabricar productos de manera similar. Esto se realiza principalmente en plantas productoras de artículos de plástico, ayudando a disminuir la demanda de materia prima. La proporción en que los residuos plásticos se añaden debe ser la adecuada para que no se afecten las propiedades del producto final (Figura 13).

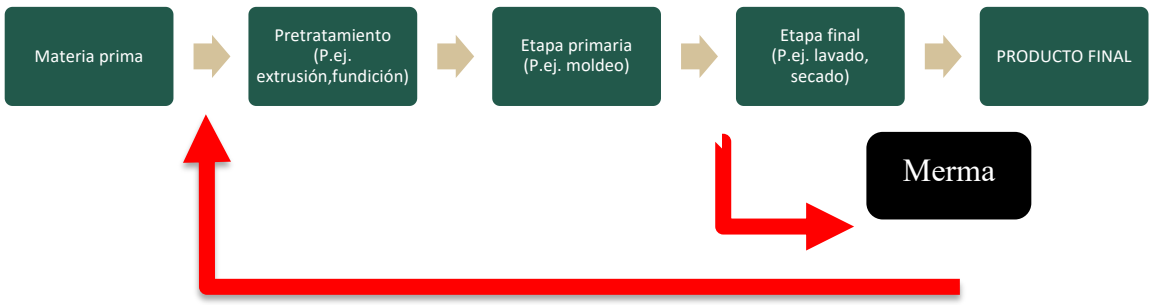


Figura 13. Reciclaje primario o re-extrusión y sus etapas. Fuente: Elaboración propia a partir de Al-Salem et al., 2009.

Reciclaje secundario o mecánico

Este tipo de reciclaje no modifica la estructura química o composición de los residuos plásticos. Pueden realizarse a partir de residuos post industriales o post consumo. Mediante tratamientos térmicos son transformados en otros productos como pellets. El proceso general se muestra en la Figura 14, aunque puede tener variantes dependiendo de la tecnología disponible.

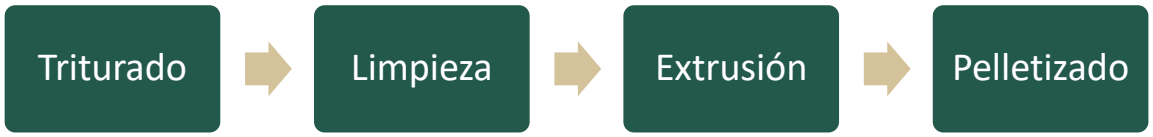


Figura 14. Reciclaje secundario o mecánico. Fuente: Elaboración propia a partir de Al-Salem et al., 2009.

Reciclaje terciario o químico

También conocido como despolimerización. En este proceso, los residuos plásticos cambian su estructura y forman nuevas moléculas. Estos nuevos compuestos se utilizan como materia prima o como combustibles. Todo se logra mediante procesos térmicos y mediante el control de la cantidad de oxígeno y el uso de catalizadores. Las principales modalidades son la pirolisis, la gasificación, la hidrogenación y la fragmentación (cracking) catalítico (Al-Salem et al., 2009), obteniendo un gas con alta capacidad calorífica, una fase líquida y un residuo sólido.

Este tipo de reciclaje tiene ventajas, como la posibilidad de tratar plásticos contaminados y mezclados sin necesidad de un pretratamiento complejo y se pueden obtener productos de alto valor agregado. Entre sus desventajas se encuentra el alto requerimiento energético (Barlow y Morgan, 2013), el costo del equipo y su mantenimiento, además de un estricto control para no introducir plásticos clorados y no generar dioxinas y furanos.

Las tecnologías de reciclaje químico han tenido un crecimiento rápido en Europa. Estos procesos se complementan con reciclaje mecánico cuando este último resulta ineficaz, como es el caso de plásticos difíciles de reciclar o no reciclables como los multicapas, residuos muy contaminados o residuos del reciclaje mecánico (PRE, 2018).

Reciclaje cuaternario o recuperación de energía

A través de este proceso se recupera la capacidad calorífica de los residuos plásticos, al reaccionar con oxigeno durante la combustión, usándolos como combustible. Este calor liberado se puede usar en otros procesos. Este proceso se debe reconsiderar ya que genera CO_2 y otros contaminantes, como los NOx, SOx, COV y partículas. A continuación, se describen varios subtipos de reciclaje cuaternario (UNEP, 2009):

Producción de combustible sólido

Se denomina combustible derivado de residuos densificados o RPF, por sus siglas en inglés. Se prepara usando, residuos plásticos, papel y otros productos secos. Se requiere aproximadamente 15% en peso de termoplásticos para solidificar los otros componentes. Excesos del 50% pueden causar fallas en la formación de los pellets. Su proceso se divide en dos etapas, el pretratamiento que consiste en la trituración y remoción de materiales no combustibles, y la producción de pellets a una temperatura mayor a 200 °C.

Hay dos tipos de sistemas de producción comercial, uno a gran escala con pretratamiento de separación de contaminación indeseable, como metales y plásticos clorados, y otro a pequeña escala sin pretratamiento (Figuras 15 y 16).

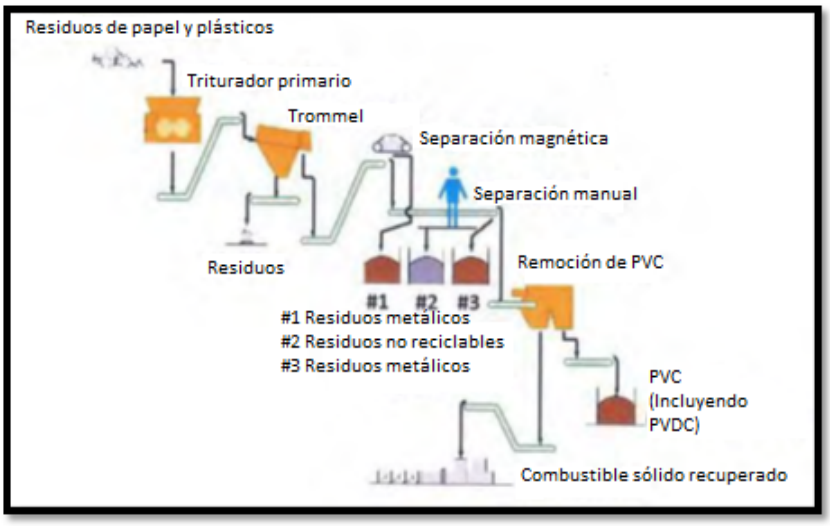


Figura 15. Etapa de pretratamiento del proceso de producción de combustible sólido a gran escala. Fuente: Japan RPF Association, 2020.

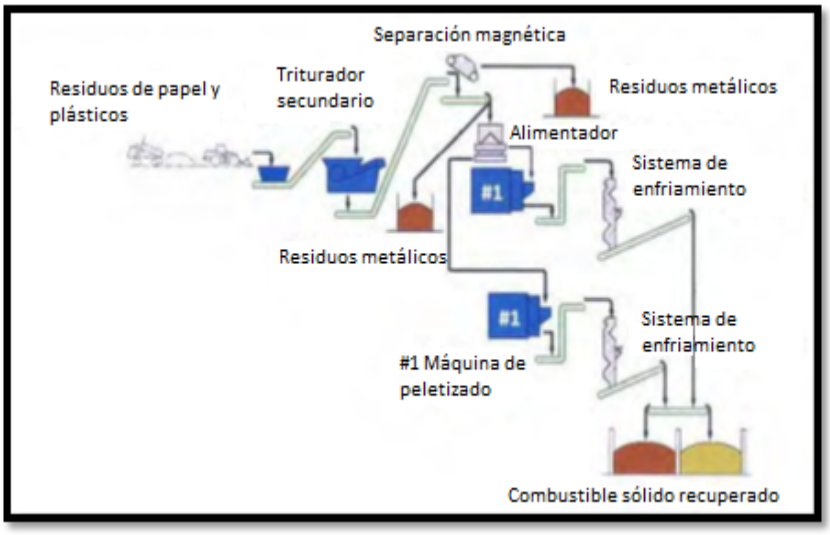


Figura 16. Etapa de pelletizado del proceso de producción de combustible sólidos a gran escala. Fuente: Japan RPF Association, 2009.

Producción de combustible líquido

En este proceso de producción los residuos plásticos se convierten en líquido por pirólisis y condensación del hidrocarburo resultante. Se utilizan reactores a una temperatura de 450 a 550 °C y los líquidos resultantes se destila continuamente con otros hidrocarburos, como diésel, keroseno y gasolina, y se condensa con agua fría. Los líquidos se recolectan y almacenan en tanques y los gases no condensables se incineran (Figura 17).

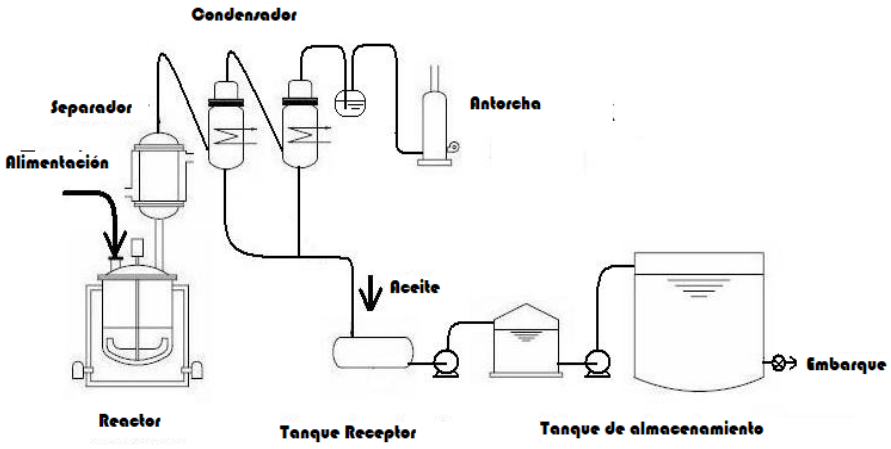


Figura 17. Producción de combustible líquido. Fuente: UNEP, 2009.

Producción de combustibles gaseosos

Consiste en obtener los gases inflamables del tratamiento térmico de los residuos plásticos. Se pueden obtener dos tipos de combustible gaseoso:

1. Hidrocarburos gaseosos: están en un estado gaseoso bajo condiciones normales
2. Gas sintetizado o syngas: mezcla de hidrógeno y CO.

El proceso incluye una serie de pasos como pretratamiento, gasificación, limpieza de gases y almacenamiento (Figura 18).

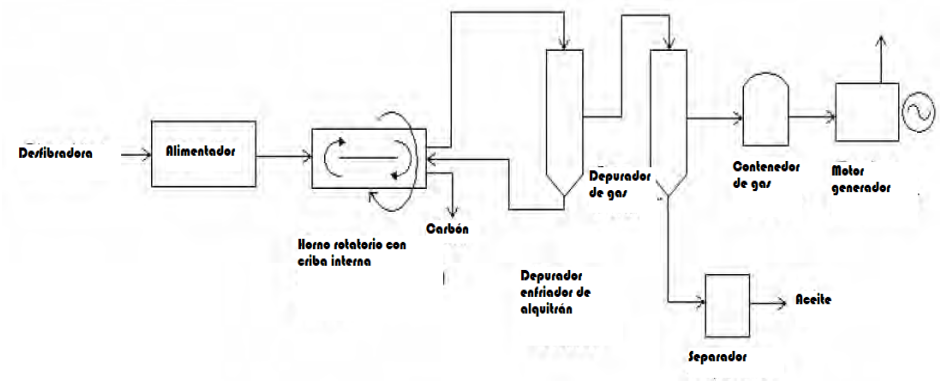


Figura 18. Producción de combustibles gaseoso. Fuente: UNEP, 2009.

El PE y el PP se descomponen térmicamente a temperaturas de aproximadamente 700 °C y bajo una atmósfera inerte de una mezcla de gases como metano, etano, etileno, propano, propileno y varios isómeros de butano.

En la gasificación la temperatura se eleva hasta casi 1000 °C y se lleva a cabo la degradación de la materia orgánica, posteriormente se genera el CO_2, y el nitrógeno del aire remanente se contiene en el gas producido. El poder calorífico del combustible gaseoso obtenido es similar al del biogás y del gas LP.

3.5.2. Etapas del reciclaje

Existen diversos procesos de reciclaje, según el país, la empresa y el tipo de plástico a reciclar, pero el proceso más simple consta de 6 etapas (Leblanc, 2019) (Figura 19).

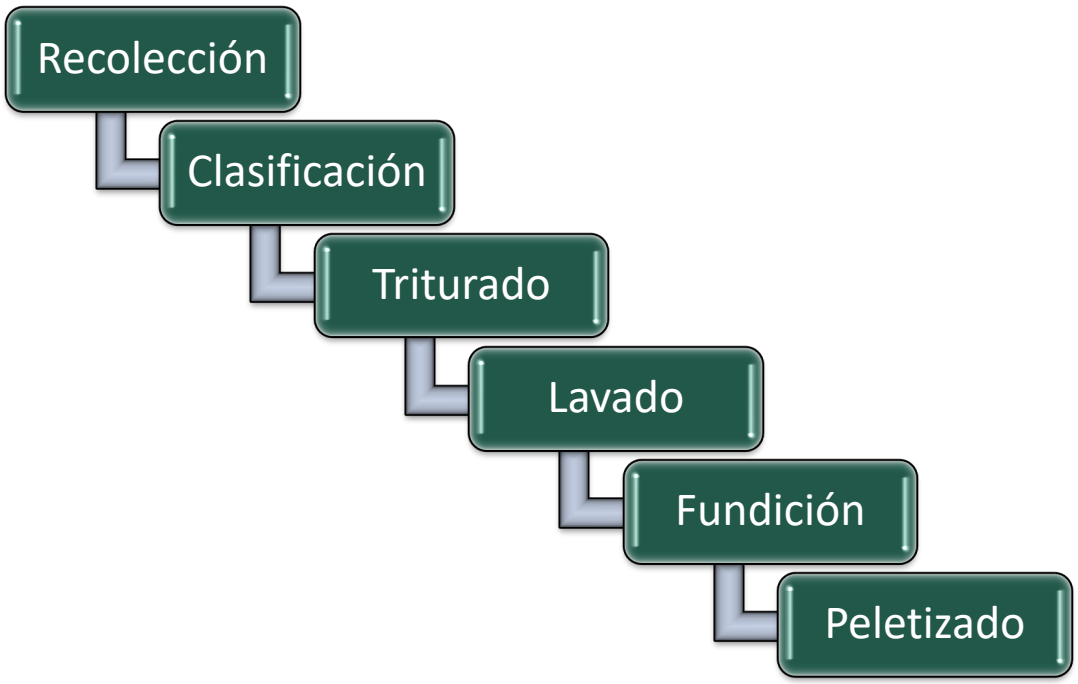


Figura 19. Etapas del reciclaje. Fuente: Leblanc, 2019.

El reciclaje incluye los costos de recolección de los residuos en pequeñas cantidades mixtas, su transporte a las instalaciones de manipulación para clasificarlos, limpiarlos, re-empacarlos y luego transportarlos nuevamente a un mercado que utilice estos como materia prima para nuevos productos y esto es casi siempre más costoso que llevar los residuos a un sitio de disposición final (Munger, 2013).

Recolección

Se deben separar los envases en el domicilio del generador y depositar en contenedores para su posterior recolección. Los contenedores pueden distinguirse usando diferentes colores y se recomienda agregar un etiquetado frontal para facilitar la identificación (Cicloplast, 1996).

Existen diversos sistemas de recolección, por ejemplo, la recolección de botellas PET utiliza tres sistemas (PRE, 2018) que pueden aplicarse a cualquier tipo de plásticos reciclables:

- Depósito: las botellas se venden con depósito reintegrable, canjeable con el regreso de la botella. Esto garantiza una alta tasa de regreso con bajos niveles de contaminación.
- Punto de entrega (Drop-off): recolección y disposición de reciclables en puntos específicos, lo cual implica altos niveles de contaminación.
- Recolección en la banqueta (kerbside): recolección directa en casas, donde los consumidores separan el material reciclable en bolsas específicamente identificadas.

Clasificación y separación

Se deben clasificar los residuos plásticos y separar de manera manual o automática para asegurarse que todos los contaminantes se eliminen del flujo de entrada del proceso de reciclaje.

Es necesario que cada pieza individual del residuo plástico se separe de acuerdo con su composición y tipo. En plantas de selección de materiales, una cinta transportadora eleva las bolsas de residuos donde se abren y se separan los mismos plásticos de manera manual o automática en sus diferentes familias, principalmente en: 1) PET: botellas de agua y refrescos, 2) PEAD: envases de detergentes y contenedores de alimentos, 3) Película plástica: bolsas y envolturas y 4) Plástico mixto: envases de alimentos (como bandejas, botes de yogurt, etc.), entre otros residuos (Cicloplast, 1996).

En un principio, para recuperar los residuos plásticos, se deben separar de otros tipos de residuos. Los polvos o partículas finas se eliminan en un cilindro rotatorio (trommel) u otro tipo de criba; los metales por medios magnéticos y el papel, dada su ligereza, empleando aire. Una vez obtenida una mezcla que solo contiene plásticos, ésta puede separarse por distintos métodos, como se muestra a continuación (Vázquez Morillas et al., 2016; Leblanc, 2019):

- Separación manual. Utilizada por su alta eficiencia, pero con limitaciones dependiendo del volumen de residuos a separar.
- Separación por densidad. Utilizando tanques con líquidos para aprovechar las diferentes densidades de cada tipo de plástico. Si se combina con un proceso mecánico, como hidrociclones, su eficiencia aumenta.

- Separación por medios ópticos. Basados en la diferente estructura química de los plásticos, se utilizan sensores que transfieren señales a una computadora que activa una respuesta a esa señal de ondas infrarrojas, UV o rayos X, separando los plásticos por medio de disparos de aire y elevadores neumáticos, detectores confiables y software sofisticado de decisión y reconocimiento, que mejoran la productividad y precisión de la clasificación automática.
- Separación triboeléctrica. Genera cargas eléctricas en los plásticos por frotación y se separan por medios magnéticos.

Triturado

Las pacas de plástico separado y clasificado se envían a molinos de trituración para formar trozos pequeños que alimenten la siguiente etapa del proceso. Estos trozos se denominan “hojuelas”, también hay residuos de menor tamaño que se les denomina “finos”.

Lavado

Las piezas trituradas se someten a varias etapas de lavado para remover impurezas, como etiquetas y adhesivos. Esto mejorará la calidad del producto final. En ocasiones utilizan agentes químicos que después son enjuagados para evitar que sus remanentes lleguen a la siguiente etapa del proceso.

Fundición o extrusión

Al obtener las hojuelas limpias, éstas se secan, se funden y extrusionan formando filamentos largos homogéneos. Para distinguir los materiales, a veces se agregan colorantes a cada lote. La temperatura aplicada durante el proceso incrementa la calidad de las hojuelas y los finos.

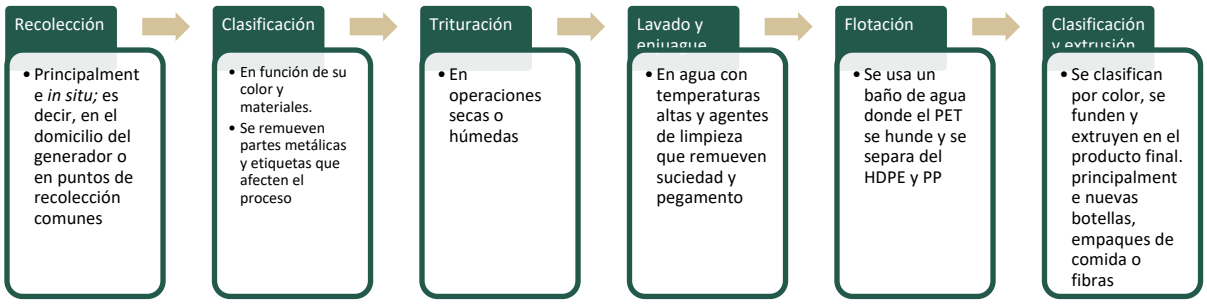
Pelletizado

En función del destino que se le dé al producto final, se forman trozos llamados “granzas” o “pellets” que se almacenan en sacos para su distribución y uso como materia prima disponible para nuevas aplicaciones, como tuberías, piezas industriales, bolsas de basura, entre otros (Cicloplast, 1996).

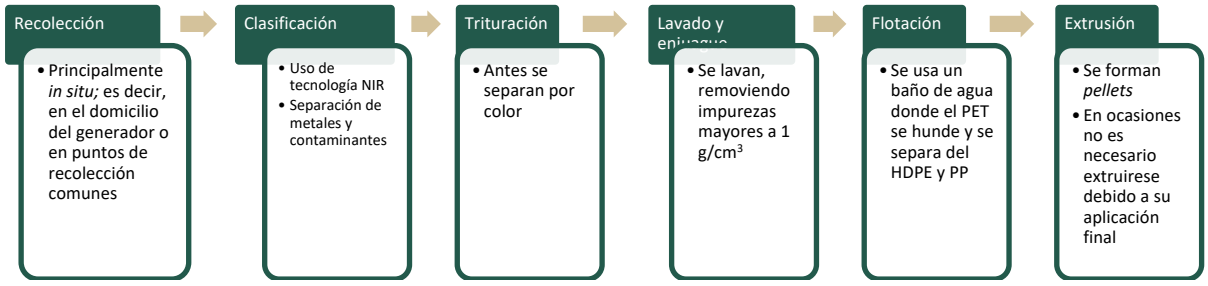
3.5.3. Ejemplos de procesos de reciclaje de residuos plásticos

En esta sección se mostrarán, a manera de secuencias, las etapas del proceso de reciclaje de diferentes tipos de plásticos.

a) Botellas de PET



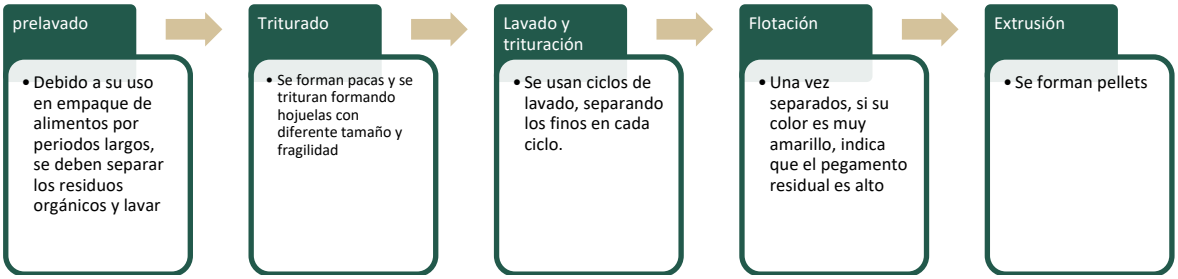
b) Botellas de HDPE



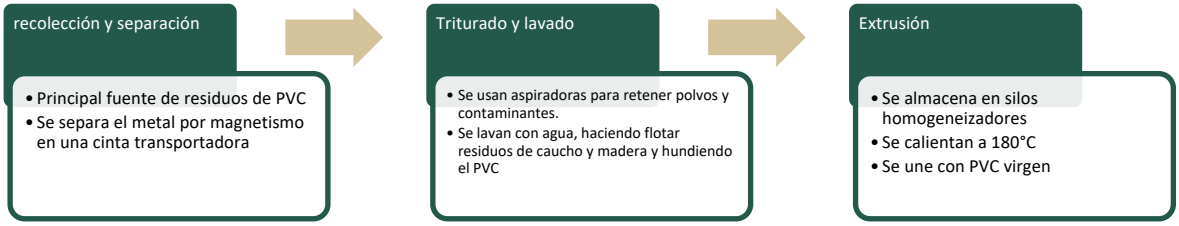
c) Películas de LDPE



d) Contenedores de PET



e) Ventanas de PVC



3.6. Dificultades para el reciclaje de los residuos plásticos

El reciclaje es la transformación de los residuos a través de distintos procesos, que permiten restituir su valor económico y evitar así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas, sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos. Aunque el reciclaje se considera generalmente como una forma de manejo de residuos, en realidad constituye una actividad que permite modificar todo el ciclo de vida de los productos, pues al reciclar un residuo se disminuye la necesidad de extraer y procesar nuevas materias primas y se evita el agotamiento de los recursos naturales (Vázquez Morillas et al., 2020).

Por los motivos anteriores, queda claro que fomentar el reciclaje no sólo es una medida conveniente, sino urgente para reducir los impactos ambientales de los residuos plásticos; sin embargo, para ello, es necesario considerar las dificultades para poder llevar a cabo esta actividad, así como las condiciones que se requieren para que sea un proceso eficaz.

