



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ANÁLISIS DE LAS OPCIONES DE GESTIÓN
DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEL
POLIPROPILENO EN SU ETAPA DE FIN DE
CICLO DE VIDA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

QUÍMICO FARMACÉUTICO BIÓLOGO

P R E S E N T A :

ALDO AZPEITIA MAYA

TUTOR

DR.ROLANDO JAVIER BERNAL PÉREZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*Dedico este trabajo a mi familia y a la vida:
aquello que me permitió culminar este gran proceso en mi paso, y que me ha traído
grandes oportunidades y retos.*

Agradecimientos

Llegar a esta sección es muy emotiva para mí. Esto porque no terminaría en agradecer a todas las personas, momentos, oportunidades y retos que me han acompañado en comenzar este importante proceso de mi vida. No descarto la posibilidad de que esto sea el inicio de algo nuevo, porque al final el conocimiento seguirá allí esperando que alguien se atreva a surcar sus olas.

Empezaré agradeciendo a la vida. Me ha traído grandes momentos, sin distinguir si fueron “buenos o malos”. Al final, todo es aprendizaje y todo es temporal. Hay que seguir adelante, disfrutar y agradecer lo vivido.

Agradezco a mi país por darme la preparación para estudiar en la UNAM.

Agradezco a la Universidad por todo lo que me ha enseñado desde que entré a la Preparatoria (ENP 8). Me llena de orgullo decir que soy universitario, y más aún, que soy egresado y titulado de la H. Facultad de Química. Gracias a la Universidad por las clases presenciales (anteriores a la pandemia por SARS-CoV-2), por los talleres, por las becas (una de ellas fue participar en el Bootcamp de Verano 2019 en el ITAM), por recibirme en sus laboratorios, por todos los materiales de consulta, por sus actividades artísticas que presencié y practiqué, por los cursos extracurriculares de idiomas, por los deportes que practiqué y en general por haber sido mi lugar preferido. Por todo lo anterior (y aún no terminaría de mencionar más razones) tengo un enorme deber y responsabilidad en los actos que yo realice en mi tiempo de vida. De igual forma, agradezco al personal de la UNIPREC con quienes hice proyectos al inicio de mi paso por la Facultad.

Del mismo modo, agradezco a los sinodales que revisaron, corrigieron y dieron grandes aportes a mi trabajo. Este agradecimiento va dirigido al Dr. Alejandro Pisanty Baruch, al Dr. Victor Manuel Luna Pabello, al Dr. Rolando Javier Bernal Pérez, a la Dra. Berenice Ovalle Magallanes y a la Mtra. Adriana Armendarez Tabares. Asimismo, doy las gracias al Mtro. Raúl Quintero Rodríguez, quien me ayudó a obtener el cálculo del peso promedio y la vida útil del PP en un relleno sanitario de la CDMX. De igual forma, esta tesis no hubiera estado lista sin la valiosa ayuda del Dr. Antonio Martínez-Richa.

Reconozco el apoyo invaluable de mi familia, en especial a mis papás (Ignacio y

María), hermanos (Ángel Cristian, María Fernanda, Marisol y Karla) y tía (Alejandra); quienes han estado en todo momento a mi lado. Si no fuera por ello(a)s, no estaría en este momento.

Mis amigo(a)s también son piezas importantes a lo largo de todo este tiempo. Ello(a)s fueron con quienes he compartido momentos memorables desde mis pasos por la ENP8. Hago una mención especial a mis amigo(a)s de “El Psicólogo que canta”: Luis, Ulises, Vanessa, Pedro y Daniela; de mis compañero(a)s y profesores del 414, el Súper 501 (específicamente a Bibiana) y del grupo 607, y externos a esos grupos; a mis amigo(a)s y compañero(a)s de estudio y de laboratorios de la H. Facultad de Química con quienes compartí momentos juntos de estrés, desesperación y festejo por aprobar las materias o por recurrar las materias. Hago mención especial a mis amigos y amigas del Grupo 12 de primer semestre, con quienes inicié mi recorrido por los pasillos de la Facultad. De ellos, está Dani Barredo. Agradezco también a mis amigo(a)s “Marsupiales” a mis amigo(a)s de “Pahuatlán 2019” y “Movimiento POP UNAM-FQ”, en especial mención a Rebeca, Teffi, Zanda, Gaby, Eliud, Blanca, Jero, Charly, Angélica, Adrián, Sam, Iván y Vale.

En el mismo orden de ideas, es importante mencionar a los profesores y profesoras quienes, a través de sus enseñanzas académicas y de vida, me motivaron y apoyaron en todo momento. Una especial mención a Edu, Rolando, Héctor, Jimena, Jorge y Fernando.

Por otra parte, mando un agradecimiento al personal de la Facultad de Química y de la UNAM que, con su gran trabajo, pude presentar mi tesis en temporada de pandemia por SARS-CoV-2. El mismo agradecimiento va dirigido al personal de la Biblioteca de la FQ, con quienes me dirigí para solicitar información de artículos relacionados a mi tesis.

Casi por terminar, agradezco mucho a las personas con quienes me encontré en mi vida. Ya sea con una llamada, una plática, una reunión o con compartir el tiempo. Fueron guías que me permitieron llegar a este momento.

Finalmente, no descarto la posibilidad de que en el futuro me encontraré con más increíbles personas, así que este trabajo también va para ustedes/ella(o)s.

¡A todos ustedes, muchas gracias!

Siglas y abreviaturas

ACV = Análisis de Ciclo de Vida

ANIPAC = Asociación Nacional de Industrias del Plásticos

ANIQ = Asociación Nacional de la Industria Química

ATSDR = Agency for Toxic Substances and Disease Registry

CDMX = Ciudad de México

EPA = Environmental Protection Agency

GPGP = Great Pacific Garbage Patch

IMP = Instituto Mexicano del Petróleo

INEGI = Instituto Nacional de Geografía e Informática

ISO = International Standard Organization

ONU = Organización de las Naciones Unidas

PP = Polipropileno

RS = Relleno Sanitario

RSU = Residuos Sólidos Urbanos

SEMARNAT = Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SPI = Sociedad de la Industria de Plásticos

UE = Unión Europea

UNAM = Universidad Nacional Autónoma de México

V = Vanadio

Resumen

El objeto de estudio son las resinas termoformadas del polipropileno (PP). “Dichos plásticos se usan en la producción de charolas de comida, recipientes de microondas y de congelación, envases de helados y margarina, envases de snacks, empaques de panadería y de confitería, envases de bocadillo, vasos para bebidas, entre otros” (British Plastics Federation, 2019). Posterior a mostrar la recopilación de información presente en el entorno teórico, en la sección de Resultados se muestran tablas y figuras relacionadas con la producción de los plásticos y del polipropileno. Del mismo modo se muestran las opciones de disposición final de estos residuos en México y en algunos otros países. Asimismo, se identifican las sustancias emitidas por las resinas del PP; se obtiene el peso promedio de los residuos de este tipo de plásticos; y se muestran las respuestas de la encuesta realizada a empresas del reciclaje del PP en México. En la sección de Análisis de Resultados se documenta si las opciones de disposición final de RSU son eficientes. Finalmente, en la sección de Conclusiones y Recomendaciones se toma una postura acerca de si prohibir los plásticos del PP es la solución a los problemas de acumulación causados por estos materiales.

Ante esta breve introducción, la presente investigación comienza con una recopilación de información sobre los aspectos generales de los plásticos, y más específicamente con el polipropileno. La información consultada está disponible en reportes, anuarios, revistas y artículos indexados, los cuales dan soporte al entorno teórico presente en esta investigación. Además, se presentan los resultados obtenidos después de consultar a especialistas de residuos sólidos urbanos en México y de encuestas realizadas a centros de acopio y reciclaje de materiales plásticos.

La razón por la cual fue realizada esta investigación es porque al principio se tuvo interés en comparar la huella hídrica entre los vasos de un solo uso del PP y vasos reusables de policarbonato. Del mismo modo en conocer la cantidad de agua usada al lavar de manera manual o con un lavavajillas esos dos tipos de vasos. Cabe mencionar que la huella hídrica de esos dos materiales no ha sido encontrada. Por ello, para continuar con el desarrollo del plástico de polipropileno como objeto de estudio, se dirigió la investigación hacia la disposición final de este material. Esto con el fin de generar información que no está presente en la literatura ni en la red y que pudiera ser usada para futuras líneas de investigación.

Esta investigación está principalmente enfocada en la etapa del fin de ciclo de vida del PP. Esto no tiene el fin de desconocer el inicio de ciclo de vida de dicho producto.

Al final de esta investigación no se pretende llegar a una conclusión definitiva, ni que, a manera personal, pudiera entenderse como la conclusión general ante la situación actual de la disposición final del PP. Se espera que esta investigación sea punto clave para la discusión del tema relacionado con la disposición final del PP y de otros residuos sólidos urbanos. Si esta investigación despierta el interés y la curiosidad por adentrarse más al tema, podré decir que el objetivo de escribir esta tesis ha sido realizado.

Abstract

The object of study is the thermoformed resins of polypropylene (PP). "Such plastics are used in the production of food trays, microwave and freezer containers, ice cream and margarine containers, snack packaging, bakery and confectionery packaging, sandwich packaging, beverage cups, among others" (British Plastics Federation, 2019). After showing the collection of information present in the theoretical environment, the Results section shows tables and figures related to the production of plastics and polypropylene. The final disposal options for this waste are also shown in Mexico and in some other countries. Likewise, the substances emitted by PP resins are identified; the average weight of residues of this type of plastics is obtained; and the responses of the survey carried out on PP recycling companies in Mexico are shown. The Results Analysis section documents whether the final MSW layout options are efficient. Finally, the Conclusions and Recommendations section takes a position on whether banning PP plastics is the solution to the problems of accumulation caused by these materials.

With this brief introduction, this research begins with a collection of information on the general aspects of plastics, and more specifically with polypropylene. The information consulted is available in reports, yearbooks, journals and indexed articles, which support the theoretical environment present in this research. In addition, the results obtained after consulting urban solid waste specialists in Mexico and surveys conducted at plastic materials collection and recycling centers are presented.