3.6.1. Dificultades técnicas

Existe una variedad de más de 3000 diferentes productos plásticos en el mercado y, aunque el 90% de los plásticos usados en los hogares pertenece a las categorías PP, PE, PS y PVC, éstos utilizan diferentes aditivos (suavizantes, colores, estabilizadores o ablandadores) que cambian sus propiedades y, por lo tanto, no es posible su reciclaje completo. Es por ello que siempre se obtiene un producto de menor calidad en comparación con el producto original (proceso conocido como downcycling) y por lo que no es posible repetir muchas veces el reciclaje del plástico (Municipio de Loja, 2003).

Las principales dificultades técnicas se describen a continuación:

1. Bajos niveles de clasificación. El reciclaje por sí mismo requiere de una red de recolección y clasificación previa y un buen manejo de los residuos. Por esto, se han desarrollado técnicas avanzadas para mejorar la clasificación, ya que de ello depende la calidad del producto final; sin embargo, aún no es suficiente pues el porcentaje de recolección en México es del 84% (SEMARNAT/INECC, 2020) y la cantidad de residuos separados en la fuente de generación es muy baja. Aunado a ello, la presencia de plásticos coloreados puede significar otra dificultad, aun tratándose de plásticos de la misma resina. Las películas plásticas o films son típicamente dejados de lado debido a sus elevados niveles de contaminación, así como por su baja relación entre peso y volumen en comparación con las botellas de PET (ACRR, 2000).

2. Contaminación por otros polímeros y aditivos. En el caso del PVC y el PET, el reciclaje se dificulta debido a que sus pesos específicos son muy similares y, por tanto, no pueden ser separados mediante los procesos físicos comunes, como la flotación, exigiendo medios más sofisticados. El PVC no es estable a la temperatura de procesado del PET (aproximadamente 280 °C), dando lugar a la problemática emisión de ácido clorhídrico (deshidrocloruración). Por lo anterior, muchos compradores de PET reciclado exigen la total ausencia de PVC, ya que la presencia de cantidades mínimas (en partes por millón) pueden provocar serios problemas de coloración del PET durante la fase de secado y resultar en la formación de manchas negras durante la extrusión. Sin embargo, existen aplicaciones en las que resulta tolerable la presencia de pequeñas cantidades de PVC (Lazzari y López-Quintela, 2005).

De igual manera, debido a que el PEAD y el PP presentan pesos específicos muy similares, son virtualmente inseparables mediante las técnicas físicas más comunes y también exigen métodos de separación más sofisticados, como aquellos basados en técnicas espectroscópicas, con mediciones en línea, especialmente en el intervalo del infrarrojo cercano. La presencia de pequeñas cantidades de contaminación por PP puede ocasionar problemas durante la extrusión, debido a la formación de bloques no fundidos, así como disminución de la resistencia del PEAD a las bajas temperaturas (Lazzari y López-Quintela, 2005).

Por otro lado, aunque los envases de PEAD y PET son lavados para retirar las etiquetas de papel, pueden quedar pequeñas cantidades residuales de fibra de celulosa y ocasionar graves problemas, como la formación de cavidades y defectos superficiales en la fase posterior de soplado de la masa fundida.

El reciclaje de los envases multicapa también es complicado debido a la presencia de poliamidas y EVOH (copolímero de etileno-vil alcohol), incompatible con las fases de reciclaje de PE y PP.

Asimismo, algunos aditivos, como los retardantes de flama, pueden interferir en el reciclaje cuaternario, debido a que pueden modificar el tipo de productos que se forman durante la incineración de los polímeros. Por ejemplo, en presencia de retardantes de flama fosfónicos, la combustión conlleva la formación de anilina, un compuesto parcialmente tóxico. También algunos de los pigmentos utilizados en las manufacturas de PE, basados en óxidos e hidróxidos de hierro, funcionan como prooxidantes; o los pigmentos verdes constituidos de óxido de cromo (Cr_2O_3) pueden catalizar la termo-oxidación del PEAD (Lazzari y López-Quintela, 2005).

3. Contaminación de residuos plásticos. Muchos envases de plásticos son usados para comercializar y transportar sustancias químicas, como grasas, aceites, fármacos, plaguicidas, detergentes, lubricantes y combustibles. Por lo tanto, por tratarse de sustancias peligrosas, los envases resultantes también son RP que no son susceptibles de reciclaje y deben ser manejados de acuerdo con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

De acuerdo con una investigación sobre el efecto de los contaminantes en envases PEAD, se encontró que los contaminantes generalmente son absorbidos por las paredes del envase y no son totalmente eliminados mediante el lavado. Los principales contaminantes encontrados en el granulado de reciclaje fueron los hidrocarburos (1-2%), aceites (0.7%) y cloro (100-500 ppm), además de los olores desagradables inherentes (Hope et al., 1992).

4. Contaminación durante el proceso. En el proceso de reciclaje pueden presentarse diversos tipos de contaminación, como los fragmentos o residuos metálicos provenientes de las maquinarias de procesado, y ocasionar fallas en los equipos o una disminución de la estabilidad del polímero. Otro tipo de contaminación son las “manchas negras” que son pequeñas zonas de polímero degradado a causa de un tiempo excesivo de residencia en el extrusor y que propician una apariencia desagradable.

Finalmente, también existen obstáculos ambientales como la presencia de tierra en los plásticos o exceso de humedad. En el caso del PET, la humedad puede inducir la hidrólisis de este polímero durante el reprocesado, con una rápida disminución del peso molecular y, por lo tanto, de la viscosidad, lo que imposibilitaría la obtención de botellas de calidad aceptable (Lazzari y López-Quintela, 2005).

3.6.2. Dificultades políticas, económicas y sociales

Los mercados de reciclaje de plástico y su importancia como actividad económica son un fenómeno relativamente reciente, en especial en el caso del PET. Debe tenerse en cuenta que antes del año 2000 sólo se hacían escamas con los residuos industriales de la empresa Coca Cola®, a partir de los envases retornables que habían finalizado su vida útil. Además, gran parte de las empresas que hoy se dedican al reciclaje de residuos de plástico posconsumo no son muy antiguas; las primeras se fundaron a inicios de los años noventa y se dedicaban en general al procesamiento artesanal de películas de PE para fabricación de baldes, tuberías o las mismas bolsas de residuos (Barrebechea et al., 2003).
Un estudio llevado a cabo por investigadores de la Universidad Federal de Río de Janeiro y la Universidad de California reveló las dificultades del reciclaje de plásticos. De acuerdo con los autores, una de las principales barreras para esta actividad es el pago de todos sus impuestos, sin ningún subsidio, sumado a los precarios programas de separación selectiva y los altos costos de electricidad.

La falta de incentivos fiscales fomenta el trabajo informal, sin condiciones de seguridad para los recolectores, dando inestabilidad a la industria. Adicionalmente, se identificaron otros problemas como la falta de mercado para productos reciclados, el escaso financiamiento para la compra de maquinaria, los altos costos del transporte y los rigurosos requisitos para la obtención de permisos ambientales (MMA, 2014).

Los siguientes son algunos obstáculos que es necesario superar para desarrollar adecuadamente los mercados secundarios de plástico:

- Los plásticos primarios y reciclados se tratan como sustitutos, sin que haya una demanda separada de cada uno de ellos. Esto expone a los reciclados a las tendencias en los mercados de los primarios.
- El precio de los plásticos reciclados es impulsado por el precio de los plásticos primarios, el cual a su vez se rige por el precio del petróleo, más que por los costos de recolección, clasificación y procesamiento de los residuos plásticos. Por consiguiente, los productores de plástico reciclado tienen pocas opciones para ajustar sus costos al presentarse una desaceleración.
- El sector de reciclaje de plástico es de menor tamaño y más fragmentado que la industria primaria, lo cual lo pone en desventaja en términos de economías de escala y de su capacidad de absorber perturbaciones de los mercados, como las fluctuaciones en los precios del petróleo.
- El mercado de los residuos plásticos está concentrado en unos cuantos países. Esto provoca que los mercados de los plásticos reciclados no se ajusten con la rapidez debida a choques en la demanda, como las restricciones a las importaciones impuestas en fecha reciente por China, país que previamente representaba dos tercios de las importaciones de residuos de plástico.
- Hay dificultades técnicas relacionadas con la amplia gama de polímeros y aditivos utilizados, los importantes niveles de contaminación de los residuos plásticos posconsumo, así como las dificultades prácticas para recolectar estos residuos, sobre todo en países de ingresos bajos (OCDE, 2018).
- Se requiere una mayor participación de la sociedad civil, particularmente para disminuir la cantidad de residuos plásticos generados y su adecuada clasificación. Asimismo, la sociedad deberá sensibilizarse y consumir productos hechos con materiales reciclados y evitar el consumo de materiales derivados de materias primas virgenes y no renovables.

En cuestiones económicas, se ha identificado que los productos reciclados son mas caros comparados con aquellos de materias vírgenes, por lo cual es más difícil que la población acceda a éstos. Por tanto, se requieren incentivos gubernamentales que permitan disminuir los costos y el desarrollo de la industria.

4. TECNOLOGÍAS DE RECICLAJE DE PLÁSTICOS EXISTENTES EN EL MUNDO

4.1. En el diseño y la composición de los plásticos

En el contexto actual es esencial que los productos de plástico se diseñen de una manera que se garantice tanto su funcionalidad como la gestión adecuada de sus residuos al final de su vida útil, lo cual promueve que estos residuos ya no lleguen a sitios de disposición final o sean incinerados. Mejorar la “reciclabilidad” de estos residuos es también una herramienta indispensable para aumentar las tasas de reciclaje en México y en el mundo.

El diseño de los plásticos desempeña también un papel relevante en el posible uso secundario de un producto. Por ejemplo, los plásticos termoestables (a diferencia de muchos termoplásticos) no son reciclables utilizando los métodos mecánicos convencionales; por ello, algunos productos están destinados a no ser reciclados. Sin embargo, varias de sus propiedades, como la dureza y la resistencia, podrían hacerlos muy adecuados para aplicaciones específicas de reutilización (Watkins et al., 2019).

En este mismo sentido, la calidad de los materiales reciclados define si pueden o no ser un sustituto adecuado de los insumos vírgenes para un producto determinado. La composición química de un plástico, incluidos aspectos como la longitud de los polímeros y los tipos de aditivos que contiene, son determinantes clave de sus propiedades. Al igual que otros materiales no permanentes, la mayoría de los plásticos no se pueden reciclar indefinidamente, ya que el material se degrada con los ciclos repetidos. Esto resulta a menudo en un reciclaje denominado en inglés 'downcycling'; es decir, que la calidad del material se va mermando gradualmente y sólo permite usos de menor valor (Watkins et al., 2019).

Ante este panorama, es claro que los diseñadores de productos plásticos tienen la compleja tarea de encontrar un balance entre la sostenibilidad de un producto y otras funciones necesarias, incluida su seguridad y sus costos. Esto se hace aún más complejo si consideramos que, en muchos casos, los factores que determinan la sostenibilidad, incluidas las materias primas, las emisiones y la toxicidad, difieren significativamente entre los diferentes tipos de plásticos (Watkins et al., 2019).

Si desde su diseño no se considera que la estructura y la composición de los residuos sea compatible con su reciclaje se pueden presentar numerosos problemas durante el proceso. Estos pueden variar desde obstrucciones y daños en los equipos hasta grandes pérdidas de materiales y una degradación de los materiales obtenidos (por decoloración, pérdida de desempeño, degradación de sus propiedades químicas, impacto en su aspecto, etc.). En el caso, por ejemplo, del reciclaje de películas plásticas, los materiales que pueden afectarlo son los materiales biodegradables (como el ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés)), compostables y oxodegradables (PRE, 2019).

Los aditivos que se usan en los plásticos (ya sean tóxicos o no tóxicos), como los plastificantes, disolventes o retardantes de flama (que representan el 75% del total) también pueden interrumpir el reciclaje al contaminar el flujo del material, haciendo que el proceso y la producción de plástico secundario de alta calidad sea difícil o imposible. Un ejemplo es el uso de PET opaco, el cual causa problemas a los recicladores porque es difícil de distinguir de otros plásticos (como el PET transparente y el HDPE); pero a diferencia de éstos, es poco reciclable debido a su recubrimiento opacificador. Asegurar la calidad de los plásticos reciclados es un desafío clave para garantizar la sostenibilidad del material desde una perspectiva química (Watkins et al., 2019).

Con respecto a los aditivos en los plásticos, otro aspecto importante a considerar es su toxicidad, la cual también es posible reducir en el diseño de estos materiales si se eligen sustancias que no produzcan daños significativos en la salud humana y el medio ambiente. En este sentido, Zimmerman y colaboradores (2019) evaluaron la toxicidad de productos plásticos de uso común fabricados con ocho de los principales polímeros, utilizando bioensayos in vitro y espectrometría de masas de alta resolución para identificar las sustancias contenidas en estos productos. La mayoría (74%) de los 34 extractos plásticos estudiados contenían sustancias químicas que desencadenan al menos una respuesta tóxica, como toxicidad basal (62%), estrés oxidativo (41%), citotoxicidad (32%), estrogenicidad (12%) y antiandrogenicidad (27%). En total, detectaron 1411 firmas químicas, correspondientes tentativamente a 260 sustancias diferentes, incluidos monómeros, aditivos y sustancias añadidas de forma no intencional. Los extractos de PVC y poliuretano (PUR) indujeron la mayor toxicidad, mientras que el PET y el HDPE no causaron toxicidad o la toxicidad fue baja. Además, se detectó una alta toxicidad basal en todos los "bioplásticos" PLA. Las toxicidades de LDPE, PS y PP variaron.

Este estudio demuestra que los plásticos de consumo común contienen compuestos que son tóxicos, pero que permanecen en buena parte sin identificar.

Por lo anterior, las nuevas investigaciones desde la perspectiva de la composición química se están enfocando en el desarrollo de materiales plásticos con propiedades que permitan reciclarlos más fácilmente. Muchos son los ejemplos de este desarrollo, como lo demuestran los casos que se describen a continuación:

- Para poder reciclar químicamente los plásticos termoestables que se usan para fabricar las carcasas de las computadoras y para aislar sus circuitos electrónicos, se ha creado la polihexahidrotriazina, la cual puede convertirse en sus monómeros originales con un catalizador ácido se hidrolizan de manera selectiva los enlaces del polímero (García et al., 2014).
- Un campo de investigación para desarrollar nuevos termoplásticos es el de los polímeros autodestructibles, también llamados autoinmolables, los cuales se caracterizan por ser inherentemente inestables, pero presentan en su molécula una “tapa” terminal que impide su despolimerización. Cuando esta tapa es activada por la luz o una sustancia específica, se libera y, con ello, desencadena la despolimerización (Figura 20). Un ejemplo de estos materiales es poliglicoxilato de etilo que regresa a su monómero (glioxilato de etilo) cuando la tapa del polímero se elimina mediante luz, peróxido de hidrógeno o un ácido suave. En teoría, ese es un sistema ideal para un polímero reciclable (Fan et al., 2014).
- Se han desarrollado plásticos termoestables reciclables a base de compuestos químicos renovables para reemplazar parte o la totalidad del bisfenol A (BPA), el cual se utiliza como precursor epóxico en muchas resinas. Las alternativas de BPA incluyen al aceite de soya epoxilado, al ácido salicílico y a otros derivados de plantas. Las características en estas moléculas de origen biológico son grupos funcionales apropiados para la conversión a epóxidos y anillos aromáticos que proporcionan resistencia e imitan la estructura química del BPA (Yang et al., 2016).
- Mediante procesos catalíticos suaves es posible romper los enlaces éster en las resinas epóxicas curadas con amina, un tipo de plástico termoestable que es común en materiales compuestos. Estos procesos permiten disolver las resinas para obtener fibra de carbono y oligómeros no reticulados a partir de desechos provenientes de fabricantes de aviones, utilizando un catalizador de etanol-$ZnCl_2$ a 250

°C. Mediante microscopía electrónica de barrido se ha demostrado que las fibras de carbono obtenidas seguían siendo lisas, lo que indica que la mayoría no sufrió daños en el proceso (Liu et al., 2017).

- Los anillos de boroxina se han utilizado para producir plásticos termoestables reciclables. Estos anillos se forman a través de reacciones reversibles entre grupos de ácido borónico en los monómeros, lo cual permite que el material termoestable se reforme y se vuelva a formar. El polímero así producido se descompone en sus monómeros en agua hirviendo (Ogden y Guan, 2018).
- Otra innovación química para sintetizar polímeros totalmente reciclables, con propiedades equivalentes a los plásticos que se encuentran actualmente en el mercado, deriva las reacciones de "polimerización de apertura de anillo", las cuales han resultado ser muy efectivas para fabricar polímeros de alto peso molecular en un corto período. De manera reciente se reportó la polimerización de un monómero enrollado de dos anillos llamado 3,4-T6GBL en un polímero lineal o cíclico, dependiendo del catalizador metálico utilizado. Mediante calor y un catalizador de $ZnCl_2$, este polímero puede regresar a 3,4-T6GBL, un proceso que se cree puede repetirse infinitamente. El diseño del monómero es la clave para lograr polímeros químicamente reciclables con alta selectividad de despolimerización y propiedades útiles. Asegurar que su estructura central pueda reciclarse químicamente es el primer paso; luego se añaden grupos funcionales que confieren las propiedades físicas deseables. Estos polímeros parecen la mejor solución al problema de los residuos plásticos, ya que no sólo permitirían obtener la botella de plástico infinitamente reciclable, sino también evitan problemas de pérdida de calidad del material secundario (Zhu et al., 2018).
- El nuevo polímero llamado polidicetoamina o PDK, por sus siglas en inglés, tiene una composición que simula piezas de "Lego"; es decir, componentes moleculares que puedan ser desensamblados y re-ensamblados en nuevas formas, texturas y colores, sin perder calidad o desempeño. Además, durante el proceso de reciclaje, el PDK, a diferencia de otros polímeros, puede desprenderse de cualquier aditivo que se haya añadido al plástico para mejorar sus propiedades, incluidos estabilizadores, plastificantes, colorantes, etc. (WMW, 2019b).

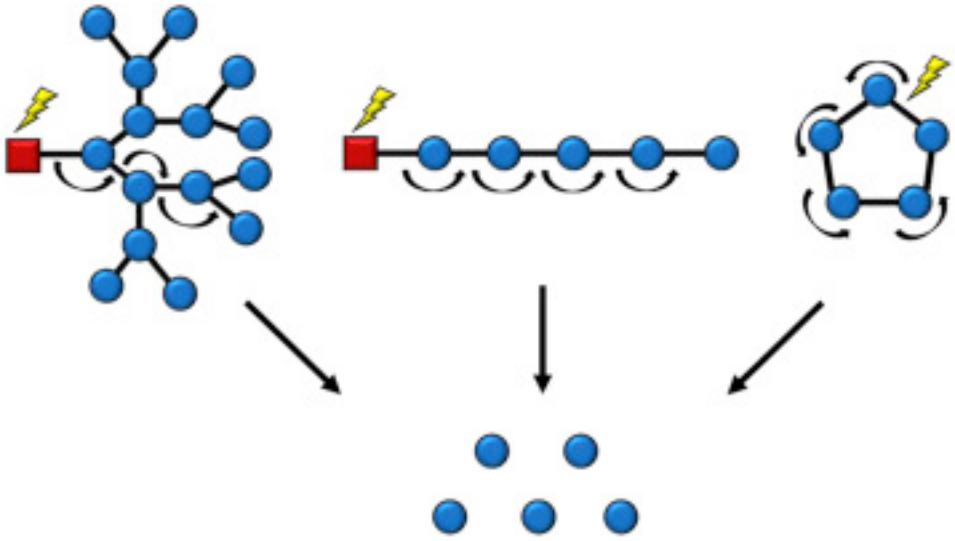


Figura 20. Esquema de la despolimerización, activada por la luz, de plástico autodestructible. Fuente: Sirianni y Gilles 2020.

Desafortunadamente, los plásticos intrínsecamente reciclables están aún lejos de la realidad comercial. Además de los obstáculos técnicos, también existen los económicos. Generalmente, para los fabricantes es más fácil usar un material probado que uno nuevo. Aunque la resistencia para la adopción de nuevos polímeros es alta, no es insuperable. Así que la investigación para encontrar soluciones químicas al problema de los residuos plásticos se sigue alentando.

Para diversos productos, las mejoras en su diseño para favorecer su reciclaje no tienen que ver tanto con la composición del polímero plástico que se use o con los aditivos que se le añadan, sino con otros materiales con los cuales se combinan. Tal es el caso, por ejemplo, de los vasos desechables de papel para bebidas calientes, a los cuales se les adhiere una película plástica. Para poder reciclar estos vasos, es necesario que en su diseño se considere un tipo de película que se desprenda con facilidad, para posteriormente procesar el papel y el plástico por separado (HCEAC, 2018).

Asimismo, las mejoras en el diseño no sólo deben abarcar a los propios productos, sino también a los materiales plásticos que se usan para el empaque y embalaje. En el curso del último medio siglo, los envases y envoltura representan la mayoría de las aplicaciones que se les han dado a los plásticos; acumulativamente, alrededor de 42% de todos los plásticos no fibrosos se usan para embalaje (Watkins et al., 2019). Tal es el caso, por ejemplo, de envases que son difíciles de vaciar, que por lo tanto

guardan cantidades importantes de remanentes del producto que se convierten en contaminación complicada de eliminar para lograr un reciclaje óptimo (PRE, 2019).

Además de la investigación sobre nuevos materiales, otra de las herramientas que actualmente se usa para determinar la pertinencia y sustentabilidad de los nuevos polímeros que se están desarrollando son los análisis de ciclo de vida (ACV). A través de ellos se pueden estudiar los impactos ambientales esperados y definir si los nuevos plásticos tienen un mejor desempeño ambiental que los plásticos convencionales.

4.2. Para la recolección y el acopio

Cuando los residuos se recolectan de manera separada es posible aumentar la cantidad y la calidad de los materiales reciclables. Si bien lo mejor es que la separación se lleve a cabo antes de la recolección; es decir, en la propia fuente donde se generan, esto no siempre ha sido la práctica común. Por ello se han desarrollado varias tecnologías para la clasificación y posterior separación de los residuos que se recolectan mezclados. El proceso de clasificación se explicará en la sección 4.3.

De manera general, la práctica común en el mundo es que los residuos plásticos se recojan a través de una gama de sistemas que cubren, por un lado, el uso industrial-comercial y, por otro, los usuarios domésticos. Los esquemas de recolección difieren según la fuente, la cual determina a su vez los procesos de clasificación y pretratamiento que se deben aplicar. Por lo tanto, dependiendo del flujo de residuos considerado y del esquema de recolección, su clasificación y separación es más o menos difícil y da como resultado variaciones de los costos de reprocesamiento y de la calidad del material recuperado (Villanueva y Elder, 2014).

Para los residuos plásticos industriales, lo común es que se generen como una corriente altamente homogénea de elevado valor agregado y que se contrate un servicio de especializado (muchas veces del sector privado) para su recolección. Este sería el caso, por ejemplo, de la mayoría de los plásticos especiales (como las poliamidas, PC, Tereftallato de polibutileno (Polybutylene terephthalate – PBT) o polisulfona (PSU)) que se recolectan directamente en las plantas industriales y que sólo están marginalmente presentes en los residuos plásticos municipales, en comparación con los polímeros comunes, como PP, HDPE, PS, PVC y LDPE (Villanueva y Elder, 2014).

Por otra parte, los plásticos de los usuarios domésticos pueden ser recuperados por varios sistemas, dependiendo de las condiciones nacionales y locales. En general, se pueden recolectar de tres maneras principales (Villanueva y Elder, 2014):

- Recolección de monomateriales. El plástico de desecho (se recolecta por separado de otros tipos de materiales reciclables (como metales o vidrio). Estos residuos pueden venir mezclados o en corrientes específicas (por ejemplo, botellas de PET).
- Recolección de múltiples materiales. El plástico de desecho se recolecta en la corriente de residuos inorgánicos; es decir, junto con otros reciclables secos, como metales o vidrio, pero por separado de los componentes restantes de los RSU como los alimentos.
- Recolección mixta de RSU. El plástico de desecho se recolecta junto con todos los demás residuos. Es posible la separación posterior de los reciclables secos, como metales, plásticos y vidrio, pero con frecuencia los reciclables resultantes están altamente contaminados y requieren un tratamiento intensivo adicional.