The reason why this research was carried out is because at first it was interesting

to compare the water footprint between single-use PP vessels and reusable polycarbonate vessels. Similarly in knowing the amount of water used when washing manually or with a dishwasher those two types of glasses. It should be mentioned that the water footprint of these two materials has not been found. Therefore, in order to continue the development of polypropylene plastic as an object of study, research was directed towards the final disposition of this material. This in order to generate information that is not present in the literature or in the network and that could be used for future lines of research.

This research is mainly focused on the end-of-life stage of PP. This is not intended to ignore the start of the life cycle of such a product.

At the end of this investigation it is not intended to reach a definitive conclusion, nor that, personally, it could be understood as the general conclusion given the current situation of the final provision of the PP. This research is expected to be a key point for the discussion of the final disposal of PP and other urban solid waste. If this research arouses interest and curiosity to go deeper into the subject, I can say that the aim of writing this thesis has been realized.

Introducción

Hoy en día se puede ver al plástico inmerso en la sociedad: cada vez que se usa algún dispositivo electrónico; la ropa y calzado para vestir; la reunión con amigos y familiares a la que se acude y se sirve comida o bebida en un vaso y plato de plástico; los empaques de regalo; los contenedores; partes de automóviles, de aviones, de barcos y estructuras de construcción; por mencionar algunos ejemplos. ¿Se podría pensar en un mundo sin la existencia de estos materiales? La respuesta es que sería inimaginable, ya que ellos ocupan un rol importante en la vida. Con todo esto, surge la siguiente pregunta: Si el plástico es un bien útil, ¿por qué hay campañas que desean prohibir los plásticos desechables y de un solo uso? Rebitzer (2019) afirma que los plásticos desechables “son los que se usan para servir, proteger, transportar, almacenar y dispensar durante un periodo de tiempo. De lo contrario, los plásticos que son de un solo uso se refieren a los plásticos que se pueden usar sólo momentáneamente y luego son desechados”. Ejemplos de este tipo de plásticos son: envases de alimentos, platos desechables de polipropileno (PP) o poliestireno expandido (comercialmente conocido como unicel), tapas de vasos de café, popotes, entre otros.

Este tipo de medidas de prohibición surgieron a partir de 1985 cuando se informó sobre la acumulación excesiva de los plásticos desechables y de un solo uso en los ecosistemas marinos (Day, 1985). De igual forma, hay reportajes y videos como el de la National Geographic (s.f), titulado “The Great Pacific Garbage Patch” que muestran a diversas especies de animales (tortugas, paces, ballenas) que están en contacto directo con dicha acumulación, en vista de que dichas especies ingieren estos materiales por confundirlos con comida, y que incluso al realizarles una necropsia se encuentran

materiales plásticos en sus sistemas digestivos.

Por lo anterior, entre otras consecuencias derivadas del uso desmedido de plásticos (por ejemplo, en el manejo integral de residuos), diversos países toman acción para disminuir el uso de este tipo de materiales. Para ilustrar este tipo de acciones, en el mes de mayo del 2019, el Congreso de la Ciudad de México reformó la Ley de Residuos Sólidos en beneficio del medio ambiente. Dicha reforma menciona que a partir de diciembre del 2020 queda prohibida la distribución y entrega de bolsas de plástico (salvo que sean compostables); lo mismo sucede a partir del 1° de enero del 2021 con los popotes, tenedores, cuchillos, cucharas, palitos de mezcladores, platos, bastoncillos para hisopos de algodón, globos y varillas para globos, vasos y sus tapas, charolas para transportar alimentos, aplicadores de tampones que son fabricados total o parcialmente de plástico y se desechan después de un solo uso. (Congreso CDMX, 2019).

Con todo lo anterior, es como doy inicio al presente desarrollo de esta tesis.

Índice general

Agradecimientos	II
Siglas y abreviaturas	IV
Resumen	VI
Abstract	VIII
Introducción	X
Antecedentes	XXI
1. Entorno teórico	1
1.1. Polipropileno	1
1.1.1. Generalidades	1
1.1.2. Tipos de polipropileno	2
1.1.3. Indelpro	4
1.2. Análisis de ciclo de vida de los productos	6
1.2.1. Concepto	6
1.2.2. Análisis de ciclo de vida del polipropileno	7
1.2.3. Cradle-to-grave	8
1.3. Disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU)	8
1.3.1. Diagnóstico general de los RSU en México	8
1.3.2. Manejo integral de residuos	9
1.4. Reducir, reusar y reciclar. Las 3Rs	18

1.5. Economía circular	19
1.6. Ecotoxicidad	20
1.6.1. Contaminantes tóxicos presentes en los desechos plásticos . . .	24
2. Planteamiento de la investigación	26
2.1. Consideraciones al entorno teórico	26
2.2. Planteamiento del problema	28
2.3. Objetivos	28
2.4. Pregunta de investigación	29
2.5. Metodología	29
3. Resultados	31
3.1. Generalidades	31
3.2. Industria del plástico a nivel mundial	33
3.3. La Gran Isla de Basura	37
3.4. Posición de México en la producción de plásticos	44
3.5. Industrial del polipropileno en México	45
3.6. Manejo integral de los plásticos	50
3.6.1. Rellenos sanitarios	50
3.6.2. Incineración	52
3.6.3. Reciclaje	54
3.7. Situación de la disposición final del polipropileno	54
3.7.1. Manejo integral de residuos del polipropileno en México	55
3.7.2. Cálculo del peso promedio y vida útil del PP en un relleno sanitario de la CDMX	62
3.8. Economía circular	63
3.9. Contaminantes presentes en los RSU	64
4. Análisis de resultados	68
4.1. Disposición final de los RSU	69
4.1.1. Contexto	70

4.1.2. Rellenos sanitarios	71
4.1.3. Incineración	75
4.1.4. Reciclaje	83
4.2. Manejo integral de los residuos plásticos	86
4.3. La Gran Isla de Basura	87
4.4. Legislación	91
4.5. Contaminantes tóxicos presentes en el PP	95
4.6. 3Rs, 5Rs y Economía circular	97
4.7. Propuestas de implementación	99
4.8. ¿Las alternativas al plástico son la solución?	101
5. Conclusiones y Recomendaciones	102
6. Anexos	123
6.1. Plásticos	123
6.1.1. Etimología	123
6.1.2. ¿Qué son?	123
6.1.3. Contexto histórico de los plásticos	126
6.1.4. Categorías de plásticos	132
6.1.5. Contexto histórico	147
6.1.6. Generalidades sobre el vanadio	150

Índice de figuras

1.1. Estructura del PP. Por Maddah (2016)	2
1.2. Visión molecular de los tres tipos de polipropileno. Adaptado de Bleeke (s.f.)	3
1.3. Polipropileno, homopolímero, SLY331. Por Indelpro (s.f.)	4
1.4. Información del producto Polipropileno Homopolímero SLY331. Por Indelpro (s.f.)	5
1.5. Polipropileno, homopolímero clarificado de alta cristalinidad, PL395N. Por Indelpro (s.f.)	5
1.6. Información del producto Polipropileno Homopolímero, PL395N. Por Indelpro (s.f.)	6
1.7. Límites del sistema de etiqueta de polipropileno y diagrama de flujo. Adaptado de Affeldt et al., (2016)	7
1.8. Código de identificación presente en un envase de plástico. Por Green Planet de Pi (s.f.)	13
1.9. Códigos de identificación de plástico. Por Ciencia UANL (s.f.)	14
1.10. Diagrama general sobre la propuesta de instalación de Veolia en la Ciudad de México. Por Veolia (2017)	15
1.11. Las 3Rs. Por Reciclacion (s.f.)	18
1.12. La Gran Isla de Basura del Pacífico. Por National Geographic (s.f.)	22
1.13. ¿Qué son los pellets de resinas de plástico? Adaptado de International Pellet Watch (s.f.)	24
3.1. Diagnóstico general de los RSU en México. Tomado de Chávez (2015)	32

3.2. Composición de los RSU recolectados valorizables 2012. Adaptado de SEMARNAT (2012)	32
3.3. Generación estimada de RSU. Tipo de residuo: plástico. Adaptado de SEMARNAT (2012)	33
3.4. Datos de la producción de plásticos en el mundo y en la Unión Europea. Adaptado de Plastics Europe (2018)	34
3.5. Distribución de la producción global de plásticos. Adaptado de Plastics Europe (2018)	35
3.6. Generación de residuos plásticos por sector industrial, 2015. Adaptado de Our World in Data (2018)	36
3.7. Porcentaje global de la mala administración de residuos, 2010. Adaptado de Our World in Data (2018)	37
3.8. Incorporación de plásticos al océano por región, 2015. Adaptado de Our World in Data (2018)	38
3.9. Cantidad de plásticos presentes en las cuencas oceánicas, 2013. Adaptado de Our World in Data (2018)	39
3.10. Masa de plásticos y partículas a lo largo de las superficies oceánicas del mundo. Adaptado de Our World in Data (2018)	40
3.11. La Gran Isla de Basura del Pacífico y sus fuentes de plástico. Adaptado de Our World in Data (2018)	41
3.12. La ruta por la cual los plásticos entran a los océanos. Adaptado de Our World in Data (2018)	42
3.13. Manejo integral de residuos de plástico en la Unión Europea. Adaptado de Plastics Europe (2018)	44
3.14. Consumo local de resinas termoplásticas en México. Tomado de Flores (2013)	45
3.15. Mercado del polipropileno en México. Tomado de la Asociación Nacional de la Industria Química (2017)	46
3.16. Etapas de los resultados del ciclo de vida en películas del PP. Adaptado de Affeldt <i>et al.</i> , (2016)	47

3.17. Hoja de seguridad del polipropileno homopolímero SLY331. Tomado de Indelpro (s.f.)	48
3.18. Información ecológica presente en hoja de seguridad del Polipropileno Homopolimero SLY331. Tomado de Indelpro (s.f.)	49
3.19. Información relacionada a la eliminación de los productos. Tomado de Indelpro (s.f.)	50
3.20. Resultados de la encuesta realizada sobre el reciclaje del PP en México. Elaboración propia.	57
3.21. El principio de la economía circular. Tomado de la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ] (2017)	64
3.22. Información existente de los efectos a la salud por los compuestos de vanadio. Adaptado de la Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], (2012)	67
4.1. Tiradero a cielo abierto, factor de contaminación. Tomado de Jerónimo (2016)	74
6.1. Estructuras de plásticos petroquímicos convencionales. Tomado de Shah, Hasan, Hameed y Ahmed, (2008)	124
6.2. Contenedor color gris, para los residuos inorgánicos con potencial de reciclaje. Tomado de Alpro Shop (s.f.)	125
6.3. Insecto atrapado en un fragmento de ámbar. Tomado de Strangis (s.f.)	126
6.4. Asta de ciervo. Tomado de Asta de Ciervo (s.f.)	127
6.5. Goma laca descerrada. Tomado de Conservación y Restauración (s.f.)	127
6.6. Gutapercha. Tomado de Facultad de Estudios Superiores Iztacala (s.f.)	128
6.7. Visualización de las estructuras moleculares de tres categorías de plásticos. Tomado de Junta de Galicia (s.f.)	132
6.8. Transformación del petróleo. Tomado de Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (s.f.)	135
6.9. Formación de un catión en el proceso de cracking. Tomado de Chem Guide (s.f.)	138

6.10. Formación de radicales en el proceso de cracking térmico. Tomado de Chem Guide (s.f.)	139
6.11. Secuencia de pasos para el cracking. Tomado de Dynamics Science (s.f.)	139
6.12. Formación de productos en el proceso de cracking térmico y catalítico. Tomado de Dynamics Science (s.f.)	140
6.13. Componentes básicos de la producción de plásticos. Adaptado de Petroleum (s.f.)	140
6.14. Representación de un polímero y copolímero. Adaptado de Petroleum (s.f.)	141
6.15. Principales fases del proceso de termoformado. Adaptado de Franklin Associates (2011)	144
6.16. Diagrama de flujo para la producción de resinas vírgenes del PP. Adaptado de Franklin Associates (2011)	145
6.17. Importancia y estructura de la industria plástica. Adaptado de Commission Ocean Indien (s.f.)	146
6.18. Clasificación de los plásticos. Creación propia	147
6.19. Banks y Hogan al recibir la Medalla Perkin en 1987. Tomado de American Chemical Society [ACS], (1999)	148
6.20. Los colores del vanadio. Adaptado de La ciencia es bella (2013) . . .	150
6.21. Compuestos del vanadio toxicológicamente importantes. Adaptado de Gummow (2011)	151

Índice de tablas

1.1. Características generales del PP. Adaptado de Crawford y Quinn (2017)	1
1.2. Tipos de polipropileno. Adaptado por Maddah (2016)	2
1.3. Categorías de los sitios de disposición final. Por NOM – 083 – SEMARNAT – 2003	11
1.4. Requerimientos de compactación inicial en rellenos sanitarios. Por NOM – 083 – SEMARNAT – 2003	12
1.5. Resumen general de las tres formas de disposición final de RSU. Adaptado de North <i>et al.</i> , (2012) y Song <i>et al.</i> , (2009)	17
3.1. Factores de emisión de CO ₂ en rellenos sanitarios con y sin sistema de captación de gas. Tomado de la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ], (s.f.)	51
3.2. Factores de emisión de plantas de incineración de RSU. Tomado de la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ], (s.f.)	52
3.3. Factores de emisión de infraestructura y equipo funcionando con biogás de rellenos sanitarios de EU. Tomado de la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ], (s.f.)	53
3.4. Escenario de fin de vida de los tres materiales de investigación en Japón. Adaptado de Affeldt <i>et al.</i> , (2016)	55
3.5. Escenario de fin de vida de los tres materiales de investigación en España. Adaptado de Affeldt <i>et al.</i> , (2016)	55

3.6. Resultados de las encuestas realizadas a empresas presentes en el Directorio de Centros de Acopio de Materiales Provenientes de Residuos en México 2010. Elaboración propia.	56
3.7. Resultados de la encuesta realizada a la Empresa 1 y a la Empresa 2, sobre el reciclaje del PP. Elaboración propia.	59
3.8. Intervalos de concentraciones reportadas en RSU y cenizas de fondo, cenizas volátiles y partículas suspendidas de la incineración de RSU. Tomado de Lisk (1988)	65
3.9. Descripción de las vías de exposición en 3 grupos de estudio. Adaptado de la Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], (2012)	66
4.1. Consumo eléctrico (GWh) por tipo de transporte en la CDMX. Adaptado del STE (2017) y MetroCDMX (s.f.)	79
4.2. Porcentaje del aporte energético del PP almacenado al año en RS de la CDMX, frente a los tipos de transporte eléctrico de la CDMX . . .	80
6.1. Diferencias de los dos tipos de polimerización. Adaptado de Petroleum (s.f.)	142
6.2. Rutas de exposición al vanadio. Adaptado de Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], (2012)	152
6.3. Descripción de las vías de exposición en 3 grupos de estudio. Adaptado de Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], (2012)	153

Antecedentes

Los plásticos han estado presentes en la vida por varias décadas. Su producción anual crece, así como su consumo; por lo tanto, sus desechos se acumulan. Algunos reportes de organismos internacionales señalan que “si no se adoptan medidas que disminuyan el uso del plástico, en el año 2050 habrá mayor cantidad de plástico que de peces u otros organismos marinos” (ONU, 2017).

Para tener el contexto sobre la producción de plástico (específicamente del objeto de estudio que es el polipropileno) en México, se consulta el Anuario Estadístico 2017 de la Asociación Nacional de la Industria Química, con datos del 2016. En este documento se describe lo siguiente: “en México se produjeron 503,000 toneladas de polipropileno, y el consumo nacional aparente fue de 1,254,120 toneladas” (ANIQ, 2017). Ante este escenario sobre la producción del polipropileno, se busca en diversas fuentes nacionales si existe información sobre el ciclo de vida de este material, y también si hay información sobre qué ocurre después de que este tipo de plástico termina con su vida útil y es desechado a los contenedores de RSU. Hasta el momento en que fue escrita esta tesis, no se cuenta con fuentes nacionales que puedan resolver estas preguntas. En cambio, en fuentes de Estados Unidos principalmente, hay organizaciones que realizan estudios del ciclo de vida del PP. Una de ellas es Franklin Associates, y estos estudios están orientados a las secciones que integran el estudio de ciclo de vida de un producto, ya sea desde la cuna a la puerta o desde la cuna a la tumba (términos usados en el ciclo de vida de un producto) y que tienen sustento bajo la norma ISO 14040:2006.

En otro orden de ideas, si bien hay campañas realizadas por algunas industrias petroquímicas que invitan a los consumidores a realizar una correcta separación de los productos que ellos fabrican, y mencionan que el reciclaje es la mejor forma de disposición final, ya que tiene menor impacto ambiental (Indelpro, s.f.); la realidad es que, en México, en el 2017, el 9.63 % de la generación de residuos sólidos urbanos [RSU] se destinó al reciclaje (SEMARNAT, 2017). Un estudio realizado por la SEDESOL, en el 2013, indica que los plásticos representan un 10.9 % del total de los RSU en México. Por otra parte, se cuenta que el porcentaje de reciclaje estimado de RSU, de tipo plásticos, es de un 9.2 % (SEMARNAT, s.f). En cuanto a la disposición final de estos plásticos, por mencionar un ejemplo, Lali Z. (2018) indica que, si los RSU son dirigidos a una incineración no regulada, hay evidencia de la liberación de dioxinas y furanos. Por su parte, Chávez (2015) muestra que, “durante el año 2012 en México, el porcentaje como manejo de RSU en el caso de la incineración es del 0 %”. Adicionalmente, con datos de la SEMARNAT (2014), se encontró que “en el 2012 un 67 % del volumen generado de RSU en el país se dispuso en rellenos sanitarios (RS)”, la cual tampoco representa la mejor forma en su disposición final. Por otra parte, otros artículos como el de Affeldt, Leung, y Yang (2016), muestran los contaminantes emergentes causantes del impacto ecotóxico en el fin de ciclo de vida de las películas de polipropileno. Dichas sustancias que indican que están presentes en el agua son el vanadio, cinc y cobre (en ese orden)

Asimismo, industrias de diferentes partes del mundo dedicadas a la producción y transformación del plástico, apuestan por la producción de bioplásticos o productos biodegradables. En contraparte, por colocar un ejemplo, la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (ANIPAC), en un artículo publicado en el 2018, menciona los siguientes puntos referidos a las bolsas de plástico:

- Son 100 % reciclables
- Cuanto más reutilizable sea una bolsa, menor es su impacto ambiental

- No hay evidencia científica que avale que este tipo de bolsas provoquen muertes de animales del mar.

Sin embargo, todo lo anterior presenta cierta incertidumbre, ya que Vázquez, Espinosa, Beltrán y Velasco (2016) mencionan:

En México no existe una contabilidad precisa de la masa de plásticos que se reciclan, debido principalmente a que una gran parte de los residuos plásticos se separa en actividades de pre-pepena, que no son registradas, y a que una proporción significativa de lo que se colecta, se exporta. (p.11)

En complemento a lo anterior, Vázquez *et al.* (2016), mencionan también que en el 2011 se estimó un reciclaje del 11 % (465 Mton) de los residuos plásticos post-consumo, y un 2 % (85 Mton) se destinó a la recuperación de energía.

Por todo lo anterior, hay evidencia para mostrar que México no cuenta con un eficaz sistema de disposición final para los RSU, y en su caso, para las resinas del PP.

Capítulo 1

Entorno teórico

1.1. Polipropileno

1.1.1. Generalidades

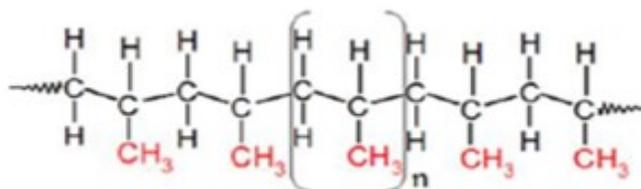
Crawford y Quinn (2017) inician esta sección al mencionar al polipropileno (PP) de la siguiente manera: “es uno de los polímeros más versátiles”. De igual forma, “es capaz de someterse a una amplia variedad de procesos, por ejemplo, moldeo por inyección, extrusión, blow moulding y expansión” (Crawford & Quinn, 2017). En la Tabla 1.1 se muestra, a manera general, las características generales del PP.