Tanto la colección monomaterial como multimaterial puede suceder de dos maneras (Villanueva y Elder, 2014):

- Recolección casa por casa. Ésta requiere que los ciudadanos separen los materiales reciclables de los componentes restantes de los residuos domésticos, colocándolos en contenedores de basura específicos. Las bolsas se recogen en cada hogar. Típicamente, del 40 al 60% de los reciclables específicos se devuelven a través de este tipo de recolección. Este tipo de esquema de recolección resulta en un bajo grado de contaminación del material que será reciclado.
- Sitios de entrega o acopio. En este caso, se requieren que los ciudadanos recojan sus materiales reciclables y luego los lleven a lugares específicos. Por lo general, alrededor del 10 al 15% de los reciclables se recuperan a través de este método. La recolección por devolución puede implicar un alto nivel de contaminación (10% - 30%). Algunos polímeros como el PVC de uso más amplio en exteriores y materiales de construcción se recogen principalmente en instalaciones de entrega.

A pesar de la existencia de estos sistemas de recolección selectiva, muchos residuos no llegan a ser reciclados, ya que se mezclan en los contenedores de basura y luego se incineran o se llevan a los rellenos sanitarios o sitios de disposición final.

Por ejemplo, en Francia, solo una de cada dos botellas llega al contenedor de reciclaje de plástico (Villanueva y Elder, 2014).

Los monomateriales también se pueden recuperar a través de sistemas de recarga o depósito. Para ciertas corrientes de plásticos se han establecido sitios específicos para entregarlos; éstos pueden ser contenedores especiales, colocados en espacios públicos o privados, o locales que funcionan como centros de acopio. En algunas tiendas y supermercados también se han colocado máquinas automatizadas que reciben, por ejemplo, las botellas de PET a cambio de algunas monedas.

Actualmente, los sistemas depósito/reembolso se usan típicamente para la recolección de botellas de bebidas. En ellos, las botellas se venden con el cargo de un depósito reembolsable, que se regresa al usuario al devolver la botella vacía después de su uso. Dichos sistemas existen en varios países europeos, en algunos casos para botellas de PET retornables y de un solo uso. Los programas de depósito de PET pueden lograr tasas de retorno muy altas (90%) con niveles muy bajos de contaminación del residuo posconsumo, lo que resulta en valores de mercado más altos.

En la mayoría de los países de la Unión Europea, la recolección selectiva de envases de plástico y sistemas de depósito se combinan con la existencia de sistemas de puntos verdes (green dots). Estos sistemas operan en nombre de los fabricantes de productos que utilizan envases de plástico, que, según la legislación actual, deben hacerse responsables de la recolección de sus envases. Según la Directiva de envases 94/62/CE, si una empresa no se une al esquema de puntos verdes, debe recolectar por su cuenta los envases reciclables; aunque esto es casi siempre imposible para los productos en masa y sólo viable para los fabricantes de bajo volumen con una red de puntos de acopio. Los sistemas de puntos verdes les cobran a los fabricantes una tarifa por la recolección, que los productores normalmente transfieren a los consumidores como parte del precio del producto. Los logotipos del sistema de puntos verdes están impresos en los envases cuyo fabricante ha pagado la tarifa para ser parte del sistema. De esta forma, los consumidores que ven el logotipo pueden reconocer los residuos que son reciclables y el contenedor apropiado donde deben colocarlos. Una vez que los residuos son recolectados, los sistemas de puntos verdes, en muchos casos, se convierte en sus propietarios y los venden a los recicladores En otros casos, estos sistemas, sin ser dueños de los residuos, los transfieren a los recicladores, y sólo coordinan las operaciones. (Villanueva y Elder, 2014).

Muchos factores determinan el desempeño de los sistemas de recolección y la eficacia con que los residuos son recogidos; entre ellos, el tipo de residuos aceptados, el uso de contenedores o de costales, la entrega de residuos separados o mezclados, y la frecuencia de la recolección (semanal o quincenal). Otros factores demográficos también son importantes, como el nivel de ingresos, y el número y la edad de los miembros de los hogares. Sin embargo y a pesar de varios estudios que se han realizado, al parecer no existen factores obvios que expliquen por qué unos esquemas funcionan bien en unos lugares y en otros no (Plastic Zero, 2012).

La eficiencia de los sistemas de recolección depende además de las motivaciones individuales para participar en la separación de los residuos. Los motores para esta participación están relacionados con los valores ambientales, así como de factores psicológicos y situacionales, como la percepción esfuerzo/recompensa, los incentivos económicos, la información recibida y el contexto social (Plastic Zero, 2012).

En México, para la recolección de los RSU y algunos RME, existen ya algunos esquemas para su separación desde la fuente, los cuales consisten básicamente en segregar los residuos orgánicos de los inorgánicos (separación primaria). Posteriormente, en las plantas de tratamiento se lleva a cabo una clasificación secundaría en la que los plásticos se seleccionan a partir de la corriente de residuos inorgánicos (SEMARNAT, 2015).

4.3. Para la compactación

Entre los factores que limitan el reciclaje de los residuos plásticos se encuentra su transporte, ya que se trata de materiales ligeros, pero que en muchos casos ocupan grandes volúmenes. Por ello, su compactación o empacado mediante equipos o maquinas con alta capacidad de prensado, resulta una medida muy recomendable, en particular en sistemas o empresas que requieren movilizar y almacenar gran cantidad de residuos (WMW, 2019a).

En Europa, diversas empresas se han especializado en la fabricación de equipos innovadores para lograr una alta eficiencia en este proceso de empacado. La mayoría de ellos logra reducir el volumen de los desechos a menos del 20% del tamaño original y, en muchos casos, se diseñan y se construyen para satisfacer las necesidades específicas de cada cliente.

Varios de estos usan tecnologías de compactación hidráulica y trituración (Lundberg Tech, 2020; Global Energy, 2020).

De esta manera, existen en el mercado compactadores para residuos ligeros, de media y de alta densidad; en modalidades estacionarias y transportables, que se pueden adaptar a las condiciones particulares de cada sitio y las preferencias individuales de manipulación y carga, tomando en consideración las características del lugar, el espacio y el presupuesto disponible, así como y el tipo de residuos que se procesarán. Además de liberar espacio, estos equipos ayudan a minimizar los recursos humanos necesarios para manejar los residuos, así como a reducir el número de viajes de traslado y el costo de la recolección (Waste Tech, 2020; Global Energy, 2020).

En general, los compactadores se pueden dividir en tres categorías: a) receptáculos de compactación automática (ACR), b) compactadores de basura regulares o interiores y c) compactadores de basura al aire libre. Los ACR se utilizan principalmente en áreas de comida rápida, incluidos centros comerciales, aeropuertos y centrales de alimentos; en otras palabras, donde las personas depositan sus propios residuos en los contenedores. Estos tipos de equipos están especialmente diseñados para el propósito de compactación automática con entrada de cada residuo. Por su parte, los que se utilizan regularmente o en interiores se emplean en almacenes industriales, hospitales y cocinas de restaurantes, aceptan una amplia variedad de residuos y se utilizan mejor en los puntos donde la tasa de generación es mayor. Finalmente, los compactadores de basura al aire libre generalmente se usan en áreas grandes o en áreas al aire libre como plazas, parques, oficinas, tiendas departamentales, etc. Pueden ser móviles y estáticos. Los compactadores para exteriores tienen muchas ventajas debido a su menor tiempo de ciclo, mecanismo de alimentación y facilidad de operación (Baidya et al., 2016).

Entre los diferentes equipos que se pueden encontrar en el mercado, están los siguientes (Global Energy, 2020):

- Compactadores verticales. También conocidos como VIP, son ideales para cuando se generan grandes cantidades de residuos, como en el caso de plazas comerciales, asilos de ancianos, restaurantes y locales de comida rápida, hospitales, etc. Se usan comúnmente cuando el espacio para la compactación y la recolección de desechos son limitados.

Estos compactadores tienen un promedio de 4.5 a 6 m3 y se reparan con un camión de carga frontal.

- Compactadores para departamentos. Se trata de equipos utilizados en complejos departamentos y edificios de gran altura. Por lo general, se colocan en el piso inferior con conductos de basura que entregan los residuos de los pisos superiores. Luego, los desechos se compactan y recogen mediante camiones de carga frontal o de carga trasera.
- Compactadores de rodillos. Se dividen en dos tipos: el estacionario o separable y el compactador autocontenido. El primero es ideal para RSU y residuos reciclables y se usa comúnmente para grandes volúmenes de materiales secos. Estos compactadores están montados en el suelo y se conectan a un contenedor receptor extraíble de aproximadamente 30 m3, aunque también hay compactadores más pequeños disponibles. Una vez que este contenedor se llena es recogido por un camión. Por su parte, el compactador autónomo es ideal para grandes volúmenes de desechos húmedos. Los compactadores autónomos, al igual que los compactadores estacionarios o desprendibles, son atendidos por un camión; sin embargo, no son compactadores montados en el suelo. El compactador autosuficiente y el contenedor de recolección son una unidad. Después de la recolección, no solo se recoge y se lleva el contenedor receptor, sino también el compactador. Una vez que los desechos se han eliminado, el contenedor se devuelve y se vuelve a conectar.

Los equipos anteriores pueden ser de uso residencial o comercial. También hay compactadores que funcionan con paneles solares que son ideales para las esquinas de las calles en zonas urbanas (Global Energy, 2020).

4.4. Para la clasificación

Cuando los residuos se recolectan mezclados con otros materiales valorizables o con los RSU se requiere de un proceso de clasificación para separar los plásticos. Este proceso generalmente se realiza en plantas de separación, que luego venden los materiales plásticos clasificados a diferentes recicladores dependiendo de las propiedades y requisitos deseados (Villanueva y Elder, 2014).

La clasificación de los residuos plásticos implica no solo separar el plástico de otros materiales, sino también separarlos en los diferentes tipos o colores de los polímeros que los componen.

Esto es importante debido a que, en la mayoría de los casos, se requiere de una corriente homogénea de un solo tipo de polímero o, a lo mucho, de dos tipos compatibles para su reciclaje. La clasificación ineficiente que conduce a una corriente heterogénea de diferentes polímeros puede dar lugar a una mezcla difícil o imposible de reciclar desde el punto de vista técnico o económico. Además, en algunos casos, la mezcla de algunos polímeros puede incluso dar lugar a riesgos para la seguridad o la salud; como, por ejemplo, cuando el PVC se mezcla con el PET y, para su reciclaje, se someten a una etapa de fundición a más de 200 °C se liberan gases clorados tóxicos. El PET y el PVC tienen problemas particulares de contaminación cruzada, ya que visualmente se parecen mucho entre sí y tienen una densidad específica muy similar, por ello se complica su clasificación por las técnicas convencionales (Villanueva y Elder, 2014).

En general, hay dos técnicas principales para clasificar los residuos plásticos: la clasificación manual y el uso de sistemas automatizados. La técnica manual es muy simple, pues no precisa de ninguna tecnología; sin embargo, requiere de bastante mano de obra. Además, puede no resultar tan eficaz en el reconocimiento de los tipos de residuos, en comparación con un equipo automatizado, pero suele ser más barata.

Respecto a los sistemas automatizados, dada la variedad existente de polímeros plásticos, se pueden encontrar diferentes técnicas que son más o menos apropiadas según el tipo de material de entrada y la pureza deseada de las corrientes de salida. Estas técnicas incluyen flotación, separación de la capa freática, centrifugas, ciclones, mesas de vibración de aire, disolución, clasificación óptica (identificación espectroscópica y cámaras de alta frecuencia) u otras técnicas avanzadas (utilizando las propiedades dieléctricas, el color, etc.). Para la clasificación de envases es bastante común usar técnicas de infrarrojo; mientras que para separar el PVC son comunes los métodos piezoeléctricos y las cámaras de alta frecuencia. La elutriación es otro método utilizado para eliminar etiquetas o accesorios livianos; este proceso separa partículas de diferentes pesos gracias a una corriente de gas o líquido, generalmente orientada hacia arriba (Villanueva y Elder, 2014).

En la mayoría de los casos, la separación se realiza en función de tres parámetros: la densidad, las características espectrofotométricas (como el color o la transparencia) y propiedades magnéticas. En corrientes de residuos inorgánicos mezclados, los separadores magnéticos permiten apartar los objetos metálicos de los plásticos; mientras que las tecnologías espectrofotométricas y basadas en la diferencia de

densidades ayudan a seleccionar los plásticos por color o tipo de polímero (Villanueva y Elder, 2014).

La separación por densidad se puede usar a través de los siguientes equipos (Villanueva y Elder, 2014):

- Clasificadores de aire. Se utilizan para separar películas y fragmentos menos densos de la corriente principal. Esto se logra utilizando chorros de aire para soplar etiquetas y fragmentos lejos de los envases de cuerpo más denso.
- Clasificadores de flotación. Los diferentes tipos de polímeros poseen densidades distintas (por ejemplo, la densidad del PP varía de 0.85 a 0.95; y la del PET de 1.35 a 1.38), propiedad que dependen además del tipo y el contenido de aditivos que se les agreguen. Con base en estas diferencias, la clasificación por flotación emplea un tanque lleno de agua dulce o agua salada para separar las escamas que se quedan en la superficie de aquellas que se hunden. Mediante extractores mecánicos se recogen las fracciones de que flotan de las que se precipitan.
- Centrífugas. También se utilizan para separar los plásticos considerando las diferencias en su densidad, pero en este caso en equipos giratorios que emplean la fuerza centrífuga.
- Ciclones e hidrociclones. Similares a las centrífugas, estos sistemas a base de aire o agua y efectos de corte separan partículas de polímero de diferentes densidades.

La clasificación por color se basa en el uso de equipos ópticos para separar los plásticos opacos de los transparentes. Estos equipos operan con rayos de luz en el rango del infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) que inciden sobre los residuos plásticos. Al interaccionar la luz con estos materiales, una parte es reflejada y captada por un sensor que la analiza y la compara con la respuesta conocida de los polímeros, para su identificación. Tras la caracterización, sigue una etapa de una separación neumática. Esta técnica funciona muy bien para diferentes polímeros de estructura simple (por ejemplo, para distinguir el PVC de las botellas de PET) (Villanueva y Elder, 2014).

Por su parte, la espectroscopía Raman utiliza luz láser monocromática para el proceso de clasificación. En esta técnica se considera que los fotones se dispersan en todas las direcciones por colisiones elásticas y que dicha dispersión provoca una diferencia de desplazamiento de la luz láser. Esa diferencia es característica de cada tipo de plástico.

Esta técnica es complementaria a la espectroscopía infrarroja y tiene la ventaja de que se obtienen datos de medición muy característicos y fáciles de interpretar. Los detectores LOD son mucho más sensibles que los NIR; son capaces incluso de distinguir residuos compuestos por un mismo tipo de polímeros, así, por ejemplo, pueden reconocer de forma diferencial charolas de capa simple de botellas de varias capas, ambas fabricadas con PET (Villanueva y Elder, 2014; Tomra, 2019).

Otra técnica de clasificación introducida más recientemente son los separadores balísticos, los cuales permiten dividir una corriente de residuos mezclada en dos o tres fracciones. La gran ventaja de ellos, en comparación con otros equipos, es que combinan en un solo paso la clasificación por peso, dimensión, densidad y forma. Por medio de estos equipos, la corriente de entrada se separa en dos fracciones principales: una "fracción pesada rodante" y "fracción ligera plana" (Figura 21). Dependiendo de la presencia de perforaciones en la base de la banda rotatoria del equipo, también es posible obtener una tercera fracción de cribado según su tamaño de grano. Con esta tecnología es posible clasificar residuos de embalajes ligeros y también diferentes fracciones de polímeros (Sutco, 2020).

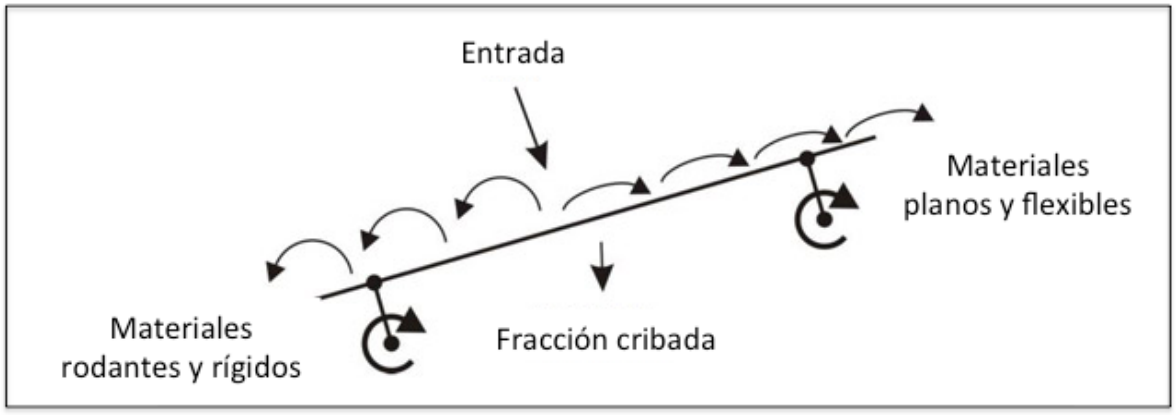


Figura 21. Funcionamiento de un separador balístico. Fuente: Tinsley, 2020.

El principio básico de lo separadores balísticos consiste en unas paletas rotatorias situadas paralelas entre sí. El equipo completo está construido con la posibilidad de ajuste de su ángulo de inclinación. Dependiendo de la aplicación que se le quiera dar, las superficies de las paletas están cerradas o diseñadas con perforaciones y estructura de portadores dados. Debido al ajuste del ángulo de inclinación y la estructura de los portadores, el separador es adaptable a diferentes corrientes de entrada (Sutco, 2020).

Existe además la clasificación triboeléctrica, la cual funciona según el principio del fenómeno de transferencia de carga superficial, donde los plásticos se frotan entre sí. Esto se puede lograr de varias maneras, como pasar pequeñas partículas de plástico a través de un ciclón forrado con PE. Luego, al pasar las partículas a través de un campo eléctrico entre dos placas, las partículas cargadas negativamente gravitan hacia la placa positiva y viceversa. Dado que la carga superficial se transfiere de manera diferente para los distintos tipos de polímeros, es necesaria una serie triboeléctrica para clasificar sus tendencias de carga. De esa manera, se ha establecido la siguiente serie triboeléctrica del polo negativo al positivo: PVC - PP - LDPE - HDPE - PET - PS - ABS (Acrylonitrile butadiene styrene – Acrilonitrilo butadieno estireno). Los beneficios de esta clasificación incluyen la capacidad de manipular mezclas de metales y plásticos, así como separar simultáneamente tres o más resinas a la vez; sin embargo, esta tecnología requiere un rango de tamaño apropiado (aproximadamente de 2 a 4 mm de diámetro) de las partículas de plástico y puede ser susceptible a la humedad en el área operativa (Bhatti, 2010).

Por otra parte, para la clasificación de las mezclas de resinas se puede aplicar la disolución selectiva. Esta consiste en usar diversos disolventes en los que se solubilizan las resinas para recuperar polímeros puros; no obstante, es un proceso difícil y costoso. Se ha utilizado para obtener un PET de un mayor grado de pureza después de la separación individual del polímero (Bhatti, 2010).

No existe una técnica de clasificación universal; su elección depende a menudo del conocimiento que tienen los recicladores para diseñar una secuencia de pasos de separación y limpieza acorde con el tipo de residuo que manejan. Así por ejemplo, la industria del reciclaje mecánico procesa el plástico residual en diferentes formas intermedias o finales; es decir, como escamas, aglomerados o regranulados, así como perfiles y láminas; los cuales implican pasos intermedios de limpieza progresiva y eliminación de contaminantes, así como de trituración. Todos estos pasos de preparación pueden ser independientes y entregar productos intermedios que se comercializan, o ser una parte integral de una operación de conversión continua en nuevos artículos. La implantación de estos pasos dentro de la secuencia es un elemento distintivo de los conocimientos de cada reciclador (Villanueva y Elder, 2014). Otro punto importante que considerar es que los remantes de una etapa de clasificación pueden reintroducirse al proceso para refinar la segregación o mandarse a incineración o disposición final (PRE, 2019).

Dadas sus ventajas, a los recicladores les interesa alentar y promover la clasificación y separación desde la fuente, ya que aumenta el valor de los residuos plásticos y reduce el costo del reprocesamiento. La mala clasificación es un gran obstáculo económico para el reciclaje. Los residuos de los hogares pueden estar altamente contaminados por residuos no reciclables; por ello, las propuestas de las partes interesadas en reducir esa contaminación incluyen la mejora y la simplificación de las instrucciones de clasificación, así como la complejidad de clasificar los residuos desde el diseño mismo de los productos (Villanueva y Elder, 2014).

Una de las herramientas que genera grandes expectativas para mejorar la clasificación y separación de los plásticos que serán sujetos a reciclaje es la aplicación de la inteligencia artificial (IA) en estos procesos, ya que ofrece múltiples oportunidades para mejorar su desempeño y eficiencia. La IA ha introducido robots que permiten una separación física de los residuos de forma rápida y eficiente, junto con una "sujeción" inteligente y capacidades más versátiles para el reconocimiento de la composición de los residuos plásticos a través de sensores sensibles acoplados a los robots (WMW, 2019a).

La aplicación de la IA en la clasificación y separación de los residuos plásticos puede contribuir a optimizar la pureza de los productos reciclados, ya que los sensores controlados por las tecnologías informáticas pueden generar información detallada, específica y en tiempo real sobre los residuos que se están procesando. Gracias a estos sensores los residuos pueden ser separados considerando diversas características, como la forma, el tipo de plástico o el color. Con la programación adecuada, los robots pueden ser fácilmente entrenados para identificar nuevos objetos y materiales (WMW, 2019a).

Dado que los residuos generados por diferentes empresas pueden ser muy específicos, la IA es útil para lograr que los robots se adapten a los cambios en las corrientes de residuos que manejan o a tratar con varios tipos de residuos al mismo tiempo. Así, la habilidad para cambiar rápidamente de tarea permite incrementar la flexibilidad y la eficiencia de las operaciones. Asimismo, gracias a la IA, los movimientos de los robots pueden volverse muy ágiles y rápidos.

Una ventaja más del uso de la IA y los robots es que con ellos se puede evitar la exposición de los trabajadores a tareas pesadas y peligrosas en las plantas de separación y asignarles tareas más gratificantes (WMW, 2019a).

4.5. Para el reciclaje

El reciclaje de los residuos plásticos inició a principios de la década de 1970. Inicialmente, los motivos para llevar a cabo este proceso eran económicos, pero con el tiempo se reconocieron sus beneficios para el medio ambiente (Mulder, 1998).

Este proceso puede llevarse a cabo en varios niveles (Mulder, 1998):

1. Como producto. El producto plástico original se reutiliza (después de su limpieza).
2. Como material. Los residuos plásticos son fragmentados en gránulos que luego son procesados en nuevos productos.
3. Como compuesto básico. Los residuos plásticos se transforman en resinas que se puede aplicar nuevamente en la producción de plástico.
4. Como fuente de energía. Los residuos plásticos se incineran para aprovechar su contenido energético.

En el proceso 2 se aplica el reciclaje mecánico y el reciclaje químico en el caso de los procesos 3 y 4.

4.5.1. Para el reciclaje mecánico

En general, las tecnologías de reciclaje mecánico (también conocido como reciclaje secundario) que son las más aplicadas actualmente en el mundo, implican el procesamiento de residuos plásticos por medios físicos; es decir, molienda, trituración y fusión para obtener nuevamente productos plásticos; sin modificar la estructura química de los polímeros, pero agregando aditivos (como agentes de curado, lubricantes y catalizadores) para mejorar el proceso, así como colorantes y agentes de corrección para restablecer algunas propiedades al material secundario. Para poderse aplicar apropiadamente, estas tecnologías requieren que los plásticos de desecho se limpian y se clasifiquen con antelación. Sumado a esto y para tener viabilidad económica, se requiere un volumen de entrada grande y constante de residuos (Villanueva y Elder, 2014).

El reciclaje mecánico se emplea en el caso de las seis principales familias de polímeros termoplásticos: LDPE, PE lineal de baja densidad (*low linear density polyethylene* –LLDPE) y HDPE; PP; PVC; PS sólido y poliestireno expandido (*Expanded Polystyrene* – EPS); y PET. Dentro de estas familias, la corriente de residuos que se trata en mayores cantidades son los envases (Villanueva y Elder, 2014).

Fragmentación

Un paso importante para lograr la recuperación de polímeros como materia prima a partir del reciclaje mecánico es la molienda de los residuos plásticos a fragmentos de un tamaño adecuado que permita su tratamiento posterior.