Tabla 1.1: Características generales del PP. Adaptado de Crawford y Quinn (2017)

Características generales del polipropileno	
Fórmula química	$(C_3H_6)_n$ (Figura 1.1)
Abreviación	PP
Clasificación	Termoplástico
Orientación molecular en fase sólida	Semicristalino (isotáctico, sindiotáctico) y amorfo (atáctico)
Monómero	Propileno
Propiedades generales	Resistente a muchos ácidos, bases y solventes.

Lo anterior se puede complementar con Maddah (2016), quien afirma que “el PP es un polímero preparado catalíticamente a partir del propileno”. Su principal ventaja está relacionada a su alta resistencia a la temperatura, el cual hace al PP particularmente ideal para objetos como charolas, embudos, cubetas, botellas, partes de carros y frascos que tienen que ser esterilizados frecuentemente por su uso en un ambiente hospitalario (Maddah, 2016).

Figura 1.1: Estructura del PP. Por Maddah (2016)



1.1.2. Tipos de polipropileno

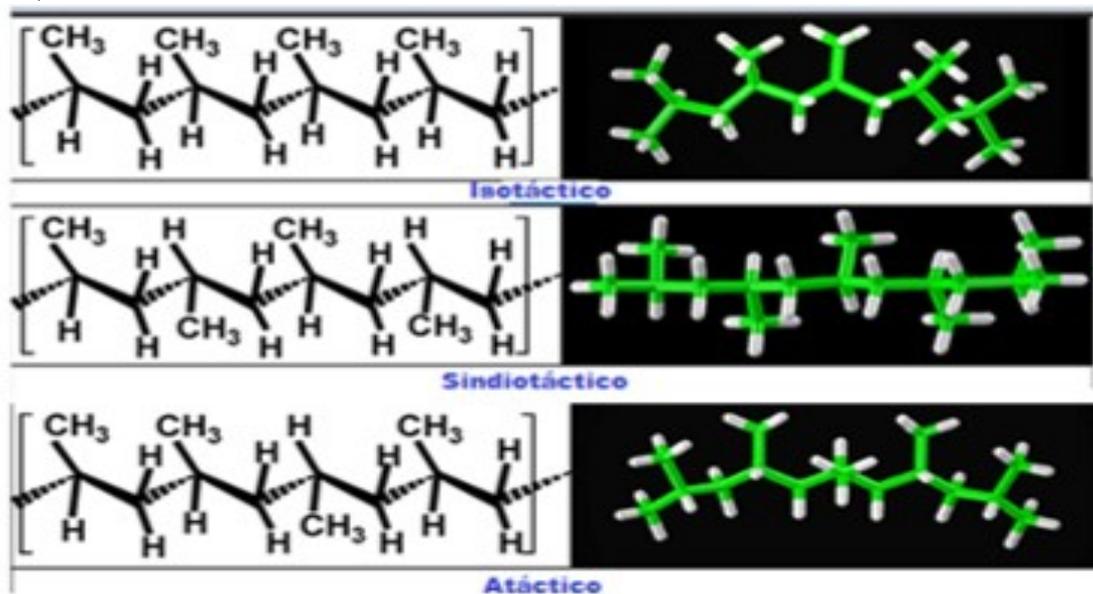
En la Tabla 1.2, se muestran los 3 diferentes tipos de polipropileno, y algunas de sus características que presentan cada una de ellas.

Tabla 1.2: Tipos de polipropileno. Adaptado por Maddah (2016)

Tipo de polipropileno	Características		
	Distribución de los grupos metilo	Intervalo de fusión(°C)	Generalidades
Isotáctico	Todos se encuentran en el mismo lado de la cadena	160 – 170	Fuerte y duro con excelente resistencia al estrés, cracking y reacciones químicas. Interés comercial.
Sindiotáctico	Alternados en una manera regular de la cadena	125 – 131	Más blando que el PP isotáctico, pero también resistente y transparente. Estable a la radiación gamma y por eso tiene aplicaciones para la medicina.
Atáctico	Todos al azar alrededor de la cadena	<0	Polímero blando y elástico

La Figura 1.2 muestra las visualizaciones moleculares del polipropileno isotáctico, sindiotáctico y atáctico.

Figura 1.2: Visión molecular de los tres tipos de polipropileno. Adaptado de Bleeke (s.f.)



Del mismo modo, Maddah (2016) complementa los tres tipos de PP con la siguiente clasificación:

Hay tres diferentes tipos de polipropileno:

- Homo-polymer PP (HPP). Contiene solo monómeros de propileno en una forma sólida semi-cristalina.
- Random Copolymer (RCP). Contiene etileno como un co-monómero en las cadenas del PP en niveles de intervalo de concentración del 1-8%.
- Impact Copolymer (ICP) el HPP que contiene una mezcla de una fase de RCP que tiene un contenido de etileno del 45-65% (p.3)

En general, los polímeros que consisten en monómeros idénticos son llamados homo-polymers, donde los componentes poliméricos con más de un tipo de monómero en sus cadenas son conocidos como co-polymers.

1.1.3. Indelpro

Al retomar el objeto de interés de esta tesis, se consulta la empresa Indelpro (s.f) (la cual se reconoce a sí misma como la única productora de resinas de polipropileno en México). Esta consulta fue para revisar su catálogo de productos y la descripción respectiva de ellos. Si bien se menciona que el objeto de estudio de esta investigación son las resinas termoformadas del PP, en Indelpro (s.f) se encuentran dos productos que forman parte de los empaques de alimentos y que además son homopolímeros. Uno de ellos es el vaso de un solo uso y el otro es un contenedor desechable, identificados como SLY331 y PL395N, respectivamente. En dicha empresa se menciona que “El Polipropileno Homopolímero exhibe una alta rigidez y resistencia a la temperatura, así como una excelente resistencia química. Los productos finales tienen una superficie dura que resiste ralladuras y manchas” (Indelpro, s.f.).

El vaso de un solo uso está identificado como SLY331, y es el que se encuentra en la Figura 1.3

Figura 1.3: Polipropileno, homopolímero, SLY331. Por Indelpro (s.f.)



En la información de este producto identificado como Polipropileno, homopolímero SLY331 se encuentra lo siguiente (Figura 1.4):

Figura 1.4: Información del producto Polipropileno Homopolímero SLY331. Por Indelpro (s.f.)

INFORMACIÓN	CERTIFICACIONES	DETALLES TÉCNICOS
<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> Excelentes propiedades ópticas Buena estabilidad al proceso Bajo acarreo de agua 	<p>Aplicaciones Típicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> Fleje Vasos desechables Termoformado 	

Por otra parte, el contenedor desechable es identificado como PL395N, y está en la Figura 1.5.

Figura 1.5: Polipropileno, homopolímero clarificado de alta cristalinidad, PL395N. Por Indelpro (s.f.)



PL395N

HOMOPOLÍMERO CLARIFICADO DE ALTA CRISTALINIDAD

El Profax PL395N es un homopolímero clarificado de alta cristalinidad diseñado para extrusión y termoformado. El PL395N exhibe propiedades de alta rigidez dando excelente resistencia mecánica a la aplicación final; también presenta una alta temperatura de deflexión así como el sostenimiento de sus propiedades mecánicas a altas temperaturas.

La resina base de este producto cumple con los requerimientos de FDA contenidos en el código 21 CFR 177.1520.

En la información de este producto identificado como Polipropileno, homopolímero clarificado de alta cristalinidad PL395N se encuentra lo siguiente (Figura 1.6):

Figura 1.6: Información del producto Polipropileno Homopolímero, PL395N. Por Indelpro (s.f.)



1.2. Análisis de ciclo de vida de los productos

1.2.1. Concepto

De manera general, para tener un contexto sobre las materias primas, la cantidad de agua y energía, entre otros recursos usadas en la producción de un material, así como la forma en que éste se dispone una vez que terminó su fin de vida, se hace uso del análisis de ciclo de vida.

De acuerdo con la norma ISO 14040:2006 se menciona lo siguiente:

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV), surge tras el incremento en la preocupación de la importancia de la protección ambiental, y de sus posibles impactos asociados a productos, manufacturados y consumidos, el cual ha aumentado el interés en el descubrimiento de métodos para comprender mejor y direccionar estos impactos (...). El ACV de un producto debe incluir todas las entradas/salidas de los procesos que participan a lo largo de su vida: la extracción de materias primas y el procesado de los materiales necesarios para la producción de componentes, el uso del producto y finalmente su disposición final. (p.V)

De la anterior referencia (ISO 14040:2006), se describe el ACV como la “compila-

ción y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida”.

En la misma descripción de la norma ISO 14040:2006, se muestra que el ACV:

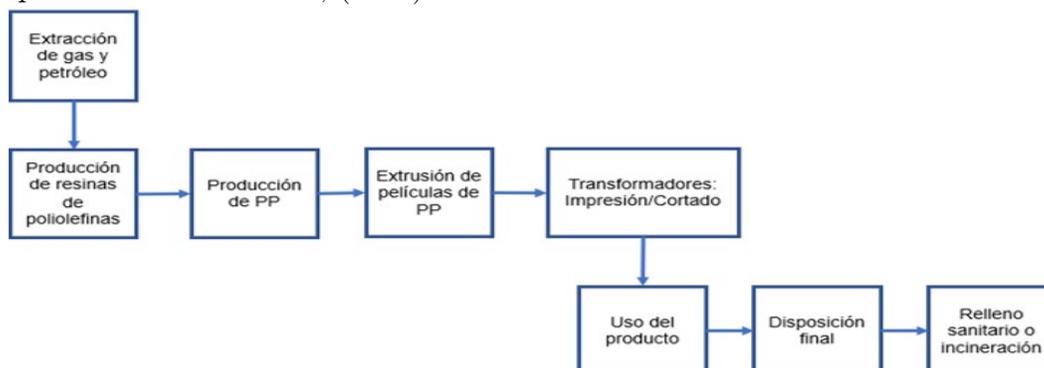
- Identifica oportunidades de mejora para el desempeño ambiental de productos en varios puntos en sus ciclos de vida.
- Informa a los tomadores de decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales (por ejemplo, para el propósito de colocar estrategias, planeaciones en el diseño o rediseño de algún producto).
- La selección de indicadores relevantes del desempeño ambiental, al incluir técnicas de medida y
- Marketing (por ejemplo, en la implementación de un esquema de etiquetado ecológico, al hacer un anuncio ambiental o producir una declaración de producto ambiental). (p.V)

1.2.2. Análisis de ciclo de vida del polipropileno

Con la información anterior se procede a recopilar la información consultada sobre el ACV del PP, la cual, de manera simplificada, se presenta en la Figura 1.7.

En la Figura 1.7 se describe el esquema de flujo en el ciclo de vida de etiquetas elaboradas de polipropileno, el cual correspondería de manera similar al ciclo de vida de muchos materiales plásticos.

Figura 1.7: Límites del sistema de etiqueta de polipropileno y diagrama de flujo. Adaptado de Affeldt et al., (2016)



1.2.3. Cradle-to-grave

De acuerdo con la ISO 14040:2006, el ciclo de vida de un producto inicia desde la adquisición de materia prima, para después dirigirse a su producción, uso, tratamiento de fin de ciclo de vida, reciclaje y disposición final.

Es a partir de este concepto, que se toma como base para la realización de la presente investigación.

1.3. Disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU)

1.3.1. Diagnóstico general de los RSU en México

La SEMARNAP (1999), muestra el contexto histórico de los residuos sólidos urbanos en México:

El control de los residuos sólidos municipales (RSM) generados por los habitantes de México se inició en la época precortesiana y la salud pública en México quedó legalmente sustentada el día 15 de julio de 1891, fecha en la que se expidió el Primer Código Sanitario elaborado por el Consejo Superior de Salubridad. Ante ello, la primera obra de gran magnitud para el control de los RSM, se realiza en la década de 1960, cuando en la ciudad de Aguascalientes se diseña y opera el primer relleno sanitario del país, bajo la dirección de profesionales y técnicos de la Comisión Constructora e Ingeniería Sanitaria, de la Secretaría de Salubridad y Asistencia [CCISSA].

Cabe aclarar que, si bien en este documento se presenta el término “residuos sólidos municipales”, en la actualidad es que, de acuerdo con la publicación de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2003), los residuos sólidos municipales (RSM) cambiaron su denominación a la de residuos sólidos urbanos (RSU). Por otra parte, la SEMARNAP se cambia su nombre por SEMARNAT.

Por su parte, la SEMARNAT (s.f) menciona que “Durante décadas, el proceso de industrialización en México se desarrolló sin que existiesen restricciones legales para el manejo y derrame de materiales y residuos peligrosos. La práctica común era deshacerse de ellos al menor costo, disponiéndolos indiscriminadamente”.

Con lo anterior, en la Gaceta Oficial del Distrito Federal (2010) se resume que “La composición física de los RSU depende esencialmente de los siguientes factores: nivel de ingresos de la población, estación del año, día de la semana, costumbres y zona donde se habita”.

Con respecto a la SEMARNAT (2015), “Los residuos que generamos son un reflejo de las formas de producción y consumo de las sociedades en que vivimos, por lo cual su gestión debe adecuarse a los cambios que se producen en ambos procesos”.

Bajo el mismo contexto de la generación de residuos, la SEMARNAT (2017) señala: “En México se generan diariamente 102,895.00 toneladas de residuos, de los cuales se recolectan 83.93 % y se disponen en sitios de disposición final 78.54 % lo cual se recicla únicamente el 9.63 % de los residuos generados”.

1.3.2. Manejo integral de residuos

Previo al manejo integral de residuos, se muestra a continuación la definición de la gestión integral de residuos. Para ello, el Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN) (2010) apunta lo siguiente:

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 la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región.

En consecuencia, el SNIARN (2010) muestra la definición del manejo integral de

residuos en México, como:

Las actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, co- procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social.

Al consultar a la SEMARNAT (s.f), en su artículo titulado “Sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos reportados por municipios”, se muestra que los rellenos sanitarios, los sitios controlados y los tiraderos a cielo abierto; forman parte de las opciones “finales” de los RSU. Sin embargo, en otros países se consideran al relleno sanitario, reciclaje e incineración (o termovalorización), como opciones de disposición final de RSU.

A razón de lo anterior, se desarrollan las características generales de cada opción de disposición final, las cuales deberían de estar identificadas por la NOM – 083 - SEMARNAT – 2003.

Relleno sanitario

De acuerdo con la NOM – 083 – SEMARNAT – 2003:

“Un relleno sanitario es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructuras adicionales, los impactos ambientales”.

Una de las características operativas de un sitio de disposición final, es que “debe de garantizar la extracción, captación, conducción y control de biogás generado en dicho sitio” (NOM – 083 – SEMARNAT – 2003).

En este mismo sentido, los sitios de disposición final (rellenos sanitarios, sitios controlados y tiraderos a cielo abierto) se caracterizan de acuerdo a la cantidad de toneladas de residuos sólidos urbanos y de manejo especial que ingresan por día, como

se establece en la Tabla 1.3:

Tabla 1.3: Categorías de los sitios de disposición final. Por NOM – 083 – SEMARNAT – 2003

Tipo	Tonelaje Recibido (Ton/Día)
A	Mayor a 100
B	50 hasta 100
C	10 y menor a 50
D	Menor a 10

La identificación del tipo de relleno sanitario de acuerdo con el tonelaje recibido de RSU, permite planear la construcción de estas instalaciones, siguiendo las especificaciones para la selección de sitio. En ciudades pobladas, tal como la Zona Metropolitana del Valle de México, el tipo de relleno sanitario es el tipo A, mientras que en ciudades menos pobladas, pueblos y en cualquier otro lugar con baja población, le corresponderán un tipo de relleno sanitario ya sea el B, C o D.

Dependiendo del tipo de sitio de relleno sanitario, se le asigna un determinado valor para la compactación de los residuos que estarán incluidos, y el cual depende de la recepción de RSU recibidos al día, tal como lo muestra la Tabla 1.4:

Tabla 1.4: Requerimientos de compactación inicial en rellenos sanitarios. Por NOM - 083 - SEMARNAT - 2003

Sitio	Compactación de los residuos kg/m³	Recepción de residuos sólidos Ton/Día
A	Mayor de 700	500 o más
B	Mayor de 600	100 y menor de 500
C	Mayor de 500	50 y menor de 100
D	Mayor de 400	Menor a 50

De acuerdo con la clasificación de la Tabla 1.4, deberán alcanzar los niveles mínimos de compactación inicial al cierre de la celda diaria.

Reciclaje

En el SNIARN (2010) se indica que el reciclaje es un proceso mediante el cual ciertos materiales de los RSU se separan, escogen, clasifican, empaacan, almacenan y comercializan para reincorporarlos como materia prima al ciclo productivo.

En Gestores de Residuos (2015) se cuenta con información sobre el sistema de clasificación de resinas. En esta referencia se encuentra lo siguiente: “El Código de identificación de plásticos y resinas resulta importante para la identificación de los distintos tipos de plástico y para saber cómo diferenciar el Reciclaje de Plásticos” (Figura 1.8).

Los plásticos están diferenciados según un Código de Identificación de Plásticos, que es un sistema utilizado internacionalmente en el sector industrial para distinguir la composición de resinas en los envases y otros productos plásticos. Esto fue realizado por la Sociedad de la Industria de Plásticos [SPI] (1988), con el fin de propiciar y dar

más eficiencia al reciclaje.

Figura 1.8: Código de identificación presente en un envase de plástico. Por Green Planet de Pi (s.f.)



Los diferentes tipos de plástico se identifican con un número del 1 al 7 ubicado en el interior del clásico signo de reciclado (triángulo de flechas en seguimiento).

En la gran mayoría de envases y contenedores plásticos, ese número se encuentra en el reverso, para que así sea más fácil de encontrar y por lo mismo se separe con otros plásticos que tengan ese número. Por ejemplo, en la Figura 1.8 se muestra el código de identificación del tipo de resina de plástico de polietileno de alta densidad, presente en ese material.

A manera general, se presenta a continuación la gama de los códigos de identificación restantes (Figura 1.9):

Figura 1.9: Códigos de identificación de plástico. Por Ciencia UANL (s.f.)



Incineración

Por su parte, el SNIARN (2010) comenta que la incineración es:

Cualquier proceso para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en la cual todos los factores de combustión, como la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos. En esta definición se incluye la pirólisis, la gasificación y plasma, sólo cuando los subproductos combustibles generados en estos procesos sean sometidos a combustión en un ambiente rico en oxígeno.

En México no hay, hasta la fecha, una planta de incineración de RSU con recuperación energética. No obstante, hubo un proyecto planeado por Veolia (Figura 1.10), el cual planteaba la construcción de la primera planta de incineración en América Latina, la cual se esperaba que para el año 2020 esta planta operara. Sin embargo, El Financiero (2018) publicó un reportaje en el cual menciona que la actual Jefa de Gobierno de la Ciudad de México, la Dra. Claudia Sheinbaum, “dice no estar de acuerdo con el proyecto de la planta de termovalorización y el biodigestor para desechos porque, a su parecer, son la mayor deuda que haya adquirido el gobierno capitalino”, haciendo mención a la instalación de la Planta de Termovalorización propuesta por la empresa Veolia. Dicha propuesta fue impulsada en septiembre del 2018 por el entonces Jefe de Gobierno de la Ciudad de México, el Dr. Miguel Ángel Mancera, quien estaba de acuerdo con la instalación de dicha planta, e indicó que esta instalación “se encar-

gará de convertir mil 500 toneladas de basura diarias en energía limpia, y que será utilizada en el Sistema de Transporte Colectivo Metro”, para lo cual, “sería construida en el Bordo Poniente, lugar que por más de 20 años recibió miles de toneladas de desechos” (El Financiero, 2018). Ante la ausencia de una planta de termovalorización, en México se opta principalmente por el relleno sanitario como forma de disposición final de RSU.