El primer paso de este proceso es el corte, que consiste en que los residuos plásticos de tamaño grande se cortan con sierras o cizalla. Posteriormente, se aplica una trituración para obtener pequeñas escamas. En esta etapa es posible efectuar una fase adicional de clasificación y separación de fragmentos de otros materiales (como metales, vidrio o papel) o de diferentes tipos de plásticos (por ejemplo, botellas de PET de sus tapas de PP), por algunas de las tecnologías explicadas en la sección 4.4 (Villanueva y Elder, 2014).

Para lograr una fragmentación adecuada, diversas empresas se han especializado en la generación de trituradoras de alta eficiencia que producen diferentes tamaños de partículas, las cuales son después tamizados (WMW, 2019a; PRE, 2019).

Descontaminación

En la etapa de reciclaje mecánico, la descontaminación que se requiere es aquella que elimina la suciedad a nivel microscópico; es decir, la que está parcialmente adherida (como pegamentos), la incrustada (como tierra alojada en lo poros del material) o la adsorbida (como los aromatizantes, aceites esenciales, solventes, pinturas, remanentes de alimentos o detergentes, unidos a las superficies del material). Esta contaminación microscópica puede deberse a la calidad inicial de la fuente de residuos, pero también a su empacado, transporte y manejo; también depende de la capacidad de adsorción que tengan los polímeros y de las propiedades de los contaminantes, que difieren entre sí (Villanueva y Elder, 2014).

La presencia de dichas impurezas puede conducir a la contaminación global de toda la corriente de residuos, a problemas en la producción y a la pérdida de calidad del material reciclado. Su eliminación completa requiere desorción, el cual es un proceso lento que disminuye el rendimiento y, por tanto, es poco común. La solución es entonces evitar dicha contaminación, por lo que el sector de reciclaje de plásticos trata de mantener las corrientes tan específicas y separadas como sea posible. El material ligeramente contaminado se puede usar para fabricar aplicaciones de bajo riesgo (por ejemplo, reciclaje a fibras que no están en contacto con alimentos (Villanueva y Elder, 2014).

La limpieza generalmente implica lavar con agua, que puede incluir detergentes o álcalis. A veces, el contenido residual del empaque puede ayudar en el proceso, por ejemplo, los remanentes de detergente ayudan en la eliminación de etiquetas de papel y aceites. Tras las etapas de clasificación y molienda, la limpieza es más fácil porque se favorece un mayor contacto de la superficie del material con el agua; sin embargo, es posible aplicarla en otros momentos del manejo de los residuos. El lavado se puede hacer con agua caliente o fría, generalmente bajo agitación (Villanueva y Elder, 2014).

También es común que se utilicen lavadoras de fricción, en la cuales es posible hacer una última separación de los residuos no deseados con base a su densidad; en los tanques de flotación se pueden segregar los residuos que se mantiene en la superficie del agua, de los que se hunden hasta el fondo. Previo a su incorporación en la etapa de extrusión, los residuos deben ser enjuagados y secados. En algunos casos, los residuos de plástico pueden no requerir lavado, según las especificaciones del cliente (Villanueva y Elder, 2014; PRE, 2019).

Extrusión

Una vez que los residuos han sido fragmentados y lavados, las escamas, *pellets* o aglomerados resultantes se alimentan a una extrusora, donde se calientan al estado de fusión y se les aplica presión para convertirlos en un producto de polímero continuo en forma de hilos. Los hilos se enfrían con agua y se cortan en gránulos, que pueden usarse para la fabricación de nuevos productos. El último paso de extrusión puede implicar una filtración a través de una malla metálica (por ejemplo, de 100-300 micras). Una parte de los plásticos reciclados mecánicamente se convierten en intermediaros de material crudo (por ejemplo, copos, aglomerados, molidos, gránulos, regranulados y perfiles), mientras que el

restante se convierte directamente en diversos artículos. Por lo general, este plástico que se reprocesa directamente en productos proviene de las corrientes más contaminadas y da como resultado usos finales de menor calidad, como macetas, alfombrillas, muebles para exteriores o tapetes para automóviles (Villanueva y Elder, 2014).

Hay algunos problemas que se destacan durante el reciclaje mecánico, entre ellos se pueden mencionar (Awasthi *et al*., 2017):

- La degradación o foto-oxidación de los polímeros ocurridas durante etapas en las cuales se usa calor.
- Las dificultades asociadas a la heterogeneidad de la composición de los residuos plástico debida a reacciones químicas extrañas durante la polimerización del material original.
- La formación de cadena lineales y ramificadas en los polímeros por oxidación o por exposición a condiciones climáticas extremas.

Entre los productos derivados del reciclaje mecánicos que usamos en nuestra vida cotidiana se encuentran las bolsas de plástico, los tubos de PVC, los perfiles de ventanas y puertas, entre muchos otros (Awasthi *et al*., 2017).

4.5.2. Para el reciclaje químico

El reciclaje químico es un proceso versátil que convierte los residuos plásticos en moléculas más pequeñas, generalmente líquidos o gases, que son adecuados para la fabricación de nuevos productos plásticos o de combustibles. Consiste en convertir los polímeros plásticos de nuevo en monómeros individuales, lo que permite volverlos a utilizar como materiales o fuentes de energía. Es aplicable a polímeros homogéneos, heterogéneos y contaminados. En sus procesos, se recuperan los componentes químicos que de los que están hechos los residuos plásticos y que son similares a los empleados en la industria petroquímica. En algunos casos, estos componentes básicos pueden volver a polimerizarse sin cesar, para obtener resina nueva o virgen. La transformación puede ocurrir a través de una variedad de procesos, los cuales evitan la quema (incineración) o disposición final de residuos plásticos. En la Figura 22, se muestra la clasificación de las principales tecnologías de reciclaje químico, las cuales se describen a continuación (Awasthi et al., 2017; Plastics 101, 2020; Solis y Silveira, 2020).

Quimólisis o despolimerización química

Este proceso implica la reacción del polímero plástico con sustancias químicas para producir sus monómeros originales que pueden procesarse para fabricar nuevos polímeros. Dependiendo del agente químico que se use, existen diferentes procesos, como glucólisis, metanólisis, hidrólisis y amonólisis, que son los más comunes. La despolimerización química solo es aplicable a polímeros que se sintetizaron por condensación, principalmente poliésteres como PET y nylon; pero no puede usarse para reprocesar polímeros que se obtienen por reacciones de adición; como PE, PP o PVC. También se aplica en el caso del nylon (Villanueva y Elder, 2014).

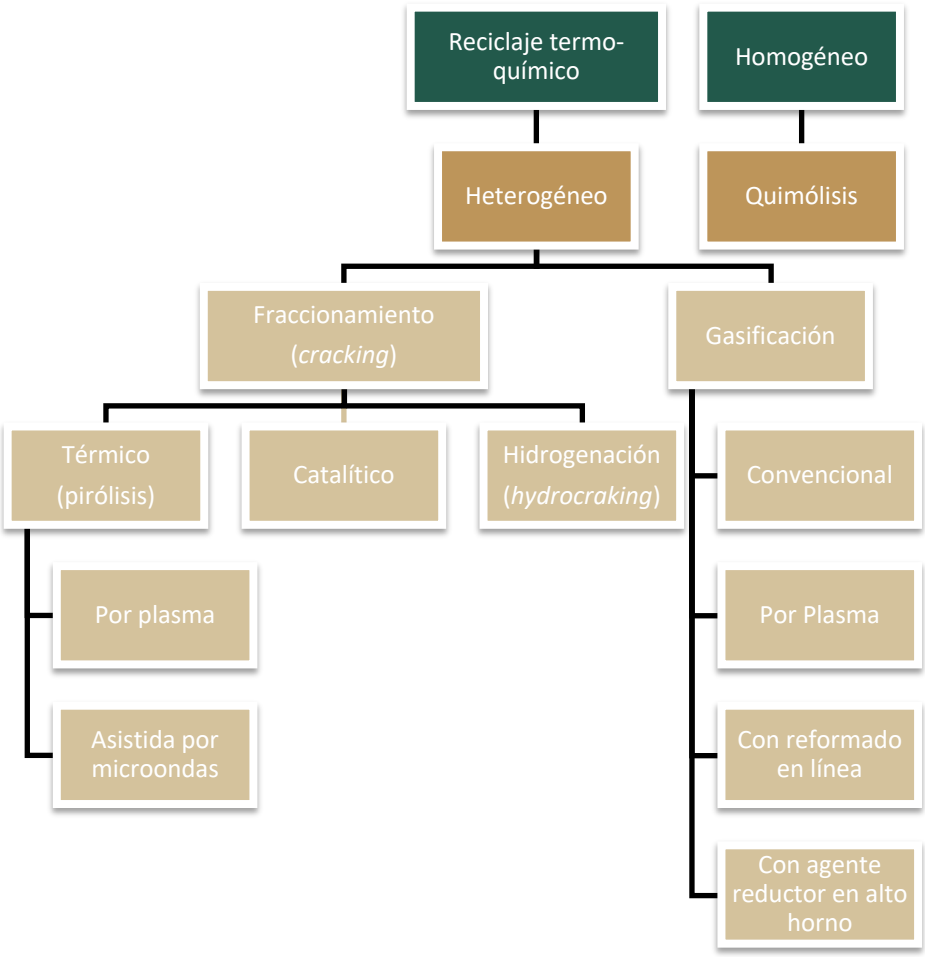


Figura 22. Principales tecnologías para el reciclaje químico de residuos plásticos (Adaptada de Solis y Siveira, 2020).

El PET y la poliamida son los mejores ejemplos de polímeros reciclados por este proceso. Los monómeros que resultan pueden purificarse por destilación y repolimerizarse nuevamente. En el caso de los residuos de PET, éstos se disuelven en ácido dimetiltereftálico y luego se calientan con metanol a una presión a 600 K. Esto produce dos monómeros de PET: el dimetil éster y el etano-1,2-diol. Por su parte, la poliamida o nylon 6, que se utilizada para fabricar alfombras, se convierte en caprolactama por procesos de fragmentación química (craking) a altas temperaturas (Awasthi et al., 2017).

Piróslisis térmica

La pirólisis, también conocida como craqueo, es un proceso que implica la degradación de los polímeros mediante calentamiento (generalmente a temperaturas entre 500 y 800 °C) en ausencia de oxígeno. Durante la misma, los polímeros se descomponen en pequeñas moléculas. La pirólisis a alta temperatura (> 600 °C) favorece la producción de pequeñas moléculas de gas, mientras que la baja temperatura (<400 °C) produce líquidos más viscosos. De esta manera, los residuos plásticos se convierten nuevamente en los productos de petróleo líquidos utilizados originalmente para producir los materiales plásticos, pero también para obtener nuevos plásticos, fibras sintéticas, lubricantes y combustibles. También produce pequeñas cantidades de material carbonizado y una fracción volátil que puede separarse en aceite de hidrocarburo condensable y un gas de alto poder calorífico no condensable que puede reutilizarse en el sitio. Por lo tanto, la clasificación del proceso de pirólisis como tecnología para el reciclaje puede variar dependiendo del uso final de las fracciones de salida resultantes (Villanueva y Elder, 2014, Awasthi et al., 2017).

La proporción de cada fracción y su composición depende principalmente de la naturaleza del plástico residual, pero también de las condiciones del proceso. La despolimerización térmica de poliolefinas, como PE o PP, tiende a generar una variedad de intermedios de hidrocarburos más pequeños, mientras que la fragmentación (cracking) de algunos otros polímeros de adición, como PS y PMMA, produce una alta proporción de sus monómeros constituyentes. La principal ventaja de esta tecnología, cuando se integra con un proceso tradicional de reciclaje mecánico, es que puede reciclar flujos de plásticos mezclados o con altos niveles de contaminación (Villanueva y Elder, 2014).

El mecanismo de degradación térmica por pirólisis de los residuos plásticos es muy complejo e incluye, entre otras, las siguientes reacciones: fisión en cadena, recombinación radical, fisión de enlace carbono-hidrógeno, abstracción de hidrógeno, escisión beta de cambio suave, adición radial. A través de estas reacciones se producen hidrocarburos ligeros volátiles, en forma de gases y aceites ligeros que son adecuados para la producción de combustibles gaseosos. Sin embargo, algunos materiales, como los estirénicos ABS y PS, más bien producen monómeros y oligómeros de estireno que son más adecuados para la producción de una materia prima en forma de aceites o ceras para la industria petroquímica. Por su parte, la pirólisis de PET forma un gas que contiene principalmente CO_2 y monóxido de carbono (CO), debido a su alto contenido de oxígeno. En el caso de los plásticos derivados de residuos electrónicos, al contener retardantes de flama halógenados, pueden emitir dibenzo dioxinas y furanos durante la pirólisis, por ello esta tecnología no es apropiada para su reciclaje si no se contra apropiadamente la temperatura (Bhatti, 2010).

Entre los equipos actualmente disponibles, el reactor fluidizado es considerado uno de los mejores para la pirólisis. Tiene la ventaja de obtener más productos derivados del petróleo y lograr buen control de temperatura (Awasthi et al., 2017).

A través de la pirólisis, los residuos plásticos pueden convertirse en fuente más barata de sustancias químicas y energía; además de ayudar a una comercialización más rápida de los productos generados y a la generación de electricidad y calor (Awasthi et al., 2017).

Pirólisis por plasma

La pirólisis de plasma integra la pirólisis convencional con las propiedades termoquímicas del plasma para transformar los residuos plásticos en gas de síntesis. Las temperaturas del proceso son muy altas, oscilan entre 1730 y 9730 °C, y los plásticos de desecho se descomponen en monómeros. El proceso es extremadamente rápido, con una duración de entre 0.01 y 0.5 segundos, según la temperatura del proceso y el tipo de desperdicio. El gas de síntesis resultante se compone principalmente de CO, H_2 y pequeñas cantidades de hidrocarburos superiores (Solis y Siveira, 2020).

La pirólisis con plasma tiene varias ventajas sobre la pirólisis convencional; como, por ejemplo, la degradación completa del polímero. El gas producido tiene un bajo contenido de alquitrán y un alto poder calorífico, lo que lo hace adecuado para la generación de electricidad en turbinas o producción de hidrógeno. La pirólisis por plasma es un método apropiado para los residuos plásticos mezclados y una tecnología prometedora para la producción de combustibles gaseosos o químicos. Resuelve el problema de los compuestos tóxicos en el gas de síntesis, ya que la temperatura es lo suficientemente alta como para descomponerlos y limitar la formación de cloro libre a partir del HCl, que es un problema común en otras tecnologías de reciclaje químico. Además, la tecnología tiene niveles de emisiones significativamente bajos (Solis y Siveira, 2020).

La pirólisis por plasma de residuos plásticos se ha investigado solo a escala de laboratorio y aún quedan varios desafíos técnicos por abordar antes de que la tecnología pueda cumplir con los requisitos de gestión de residuos y estar disponible comercialmente. Los desafíos varían según el equipo de plasma específico, pero el que parece más prometedor es el reactor de lecho fluido de pico (Solis y Siveira, 2020).

Pirólisis asistida por microondas

La pirólisis de residuos plásticos asistida por microondas implica mezclar dichos residuos con un material dieléctrico altamente absorbente de microondas. El calor absorbido por las microondas se transfiere a los plásticos por conducción. Las fuentes de radiación de microondas permiten temperaturas y tasas de calentamiento muy altas y alcanzan altas eficiencias de conversión de energía eléctrica en calor y transferencia de calor a carga (Solis y Siveira, 2020).

La pirólisis por microondas es un campo relativamente nuevo. Ofrece muchas ventajas sobre el calentamiento convencional, incluida una distribución más uniforme del calor, mayores velocidades de calentamiento, más control sobre el proceso y una mayor velocidad de producción. La tecnología también se caracteriza por el calentamiento selectivo del material, cuya magnitud depende de la rigidez dieléctrica propia del material. En general, los plásticos tienen una rigidez dieléctrica deficiente y, cuando se mezclan con un absorbente dieléctrico, la eficiencia de calentamiento puede variar para diferentes materiales. Las grandes fluctuaciones en la composición de los desechos plásticos podrían representar un desafío.

Dado que la eficacia del calentamiento varía para diferentes absorbentes, puede resultar difícil utilizar absorbentes dieléctricos de forma eficaz a escala industrial.
Otro desafío es la información insuficiente para cuantificar las propiedades de los materiales dieléctricos que determinan la eficiencia de calentamiento en el proceso. Solis y Siveira, 2020).

En estudios de laboratorio, se ha utilizado con éxito la pirólisis asistida por microondas para el reciclaje de envases laminados de aluminio y polímeros plásticos, que a menudo se encuentran en los RSU. Los resultados han mostrado que la tecnología es adecuada para tratar estos residuos, con una recuperación del 100% del aluminio presente, y posiblemente podría servir para tratar residuos reales (Bhatti, 2010; Solis y Siveira, 2020).

Hasta ahora, esta tecnología se ha estudiado a escala de laboratorio y piloto. Entre 2003 y 2005, Stena Metall junto con varios otros socios establecieron un proyecto para explorar el potencial de la pirólisis asistida por microondas como método alternativo para reciclar compuestos reforzados con fibra de vidrio. Se desarrollaron equipos a escala de laboratorio y una planta piloto. Los resultados mostraron que la tecnología requiere más desarrollo y grandes volúmenes de producción para ser comercialmente factible. La tecnología no se ha analizado a escala industrial en parte debido a que los datos son insuficientes para cuantificar las propiedades dieléctricas de las corrientes de residuos tratadas, lo que es necesario para la estimación de la eficiencia del calentamiento por microondas (Solis y Siveira, 2020).

Pirólisis catalítica

Como su nombre lo dice, la pirólisis catalítica implica la degradación de los polímeros por medio del catalizador. Este tipo de conversión ofrece muchas ventajas en comparación con la pirólisis térmica, incluidas las siguientes (Bhatti, 2010; Villanueva y Elder, 2014):

- Temperaturas de degradación más bajas y, en consecuencia, un menor consumo de energía. Se ha detectado una degradación catalítica significativa de los polímeros a temperaturas tan bajas como 200 ° C, frente al mínimo de 400 ° C requerido para la degradación térmica.
- Reacciones de fragmentación (cracking) más rápidas y, por tanto, tasas de conversión más altas

- Una selectividad más específica y una distribución más estrecha de los hidrocarburos producidos, dada por el tipo de catalizadores empleados.

Asimismo, mediante este proceso se obtienen combustibles de mayor calidad (fracciones de gasolina y diésel), olefinas gaseosas y compuestos aromáticos para su uso como materias primas, y se reduce la formación de subproductos residuales (Villanueva y Elder, 2014).

En este proceso se suelen usar los mismos catalizadores que se emplean en la industria petroquímica. Se ha visto que los catalizadores heterogéneos son más fáciles de separar del medio de reacción, pero presentan dificultades en su desactivación; mientras que los catalizadores homogéneos son difíciles de eliminar del producto final (Bhatti, 2010).

Hidrogenación (hydrocracracking)

La hidrogenación, conocida en inglés como hydrocracking implica la adición de hidrógeno al proceso de fracturamiento, lo que da como resultado una mayor calidad del producto. El proceso ocurre a elevadas presiones de hidrógeno, aproximadamente 70 atm, y la temperatura varía de 375 a 500 °C. El plástico de desecho se somete a pirólisis a baja temperatura antes del proceso principal que conduce a la licuefacción del plástico libre de materia no destilable. Luego, el líquido se envía a un lecho de catalizador. El catalizador juega un papel importante en este proceso ya que reduce la temperatura de reacción y aumenta el rendimiento y la calidad del aceite. Sin embargo, se ha encontrado que la presencia y el tipo de catalizador no tiene una influencia significativa en el proceso a temperaturas elevadas. El mayor obstáculo para implementar esta tecnología es el costo del hidrógeno. El hidrógeno producido eléctricamente puede costar aproximadamente 2500 € por tonelada (Solis y Siveira, 2020).

La tecnología de hidrogenación está presente en otras industrias; por ejemplo, la industria del petróleo. Aunque se ha probado para la materia prima de residuos plásticos, solo está disponible a escala piloto para este propósito. Varios desafíos quedan antes de que sea comercialmente viable, como, por ejemplo, el efecto de envenenamiento después de la hidrogenación del PVC. Además, habrá que optimizar los elevados costos operativos y de inversión (Solis y Siveira, 2020).

Gasificación convencional

La gasificación se refiere a un proceso químico a altas temperaturas (típicamente entre 1200 y 1500 °C) que convierte el material a base de carbono, en este caso los residuos plásticos, en un producto gaseoso que contiene CO_2, CO e hidrógeno y gas metano. Estos gases se pueden usar para calefacción, iluminación y generación de energía. Su principal ventaja es usar aire en lugar de oxígeno, lo cual lo convierte en un proceso más simple y menos costoso. (Villanueva y Elder, 2014; Awasthi et al, 2017).

Dependiendo de los materiales plásticos de desecho utilizados, otros compuestos pueden estar presentes en la corriente gaseosa y deben eliminarse. La formación de cantidades significativas de productos pesados (con alto peso molecular) es uno de los principales problemas del proceso, que disminuye el rendimiento de gas y, además, crea importantes problemas de taponamiento. Al igual que con la pirólisis, el gas de síntesis producido durante el proceso de gasificación puede usarse como materia prima química o como combustible (Villanueva y Elder, 2014).

Una ventaja adicional de la gasificación es que, en el proceso, los residuos plásticos pueden ser combinados con biomasa. Para ello, se puede emplear una técnica directa y un sistema de lecho fijo vertical y el aire como agente gasificador para el aprovechamiento de la biomasa. Esta gasificación directa tiene la ventaja de ser una técnica simple y con una operación rentable, pero con la desventaja de que la presencia de nitrógeno en el aire podría reducir el valor calorífico de los combustibles resultantes, debido a la dilución de los gases combustibles (Awasthi et al, 2017).

Esta tecnología se ha utilizado durante más de medio siglo y se aplica en todas las regiones del mundo, pero especialmente en Alemania y Austria. Sin embargo, los requisitos legales para autorización, que son más pesados que los de las instalaciones de reciclaje convencionales, han impedido su implementación a gran escala en más países. Las instalaciones de gasificación deben tener una licencia de incineración de residuos y las mediciones de emisiones deben realizarse con frecuencia (en particular, las emisiones de dioxinas y gases de combustión deben medirse al menos dos veces al año) (Villanueva y Elder, 2014).

Gasificación por plasma

Las tecnologías de plasma se han utilizado durante más de 30 años en diferentes aplicaciones, como las industrias química, metálica y espacial. La tecnología de plasma se utiliza principalmente para descomponer RP, y su introducción a la industria de conversión de residuos en energía es relativamente nueva (Solis y Siveira, 2020).

La gasificación por plasma es un proceso en el que las antorchas de plasma crean un arco eléctrico mediante el paso de corriente eléctrica a través de un gas. La temperatura del proceso es muy alta, hasta 15,000 °C, y se puede controlar independientemente de las fluctuaciones en las propiedades y la calidad de la materia prima. Los gasificadores de plasma tienen una alta tolerancia a la materia prima de baja calidad (Solis y Siveira, 2020).

La gasificación por plasma mejora el proceso de gasificación convencional y da como resultado una mayor pureza del gas del producto con un nivel reducido de alquitranes. El plasma, un medio eléctricamente conductor, se genera a través de sopletes de plasma al calentar el gas (generalmente aire) a temperaturas extremadamente altas, hasta aproximadamente 3,900 °C. Como resultado, el gas se ioniza y crea plasma. Los residuos sin ser tratados entran en contacto con el plasma generado eléctricamente en el reactor. Las condiciones del proceso suelen ser la presión atmosférica y una temperatura que suele oscilar entre 1,500 y 5,000 °C, pero puede alcanzar hasta 15,000 °C. El tiempo de residencia suele ser muy corto, del orden de minutos. La materia orgánica de la materia prima se convierte en gas de síntesis, mientras que la materia inorgánica se convierte en escoria inerte (Solis y Siveira, 2020).

Los gasificadores de plasma tienen un requerimiento de electricidad muy alto para funcionar. Para una planta de gasificación por plasma con alrededor de 1,200 a 2,500 MJ/tonelada de residuos, el requerimiento de electricidad sería del 5 al 10% de la energía en los residuos y del 15 al 20% de la producción de energía bruta. El aumento de los requisitos de electricidad y la mejora de la calidad del gas implican mayores costos operativos y mayores inversiones (Solis y Siveira, 2020).