Figura 1.10: Diagrama general sobre la propuesta de instalación de Veolia en la Ciudad de México. Por Veolia (2017)



Además de lo anterior, una de las causas por las cuales se optó cancelar la instalación de una planta de termovalorización en México, se puede entender con la siguiente investigación: de acuerdo con Verma, Vinoda, Papireddy, y Gowda, (2016), “la incineración de plásticos a cielo abierto es la mayor fuente de contaminación de aire”. Por ello, Verma *et al.* (2016) mencionan que “la mayoría de las veces, los RSU contienen alrededor del 12% de plásticos los cuales, al ser incinerados, liberan gases

tóxicos como dioxinas, furanos, mercurio y bifenilos policlorados”. Adicional a esto, “la incineración de cloruros de polivinilo libera halógenos peligrosos y contamina el aire” (Verma *et al.*, 2016). Este contenido se retoma en la Sección 1.6.1 “Contaminantes tóxicos presentes en los residuos de los plásticos”.

Para este tipo de disposición final, es necesario mencionar dos términos importantes (NMX - AA - 33 - 1985):

- Poder calorífico: Es el calor de combustión de una sustancia normalmente expresado en calorías por gramo. De este término, surge el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior:
- Poder calorífico superior: es el calor producido en la combustión de una cantidad unitaria de combustible sólido bajo volumen constante, dentro de una bomba calorimétrica, en condiciones específicas tales que toda el agua de los productos permanezca en estado líquido.
- Poder calorífico inferior: se calcula a partir del poder calorífico total y equivale al calor producido por la combustión de una cantidad unitaria de un combustible sólido en condiciones constantes de presión y condiciones específicas tales que toda el agua de los productos permanezca en forma de vapor.

No obstante, Gimeno (2018) menciona que el poder calorífico de un combustible se define como la cantidad de energía que se desprende en una reacción de combustión para elevar la temperatura un grado con una masa de valor de la unidad, habitualmente en 1 kg. Por lo cual, dicha energía liberada es igual a la energía que mantenía unidos a los átomos en el combustible menos la energía utilizada para dar lugar a nuevos productos, generalmente gases formados en la combustión.

Gimeno (2018), menciona que esa reacción debe ser completa, y que por lo tanto, la mayoría de las veces dará lugar a productos como el vapor de agua y el dióxido de

carbono.

Las tres formas de disposición final para residuos plásticos proveniente de petróleo crudo se pueden resumir en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5: Resumen general de las tres formas de disposición final de RSU. Adaptado de North *et al.*, (2012) y Song *et al.*, (2009)

Disposición final	Características
Relleno sanitario	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Requieren espacio ✚ Los constituyentes químicos y energía contenida en los artículos plásticos es perdida.
Incineración con recuperación energética	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Regresa una cantidad de la energía de la producción de plástico. ✚ Produce efectos negativos al ambiente y a la salud de los organismos. ✚ 60% de los desechos potencialmente infecciosos y regulados, al incluir objetos punzocortantes y farmacéuticos, son incinerados. ✚ Prevención de transmisión de enfermedades. ✚ Reducción significativa en el volumen y masa de desechos.
Reciclaje	<ul style="list-style-type: none"> ✚ En teoría, muchos plásticos pueden ser reciclados. ✚ Algunos de los materiales usados para hacer plásticos pueden ser recuperados. ✚ Este método no está ampliamente utilizado, debido a las dificultades con la recolección y la selección del desecho del plástico.

1.4. Reducir, reusar y reciclar. Las 3Rs

The 3R Initiative (s.f) señala lo siguiente “tiene como objetivo promocionar las ‘3Rs’ (reducir, reusar y reciclar) (Figura 1.11) globalmente. Esto para construir una sociedad sana en el ciclo del material a través del uso efectivo de recursos y materiales”. Dicha propuesta fue aceptada en la Cumbre del G8 Isla del Mar en junio del 2004 como una nueva resolución del G8. Con el propósito de formalmente lanzar la Iniciativa 3R, fue aprobada en el encuentro ministerial en Japón en la primavera del 2005.

Por otra parte, en la misma referencia The 3R Initiative (s.f) se muestra que:

El principio de reducir desechos, reusar y reciclar recursos y productos se encuentra en lo siguiente: reducir significa escoger usar cosas con cuidado para disminuir la cantidad de desechos generados. Reusar involucra el uso repetido de elementos o partes de elementos, los cuales continúan siendo servibles. Reciclar significa hacer el uso del desecho por sí mismo como recurso. El uso mínimo de residuos puede ser alcanzado en una manera eficiente al poner atención principalmente en la primera R ‘reducir’, seguido de ‘reusar’ y finalmente ‘reciclar’.

Figura 1.11: Las 3Rs. Por Reciclacion (s.f.)



La Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ] (2017b) menciona que “muchos países tienen la intención de desarrollar su estrategia nacional para la gestión de residuos, basada en el concepto de las 3Rs”.

Cabe aclarar algo, y es que un sistema moderno para la gestión de resinas de poli-

propileno no es obtener la eliminación total de los mismos, sino que generar materias primas o secundarias y energía generadas a partir de la gestión de estos residuos integral de estos residuos.

Probablemente y se piense que, si todo el enfoque de la disposición final del PP se destine únicamente al reciclaje como opción principal, disminuiría su acumulación. Sin embargo, de acuerdo con la GIZ (2017b), se menciona que “incluso con un reciclado intensivo, siempre habrá residuos remanentes que no tienen valor material o de mercado y que, en algunos casos, se clasifican como peligrosos”. Entonces, disponer las resinas del PP al reciclaje, no es la opción correcta.

1.5. Economía circular

El concepto de las 3Rs se complementa con el concepto de la economía circular. Para ello, de acuerdo con Ellen Macarthur Foundation (s.f) la economía circular “pretende conseguir que los productos, componentes y recursos en general mantengan su utilidad y valor en todo momento”. Dicho de otra forma, “es reparadora y regenerativa”.

Por su parte, la GIZ (2017) muestra:

La visión enfocada en transitar hacia una economía circular tiene como propósito reemplazar la economía actualmente lineal de ‘tomar, usar y desechar’, con otra en la que los recursos circulan a valores altos, evitando o reduciendo la necesidad de recursos primarios y minimizando residuos, contaminantes y emisiones. (p.14)

Este sistema, de acuerdo con GIZ (2017) es una posible solución a los problemas derivados del uso del PP, ya que:

Los motores principales de la economía circular son la creciente volatilidad de precios y las restricciones en el suministro de recursos primarios, las políticas ambientales, tales como la normatividad sobre responsabilidades del productor y, posiblemente una nueva cultura del consumidor. (p.14)

1.6. Ecotoxicidad

De acuerdo con la Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR] (2012), señala:

Si una sustancia química es liberada de una planta industrial, entra al ambiente como una emisión química. Esta liberación no siempre significa que sea una amenaza, debido a que una persona está expuesta en caso de estar en contacto con la sustancia química. Por ejemplo, al respirar, al comer, al beber una cantidad de esa sustancia o incluso al pisarlo. (p.1)

Lo anterior muestra que muchos factores determinan si una persona es susceptible a la exposición de una sustancia química, en estos casos, la dosis, la duración y la forma de contacto con el ser vivo. También hay que considerar otros factores a las que una persona ha estado expuesta a ciertas sustancias químicas. Dichos factores son la edad, sexo, dieta, estilo de vida y estado de salud del individuo o grupo de personas.

Ante esto, The National Academies Press [NAP] (2014) muestra:

La ecotoxicología es el estudio de cómo las sustancias químicas interactúan con los organismos en el ambiente (...). La literatura ecotoxicológica está fuertemente orientada a los sistemas acuáticos, particularmente a los organismos de agua dulce. (p.81)

Al seguir con lo anterior, no hay que olvidar que los ecosistemas acuáticos, terrestres y aéreos no son sistemas aislados. Al contrario, son sistemas que interactúan de manera compleja y que tienden al equilibrio.

Conforme con The Blastic Project (s.f), el cual es una organización reconocida por European Regional Development Fund, mencionan que:

El daño de las sustancias químicas asociadas a los plásticos puede estar dividida en tres categorías: ingredientes del material de plástico, subproductos de la fabricación y sustancias químicas absorbidas del ambiente. Las posibles respuestas toxicológicas causadas por el plástico pueden ser una combinación de las sustancias químicas. Algunas de ellas son definidas como contaminantes principales, los cuales están regulados por agencias gubernamentales, por sus toxicidades o por la persistencia en organismos y cadena alimentaria. Dichas sustancias químicas incluyen metales pesados, plaguicidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y bifenilos policlorados (PCBs), los cuales pueden alterar procesos fisiológicos importantes de animales, que provocan, por ejemplo, enfermedades y problemas en la

reproducción.

Por otra parte, en la anterior referencia (The Blastic Project, s.f.) se menciona que:

Se ha encontrado que al menos el 78 % de los contaminantes prioritarios listados por la EPA (US Environmental Protection Agency) y 61 % listados por la Unión Europea, están asociados con los desechos plásticos ya sea que derivan de su producción o desechados al ambiente (...). Todos los plásticos, desde los de la macro a la nanoescala, están expuestos a la filtración y a la absorción de sustancias peligrosas.

Aunado a lo anterior, Hwang, Choi, Han, Choi, y Hong, (2019) indican que hay tres grandes preocupaciones que las partículas de los plásticos (en general) pueden mostrar toxicidad en los humanos. Estas tres preocupaciones son las siguientes:

- Toxicidad física de las partículas
- Toxicidad química de las partículas
- Actuar como substratos para microorganismos patógenos y parásitos.

Por su parte, Affeldt *et al.* (2016) mencionan que:

Otro problema final procede de los efectos potenciales en la salud por el sobreuso y sobredependencia de los plásticos en la sociedad. Mientras que se desconocen los niveles de bioacumulación de los plásticos, el gran volumen de estos productos ha dado lugar a la presencia de componentes de dichos materiales en el cuerpo humano. (p.9)

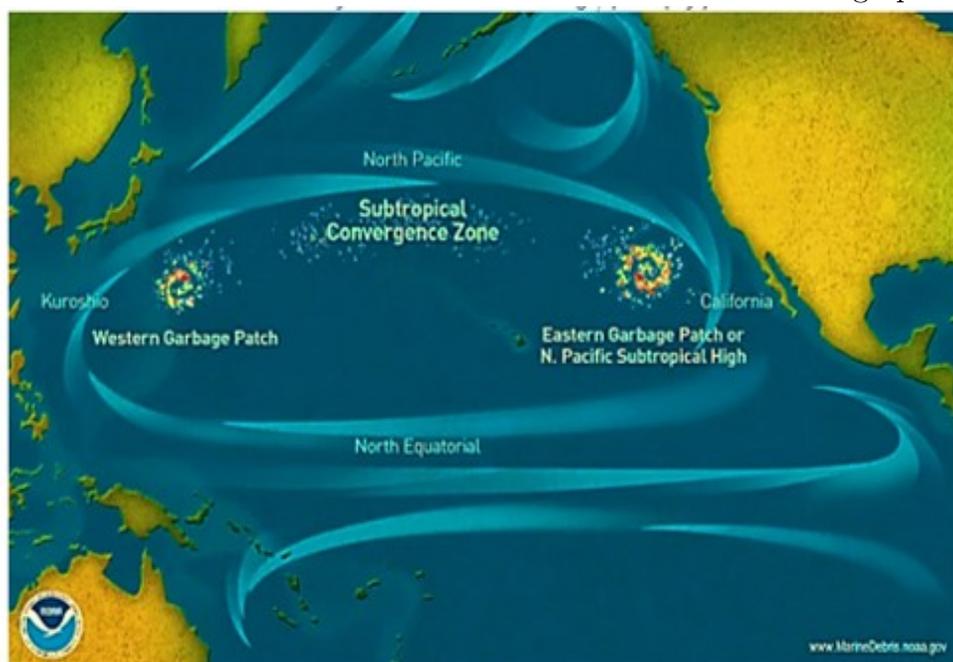
Aunado a las sustancias tóxicas que liberan en su disposición final, “otro de los principales problemas asociados con el desecho de los plásticos es la persistencia del material” (Affeldt *et al.*, 2016).

Previamente, Ocean Wise (2019) afirma:

Una vez que el plástico entra al océano, realmente no desaparece. Se rompe con el paso del tiempo en pequeñas piezas llamadas microplásticos, no mayores que un grano de arroz (menor de 5 mm). Lo cual, en combinación con demás residuos sólidos, podrían formar masas increíblemente largas y persistir por varios años.

Con todo lo anterior, uno de los ejemplos más claros de la acumulación excesiva de plásticos en los océanos es la ‘Great Pacific Garbage Patch’ (GPGP) (Figura 1.12), la cual se estima tener al menos 700,000 kilómetros cuadrados de largo, el cual es casi del tamaño de Texas (NationalGeographic, 2018). En un entorno oceánico, los plásticos pueden causar daños a la vida marina que ingiere plásticos o que es atrapada por los mismos. La GPGP, también conocido como el ‘Vórtice de Basura del Pacífico’ o la ‘Isla de Basura’ se trata de dos colecciones distintas de desechos marinos limitados por el gran Giro Subtropical del Pacífico del Norte. A desechos marinos se refieren a la “basura” que termina en océanos, mares y otros grandes cuerpos de agua.

Figura 1.12: La Gran Isla de Basura del Pacífico. Por National Geographic (s.f.)



De la Figura 1.12 se puede comprobar la existencia de la Isla de Basura. Esta acumulación de residuos presentes en cuerpos de agua puede propiciar que otros seres vivos consuman estos residuos y al seguir con la cadena alimenticia, los humanos también ingieran estos residuos.

Por su parte, Ocean Wise (2019) ha investigado la procedencia de los microplásticos, “entre ellos están los que provienen de fragmentos de artículos de plásticos de un solo uso.”

Con la información que se tiene del reporte de la National Geographic (2018) y junto con el reporte de Ocean Wise (2019), The Blastic Project (s.f) emitió una publicación sobre la ingesta de residuos plásticos presentes en el mar, por las aves. En esta fuente se encontró que:

Las primeras observaciones de piezas de plástico dentro de las aves marinas datan de 1960, y los estudios hechos entre los años 1962 y 2012, han revelado que el 59 % de las especies de aves marinas examinadas habían ingerido plásticos. De estos estudios individuales, cerca de una tercera parte (29 %) tenían plásticos en el interior de sus estómagos. Los modelos han mostrado un incremento en la tendencia de ingesta de plástico cuanto más plástico es introducido al océano. En estos días, la mayoría de los plásticos ingeridos por aves marinas son otros que los pellets vírgenes. Los plásticos ingeridos han sido reportados al contener monofilamentos, tapa roscas, bolsas de plástico, fragmentos de botellas plásticas y contenedores, globos y botones, encendedores de cigarrillos, unicel (poliestireno expandido) y marcadores.

Lo anterior se complementa con lo siguiente: “sin embargo, no sólo impacta a los animales de mayor tamaño, sino que también al zooplancton, aunque a este grupo de especies aún está en investigación” (Ocean Wise, 2019).

Para ilustrar cómo es que los animales (en este caso un ave marina) ingieren residuos plásticos, la Figura 1.13 muestra esa situación desde la generación de este material en las plantas industriales, y a partir de ahí se dirigen hacia ríos de agua y posteriormente a la playa, donde son encontrados por organismos marinos y terrestres.

Figura 1.13: ¿Qué son los pellets de resinas de plástico? Adaptado de International Pellet Watch (s.f.)



1.6.1. Contaminantes tóxicos presentes en los desechos plásticos

De acuerdo con Verma *et al.* (2016), las sustancias tóxicas que son liberadas por la incineración de desechos plásticos “son una amenaza para la vegetación y la salud humana y animal”. Relacionado a la presencia de los desechos plásticos en el ambiente marino, “los desechos plásticos tienen la habilidad de atraer contaminantes, tales como los compuestos orgánicos persistentes (conocidos como persistent organic pollutant, POPs). Esto se debe a que muchos de estos contaminantes son hidrofóbicos”, que, como se vio en esta tesis, la composición química de los plásticos es mayoritariamente no polar, lo cual produce cierta atracción entre ambas especies. Así mismo, Verma *et al.* (2016) mencionan que “los plásticos contienen sustancias químicas o aditivos los cuales dan ciertas propiedades. Hay una gran variedad de aditivos, pero lo/s más rele-

vantes para la ecología y salud humana son el Bisfenol A, Ftalatos y los Retardantes de Llama Bromados (conocidos como Brominated Flame Retardants)”.

Del mismo modo, Verma *et al.* (2016) señalan que la combustión incompleta de polietileno, polipropileno y poliestireno para la utilización térmica, pueden liberar grandes concentraciones de monóxido de carbono (CO) y otras sustancias nocivas. Con lo anterior mencionado sobre el PP, se presenta a continuación la investigación que Affeldt *et al.* (2016) han realizado a este y a otros dos materiales más. Por razones de esta investigación, se le prestará atención a la situación del PP.

En esta investigación se considera al vanadio por encima de otras sustancias reportadas como tóxicas, derivadas de la incineración de residuos plásticos como las dioxinas y furanos (North *et al.* 2013), así como al Bisfenol A, Ftalatos, Retardantes de Llama Bromados, CO y otras sustancias nocivas (Verma *et al.*, 2016). Esto debido a que Affeldt *et al.* (2016), mencionan que “un 97% de los impactos ecotóxicos para películas del PP son por la liberación al agua de vanadio, cinc y cobre, en ese orden”.

Capítulo 2

Planteamiento de la investigación

2.1. Consideraciones al entorno teórico

Las siguientes consideraciones sirven para mostrar los aspectos más sobresalientes relacionadas al entorno teórico de esta investigación:

- No hay información documentada relacionada con la disposición final de las resinas de polipropileno en México. En específico, con la cantidad de desechos de este material que terminan en rellenos sanitarios.
- A raíz de lo anterior, el 24 de mayo del 2019, en la Ciudad de México, se tuvo la comunicación personal con el Mtro. Raúl Quintero Rodríguez. Él comenta lo siguiente:

Te puedo comentar que he realizado estudios de caracterización y el PP tiene una presencia aproximada del 1 por ciento del total de la composición de los residuos sólidos. No conozco por el momento quien separe este tipo de plástico, situación que es de llamar la atención dada su alta producción de este tipo de residuos.

- Se acudió a las oficinas de la ANIQ y de la ANIPAC para solicitar información sobre la disposición final de las resinas de PP. Sin embargo, no dieron respuesta

los responsables del área de medio ambiente en estas empresas.

- Del mismo modo, se contactó al Grupo UBE solicitando la misma información y no hubo respuesta.
- Empero, se acudió al Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) para obtener información bibliográfica y artículos relacionados con el PP y su impacto al medio ambiente. Cabe señalar que en este instituto sí hay información presente en su biblioteca abierta al público.
- No se encuentra información sobre la huella hídrica de los vasos de un solo uso del PP en México, y la que existe, presenta el mensaje de que consumir vasos de un solo uso del PP es mejor que usar un vaso reusable, razón por la cual no se continuó con la investigación de la huella hídrica de dichos productos.
- No se localizan líneas de investigación en México sobre la ecotoxicidad de materiales o productos “commodities” a lo largo de su ciclo de vida.
- La SEMARNAT tiene el Directorio de Centros de Acopio de Materiales Provenientes de Residuos en México 2010. En el cual están registradas 77 empresas de reciclaje y acopio del PP en México. Este documento sirve para conocer la situación “actual” en el acopio y reciclaje del PP en México.
- Indelpro (s.f) menciona que el reciclaje, seguido de incineración y por último relleno sanitario es la manera de disponer sus resinas de plástico.
- “La Isla de Basura” es una de muchas evidencias sobre un ineficiente manejo en la gestión de los desechos plásticos. Sin embargo, no se encuentra suficiente información que señale el impacto ecotóxico sobre su acumulación en cuerpos de agua, en suelo o de su bioacumulación en diversos organismos.
- Affeldt *et al.* (2016), mencionan que “un 97 % de los impactos ecotóxicos para películas del PP son por la liberación al agua de vanadio, cinc y cobre, en ese orden”. Por lo cual, se revisará esto.