Gasificación por reformado en línea

El mayor interés en el proceso de reformado por pirólisis radica en la alta producción de hidrógeno del proceso, que generalmente supera el 30%, y el gas está libre de alquitrán. La temperatura del proceso varía entre 500 y 900 C dependiendo de la materia prima, la configuración del reactor y el material del lecho (Lopez et al., 2018). El proceso se lleva a cabo en dos reactores en línea conectados para las etapas de pirólisis y reformado. Las impurezas de los residuos plásticos permanecen en el reactor y no tienen ningún contacto con el catalizador de reformado. Esto evita que el catalizador se desactive. La temperatura del proceso es más baja que en la gasificación, lo que reduce los costos de producción. Los alquitranes del producto gaseoso se pueden eliminar por completo. La producción de hidrógeno obtenida es significativamente mayor que en el proceso de gasificación con vapor (Solis y Siveira, 2020).

A pesar de su gran potencial, los estudios de la tecnología se limitan actualmente a escala de laboratorio. Un experimento llevado a cabo por (Wu y Williams, 2010) mostró que se obtuvo un menor rendimiento de gas del proceso no catalítico, mientras que la adición de catalizador al proceso mejoró la producción de hidrógeno. Ouadi y colaboradores (2017) desarrollaron una planta piloto de 2 kg / h para pirólisis y reformado en línea de RSU. Antes de que la tecnología se pueda implementar a escala industrial, se deben abordar varios desafíos, por ejemplo, una investigación detallada de la desactivación del catalizador (Lopez et al., 2018). Un estudio de (Barbarias et al., 2018) demostró la viabilidad de la pirólisis rápida y el reformado en línea de diferentes plásticos y mezclas de plásticos. El proceso se realizó en régimen continuo, lo que es un resultado alentador y un hito para el desarrollo de esta tecnología (Solis y Siveira, 2020).

Gasificación con agente reductor en alto horno

Esta es una variación especial de la gasificación en la que el gas de síntesis formado tras el reciclaje químico de los residuos plásticos se usa directamente como reactivo químico para reducir el mineral de hierro en la producción de acero. El carbón y el coque solían ser los agentes reductores en los altos hornos, pero en la década de 1990, en algunos lugares, comenzaron a ser reemplazados por residuos plásticos. Este proceso podría considerarse más como una recuperación de energía, ya que los residuos plásticos no se transforman en materia prima o en un nuevo plástico (Villanueva y Elder, 2014).

Consideraciones sobre las tecnologías de reciclaje químico

El reciclaje químico es un concepto elegante, y a pesar de atraer la atención científica, hasta ahora no se ha comercializado ampliamente debido a la economía del proceso y porque, en muchos casos, la calidad de los productos es inferior a la materia prima de grado comercial normal. Además, el reciclaje de regreso al monómero (o reciclaje homogéneo) solo es operativo para ciertos tipos de polímeros, mientras que el reciclaje heterogéneo es menos exigente (Villanueva y Elder, 2014).

Aunque es bien reconocido que el reciclaje químico de los residuos plásticos por fracturamiento, para obtener en sus monómeros, puede consumir más energía que el reciclaje mecánico, es un proceso que puede tener mayores beneficios ambientales, dependiendo de la calidad del producto final. No obstante, también hay una tendencia a combinar ambos procesos. La aplicación de una combinación de procesos de reciclaje mecánico y químico se basa en el empleo de vapor o catalizador en la operación. Este proceso se conoce como extrusión por degradación, donde los residuos plásticos se degradan en una extrusora para recuperar algunos productos químicos (Villanueva y Elder, 2014; Awasthi et al, 2017).

5. CASOS DE ESTUDIO: TECNOLOGÍAS DE RECICLAJE DE RESIDUOS PLASTICOS APLICADAS EN MÉXICO

5.1. Reciclaje de PET

Entre todos los residuos plásticos que se generan en México, el PET ocupa un lugar preponderante por la cantidad con la que se acopia y se recicla. En los últimos seis años, su acopio posconsumo ha sido el más alto de América y durante 2017 su recuperación se incrementó en 20,000 toneladas por año, con lo que llegó a 445,000 toneladas anuales, lo que representa 58% del consumo nacional, un porcentaje similar de recuperación al de la Unión Europea (Animal Político, 2019). PetStar, la empresa mexicana más importante en esta actividad recicla el equivalente a llenar el Estadio Azteca 2.4 veces al año; es decir, 50,000 toneladas de PET (Arteaga, 2017).

Estas notables cifras son posibles gracias a varias circunstancias relacionadas con el propio PET y sus propiedades fisicoquímicas, pero también con condiciones de su generación y mercado que favorecen su reciclaje. Respecto a las primeras podemos decir que el PET es fácilmente reciclable ya que, como todos los termoplásticos, se funde cuando se calienta y por tanto es posible moldearlo repetidas veces sin que sus propiedades originales se alteren, asimismo, su estabilidad química lo hace resistente al desgaste; por ello puede pasar por múltiples ciclos de reciclaje (excepto en el caso del uso alimenticio en el cual sólo se permite un ciclo) para producir envases y otros artículos con nuevos o distintos diseños (Econoticias, 2010; Arapack, 2018). Además, es ligero y fácil de almacenar, lo que ayuda a que se pueda acopiar y transportar sin problema; y es fácil de limpiar, lo cual permite eliminar restos de alimentos y otras sustancias durante el proceso de reciclaje,

En cuanto a las condiciones de mercado, es importante señalar que, a partir del PET reciclado, se pueden fabricar una gama de productos en los cuales la sustitución del material virgen por material reciclado resulta económicamente y técnicamente viable, tal es el caso de fibras textiles, chapas para termoformado, fibras para no-tejidos y tejidos para empaque, con las que se fabrican una gran cantidad de productos, como ropa, bolsas y complementos, alfombras, cuerdas y envases para usos no alimenticios (como detergentes y productos fitosanitarios), entre otros.(Econoticias, 2010).

Un caso particular es la de las botellas de PET, a partir de las cuales es posible volver a obtener nuevas botellas recicladas con un grado alimenticio; es decir, que mantengan su mismo nivel de inocuidad para poder contener bebidas para consumo humano, sin riesgo de contaminación con sustancias o agentes biológicos dañinos. De hecho, México es líder mundial en reciclaje de botella a botella grado alimenticio, con un 57% del total que se recupera (Plastics Technology, 2016). Esto se logra agregando un pequeño porcentaje de material virgen para mantener sus propiedades y calidad; o como lo hizo la Industria Mexicana de Coca-Cola® con el lanzamiento en 2010 de la PlantBottle, un envase de PET elaborado con hasta 30% de materiales provenientes de fuentes renovables como subproductos de plantas, lo que le permite ser reciclada infinidad de veces (Coca-Cola, 2016).

Otra condición que facilita el reciclaje del PET es que muchos de los productos fabricados con él, tienen estampado su código de identificación (que corresponde al número 1), de acuerdo con el Código de Identificación de Resinas que permite a los consumidores reconocer el tipo de plástico que están desechando y, con ello, separarlo y llevarlo a los centros de acopio (Arístegui Maquinaria, 2016; Pascual 2019).

En el caso del reciclaje de PET en nuestro país, la empresa PetStar ha jugado un papel determinante. A principios de 1994, el ingeniero Jaime Cámara Creixell aprovechó la oportunidad de crear su propia empresa de reciclaje, con la visión de convertir los residuos plásticos en un negocio rentable, perspectiva que en aquel momento se consideraba impensable en México. El paso del tiempo ha demostrado que esta actividad no sólo era viable, sino muy productiva. Por ello ha llegado a una tendencia a nivel mundial. PetStar cuenta actualmente con la planta recicladora de PET más grande del mundo (Arteaga, 2017).

Para consolidarse como empresa, sin duda, el apoyo del gobierno y ECOCE, creada con el auspicio de la industria de bebidas y alimentos y de la que Coca-Cola® de México es su mayor accionista, ha sido fundamental (Ganar-Ganar, 2017).

La estrategia de ECOCE para reciclar este material se basa en tres ejes: educación, comunicación y acopio. De esta manera lleva a cabo programas y acciones de sensibilización social, educación ambiental y sinergias con gobierno: realiza campañas de comunicación dirigidas a toda la población con mensajes sobre la importancia de la recuperación de residuos y su reciclaje; opera el ECO-RETO, programa de acopio de

envases de PET, voluntario y gratuito, en escuelas de educación básica y media, públicas y privadas a nivel nacional. Los centros escolares abarcan desde jardines de niños hasta preparatorias en las 65 principales zonas metropolitanas del país; y desarrolla en conjunto con los diferentes niveles de gobierno, actividades de sensibilización para buscar soluciones de fondo (ECOCE, 2020).

El proceso de reciclaje que realiza PetStar se inicia en los centros de acopio, donde los materiales son segregados y clasificados por color y por tipo de polímero, para luego ser compactados. Desde allí, todo el material en color natural o transparente se lleva a PetStar, mientras que los materiales de otros colores son enviados a otros recicladores que los emplean en diversas aplicaciones (Ganar-Ganar, 2020).
Cuando las pacas llegan a la planta de reciclaje se rompen y un minicargador frontal empuja el material a una tolva que alimenta la línea de lavado. Las botellas pasan por un prelavado para eliminar suciedad orgánica. Las botellas, todavía enteras, atraviesan unos segregadores automáticos de rayos infrarrojos que leen la composición molecular del material y dejan pasar únicamente las botellas de PET, mientras descartan los envases de otros materiales, como PC, PE o PS. Luego se somete a una segunda segregación de ajuste, para retirar algunas botellas de color o con pintura (Ganar-Ganar, 2020).

De ahí, pasan a una molienda que consiste básicamente en triturar el material, después, es lavado nuevamente y secado, seguido de un proceso más de homogenización detallado y almacenamiento de la hojuela, para finalizar con extrusión, pelletización, policondensación y enfriamiento, procesos químicos para lograr que el PET sea de una alta calidad para salir de nueva cuenta al mercado, sin ningún agente contaminante y completamente seguro (Ganar-Ganar 2020).

Otro de los aspectos que han hecho tan rentable el reciclaje de PET es el comercio internacional de este material. México exporta a Estados Unidos y a China 62% del PET que recicla. De las 428 mil toneladas de PET que se reciclaron el año pasado, alrededor de 260 mil toneladas se enviaron a China para la producción de fibra textil poliéster para manufactura de ropa; mientras que Estados Unidos lo utiliza para fabricar alfombras, ropa, fleje y lámina. El 38% restante se queda en México para consumo de las 12 plantas de reciclado de PET (Ambiente Plástico, 2020).

5.2. Reciclaje de unicel

Otros de los casos interesantes de reciclaje en México es el EPS o unicel (como se le conoce comercialmente), aunque significativamente más modesto que el del PET.

En nuestro país, la producción nacional de PS llega a 417 mil toneladas de capacidad instalada y los principales productores son Styropek (12%), Novidesa (12%), Resirene (36%) y BASF (40%). Esta industria representa el 9% de todas las empresas mexicanas que fabrican plástico, aporta al PIB nacional 2,150 millones de dólares anuales (0.19%) y alrededor de 21 mil empleos directos (Rennueva, 2018).

De acuerdo con la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (ANIPAC), el consumo del unicel en México es de 125 mil toneladas anuales, lo cual representa el 29.97% del total de la industria del PS. De ellas, el 25% se destinan a la fabricación de productos desechables para la industria alimenticia y el restante 75% se divide entre los sectores de construcción y embalaje (Rennueva, 2018; Fundación UNAM, 2019). Asimismo, el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) dio a conocer en 2013 que en nuestro país se consumen cada año más de 13 mil millones de piezas de unicel entre vasos, platos, charolas y placas dedicadas a la construcción; los cuales representan un volumen de 350 mil toneladas (Fundación Carlos Slim, 2017). Así, estas cifras muestran que la oferta de residuos de unicel que podrían aprovecharse es considerable. Sin embargo, su porcentaje de reúso y reciclaje asciende apenas al 2.12% (Rennueva, 2018)

Ese bajo porcentaje se debe, en parte, a la percepción de que reciclar este material es muy complicado debido a las dificultades en su transportación y limpieza. En el caso del transporte, la logística resulta costosa cuando es necesario llevar los residuos desde lugares lejanos a la planta donde se le da un tratamiento, muy pocas empresas tienen el capital para solventar estos gastos (Sánchez, 2014). Por su parte, la limpieza se complica si al material no se le retiran los residuos de alimentos, etiquetas u otros elementos que pudieran interferir en el proceso de reciclaje.

Sin embargo, en México el reciclaje de unicel es un negocio viable y en crecimiento (Plastics Technology, 2016). En el territorio nacional existen al menos tres empresas dedicadas a su aprovechamiento: Tecnologías Rennueva, Marcs & Marcos y Dart de México.

Ellas cuentan con tres centros de acopio y reciclaje, uno en la alcaldía Cuauhtémoc, en la Ciudad de México, y los otros dos en el Estado de México, en los municipios de Tultepec y Atlacomulco. Estos centros reciben residuos post consumo, como vasos y charolas, material de empaque y embalaje, así como materia de construcción (Rennueva, 2020).

Tecnologías Rennueva, en colaboración con Marcs & Marcos y Dart de México, desarrolló el primer plan de manejo para el unicel, autorizado por la SEMARNAT. Este plan busca formalizar y fomentar el negocio del reciclaje del unicel, bajo una modalidad nacional, colectiva y mixta (gobierno-sector privado) (Rennueva 2018).

La operación del plan de manejo será promovida por los generadores, recicladores y fabricantes. Los generadores se enfocan a dar un correcto manejo a los residuos, a disponer adecuadamente de ellos y a fomentar la comunicación en su sector; su participación es fundamental para cerrar el círculo virtuoso de operación de la cadena de valor de estos residuos. Los fabricantes contribuyen en la difusión de materiales didácticos para la concientización y sensibilización sobre el correcto manejo de estos residuos, promoviendo el uso responsable del unicel para disminuir la generación de estos. Finalmente, los recicladores usan los incentivos que puedan ofrecer gobiernos locales, productores o generadores para mejorar su infraestructura de manejo y reciclaje; su objetivo es optimizar sus procesos con el fin de mitigar en mayor proporción el impacto generado por estos residuos. Además de estos actores, se contará con el apoyo de aliados estratégicos, entre los cuales se incluirán agrupaciones, cámaras, organizaciones de la sociedad civil y personas morales o físicas preocupadas por el ambiente.

El proceso de reciclaje que se describe en dicho plan de manejo abarca 5 etapas, las cuales se describen brevemente a continuación (Plastics Technology, 2016; ANIQ, 2016; Rennueva, 2018):

1. El primer paso, es el acopio y la recolección desde la fuente de origen o en sitios destinados a su recuperación. Las empresas Marcos & Marcos y Dart de México se encargan de recoger el material separado por sus clientes en sus domicilios, o bien lo reciben en sus plantas de reciclaje. Los residuos procedentes de una recolección selectiva deben estar libres de comida, bebida, tierra, cintas adhesivas, chicles, popotes, tapas o material que no sea unicel.

No se pretende que sea lavado, sino que ya no tenga exceso de residuos orgánicos. El material que viene de la construcción debe estar libre de tierra, cal o cemento, así como varillas o cualquier otro metal.

2. Los residuos recolectados se consolidan por un proceso de termodensificado (compactación a través de presión y calor), donde se elimina el aire contenido en el material, reduciendo su volumen hasta un 95%. En este proceso, los residuos pasan por un triturador que lo divide en partículas de menor tamaño y las arroja a la garganta de una extrusora, donde es llevado a través del husillo. El material se desplaza entre el husillo y el barril, al cual están adheridas resistencias eléctricas para aumentar la temperatura del material. Finalmente, el material sale del barril pasando por el dado de extrusión
3. El material obtenido en la extrusora es sujeto a un proceso de pelletizado que consiste en transformarlo en trozos muy pequeños. Este proceso se puede realizar de tres formas: por trozado, por engranes o por goteo. El pelletizado por trozado implica que la salida del dado sea tan pequeña como el grueso que se requiere del pellet, colocando una trozadora rotativa frente al dado. El proceso de engranes corta el filamento enfriado por medio de dos engranes coincidentes y el de goteo, hace que el material gotee desde el dado a una tina de enfriamiento, creando pellets esféricos. La máquina peletizadora contiene una malla que limpia el material, eliminando cualquier impureza, residuos o suciedad. Los pellets así obtenidos pueden ser comercializados como materia prima para otras industrias del plástico.
4. Los residuos colectados también pueden ser convertidos en resina mediante su disolución con agentes químicos, que luego son separados del PS por refinación. De esta manara se pueden obtener tres productos dependiendo de la concentración de PS en el disolvente: si es una concentración baja, se obtiene un recubrimiento sellador o barniz; si aumenta la concentración se produce un pegamento de baja resistencia; y si se maximizar la cantidad de unicel, se obtiene material densificado que se somete al proceso de pelletizado.
5. Finalmente, los pellets obtenidos son entonces utilizados para la fabricación de nuevos productos que no tengan contacto con alimentos; por ejemplo, suelas de zapatos, reglas, carcasas para teléfonos celulares y CD, marcos, molduras, facias para automóviles, macetas, entre otros artículos.

Las metas de cobertura de este plan de manejo contemplan dos etapas. La primera es atender las tres principales zonas conurbadas del país: la Zona Metropolitana del Valle de México, la Zona Metropolitana de Monterrey y la Zona Metropolitana de Guadalajara; la segunda es abrir centros de acopio en nueve regiones del país: Bajío, California, Centro, Golfo, Norte, Occidente, Península, Pacífico y Sur (Rennueva, 2018). Además, este plan de manejo busca establecer los mecanismos que permitan en un futuro que el reciclaje de unicel post consumo y post industrial alcancen un 19% y 25%, respectivamente, uno de los porcentajes más altos entre todos los tipos de plásticos pese a las dificultades para su reciclaje (Tecnología del Plástico, 2018).

Estas metas son similares a las esperadas en el resto del mundo, pues se prevé que el mercado global de unicel alcance 18.97 billones de dólares en 2022, con una tasa de crecimientos anual de 5.1%, de acuerdo con estimaciones de la consultora Markets and Markets, lo cual anticipa una enorme oportunidad de negocio para el reciclaje de este material, no sólo para México, sino para el resto del mundo (Tecnología del Plástico, 2018).

A pesar de las alentadoras expectativas respecto al reciclaje del unicel, hay quienes consideran que esta actividad no es una verdadera solución, ya que la cantidad de residuos que se genera en comparación con la que se valoriza es aún muy pequeña. Además, cuando este material es sujeto únicamente a un proceso de densificación, sólo puede reciclarse una vez y los productos que se obtienen a partir del él siguen conservando su imposibilidad de biodegradarse en el ambiente; de esta manera simplemente se pospone su desecho, pero no se elimina. En este mismo sentido, se argumenta que fomentar el reciclaje no crea una conciencia sobre la importancia de cambiar los hábitos de consumo, pues el público percibe que lo que desecha ya no impacta al medio ambiente. Por ese motivo, varias organizaciones recomiendan tomar medidas complementarias, en algunos casos incluso implementadas; por ejemplo, la prohibición de ciertos usos del unicel, para realmente encontrar una salida al problema de los plásticos (Martínez, 2018; Martinelli, 2018: Chung, 2019).

5.3. Tecnologías para la producción de bioplásticos

De la revisión bibliográfica efectuada para integrar esa sección y que se resumen en la Tabla 4, encontramos que en México se han desarrollado al menos 20 tecnologías diferentes para la producción de bioplásticos. Siete de ellas ya se han conformado como empresas bien establecidas y las 13 restantes corresponden a proyectos de investigación generados por profesores y alumnos de diferentes instituciones académicas. Para varias de ellas se han solicitado las patentes que las respaldan, y unas pocas ya están exportando sus productos.

En todos los casos se trata de tecnologías creadas por emprendedores mexicanos que aprovechan residuos orgánicos agroindustriales, que incluyen cáscaras, semillas, bagazos, fibras, subproductos y excedentes. En tres de ellas se usan residuos orgánicos mixtos, mientras que en las otras 17 se emplean corrientes específicas de un solo tipo de residuo. Dos corresponden a residuos de origen animal y 18 a residuos de origen vegetal. De estas últimas incluyen diversos tipos de plantas, como agave, naranja, aguacate, elote, mango, tuna, tamarindo, plátano, jitomate, café, pepino, nuez de castilla y tubérculos. Gracias a ellas se logra la reutilización de este tipo de residuos, lo cual reduce su depósito en sitios de disposición final.

El desarrollo de todas estas tecnologías ha tenido la finalidad de obtener bioplásticos biodegradables, con características similares a los plásticos convencionales, y también a otros materiales como el cuero o la madera, así como reducir el consumo de combustibles fósiles. En algunos casos se argumenta que sus costos son menores que los de las tecnologías empleadas para los plásticos sintéticos, pero en que éstos son mayores.

Para la aplicación de estas tecnologías, prácticamente todas ellas sujetan a los residuos a distintos procesos de pretratamiento y tratamiento, similares a los de los plásticos convencionales. Entre ellos, se incluyen etapas como recolección selectiva; esterilización; secado; molienda o trituración; extracción, separación y purificación de los polímeros naturales (principalmente celulosas y almidones) y su modificación química y física (incluido el calentamiento); mezcla con algunos aditivos; y extrusión e inyección. De los aditivos que se agregan, en muchos casos se trata de productos naturales (como el mucílago de nopal o los almidones de tubérculos) y en algunos pocos de sustancias sintéticas (como plastificantes).

Asimismo, de estos tratamientos, en ciertos casos específicos se emplean microorganismos (como hongos y bacterias), a veces genéticamente modificados, que proveen de características deseables a los bioplásticos producidos.

De estas tecnologías se obtienen una gran diversidad de productos, parecidos a los que se fabrican con los plásticos convencionales, pero muchos de ellas se enfocan principalmente a elaborar empaques, embalajes, contenedores o utensilios desechables, aplicaciones médicas y materiales para la industria textil y del zapato.

Tabla 4. Resumen de las tecnologías desarrolladas en México para la producción de bioplásticos a partir de residuos orgánicos.

EMPRESA/PERSONA QUE DESARROLLO LA TECNOLOGÍA	TIPO DE RESIDUOS ORGÁNICOS APROVECHADO	PROCESO/ TECNOLÓGICO	PRODUCTOS OBTENIDOS	REFERENCIAS
Empresa BioSolutions, fundada por Ana Elena Aguirre, Maestra en Innovación Empresarial y Tecnológica del Tecnológico de Monterrey.	Fibras de agave (celulosa). Por cada tonelada de bioplástico, se reúsan y aprovechan 3 toneladas de subproductos agrícola (agave), lo que reduce hasta un 30% el consumo de petropolímeros, 150 litros de petróleo y evita la emisión de 450 kg de CO2 al ambiente.	La empresa produce un bioplástico para aplicaciones de extrusión y procesos de inyección. Cuenta con una capacidad de producción de 40,000 toneladas mensuales. El costo del proceso es entre 5 y 10% más elevado que los plásticos tradicionales.	Como productos se obtienen piezas con un aspecto de madera, envases para productos agroindustriales, cosméticos y de limpieza; hielera; termos; juguetes promocionales; tapas; autopartes; popotes rígidos y flexibles; palillos; películas de empaque; bolsas en rollo, resellables y tipo “camiseta”; macetas; baños; tarimas; muebles; y cubiertas de construcción.	Alcántara, 2017; Exaudem, 2018; Meza, 2019; BioSolutions, 2020.
Empresa Ecoplaso, fundada por Bárbara Arteaga Ballesteros, Ana Cristina Cabrera Cortés, María Fernanda García y Claudia Alejandra Coet, ingenieras en Biotecnología egresadas de Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Puebla.	Residuos orgánicos (hojas, raíces, semillas, bagazos y cáscaras) que obtienen gracias a los convenios que han logrado con restaurantes y cafeterías de la ciudad de Puebla.	Esta tecnología permite desarrollar filamentos para impresión 3D, 100% biodegradables y compostables. Los residuos orgánicos pasan por varias etapas y tipos de esterilización para asegurar su inocuidad, y por pruebas microbiológicas para comprobar su degradabilidad. Esta compañía cuenta con una planta piloto	Como producto se obtienen fibras textiles y un material muy parecido a la piel, con el cual se pueden fabricar carteras, llaveros, cinturones, bolsas y sandalias. En el futuro también está planeado el exportar el bioplástico como materia prima en la industria del zapato y mueblera.	Velázquez, 2016; Greentv, 2016; Pontaza, 2019; Meza, 2019.

		con capacidad de procesamiento de 300 a 400 kilos cada dos días.		
Empresa Geco, fundada por Giselle Mendoza Rocha, estudiante de economía el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, en asociación con Marlene Perales, Maestra en Biología Molecular y Química Biotecnológica; Fernando Vázquez, Doctor en Biotecnología; y Grecia Medina, también estudiante de economía.	Cáscaras de naranja. Se utiliza la bacteria Gluconacetobacter xylinus, que se reproduce de forma natural ante la descomposición de la naranja, para producir celulosa que se usa como materia prima para fabricar bioplásticos. Los residuos de naranja se obtienen por alianzas con productores, para asegurar el costo casi nulo de la materia prima.	A diferencia con otras tecnologías, ésta permite obtener un bioplástico transparente, resistente y flexible, que además es un 30% más barato que el plástico tradicional. Es una tecnología muy versátil, con aplicaciones a corto plazo en la fabricación de un material sustituto de los envases de PET, pues se trata de un bioplástico flexible y transparente. A largo plazo, también se vislumbran aplicaciones futuras en la biomedicina, e incluso como sustituto de piel para tratamiento de quemaduras y heridas o como sustituto de córnea. Actualmente, la empresa está preparando un prototipo de laboratorio a nivel industrial con una planta piloto y, posteriormente, busca hacer un convenio con un primer cliente que	La resina plástica que se obtiene es útil para un sinfín de aplicaciones, tantos textiles como para la industria de productos de envases y embalaje.	Jiménez, 2017; Celis, 2018; Campos, 2018; López Argueta, 2018; Milenio, 2018; Sweet Cannela, 2019.

		requiera una producción grande.		
Empresa Biofase, fundada por Scott Munguía Olvera, Ingeniero Químico egresado del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey.	Semillas de aguacate. Biofase consume para todos sus productos 15 toneladas diarias de semillas de aguacate.	Para aplicar esta tecnología, se recolecta la semilla de aguacate de la que se extraen los biopolímeros vírgenes que se sujetan a una modificación química para convertirlos en un termoplástico, el cual se combina con otros elementos para generar resinas, con las cuales se pueden fabricar una gran variedad de productos. La empresa Biofase genera 130 toneladas mensuales de plástico biodegradable, de las cuales 80 son para exportación. Manufactura entre 300 y 400 toneladas de cubiertos y popotes al año y comercializa alrededor de 5000 toneladas anuales de productos en general.	Con el bioplástico producido se fabrican vasos, popotes, bolsas, platos y cubiertos.	Global Energy, 2015; Muñoz, 2015: Nares, 2018; Rodríguez 2019.
Empresa Xeiba Nutraingredients, fundada por Hazael Pinto Piña, Licenciado en Ingeniería Industrial, y Álvaro Carlos Rodríguez Sánchez,	Lactosuero, desechado por la industria quesera. Aunque se trata de un residuo orgánico el lactosuero es	Esta tecnología aprovecha el lactosuero al convertirlo en ácido láctico. Durante este proceso se aplica un	A partir del bioplástico, que funciona como el nylon, se fabrica ropa, pero también cubiertos y productos con aplicaciones médicas, como prótesis, tornillos y agujas, así	Entrepreneur, 2009; Ecoosfera, 2014; Ingenet Bitacora, 2014; Issuu 2017.

Ingeniero en Biotecnología, ambos egresados del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey.	altamente contaminante, pues altera las propiedades del suelo y deteriora el agua. En México cada año son eliminadas, sin tratamiento alguno, 6 mil toneladas de lactosuero. El 90% del total de la leche usada por la industria quesera en México es eliminado en forma de lactosuero, el cual retiene cerca de 55% del total de ingredientes de la leche, como la lactosa, proteínas solubles, lípidos y sales minerales; por ello, es una fuente susceptible de aprovechamiento.	método de separación física, con el fin de extraer las proteínas, minerales, vitaminas y la lactosa. Después, el ácido láctico se recupera en forma de monómero amarillento, que se purifica hasta llegar a la concentración ideal que le permita ser empleado para la fabricación de bioplástico y otros productos alimenticios. La empresa se localiza en Tulancingo, Hidalgo.	como prototipos en 3D.	
Empresa Polybión fundada por Axel Alejandro Gómez Ortigoza Aguirre, ingeniero en biotecnología molecular, y su hermano Alexis Gómez Ortigoza Aguirre, licenciado en finanzas, ambos egresados del Instituto Tecnológico de Estudios	Residuos agrícolas ricos en celulosa, como paja, aserrín, cáscara de trigo, salvado, etc.	En esta empresa se han desarrollado varias tecnologías. La primera es para obtener un bioplástico que se ha denominado Fungicel, el cual es fabricado a partir de los	Polybion ha creado tres tipos de bioplásticos: el Fungicel, un sustituto de las espumas usadas en elementos aislantes y empaquetado; Lignum, un material para remplazar los paneles de madera sintética; y Celium, una alternativa biológica para la piel sintética.	Aguilar, 2018; Gabriel, 2018; 4 vientos, 2019; Somos industria, 2019; Valles, 2019; Villanueva, 2019; Zúñiga, 2019; Ortiz, 2020.

Superiores de Monterrey, Campus Irapuato.		residuos que son transformados por un hongo genéticamente modificado. En este proceso, los residuos de paja se esterilizan y muelen; luego se vierten en una incubadora donde se agrega el hongo y en 15 días se obtiene el biomaterial. El hongo sirve como un aglomerante natural, además secreta quitina que añade muchas propiedades al bioplástico, el cual puede absorber los impactos (igual que el unicel), es moldeable, aislante y retardante al fuego. Otra de las tecnologías es para fabricar un bioplástico, llamado Celium, que tiene características similares a la piel vacuna. Este biomaterial se obtiene de residuos de plantas empacadores de mango		

		y fresa, en los cuales está presente una bacteria que se alimenta de ellos y genera una membrana de celulosa que se somete a un proceso patentado por la compañía.		
Empresa Ecoshell, fundada en 2010 por Carlos Camacho y desarrollada mientras estudiada la carrera de Ingeniería Industrial en la Universidad Anáhuac.	Residuos de elote.	Los residuos de elote son triturados y mezclados con biopolímeros de almidón que posteriormente son fusionadas en microesferas para después moldearlas y crear diferentes productos, que tratan de 90 a 240 días en degradarse.	La empresa fabrica diferentes productos como platos, bolsas, popotes, charolas, empaques, cubiertos, entre otros.	Ruiz, 2018; Ecoshell, 2020.
Proyecto desarrollado por Andrea Arantza Cervantes Romero, Fabiola Lozano Loza y Cristian Martínez Cruz, estudiantes de la Universidad del Valle de México, Campus Hispano.	Cabezas y cáscaras de camarón.	Las cabezas y cáscaras de camarón son la materia prima principal en la producción de quitina y quitosano. Las cabezas desecadas son descalcificadas usando ácidos minerales y desproteinizadas, usando compuestos alcalinos para obtener una masa rica en quitina, la cual es secada al sol o en un horno para	A partir del proceso indicado se obtienen láminas de un bioplástico recomendado para uso en la producción de envases pequeños.	Cervantes Romero et al., 2018.

		obtener quitina con un amplio uso industrial.		
Proyecto desarrollado por las alumnas Itzel Paniagua Castro y Alondra López López del Colegio de Ciencias y Humanidades Oriente de la Universidad Nacional Autónoma de México.	Residuos de mango (cáscaras) y mucílago de nopal.	Se extrae la celulosa y los PF de la cáscara de mango y se realiza una mezcla con agua, almidón, jugo de limón (fundamental para evitar la oxidación) y mucílago de nopal (otorga al bioplástico resistencia al agua).	Se obtienen láminas del bioplástico que pueden emplearse para la producción de diversos artículos como los popotes, cuyo tiempo de degradación oscila entre los 4 y 6 meses.	UNAM, 2019; Sánchez, 2019.
Proyecto desarrollado por Alan Vidal Vera, estudiante de licenciatura de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.	Cáscaras de tuna.	Se obtiene el material lignocelulósico de la cáscara de la tuna y se empleó anhidrido oleico como precursor de la reacción.	Se obtuvieron comprimidos del bioplástico con características hidrofóbicas. Aunque aún no se prueban en ningún producto en particular se identificó un alto potencial para la sustitución de plásticos tradicionales.	Vidal, 2019.
Proyecto desarrollado por Fernanda Quiñonez, Aurora Chaidez y Elizabeth Rivera, alumnas de Ingeniería en Bionegocios, del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey en el Estado de Sinaloa.	Cáscaras de mango. Se aprovechan los residuos generados en el estado de Sinaloa, uno de los principales exportadores en México de esta fruta.	La tecnología consiste en mezclar las cáscaras de mango con los principales componentes del almidón para generar un biopolímero resistente y flexible, que asemeja la consistencia del plástico convencional. Este bioplástico tarda tan sólo seis meses en degradarse. Los costos	Su primer prototipo lo han centrado en la producción de platos desechables. Ahora las emprendedoras están buscando un proveedor de desechos de esta fruta para poder llevar su bioplástico al siguiente nivel y poder formalizar su emprendimiento.	El empaque, 2019; Leal, 2019; Mundo Agropecuario, 2019; N+1, 2019; Plastics Technology, 2019.

		de producción de platos con este biopolímero podrían ser 80% menores que los plásticos convencionales y 50% menores que los de unicel.		
Proyecto desarrollado por científicos del Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México, encabezados por el Dr. Alfredo Maciel Cerda y en colaboración con Abel Humberto Cortés Arce, de la Facultad de Química y maestro en Ciencias e Ingeniería de Materiales.	Semillas de tamarindo. México produce 39 mil toneladas de tamarindo al año. De esta cantidad, una tercera parte son semillas, de las cuales se desechan 12 mil toneladas.	Mediante esta tecnología, a un polisacárido extraído de las semillas del tamarindo se le injertan moléculas de acrilato de etilo, para producir un copolímero constituido por los dos monómeros: acrilato de etilo y glucosa. Dependiendo del porcentaje de acrilato de etilo, el copolímero resultante presenta determinadas propiedades mecánicas: a mayor porcentaje es más suave y flexible; a menor porcentaje, más rígido y resiste a la carga mecánica, pero si se rebasa esta resistencia se vuelve frágil y se rompe. Este material podría durar seis meses en anaqueles y, luego de ser usado, puede	El bioplástico producido puede servir para hacer vasos y platos desechables, pero también empaques para aparatos electrodomésticos y equipo científico, paneles de anuncios, aislantes térmicos para la construcción, cajas de pescado o hieleras para transportar vacunas.	Excelsior, 2017; Local, 2017; México Ambiental. 2017; Tecnología del Plástico, 2017; Reyes, 2018.

		degradarse por completo a agua y CO_2. Esta tecnología requiere financiamiento para colocarla en el mercado a disposición de la sociedad.		
Proyecto desarrollado por Aranza Meza Dorantes, Israel Hernández y Edmundo Balderas, alumnos de preparatoria de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.	Cáscaras de plátano.	Para aplicar esta tecnología es necesario extraer el almidón de la cáscara de plátano. Para ello, las cáscaras de plátano se mezclan por licuefacción con fécula de maíz, vinagre y glicerina. La mezcla resultante se somete a calentamiento y se genera una especie de gel que se expande en una placa de tela o vidrio, posteriormente es secada al aire libre por 24 horas. Se obtiene hojas de bioplástico de 50 X 50 cm que se degradan en un mes, cuyo costo de producción es de 17 pesos.	Hasta el momento se han producido bolsas tipo Ziploc®, pastas para libretas y engargolados para demostración en exposiciones internacionales.	Investigación y Desarrollo, 2019.
Proyecto desarrollado por Daniel Arrieta Baez y Mayra Beatriz Gómez Patiño, científicos del Centro de Nanociencias y Micro y	Residuos agroindustriales de jitomate.	El proceso consiste en hidrolizar la cutícula purificada del jitomate, separar sus componentes y obtener	Se obtuvo un polímero con uso potencial para una amplia gama de aplicaciones biomédicas, los resultados aún se encuentran a nivel	Agencia EFE, 2016. Iresiduo, 2016.

Nanotecnologías (CMNM) del Instituto Politécnico Nacional.		un monómero con un rendimiento de adherencia de 40 a 45%. El monómero es combinado con plásticos convencionales como PVC o PET para darles la característica de biodegradabilidad.	laboratorio.	
Proyecto desarrollado por el Dr. Alfredo Martínez Jiménez y su equipo, del Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México.	Residuos agroindustriales, ricos en celulosa y hemicelulosa, y ácidos orgánicos de bacterias modificadas.	Con la aplicación de esta tecnología, los precursores del bioplástico son producidos a partir de residuos agroindustriales. Los azúcares obtenidos de dichos residuos son usados para generar ácidos orgánicos, por fermentación. Además, se utilizan bacterias, principalmente Escherichia coli, cuyas vías metabólicas han sido modificadas para que produzcan ácido D-láctico o ácido L-láctico, que son isómeros que les permiten generar PLA. El PLA es totalmente biodegradable y puede sustituir los usos que actualmente tiene el	El bioplástico se puede utilizar en muchas aplicaciones de sustitución de material de empaque y embalaje para alimentos y compuestos médico. Asimismo, tiene potencial para ser empleado en el sector agrícola e incluso para desarrollar propaganda biodegradable.	InfoAgro, 2017; Plastics Technology, 2017; National Geographic, 2020.

		plástico convencional. Además, el PLA se puede reducir, reusar y reciclar. En este sentido, el bioplástico que no se deseche y sea manejado adecuadamente se puede reutilizar, pero cuando está en condiciones de composta, con basura orgánica y ciertos microorganismos, es cuando se degrada. Este equipo de investigación actualmente tiene tres registros de patente en México para el bioplástico fabricado.		
Proyecto Biobex, desarrollado por la Dra. Janet Gutiérrez, directora del Departamento de Bioingeniería y Ciencias, y alumnos del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Veracruz.	Residuos comunes de café, en particular la pulpa, uno de los principales de la industria cafetalera.	Esta tecnología busca ayudar a la economía de los productores y disminuir el impacto ambiental por la descomposición de los residuos de café, usando herramientas biotecnológicas (bioprocesos) para generar valor y que las comunidades y zonas de producción de café no sean solo un abastecedor de materia,	El bioplástico producido es aplicable a la industria textil y zapatera.	Juárez, 2019

		sino de otros productos comerciales.		
Proyecto desarrollado por Alejandra Lizbeth García Tejeda, Wendy Yotziri de Jesús Hernández, Alondra Carballido Juárez y Amanda Paola Bueno García, estudiantes de la carrera de Técnico Laboratorista Químico del Centro de Estudios Científicos y Tecnológicos (CECyT) No. 6 "Miguel Othón de Mendizábal" del Instituto Politécnico Nacional.	Residuos (cáscara) de pepino.	En esta tecnología se utiliza la pectina presente en la cáscara de pepino y el almidón de la fécula de maíz para fabricar un bioplástico 100% degradable; También le adicionan alga espirulina, ácido acético para conservarlo, agua destilada y glicerina. Este bioplástico, además de ser resistente y degradable, sirve como alimento para cualquier tipo de animal marino por su contenido de alga espirulina.	De este material se pueden fabricar bolsas de supermercado y utensilios desechables.	Vázquez, 2020
Proyecto desarrollado por Jesús Nicolás Bermúdez, estudiante de Doctorado en Alimentos de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional.	Residuos (cáscara) de nuez de castilla.	Esta tecnología se basa en obtener, mediante una molienda, nanopartículas que se utilizan para producir biopolímeros biodegradables, cuyas propiedades mecánicas son reforzadas, ya que se trata de materiales blandos. La idea con la aplicación de esta tecnología es inspirarse en lo que ya	Con esta tecnología se obtiene un bioplástico de alta dureza. No se especifican ningún tipo de producto al que se aplique.	Jmalpica, 2019; Tecnologia del Plástico, 2019.

		existe en la naturaleza, en este caso la estructura de la cáscara de nuez, para inventar nuevos materiales.		
Proyecto desarrollado por el profesor Eduardo San Martín Martínez, del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Legaria, del Instituto Politécnico Nacional, en colaboración con su alumno del doctorado en Tecnología Avanzada, Horacio Vieyra Ruiz.	Cosecha de plátano verde que no se destina para alimento, la cual resulta como excedente y suele pudrirse debido a que es una fruta que madura rápidamente.	Para esta tecnología, el proceso de elaboración de plástico consiste en utilizar el plátano con todo y cáscara. Primero pasa por una desinfección para eliminar cualquier microorganismo, luego se corta y seca para facilitar la trituración y producir harina, se blanquea con peróxido de hidrógeno y, a través de procesos térmicos y químicos, se incorpora el polvo de plátano con un plastificante sintético, de donde resulta un material termoformable.	Con esta tecnología se obtienen productos plásticos con alta capacidad de biodegradarse. No se especifican ningún tipo de producto al que se aplique.	Packaging, 2014; Petroquimex, 2014.
Proyecto Ya'ax Chíim realizado por Víctor Antonio Flores Santana y Paula Liver Gómez Rocha, egresados de las carreras de Biotecnología y de Creación y Desarrollo de Empresas, respectivamente, del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Ciudad	Almidones de papa y otros vegetales (rábano, maíz y cebolla).	Esta tecnología se basa en el aprovechamiento de las propiedades del almidón, el cual requiere de un manejo determinado de temperaturas y de factores plastificantes para ser transformado en una malla, con ayuda de	Se fabrican bolsas que no sólo son biodegradables, sino que también ayudar a descomponer los residuos orgánicos en dos semanas a un mes, y una vez concluido este proceso es posible obtener una composta que puede ser utilizada como abono.	El Heraldo de México, 2019; Rivera, 2020.

de México.		moléculas de proteínas. La proteína que se añade a esta fórmula es lo que le soporte a la estructura del bioplástico.		

6. CONCLUSIONES

En México, como en el resto del mundo, los problemas ambientales que generan los residuos plásticos son un tema de preocupación y en años recientes han mostrado gran visibilidad en los medios de comunicación. Ello ha llevado a generar presión social y a que las autoridades ambientales, en respuesta a esto, propongan e implementen algunas medidas para atenderlo, en particular en el caso de los residuos derivados de plásticos de un sólo uso, como bolsas, popotes y ciertos tipos de empaques desechables. No obstante, estas iniciativas han surgido de manera desarticulada y no necesariamente basadas en un conocimiento cabal sobre la generación y el manejo de estos residuos a nivel local. Además, al tomarse como acciones reactivas, no han considerado un esquema de gestión realmente integral y, por ello, en muchos casos no están resultando en una mejor valorización y reciclaje. Esto se refleja en el bajo porcentaje en que la mayoría de los diferentes tipos de residuos plásticos (con excepción del PET) son recolectados, recuperados y reciclados, el cual nunca ha revasado el valor del 10% y que resulta muy bajo en comparación con los valores de producción de estos polímeros en nuestro país, cuya maxima producción alcanzó un valor de 3.7 Mt en 2017 (ver Figura 2); así como en comparación con su desecho como residuos, el cual alcanza las 123 t diarias, tan sólo para la Ciudad de México.

Por otra parte, en varios países del mundo la innovación en las tecnologías para impulsar un manejo adecuado de los residuos en general, y de los plásticos en particular, no deja de avanzar. Si bien, una parte de esas tecnologías ya se aplica en nuestro país, su uso es aún limitado, pues se enfoca a un número reducido de corrientes de residuos plásticos, en especial al PET, que es el polímero más reciclado a nivel nacional. Sin embargo, otros tipos de polímeros o de residuos complejos, como aquellos que contienen sustancias tóxicas o una composición más complicada (como en el caso de los residuos multicapa) siguen sin poder aprovecharse y su destino final continúa siendo, en el mejor de los casos, un relleno sanitario.

En contraste con esa aplicación limitada, se encuentra el enorme interés de las instituciones académicas mexicanas por promover el aprovechamiento de los residuos orgánicos para obtener bioplásticos. Es de resaltar el gran número de proyectos, algunos de los cuales ya se han convertido en empresas formales, que se han desarrollado para obtener diferentes tipos de materiales y productos a partir de desechos

vegetales de diversos cultivos, así como de algunos subproductos de algunas actividades pecuarias.

Los retos para reducir el problema de los residuos plásticos son grandes, pero no imposibles de enfrentar. Para ello, el fomento al reciclaje será decisivo, pero no bastará. Tendrá que venir acompañado de otras medidas e incentivos tecnológicos, políticos, económicos, fiscales, sociales, de educación, concientización y capacitación.

Aunque los ejemplos de éxito en esta materia todavía sean poco en nuestro país, eso no impide que en el futuro no se puedan replicar, tomando en cuenta los aciertos obtenidos y evaluando las lecciones aprendidas. La experiencia alcanzada en otros países también en una fuente invaluable de conocimiento a considerar y ajustar a las condiciones nacionales específicas.

7. RECOMENDACIONES

Para favorecer el reciclaje, varias medidas, adicionales a las tecnologías antes expuestas, pueden aplicarse. Entre ellas se pueden mencionar las siguientes:

- Establecer nuevos esquemas depósito-reembolso para facilitar el acopio de los residuos plásticos que se reciclen.
- Promover la implementación de instrumentos económicos, como impuestos, para quienes sigan utilizando productos o materiales difíciles de reciclar. El dinero así recaudado se puede emplear para crear, ampliar o mejorar la infraestructura para el reciclaje de los residuos plásticos.
- Establecer metas de reciclaje con una fecha límite para alcanzarlas e incluirlas en la normatividad vigente para darles un carácter obligatorio. Si dichas metas no se cumplen, se puede establecer la restricción o prohibición en la venta o uso de ciertos productos.
- Desarrollar criterios y normas nacionales para evaluar la calidad de los materiales reciclados, de tal manera que se garanticen sus propiedades para las diferentes aplicaciones de interés. La certificación de estos materiales, particularmente sobre la facilidad de degradación y compostabilidad, como ocurre en otros países, puede ser una medida para asegurar su calidad y veracidad.
- Impulsar la innovación y la investigación de materiales, diseños, procesos y productos que faciliten el reciclaje de los residuos plásticos.
- Analizar la factibilidad de restringir o prohibir la recepción de ciertas corrientes de residuos plásticos en los sitios de disposición final.
- Armonizar en todo el país los procesos de separación y clasificación de residuos para asegurar la misma calidad de los materiales generados sin importar el lugar en donde sean obtenidos.
- Desarrollar guías con enfoque en economía circular para el diseño específico de nuevos productos, empaques y embalajes que permitan su reciclaje, que incluya el análisis de los diferentes materiales y sustancias que se van a introducir en el proceso y que establezcan recomendaciones para productos específicos sobre la composición del polímero base, el color, los revestimientos y recubrimientos, los aditivos, tintas y adhesivos, las etiquetas y la impresión directa.
- Promover una cultura de consumo de productos biodegradables, así como evitar los desechables de un solo uso o productos con sobre

empaquetamiento y difundir los niveles de contaminación debido a la inadecuada disposición final de residuos plásticos.

- Incrementar la vigilancia en playas y costas para asegurar que no sean vertidos los residuos plásticos directamente al mar, y que hoteles y puertos cuenten con un adecuado plan de manejo.

8. REFERENCIAS

- 4 vientos. 2019. Crea empresa biotecnológica mexicana cuero vegano con bacterias y desechos agroindustriales. http://www.4vientos.net/2019/01/29/crea-empresa-biotecnologica-mexicana-cuero-vegano-con-bacterias-y-desechos-agroindustriales/. Fecha de consulta: 29 de julio de 2020.
- Agencia EFE. 2016. Investigadores mexicanos usan desechos de jitomate para hacer bioplástico. https://www.efe.com/efe/america/tecnologia/investigadores-mexicanos-usan-desechos-de-jitomate-para-hacer-bioplastico/20000036-3029255. Fecha de consulta: 31 de julio de 2020
- Aguilar M. 2018. Está EXATEC en los jóvenes más innovadores de MIT Tech Review. Tecnológico de Monterrey. https://tec.mx/es/noticias/irapuato/educacion/esta-exatec-en-los-jovenes-mas-innovadores-de-mit-tech-review. Fecha de consulta: 30 de julio de 2020.
- Alcántara V. 2017. Bioplástico mexicano hecho con agave. Tecnología del plástico. http://www.plastico.com/temas/Bioplastico-mexicano-hecho-con- agave+123214?tema=450234&pagina=2. Fecha de consulta: 2 de junio de 2020.
- Alfonso E. 2002. Propiedades básicas de los polímeros. https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/43394563/Materiales.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DPROPIEDADES_BASICAS_DE_LOS_POLIMEROS.pdf. Fecga de consulta: 11 de mayo de 2020.
- Aliso. 2007. Los plásticos. http://aliso.pntic.mec.es/cmal0029/PLASTICOS/Generalidades.html. Fecha de consulta: 7 de abril de 2020.
- Alomar C., Estarellas F., Deudero S. 2016 Microplastics in the Mediterranean Sea: Deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size. Marine Environmental Research. 115: 1-10.
- Al-Salem, S., Lettieri, P., Baeyens, J. 2009. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. Waste Management 2625-2643.
- Ambiente Plástico. 2020. El 62% del PET que se recicla en México. https://www.ambienteplastico.com/el-62-del-pet-que-se-recicla-en-mexico-se-exporta-a-estados-unidos-y-china-paises-que-lo-utilizan-

para-la-fabricacion-de-ropa-y-alfombras/. Fecha de consulta: 23 de abril de 2020.

- Animal Político. 2019. México, un líder en reciclaje. https://www.animalpolitico.com/2019/01/mexico-lider-reciclaje. Fecha de consulta: 20 de abril de 2020.
- Arapack. 2018. ¿Qué es el PET? https://www.arapack.com/faq/que-es-el-pet/. Fecha de consulta: 27 de abril de 2020.
- Arístegui Maquinaria. 2016. Identificación de los plásticos por sus códigos. https://www.aristegui.info/identificacion-de-los-plasticos-por-sus-codigos/. Fecha de consulta: 24 de abril de 2020.
- Arteaga J. 2017. Los hombres que convirtieron la basura en oro. Alto Nivel. Negocios. https://www.altonivel.com.mx/empresas/negocios/los-hombres-que-convirtieron-la-basura-en-oro/. Fecha de consulta: 20 de abril de 2020.
- Asociación de Ciudades y Regiones para el Reciclaje (ACRR). 2000. Guía de Buenas Prácticas para el Reciclaje de los Residuos Plásticos. Una Guía por y para las Autoridades Locales y Regionales. file:///C:/Users/tania.ramirez/Downloads/reciclaje.pdf. Fecha de consulta: 30 de octubre de 2020.
- Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ). 2016. El ABC de los plásticos -unicel. https://unicel-aniq.mx/medioambiente.html. Fecha de consulta 4 de mayo de 2020.
- Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ). 2017. Boletines Mensuales de la Industria Química 2017. https://aniq.org.mx/boletines/2017/AnalisisMensual/Assets/pdf/Analisis_mensual_julio_17.pdf. Fecha de consulta: 26 Mayo de 2020.
- Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ). 2019. Anuario Estadístico de la Industria Química 2019. https://aniq.org.mx/anuario/2019/. Fecha de consulta: 19 Mayo de 2020.
- Automated. 2014. La expansión de los bioplásticos. https://www.euautomation.com/mx/automated/article/la-expansion-de-los-bioplasticos. Fecha de consulta: 13 de abril de 2020.
- Avio C.G., Gorbi S., Milan M., Benedetti M., Fattorini D., d´Errico G., Pauletto M., Bargelloni L., Regoli F. 2015. Pollutants bioavailabitiy and toxicological risk from microplastics to marine mussels. Environmental Pollution. 198: 211-222.
- Awasthi A.K., Shivashankar M., Majumder S. 2017. Plastic solid waste utilization technologies: A Review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 263: 1-13.

- Azoulay D., Villa P., Arellano Y., Gordon M., Moon D., Miller K., Thompson K. 2019. Plastic & Health, The Hidden Costs of a plastic planet. Centrer for International Environmental Law. https://www.ciel.org/reports/plastic-health-the-hidden-costs-of-a-plastic-planet-february-2019/. Fecha de consulta: 31 de marzo de 2020.
- Baidya R., Debnath B., De D., Kumar Ghosh S. 2016. Sustainability of modern scientific waste compacting stations in the city of Kolkata. Procedia Environmental Sciences 31: 520-529.
- Barlow C., Morgan, D. 2013. Polymer film packaging for food: An environmental assessment. Resourse Conservation and Recycling., 78: 74-80.
- Barragán A. 2018. 3°A Trabajo de Tecnología Actividades Tema 2 - Los plásticos. http://3atecnologiaalbabarragan.blogspot.com/2018/11/actividad-1.html. Fecha de consulta: 13 de mayo de 2020.
- Barrebechea P., González I., Croce C. 2003. Estudio de mercado: materiales reciclables de residuos sólidos urbanos. http://www.cempre.org.uy/docs/biblioteca/030828_Informe_Final_de_Mercados_Barrenechea.pdf. Fecha de consulta: 30 de octubre de 2020.
- British Broadcasting Corporation (BBC). 2017. Leo Bekeland, el millonario belga que inventó el plástico practicando su hobby favorito. https://www.bbc.com/mundo/noticias-40943571. Fecha de consulta: 18 de marzo de 2020.
- British Broadcasting Corporation (BBC). 2019. Cómo los plásticos de ser una promesa de utopía futurista a la actual pesadilla ecológica. https://www.bbc.com/mundo/noticias-48699194. Fecha de consulta: 30 de marzo de 2020.
- Beltrán M., Marcilla A. 2012. Estructura y propiedades de los polímeros. http://iq.ua.es/TPO/Tema1.pdf. Fecha de consulta: 25 de abril de 2020.
- Bhatti J.A. 2010. Current state and potential for increasing plastics recycling in the U.S. Master degree thesis. Department of Earth & Environmental Engineering. Columbia University.
- Biofase. 2020. Tecnología. https://www.biofase.com.mx/bioplastico. Fecha de consulta: 17 de abril de 2020.
- BioSolutions. 2020. Bienvenidos a BioSolutions. https://biosolutions.mx/ Fecha de consulta: 2 de junio de 2020.
- Boletín Oficial del Estado de Baja California Sur. 2018 Ley De Equilibrio Ecologico Y Proteccion Del Ambiente Del Estado De Baja California Sur. Última reforma. Gobierno del Estado de Baja

California. http://legismex.mty.itesm.mx/estados/ley-bcs/BCS-L-EqEcolProtAmb2018_12.pdf. Fecha de consulta: 6 de Abril de 2020.

- Bonilla A. 2015. Producen bioplástico a partir de semillas de aguacate. Cienciamx. Noticias. http://www.cienciamx.com/index.php/tecnologia/biotecnologia/1324-joven-mexicano-produce-biplastico-a-partir-de-semillas-de-aguacate. Fecha de consulta 16 de abril de 2020.
- Bordón E. 2012. Propiedades de plástico. https://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/escolar/propiedades-del-plastico-407352.html. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2020.
- British Plastic Federation (BPF). 2020. Plastics in electrical and electronic applications. https://www.bpf.co.uk/innovation/plastics_in_electrical_and_electronic_applications.aspx#:~:text=PVC%20is%20widely%20used%20to,switches%2C%20light%20fittings%20and%20handles. Fecha de consulta: 11 de diciembre de 2020.
- Brooks A.l., Wang S., Jambeck J. 2018. The chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. Science Advances. 4.
- Brown M.A., Crump P., Niven S.J., Teuten E., Tonkin A., Galloway T., Thompson R. 2011. Accumulation of Microplastics on Shorelines Woldwide: Sources and Sinks. Environmental Sciences and Technology. 45: 9175-9179.
- Brunet R. 2020. El plástico en nuestras vidas. https://www.muyinteresante.es/innovacion/articulo/el-plastico-en-nuestras-vidas-281467114396. Fecha de consulta: 18 de marzo de 2020.
- Campos T. 2018. Con bioplástico de cáscaras de naranja, estudiante del ITESM representará a México en competencia mundial de emprendedores. Kataka. https://www.xataka.com.mx/investigacion/con-bioplastico-de-cascaras-de-naranja-estudiante-del-itesm-representara-a-mexico-en-competencia-mundial-de-emprendedores. Fecha de consulta: 16 de junio de 2020.
- Carpenter E., Anderson S., Harvey G., Miklas H. Peck B. 1972. Polystyrene Spherules in Coastal Waters. Science. 178: 749.
- Castillejos, E. 2019. ECOCE cumple 17 años en promover una cultura de sustentabilidad en México. The markethink. https://www.themarkethink.com/relaciones-publicas/ecoce-17-anos-cultura-sustentabilidad/. Fecha de consulta: 6 de Mayo de 2020.

- Castro Zarate E.X. 2019. Análisis cuantitativo de microplásticos de tamaño 0.5 mm a 5 mm en sedimentos costeros del Norte del Caribe Mexicano. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Celis F. 2018. Esta estudiante mexicana hará plástico con cáscara de naranja. Forbes México. https://www.forbes.com.mx/esta-estudiante-mexicana-hara-plastico-con-cascara-de-naranja/. Fecha de consulta: 19 de junio de 2020.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2018. Di no a las inundaciones y encharcamientos. https://www.gob.mx/cenapred/articulos/di-no-a-las-inundaciones-y-encharcamientos?idiom=es. Fecha de consulta: 23 de Abril de 2020.
- Cervantes Romero A.A. Lozano Loza F., Martínez Cruz C. 2018. Plástico a base de quitina (cáscaras de camarón). Universidad del Valle de México. http://vinculacion.dgire.unam.mx/vinculacion-1/Memoria-Congreso-2018/trabajos/ciencias-biologicas-quimicas-y-de-la-salud/medio-ambiente-biologia/doc3.pdf. Fecha de consulta: 3 de noviembre de 2020.
- Chung E. 2019. Most styrofoam isn't recycled. Here's how 3 startups aim to fix that. CBC. https://www.cbc.ca/news/technology/styrofoam-chemical-recycling-polystyrene-1.5067879. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2020.
- Cicloplast. 1996. La ruta del reciclado de plásticos. http://www.cicloplast.com/index.php?accion=ruta-del-reciclado&subAccion=reciclado-envases. Fecha de consulta: 15 de septiembre de 2020.
- Coca-Cola. 2016. Todo sobre IMER: la primera planta de reciclaje de PET Grado Alimenticio en América Latina. https://www.coca-colamexico.com.mx/historias/todo-sobre-imer-la-primera-planta-de-reciclaje-de-pet-grado-alimenticio-en-america-latina Fecha de consulta: 27 de abril de 2020.
- Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). 2017. Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, Informe sintético. http://www3.cec.org/islandora/fr/item/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf. Fecha de consulta 12 de octubre de 2020.
- Cornish M. 1997. El ABC de los plásticos. Universidad Iberoamericana, Departamento de Diseño Industrial, Gráfico y Textil. México.
- De Sá L.C., Luís L.G., Guilhermino, L. 2015. Effects of microplastics on juveniles of the common goby (Pomatoschistus microps): confusion with prey, reduction of the predatory performance and efficiency,

and possible influence of developmental conditions. Environmental Pollution.,196: 359-362.

- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1985. Norma Mexicana NMX-AA-61-1985. Protección al Ambiente – Contaminación del Suelo – Residuos Sólidos Municipales – Determinación de la Generación. México. Fecha de publicación: 8 de agosto de 1985.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2015. Proyecto de Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Fecha de publicación: 4 de agosto de 2015.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2018. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Última reforma. Fecha de publicación: 19 de enero de 2018.
- ECOCE 2020. Eco-Reto en escuelas. https://www.ecoce.mx/. Fecha de consulta: 24 de abril de 2020.
- Ecologistas en Acción. 2012. Refinando el petroleo y contaminando el mundo. https://www.ecologistasenaccion.org/11161/refinando-el-petroleo-y-contaminando-el-mundo/. Fecha de consulta: 10 Abril de 2020.
- Econoticias. 2010 Reciclado de plástico ¿Cómo se reciclan? https://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/21178/Reciclado-de-Plasticos-Como-se-Reciclan. Fecha de consulta: 21 de abril de 2020.
- Ecoosfera. 2014. Mexicanos descubren cómo hacer plástico biodegradable con desechos de leche. https://ecoosfera.com/2014/11/mexicanos-descubren-como-hacer-plastico-biodegradable-con-desechos-de-leche. Fecha de consulta: 9 de julio de 2020.
- Ecoshell. 2020. Productos. https://www.ecoshell.com.mx/. Fecha de consulta: 3 de noviembre de 2020.
- Ecoticias. 2020, Alianza europea para reducir el plástico e impulsar su reciclaje. https://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/200084/Alianza-europea-reducir-plastico-impulsar-reciclaje. Fecha de consulta: 1 abril de 2020.
- Ecovale. 2014. La importancia de reciclar. http://ecovale.com.mx/la-importancia-de-reciclar/. Fecha de consulta: 2 de abril de 2020.
- El empaque. 2019. Estudiantes mexicanas crean bioplástico con residuos de mango. http://www.elempaque.com/temas/Estudiantes-

mexicanas-crean-bioplastico-con-residuos-de-mango+130147. Fecha de consulta: 17 de julio de 2020.

- El Heraldo de México. 2019. ¿Basura? Disminuye el impacto con una bolsa que biodegrada compuesto orgánicos. https://heraldodemexico.com.mx/tv/archivo-tv/basura-disminuye-impacto-bolsa-biodegrada-compuestos-organicos-problema-acumulacion/. Fecha de consulta: 15 de septiembre de 2020.
- El Informante. 2018. Basura Genera 50 por Ciento de Inundaciones. https://elinformante.mx/?p=12454. Fecha de consulta: 21 de Abril 2020.
- Entrepreneur. 2009. Premian a emprendedores del Tec que crearon plástico biodegradable. https://www.entrepreneur.com/article/261447. Fecha de consulta: 6 de julio de 2020.
- Exaudem. 2018. Ana Elena Laborde Aguirre. Noticias y Eventos de la Dirección de Relación con Egresados de la Universidad de Monterrey. http://exaudem.blogspot.com/2018/05/ana-elena-laborde-aguirre-lin-02.html. Fecha de consulta: 2 de junio de 2020.
- Excelsior. 2017. Científicos de la UNAM desarrollan unicel biodegradable con tamarindo. https://www.excelsior.com.mx/nacional/2017/08/30/1185132. Fecha de consulta: 20 de julio de 2020.
- Fan B., Trant J.F., Wong A.D., Gilles E.R. 2014. Polyglyoxylates: A Versatile Class of Triggerable Self-Immolative Polymers from Readily Accessible Monomers. Journal of the American Chemical Society. 136: 10116-10123.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2017. Microplastics in fisheries and aquaculture. Status of knowledge on their ocurrence and implications for aquatic organisms and food safety. http://www.fao.org/3/a-i7677e.pdf. Fecha de consulta: 6 de julio de 2020.
- Freepik. 2019. Diagrama que muestra la destilación fraccionada de petróleo crudo vector gratuito. https://www.freepik.es/vector-gratis/diagrama-que-muestra-destilacion-fraccionada-petroleo-crudo_5916157.htm. Fecha de consulta: 21 de Abril 2020
- Fundación Carlos Slim. 2017. Desarrollan material con semillas de tamarindo que podría sustituir el unicel. https://fundacioncarlosslim.org/desarrollan-material-semillas-tamarindo-podria-sustituir-unicel/. Fecha de consulta: 30 de abril de 2020.

- Fundación UNAM. 2019. En México, el consumo nacional de unicel es 125 toneladas anuales. https://www.fundacionunam.org.mx/unam-al-dia/en-mexico-el-consumo-nacional-de-unicel-es-de-125-mil-toneladas-anuales/ Fecha de consulta: 29 de abril de 2020.
- Gabriel C. 2018. Polybion, salvando el medio ambiente en sólo 30 días. Newspreneur. https://newspreneur.lat/startups/sustentabilidad/polybion-salvando-el-medio-ambiente-en-tan-solo-30-dias/. Fecha de consulta: 31 de julio de 2020.
- Gaceta Oficial del Estado de Veracruz. 2019. Decreto por el que se Reforman los Artículos 1, en sus Fracciones XIII y XIV, 23 Bis, 23 Ter y Adiciona los Artículos 23 QuáTer y 23 Quinquies a la Ley de Prevención Y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Gobierno del Estado de Veracruz. http://www.legisver.gob.mx/gaceta/gacetaLXV/GACETA%2039.pdf. Fecha de consulta: 04 de junio de 2020.
- Ganar-Ganar. 2017. PetStar ratifica su compromiso con la sustentabilidad. https://ganar-ganar.mx/2018/05/29/petstar-ratifica-compromiso-la-sustentabilidad/. Fecha de consulta: 21 de abril de 2020.
- Ganar-Ganar. 2020. ¿Qué es el PET y qué puedes hacer para ayudar a reciclarlo? https://ganar-ganar.mx/2019/10/24/que-es-el-pet-y-que-puedes-hacer-para-ayudar-a-reciclar/. Fecha e consulta: 20 de abril de 2020.
- García J.M., Jones G.O., Virwani K., McCloskey B.D., Boday D.J., Huurne G.M., Horn H.W., Coady D.J., Bintaleb A.M., Alabdulrahman A.M.S., Alsewailem F., Almegren H.A.A., Hedrick J.L. 2014. Recyclable, Strong Thermosets and Organogels via Paraformaldehyde Condensation with Diamines. Science. 344: 732-735.
- Gestores de Residuos, 2020. La clasificación de los plásticos. https://gestoresderesiduos.org/noticias/la-clasificacion-de-los-plasticos. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2020.
- Global Citizen 2019. Ya funciona el dispositivo para limpiar el gran parche de basura del Pacífico. https://www.globalcitizen.org/es/content/ocean-cleanup-great-pacific-garbage-patch-2/ . Fecha de Consulta: 31 de marzo de 2020.
- Global Energy. 2015. Biofase, de Scott Murguía, sería la mayor empresa de bioplástico en México. https://globalenergy.mx/noticias/alternativas/eolica/biofase-de-scott-

munguia-seria-la-mayor-empresa-de-bioplastico-en-mexico/. Fecha de consulta 26 de junio de 2020.

- Global Energy. 2020. Waste Compactors. http://www.globalre-energy.com/waste-compactors/. Fecha de consulta: 17 de junio de 2020.
- Gobierno del Estado de México. 2017. Manual de Procesos de Recolección y Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos. Dirección de Servicios Públicos del Municipio de Chapultepec. https://www.ipomex.org.mx/recursos/ipo/files_ipo3/2018/42897/12/b7dd1951c7e475750edfaa105da3ec81.pdf. Fecha de consulta: 14 de septiembre de 2020.
- Greenpeace. 2017. Datos sobre la producción de plástico. https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/ Fecha de consulta: 26 de marzo de 2020.
- Greenpeace. 2020. Consumo de plásticos. https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/. Fecha de consulta 2 de abril de 2020.
- Greentv. 2016. Estudiantes poblanas convierten cáscara de frutas en bioplásticos. https://www.greentv.com.mx/uncategorized/estudiantes-poblanas-convierten-cascara-de-frutas-en-bioplasticos. Fecha de consulta: 4 de junio de 2020.
- Hope P.S., Parsons, D., Capaccio, G. and Kitchiner, M.J. 1992. The issue of contamination in recycling. Makromolekulare Chemie. Macromolecular Symposia. 57: 383-395.
- House of Commons Environmental Audit Committee (HCEAC). 2018. Disposable Packaging: Coffee Cups. Second Report of Session 2017-19. UK, Parlament. Reino Unido.
- Iberdrola. 2020. Las 5 islas de plástico oceánico en el mundo. https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/las-5-islas-de-basura-en-el-mundo. Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2020.
- InfoAgro. 2017. Científicos mexicanos crean bioplásticos. https://mexico.infoagro.com/cientificos-mexicanos-crean-bioplasticos/. Fecha de consulta: 3 de noviembre de 2020.
- Ingenet Bitácora. 2014. Transforman el desecho lactosuero en materia para suplementos alimenticios y plástico biodegradable. http://bitacora.ingenet.com.mx/2014/12/id-transforman-el-desecho-lactosuero-en-materia-para-suplementos-alimenticios-y-plastico-biodegradable/. Fecha de consulta: 4 de julio de 2020.

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2007. Ciclo de los residuos sólidos urbanos http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/105/I.html. Fecha de consulta: 14 de agosto de 2020.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2018. Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México. https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2019/default.html#Tabulados Fecha de Consulta: 17 de septiembre de 2020.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2019. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/. Fecha de consulta: 4 de junio de 2020.
- Interempresas. 1999. Cuando el caucho se convirtió en goma. https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/6255-Cuando-el-caucho-se-convirtio-en-goma.html. Fecha de consulta: 17 de marzo 2020.
- Investigación y Desarrollo. 2019. Logran estudiantes crear bioplástico con cáscaras de plátano que se degrada en 30 días. https://invdes.com.mx/agencia-id/logran-estudiantes-crear-bioplastico-cascaras-platano-se-degrada-30-dias/. Fecha de consulta: 3 de noviebre de 2020.
- Iresiduo. 2016. Los desechos del tomate pueden convertir el plástico normal en biodegradable. https://iresiduo.com/noticias/mexico/instituto-politecnico-nacional/16/09/05/desechos-tomate-pueden-convertir-plastico. Fecha de consulta: 3 de agosto de 2020.
- Issuu. 2017. Biosystems. Tecnológico de Monterrey. https://issuu.com/tecdemty/docs/biosystems. Fecha de consulta: 8 de julio de 2020.
- Jambeck J., Geyer R., Wilcox C., Siegler T., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Lavender K. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. Science 347: 768-771.
- Japan RPF Association. 2020. Solid Recovery Fuel. http://www.jrpf.gr.jp/en Fecha de consulta: 15 de diciembre de 2020.
- Jiménez J. 2017. Pondría naranja fin a la era del plástico. TecReview. http://tecreview.tec.mx/pondria-naranja-fin-a-la-era-del-plastico/. Fecha de consulta: 18 de junio de 2020.
- Jmalpica. 2019. Propiedades de la cáscara de nuez para crear bioplástico. México Ambiental. https://www.mexicoambiental.com/propiedades-de-la-cascara-de-

nuez-para-crear-bioplastico/. Fecha de consulta: 2 de septiembre de 2020.

- Joint Group of Experts on Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP). 2015. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. Reports and Studies. 90. Internationla Maritime Organization. https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/pdf/GESAMP_microplastics%20full%20study.pdf. Fecha de consulta: 6 de jullio de 2020.
- Juárez J. 2019. Desechos del café para crear bioplásticos: un proyecto con aroma Tec. Conecta. Tecnológico de Monterrey. https://tec.mx/es/noticias/veracruz/investigacion/desechos-del-cafe-para-crear-bioplastico-un-proyecto-con-aroma-tec. Fecha de consulta: 17 de agosto de 2020.
- Klein S., Worch E., Knepper T. 2015. Ocurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-Main area in Germany. Environmental Science and Technology. 49: 6070-6076.
- Lazzari M., López-Quintela M. 2005. Plásticos y medio ambiente: aspectos químicos del reciclaje de plásticos. Departamento de Química Física. https://www.academia.edu/31042520/Pl%C3%A1sticos_y_medio_ambiente_aspectos_qu%C3%ADmicos_del_reciclaje_de_pl%C3%A1sticos. Fecha de consulta: 30 de octubre de 2020.
- Leal A. 2019. Estudiantes mexicanas crean un bioplástico a base de mango. Tecnológico de Monterrey. https://tec.mx/es/noticias/sinaloa/investigacion/estudiantes-mexicanas-crean-un-bioplastico-base-de-mango. Fecha de consulta: 13 de julio de 2020.
- Leblanc R. 2019. An Overview of plastic recycling. The balance small business. https://www.thebalancesmb.com/an-overview-of-plastic-recycling-4018761. Fecha de consulta: 16 de september de 2020.
- Lee J., Hong S., Song Y.K., Hong S.H., Jang Y.C., Jang M., Heo N., Han G., Lee M., Kang D., Shim W. 2013. Relationships among the abundance of plastic debris in different size classes on beaches in South Korea. Marine Pollution Bulletin. 77: 349-354.
- Lee K.W., Shim W.J., Kwon O.Y., Kang J.H. 2013a. Size-dependent effects of micro polystyrene particles in the marine copepod Tigriopus japonicus. Environmental Science and Technology. 47: 11278-11283.
- Liu T., Guo X., Liu W., Hao C., Wang L., Hiscox W.C., Liu C., Jin C., Xin J., Zhang J. 2017. Selective cleavage of ester linkages of anhydride-

cured epoxy using a benign method and reuse of the decomposed polymer in new epoxy preparation. Green Chemistry. 19: 4364-4372.

- LJA.MX. 2013. Ratifica el relleno sanitario San Nicolás su certificación ambiental ISO 14001. http://www.lja.mx/2013/06/ratifica-el-relleno-sanitario-san-nicolas-su-certificacion-ambiental-iso-14001. Fecha de consulta: 29 de octubre de 2020.
- Local. 2017. La UNAM crea sustituto de unicel hecho de tamarindo. https://local.mx/ciudad-de-mexico/medio-ambiente/unam-unicel-espuma-tamarindo/. Fecha de consulta 23 de julio de 2020.
- López Argueta E. 2018. De cáscaras de naranja a plástico biodegradable. BioEconomía. https://www.bioeconomia.info/2018/12/11/de-cascaras-de-naranja-a-plastico-biodegradable/. Fecha de consulta: 17 de junio de 2020.
- López F. 2004. Fundamentos de los polímeros. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias. Venezuela.
- Lundberg Tech. 2020. WasteCompactor. https://lundbergtech.com/en/home-2/products-en/wastecompactor-en.html. Fecha de consulta: 17 de junio de 2020.
- Martín Pantoja J.L. 2007. Desechos generados por buques y residuos de carga. EOI Escuela de Negocios. https://www.eoi.es/es/file/18544/download?token=0f3LKpuN. Fecha de consulta: 6 de julio de 2020.
- Martinelli K. 2018. Is the 30-Year-Long Styrofoam War Nearing Its End? JSTOR Daily. https://daily.jstor.org/is-the-30-year-long-styrofoam-war-nearing-its-end/. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2020.
- Martínez I.D. 2018. ¿Por qué debe prohibirse el uso de unicel en la industria alimenticia en México? Derecho en acción. CIDE. http://derechoenaccion.cide.edu/por-que-debe-prohibirse-el-uso-de-unicel-en-la-industria-alimenticia-en-mexico-i-ii/. Fecha de consulta: 11 de mayo de 2020.
- Mazhandu Z., Muzenda E. 2019. Global plastic waste pollution challenges and management. 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference.
- México Ambiental. 2017. Con semilla de tamarindo (Tamarindus indica) fabrican científicos mexicanos espuma biodegradable para sustituir unicel. https://www.mexicoambiental.com/semilla-tamarindo-tamarindus-indica-fabrican-cientificos-mexicanos-espuma-biodegradable-sustituir-unicel/. Fecha de consulta: 24 de julio de 2020.

- Meza K. 2019. El florecimiento de bioplásticos en México. Tus buenas noticias. https://tusbuenasnoticias.com/medio-ambiente/florecimiento-bioplasticos-en-mexico/. Fecha de consulta: 8 de junio de 2020.
- Milenio. 2018. Crean bioplásticos con cáscara de naranja. https://www.milenio.com/negocios/crean-bioplastico-con-cascara-de-naranja Fecha de consulta: 10 de junio de 2020.
- Ministerio de Medio Ambiente de Chile (MMA). 2014. Guía para la Elaboración de Estrategias de Gestión de Residuos Plásticos en Chile. http://www.asipla.cl/wp-content/uploads/2014/10/GUIA_RESIUDOS_PLASTICOS_VF.pdf. Fecha de consulta: 30 de octubre de 2020.
- Montes S. 2018. Al menos 14 países ya han prohibido la utilización de bolsas plásticas en el mundo. Patagonia Ambiental. https://patagoniambiental.com.ar/info/al-menos-14-paises-ya-han-prohibido-la-utilizacion-de-bolsas-plasticas-en-el-mundo/. Fecha de consulta: 20 de Abril de 2020.
- Mulder K.F. 1998. Sustainable Consumption and Production of Plastics? - The Case of Clean Technologies. Technological Forecasting and Social Change. 58: 105-124.
- Mundo Agropecuario. 2019. Estudiantes mexicanos crean plástico biodegradable con cáscara de mango. https://mundoagropecuario.net/estudiantes-mexicanos-crean-plastico-biodegradable-con-cascara-de-mango/. Fecha de consulta: 14 de julio de 2020.
- Munger M.C. 2013. Recycling: Can it be wrong, when it feels so right? Cato Unbound. https://www.cato-unbound.org/2013/06/03/michael-c-munger/recycling-can-it-be-wrong-when-it-feels-so-right. Fecha de consulta: 30 de septiembre de 2020.
- Muñoz D. 2015. Mexicano hace plástico con semillas de aguacate. El Financiero. https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/mexicano-hace-plastico-con-semilla-de-aguacate. Fecha de consulta: 23 de junio de 2020.
- N+1. 2019. Estudiantes mexicanos desarrollan bioplástico a base de mango. https://nmas1.org/news/2019/05/07/mexico-bioplastico-mango. Fecha de consulta: 16 de julio de 2020.
- Nares P. 2018. Esta empresa mexicana inventó los popotes “de aguacate”. El Financiero. https://www.elfinanciero.com.mx/tech/esta-empresa-mexicana-invento-los-popotes-de-aguacate. Fecha de consulta. 21 de junio de 2020.

- National Geographic. 2020. Científicos mexicanos desarrollan plásticos biodegradables. https://www.ngenespanol.com/ciencia/desarrollo-de-plasticos-biodegradables-bioplasticos/ Fecha de consulta: 11 de agosto de 2020.
- Ogden W.A., Guan Z. 2018. Recyclable, Strong, and Highly Malleable Thermosets Based on Boroxine Networks. Journal of the American Chemical Society. 140: 6217-6220.
- Organización de la Naciones Unidas (ONU). 2019. Compromiso mundial para reducir los plásticos de un solo uso. Noticias ONU. https://news.un.org/es/story/2019/03/1452961. Fecha de consulta: 18 de Mayo 2020
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). 2018. Los gobiernos necesitan actuar para fomentar los mercados de reciclado de plásticos, dice la OCDE. https://www.oecd.org/centrodemexico/medios/losgobiernosnecesitanactuarparafomentarlosmercadosderecicladodeplasticosdicelaocde.htm. Fecha de consulta: 30 de octubre de 2020.
- Organozación Marítima Internacional (OMI). 2020. Prevención de la contaminación por las basuras de los buques. http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/Garbage/Paginas/Default.aspx. Fecha de consutta: 6 de julio de 2020.
- Ortiz A. 2020. Científico mexicano crea fungicel, el material que busca sustituir al unicel. Wokii. https://wokii.com/impact/environment/cientifico-mexicano-crea-fungicel-el-material-que-busca-sustituir-al-unicel/. Fecha de consulta: 5 de agosto de 2020.
- Ouadi M., Jaeger N., Greenhalf C., Santos J., Conti R., Hornung A. 2017. Thermo-Catalytic Reforming of municipal solid waste. Waste Managemen t. 68: 198-206.
- Packaging. 2014. Elaboran plástico biodegradable con harina de plátano. http://www.packaging.enfasis.com/notas/70139-elaboran-plastico-biodegradable-harina-platano. Fecha de consulta: 8 de septiembre de 2020.
- Pascual E. 2019. La clasificación de los plásticos ElBlogverde.com. https://elblogverde.com/clasificacion-plasticos/. Fecha de consulta: 23 de abril de 2020.
- Pedà, C., Caccamo L., Fossi M.C., Gai F., Andaloro F., Genovese L., Perdichizzi A., Romeo T., Maricchiolo G. 2016. Intestinal alterations in European sea bass (Dicentrarchus labrax) exposed to microplastics: Preliminary results. Environmental Pollution. 212: 251-256.

- Periódico Oficial del Estado de Oaxaca. 2019. Ley para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos del Estado de Oaxaca. Última reforma. Fecha de publicación: 22 de junio de 2019.
- Periódico Oficlal del Estado de Nuevo León. 2019. Ley Ambiental del Estado de Nuevo León. Última reforma, Gobierno del Estado de Nuevo León. http://www.hcnl.gob.mx/trabajo_legislativo/leyes/leyes/ley_ambiental_del_estado_de_nuevo_leon/. Fecha de consulta: 04 de junio de 2020.
- Petroquimex. 2014. Instituto Politécnico Nacional crea plástico biodegradable a partir de harina de plátano. https://petroquimex.com/instituto-politecnico-nacional-crea-%e2%80%a8plastico-biodegradable-a-partir-de-%e2%80%a8harina-de-platano/. Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2020.
- Plastic Europe. 2018. Plastics – the Facts 2018. An analysis of European plastics production, demand and waste data. https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf. Fecha de consulta: 3 de abril de 2020.
- Plastics Europe. 2020. Cómo se fabrica el plástico. https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics/how-plastics-are-made. Fecha de consulta 6 abril de 2020.
- Plastics Recyclers Europe (PRE). 2018. How does recycling work? https://www.plasticsrecyclers.eu/how-does-recycling-work. Fecha de consulta: 30 de septiembre de 2020.
- Plastic Recyclers Europe (PRE). 2019. Flexible Polyethylene Recycling in Europe, Accelerating the Transition Towards Circular Economy. https://www.plasticsrecyclers.eu/sites/default/files/2019-07/Flexible%20PE%20Recycling%20in%20Europe_June%202019_REVISED.pdf. Fecha de consulta: diciembre de 2019.
- Plastic Zero. 2012. Action 3.1: Survey on existing technologies and methods for plastic w aste sorting and collection. Plastic ZERO - Public Private Cooperations for Avoiding Plastic as a Waste, http://www.plastic-zero.com/media/20355/action_3.1_collection_and_sorting_technologies_-_final_july_2012.pdf. Fecha de consulta: 10 de junio de 2020.
- Plastics 101. 2020. What Is Advanced Recycling? https://www.thisisplastics.com/environment/recycling-101-chemical-recycling/#:~:text=Chemical%20recycling%20is%20any%20process,the%20limits%20of%20traditional%20recycling. Fecha de consulta: 13 de agosto de 2020.

- Plastics Technology. 2016. Unicel reciclado como negocio. https://www.pt-mexico.com/art%C3%ADculos/unicel-reciclado-un-negocio-de-ms-de-2-millones-de-metros-lineales Fecha de consulta: 28 de abril de 2020.
- Plastics Technology 2017. UNAM trabaja en desarrollo de biomateriales y bioplásticos. https://www.pt-mexico.com/noticias/post/unam-trabaja-en-el-desarrollo-de-biomateriales-y-bioplsticos Fecha de consulta: 13 de agosto de 2020.
- Plastics Technology. 2019. Estudiantes del Tec crean bioplástico hecho con cáscara de mango. https://www.pt-mexico.com/noticias/post/estudiantes-del-tec-crean-bioplastico-hecho-de-cascara-de-mango. Fecha de consulta: 15 de julio de 2020.
- Pontaza D. 2019. Ecoplaso, la statup que transforma desechos en accesorios. Tecreview. https://tecreview.tec.mx/ecoplaso-una-opcion-en-pro-del-planeta/. Fecha de consulta: 8 de junio de 2020.
- Recytrans. 2013. ¿Cómo se recicla el plástico? https://www.recytrans.com/blog/como-se-recicla-el-plastico. Fecha de consulta 12 de octubre de 2020.
- Rennueva. 2018. Plan Nacional de Manejo de Residuos de EPS. http://rennueva.com/plandemanejounicel/Plan%20de%20Manejo%20EPS.pdf. Fecha de consulta: 07 de mayo de 2020.
- Reyes K. 2018. Científicos de UNAM crean unicel a base de tamarindo. Así Sucede. https://asisucede.com.mx/cientificos-de-unam-crean-unicel-a-base-de-tamarindo/. Fecha de consulta: 24 de julio de 2020.
- Rincón J.M. 2008. Materias Primas para la Industria del Vidrio. Universidad del País Vasco. http://www.ehu.eus/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_049.pdf. Fecha de consulta 12 de octubre de 2020.
- Rivera K. 2020. Bolsas 100% orgánicas son desarrolladas en México. http://www.eloriente.net/home/2020/03/10/bolsas-100-organicas-son-desarrolladas-en-mexico/. Fecha de consulta: 15 de septiembre de 2020.
- Röben E. 2003. El Reciclaje. Oportunidades para reducir la generación de los desechos sólidos y reintegrar materiales recuperables en el círculo económico. Municipio de Loja/DED. https://ambientehogar.files.wordpress.com/2017/08/manual-el-reciclaje.pdf. Fecha de consulta: 3 de noviembre de 2020.
- Rodríguez D. 2019. El fabricante mexicano de popotes de aguacate que se degrada en 8 meses. El País.

https://verne.elpais.com/verne/2019/02/09/mexico/1549674807_968461.html. Fecha de consulta: 22 de junio de 2020.

- Royer S.J., Ferrón S, Wilson S.T., Karl D.M. 2018. Production of methane and ethylene from plastic in the environment. Plos One. https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0200574. Fecha de consulta: Abril de 28 de 2020.
- Rubio Maldonado E., Murad Robles M., Rovira Sanroque J.V. 2010. Crisis ambiental en la costa de Quintana Roo como consecuencia de una visión limitada de lo que representa el desarrollo sustentable. Argumentos. 23: 161-185.
- Ruiz A.L. 2018. A los 21 años ideó su empresa, hoy es líder en la industria de desechables. Entrepreneur. https://www.entrepreneur.com/article/320599. Fecha de consulta: 3 de noviembre de 2020.
- Salgado R. 2014. Bioplásticos: Productos biodegradables. Saber más. Revista de divulgación de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. https://www.sabermas.umich.mx/archivo/tecnologia/141-numero-1856/285-bioplasticos-productos-biodegradables.html. Fecha de consulta: 14 de abril de 2020.
- San Andrés M., Chércoles R., Gómez M., De la Roja J.M. 2010. Materiales sintéticos utilizados en la manipulación, exposición y almacenamiento de obras de arte y bienes culturales. Caracterización por espectroscopia FTIR–ATR. http://www.culturaydeporte.gob.es/dam/jcr:4cc0936a-f176-4283-87d2-9397f1a152b7/matsintreinasof.pdf. Fecha de consulta: 13 de mayo de 2020.
- Sánchez A. 2014. Reciclaje de unicel un negocio desperdiciado. https://www.elfinanciero.com.mx/archivo/reciclaje-de-unicel-un-negocio. Fecha de consulta: 30 de abril de 2020.
- Sánchez Q. 2019. Popotes de plástico biodegradable natural creado por alumnas de la UNAM. Hola Zacatlán. https://www.holazacatlan.com/2019/06/popotes-de-plastico-biodegradable.html. Fecha de consulta: 3 de noviembre de 2020.
- Santillán M. 2018. Una vida de plástico. Ciencia UNAM. http://ciencia.unam.mx/leer/766/una vida-de-plastico. Fecha de consulta: 27 de abril de 2020.
- Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). 2017. Norma Ambiental sobre Separación, Clasificación, Recolección selectiva y Almacenamiento de los Residuos del Distrito Federal. http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/NADF_024.html

- Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). 2019. Contenido Plan de Manejo de Residuos Sólidos No Sujetos a Licencia Ambiental Única (LAUCDMX). https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/contenido-plan-manejo-residuos-solidos-no-sujetos-laudf.pdf. Fecha de consulta: 9 de junio de 2020.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2012. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México Informe 15. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html. Fecha de consulta: 26 de Mayo de 2020.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2015. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2018. Informe de la situación del medio ambiente en México 2018, residuos. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Cap7_Residuos.pdf. Fecha de consulta: 25 de octubre de 2020.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2019. Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental - Residuos sólidos, Rellenos Sanitarios. https://datos.gob.mx/busca/dataset/indicadores-basicos-del-desempeno-ambiental--residuos-solidos. Fecha de consultra 25 de octubre de 2020.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2020. Estaciones de transferencia de residuos sólidos urbanos y procesos reportados por entidad federativa http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RSM03_07&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=*&NOMBREANIO=*. Fecha de consulta: 11 de septiembre de 2020.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (SEMARNAT/INECC). 2020. Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. Primera Edición, mayo 2020. México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf. Fecha de consulta: 30 de octubre de 2020.
- Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial (SMADSOT). 2018. Plan de Gestión Ambiental para el Municipio de Puebla.

http://www.pueblacapital.gob.mx/images/transparencia/obl/vi-planes/plan.gest.amb.pdf. Fecha de consulta: 27 de julio de 2020.

- Shim W., Hong. S., Soen E. 2018. Marine Microplastics: abundance, distribution and composition. En: Zeng E. (editor). Microplastic contamination in aquatic environments. Elsevier. United States. pp. 1-26.
- Sirianni Q.E.A., Gilles E.R. 2020. The architectural evolution of self-immolative polymers. Polymer. 202. 122638.
- Solis M., Silveira S. 2020. Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment. Waste Management. 105: 128–138.
- Somos Industria. 2019. Desarrolla biomateriales en Guanajuato. https://www.somosindustria.com/articulo/desarrollan-biomateriales-en-guanajuato/. Fecha de consulta: 31 de julio de 2020.
- Sutco. 2020. Ballistic separator. https://www.sutco.de/en/components/ballistic-separator. Fecha de consulta: 15 de junio de 2020.
- Sweet Cannela. 2019. Bioplástico mexicano hecho a partir de cáscara de naranja. Directo al Paladar México. https://www.directoalpaladar.com.mx/ingredientes-y-alimentos/bioplastico-mexicano-hecho-a-partir-de-cascara-de-naranja. Fecha de consulta: 16 de junio de 2020.
- Sysfix. 2011. El plástico: Historia del plástico, sus tipos y su moldeo. http://www.sysfix.es/el-plastico-su-historia-sus-tipos-y-su-moldeo/. Fecha de consulta: 18 de marzo de 2020.
- Tecnología del Plástico. 2017. UNAM desarrolla sustituto de unicel a base de tamarindo.
- Tecnología del Plástico. 2018. México construye una industria del reciclaje de ESP. http://www.plastico.com/temas/Mexico-construye-una-industria-del-reciclaje-de-EPS+125381?pagina=2. Fecha de consulta: 30 de abril de 2020.
- Tecnología del Plástico. 2019. Nuez de castilla se convierte en base de bioplástico. http://www.plastico.com/temas/Nuez-de-castilla-se-convierte-en-base-de-bioplastico+130737. Fecha de consulta: 4 de septiembre de 2020.
- Tecnología de los Plásticos. 2011. Códigos de los plásticos. https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/codigos-de-los-plasticos.html. Fecha de consulta: 13 de mayo de 2020.
- Thompson R., Olsen Y., Mitchell R., Davis A., Rowland S., John A., Rusell A. 2004. Lost at Sea: where is all the plastic? Science. 304: 838. Doi: 10.1126/science.1094559

- Tinsley. 2020. What is a Ballistic Separator? https://www.tinsleycompany.com/recycling/what-is-a-ballistic-separator/. Fecha de consulta: 15 de junio de 2020.
- Tomra. 2019. Circular Economy. https://www.tomra.com/es-es/sorting/recycling/recycling-news/2019/circular-economy-ebook. Fecha de consulta: diciembre de 2019.
- Toppr. 2020. Polymers of commercial importance. https://www.toppr.com/guides/chemistry/polymers/polymers-of-commercial-importance/. Fecha de consulta: 29 de abril de 2020.
- Tsang Y.F., Kumar V., Samadar P., Yang Y., Lee J., Ok Y.S., Song H., Kim K-H., Kwon E.E., Jeon Y.J. 2019. Production of bioplastic through food waste valorization. Environment International. 127: 625-644.
- Twenergy. 2019a. ¿Qué son los biolplásticos y cómo se fabrican? https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/residuos/fabricar-bioplasticos-en-casa/ Fecha de consulta: 7 de abril de 2020.
- Twenergy. 2019b. ¿Cómo se realiza el reciclaje de plásticos? https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/reciclaje/reciclado-de-plasticos-542. Fecha de consulta 12 de octubre de 2020.
- Unite Nations UN Global Compact. 2012. The Ten Principles of the UN Global Compact. https://www.unglobalcompact.org/what-is-gc/mission/principles. Fecha de consulta: 16 de Mayo de 2020.
- United Natons Environmental Programme (UNEP). 2009. Converting waste plastics into a resource. Division of Technology, Industry and Economics. International Environmental Technology Centre. Osaka/Shiga, Japan. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8638/WastePlasticsEST_Compendium_full.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Fecha de consulta: 30 de septiembre de 2020.
- United Nations Environmental Programme (UNEP). 2018. Our planet is drowning in plastic pollution. https://www.unenvironment.org/interactive/beat-plastic-pollution/. Fecha de consulta: 6 de julio de 2020.
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 2017. Mayor producción de basura durante periodos vacacionales. http://www.unamglobal.unam.mx/?p=15008. Fecha de consulta: 21 de Abril de 2020.
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 2019. A partir de cáscara de mango y baba de nopal alumnas del CCH Oriente crean popote. Dirección General de Comunicación Social. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2019_403.html. Fecha de consulta: 3 de noviembre de 2020.

- Usa la Basura. 2010. Todo sobre papel y cartón. http://www.usalabasura.org/residuos/papel-carton/item/199-papel-y-cart%C3%B3n. Fecha de consulta 12 de octubre de 2020.
- Usón V. 2019. El plástico atasca las arterias de la Ciudad de México. El País. https://elpais.com/sociedad/2019/05/23/actualidad/1558624419_313952.html. Fecha de consarzo de 2020.
- Valles Y. 2019. Emprendedores mexicanos crean piel vegana. Experto PYME. https://www.expertopyme.com/emprendedores-mexicanos-crean-piel-vegana2/. Fecha de consulta: 4 de agosto de 2020.
- Vázquez A. 2020. Elaboran politécnicas bioplástico con cáscara de pepino. Investigación y Desarrollo. https://invdes.com.mx/ciencia-ms/elaboran-politecnicas-bioplastico-con-cascara-de-pepino/. Fecha consulta: 27 de agosto de 2020.
- Vázquez Morillas A., Espinosa Valdemar R., Beltrán Villavicencio M., Velasco Pérez M. 2016. El reciclaje de los plásticos. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana/ANIPAC. http://biblioteca.anipac.mx/wp-content/uploads/2016/10/0047_El_Reciclaje_de_los_Plasticos.pdf. Fecha de consulta: 30 de septiembre de 2020.
- Velázquez M. 2016. Ecoplaso, la alternativa orgánica al plástico industrial. El popular. https://www.elpopular.mx/2016/10/09/identidad-empresarial/ecoplaso-la-alternativa-organica-al-plastico-industrial-151557. Fecha de consulta: 6 de junio de 2020.
- Villanueva A. 2019. El sustituto del biodegradable de unicel que creó este mexicano. Tecnológico de Monterrey. https://tec.mx/es/noticias/nacional/emprendedores/el-sustituto-biodegradable-de-unicel-que-creo-este-mexicano. Fecha de consulta: 29 de julio de 2020.
- Vidal A., 2019. Aprovechamiento de cáscaras de tuna para la producción de bioplásticos mediante un injerto de anhídrido oleico en la matriz lignocelulósica. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Villanueva A., Eder P. 2014. End-of-waste criteria for waste plastic for conversión. Technical Report by the Joint Research Centre of the European Commission. https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/end-waste-criteria-waste-plastic-conversion-technical-proposals. Fecha de consulta: 15 de junio de 2020.

- Waste Management World (WMW). 2019a. Product News. Special edition Recycling. Marzo-Abril.
- Waste Management World (WMW). 2019b. Product News. Special edition Recycling. Julio-Agosto.
- Waste Tech. 2020. Cardboard, Waste & Garbage Compactors. https://wastech.com.au/all-compactors/. Fecha de consulta. 17 de junio de 2020.
- Watkins E., Schweitzer J-P., Leinala E., Börkey P. 2019. Policy approaches to Incentivise Sustainable Plastic Design. OECD Environmental Working Papers. No. 149. Organization for Economic Cooperation and Development. https://doi.org/10.1787/233ac351-en. Fecha de consulta: 8 de junio de 2020.
- Watts A.J., Urbina M.A., Corr S., Lewis C., Galloway T.S. 2015. Ingestion of plastic microfibres by the crab Carcinus maenas and its effect onf food consumption and energy balance. Environmental Science and Technology. 49: 14597-14604.Wilhelm R. 2008. Códigos de Identificación de Resinas. American Society of Testing Materials (ASTM). https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPSO08/wilhelm_spso08.html. Fecha de consulta: 13 de mayo de 2020.
- Wu C., Williams P.T. 2010. Pyrolysis–Gasification of Plastics, Mixed Plastics and Real-World Plastic Waste With and Without Ni–Mg–Al Catalyst. Energy and Fuels. 89: 3022-3032.
- Yang G., Rohde B.J., Tesefay H., Robertson M. 2016. Biorenewable Epoxy Resins Derived from Plant-Based Phenolic Acid. ACS Sustainable Chemistry and Engineering. 4: 6524-6533.
- Zero Emissons Objetive (ZEO). 2020. ¿Cuánto CO_2 emite el plástico? https://plataformazeo.com/es/cuanto-co2-emite-el-plastico/. Fecha de consulta: 26 de 5 de 2020.
- Zhu J-B., Watson E.M., Tang J., Chen E.Y.X. 2018. A synthetic polymer system with repeatable chemical recyclability. Science. 360: 398-403.
- Zimmerman L., Dierkes G., Ternes T.A., Völker C., Wagner M. 2019. Benchmarking the in Vitro Toxicity and Chemical Composition of Plastic Consumer Products. Environmental Sciencie and Technology. 53: 11467-11477.
- Zúñiga S. 2019. Científico pone en alto el nombre de Irapuato. El Sol de Irapuato. https://www.pressreader.com/mexico/el-sol-de-irapuato/20190215/282862257150356. Fecha de consulta: 28 de julio de 2020.