2.2. Planteamiento del problema

Proponer un sistema para la gestión integral del fin de ciclo de vida de las resinas de PP en la Ciudad de México precisa de la definición de parámetros técnicos que a la fecha se desconocen.

2.3. Objetivos

Objetivo general

Presentar las opciones de la gestión integral de las resinas de polipropileno en México en su etapa de fin de ciclo de vida.

Objetivos específicos

- Mostrar los resultados de la encuesta telefónica de empresas dedicadas al reciclaje del PP en México, del 2019.
- Exponer la magnitud de los residuos del PP generados en un año en la CDMX y su aporte energético en el Servicio de Transportes Eléctricos de la CDMX.
- Conocer la situación actual de las opciones de disposición final de RSU establecidas en México.
- Obtener información de institutos y empresas dedicadas a la producción y transformación de plásticos, relacionada con la disposición final del PP.
- Mostrar las evidencias de una mala gestión de RSU y de los plásticos.
- Exponer el beneficio de adoptar la economía circular como posible solución al tratamiento de los residuos de PP.

2.4. Pregunta de investigación

¿Cuál es el sistema de gestión integral del fin de ciclo de vida de las resinas del PP en México?

De esta pregunta surgen las siguientes preguntas complementarias:

- ¿Cuáles son las formas de disposición final de PP en México?
- ¿Qué contaminantes tóxicos están presentes en el PP?
- ¿Cuál es la situación actual del reciclaje del PP en México?
- ¿Cuáles son los problemas derivados de una ineficiente gestión de la disposición final del PP en el mundo?
- ¿Las modificaciones a la Ley de Residuos Sólidos en la CDMX son la solución para evitar la acumulación de desechos plásticos?

2.5. Metodología

Debido a que este estudio pretende analizar la situación de la disposición final del PP, a partir de un estudio exploratorio en la Ciudad de México, no es la finalidad efectuar un experimento para comprobar qué tipo de opción de disposición final es la más eficiente, ya que no hay líneas de investigación en la Facultad de Química de la UNAM sobre este tema. Esta investigación no se centra únicamente en el tiempo presente, sino que con la información disponible se proponen acciones para crear un impacto positivo para la gestión del PP. Con este marco de referencia, se plantea la siguiente metodología de investigación:

- Se inicia el análisis cualitativamente con base en la información presente en el entorno teórico.
- Se muestra la producción de plásticos alrededor del mundo, con datos del 2016 al 2017. Del mismo modo, se muestran cifras sobre los países y regiones del mundo que producen plásticos.
- Se realizan dos encuestas, para ello, se prepararán reactivos ad hoc, con base en información previa.
- Se identifican las opciones de disposición final de RSU en México, se colocan las características de cada una de ellas, así como las ventajas y desventajas de dirigir los RSU en cada una de ellas.
- Se determina el peso promedio del PP calculada a un año en la Ciudad de México
- Se muestra el aporte energético que darían los residuos del PP provenientes de la CDMX al Servicio de Transportes Eléctricos de esta ciudad.
- Con base en la información recolectada y creada, se proponen opciones a la gestión del PP en su etapa de fin de ciclo de vida.

Toda la información considerada para este estudio es de acceso público, a excepción de las encuestas realizadas por su servidor y de la entrevista con el Mtro. Raúl Quintero. Los reportes, libros, artículos y revistas consultadas están presentes en internet, a excepción del nombre de las dos empresas dedicadas a la recolección y reciclaje del PP en México que son de carácter confidencial. En todo caso, se busca que esta ausencia no comprometa la validez del estudio.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Generalidades

En el diagnóstico nacional de residuos (INE, 2006 - 2012), por Chávez (2015) (Figura 3.1), presenta que, en México, el:

- Promedio de 0.9 kg/hab/día de residuos (de 0.4 kg en zonas rurales a 1.5 kg en zonas metropolitanas) = cerca de 95 mil toneladas/día (35 millones de ton/año).
- Recolección del 87 % de RSU y de RME (restante dispuesto por generadores).
- De la recolección, se estima que 64 % se dispone en rellenos sanitarios y sitios controlados.
- Recuperación menor al 50 % de materiales potencialmente reciclables
- Poco interés de algunos estados, municipios y población en atender a los residuos.
- Grandes diferencias en capacidad técnica y financiera entre estados.
- Mayores diferencias en capacidad técnica y financiera entre municipios. (p.3)

Figura 3.1: Diagnóstico general de los RSU en México. Tomado de Chávez (2015)



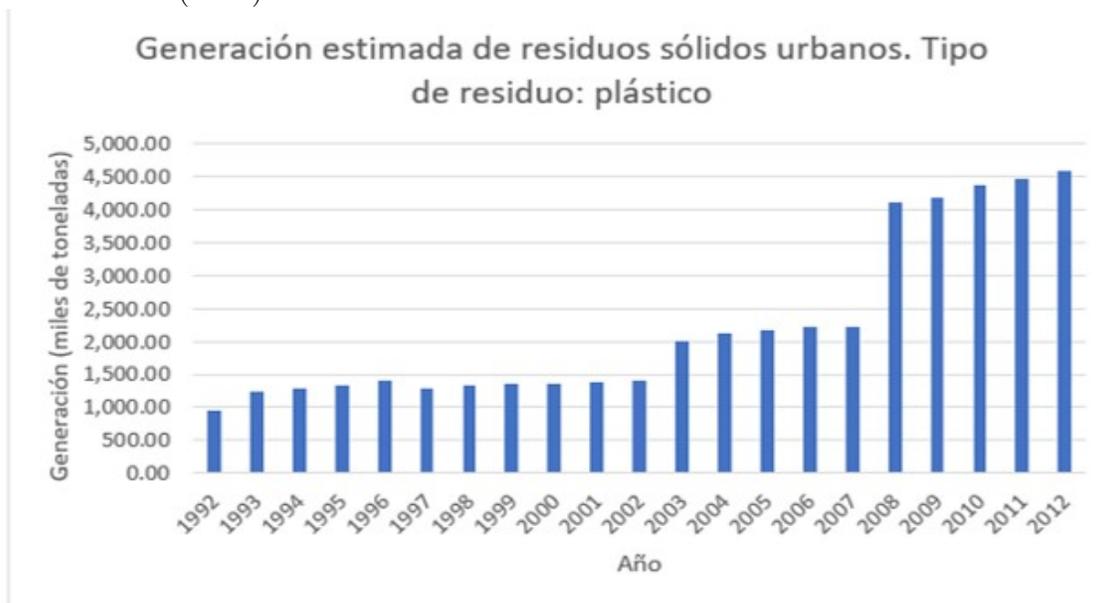
Al integrar lo anterior, la SEMARNAT (2012) en su publicación de los residuos sólidos urbanos, muestran datos sobre los porcentajes de la composición de los RSU recolectados valorizables, la cual es la que se muestra a continuación, en la Figura 3.2

Figura 3.2: Composición de los RSU recolectados valorizables 2012. Adaptado de SEMARNAT (2012)



SEMARNAT (2012) se encontraron datos de la generación estimada de residuos sólidos urbanos, específicamente del plástico, la cual se muestra en la Figura 3.3

Figura 3.3: Generación estimada de RSU. Tipo de residuo: plástico. Adaptado de SEMARNAT (2012)



3.2. Industria del plástico a nivel mundial

Affeldt *et al.* (2016) mencionan que “la industria petroquímica es una de las más grandes del mundo, y el mercado global está proyectado a alcanzar los \$758.3 mil millones de dólares en el 2022”. La industria produce una variedad de productos, que incluyen al etileno, propileno, butadieno y benceno, por nombrar algunas sustancias.

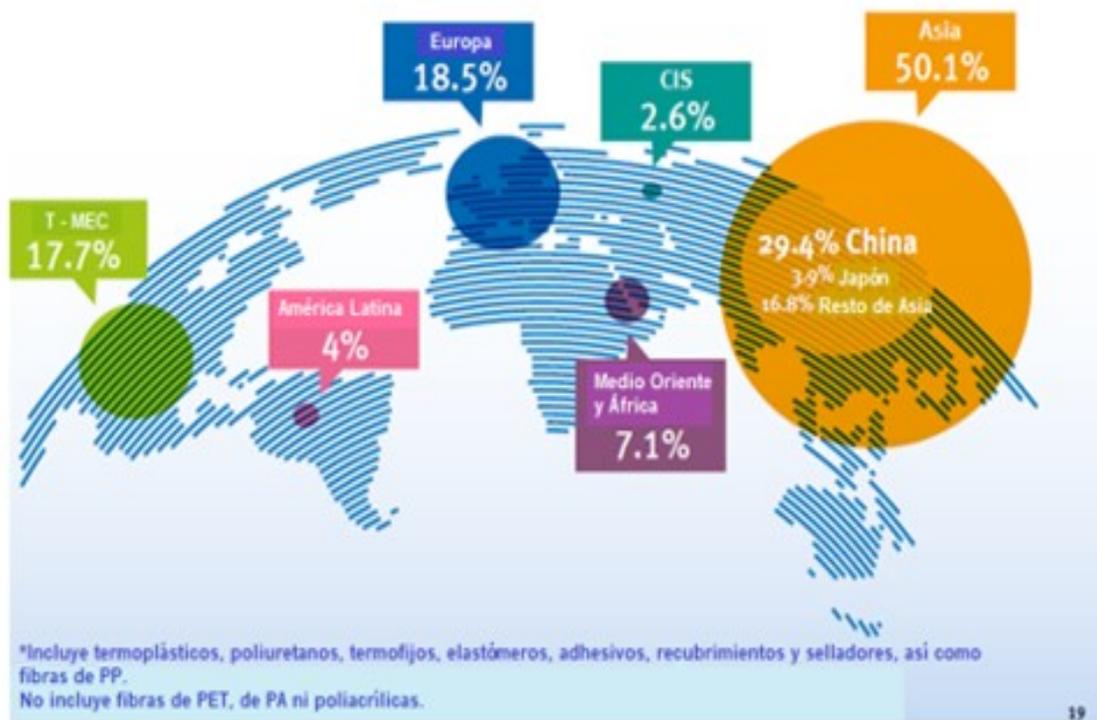
En el reporte *Plastics Europe* (2018), sintetiza que la producción mundial alcanzó casi los 350 millones de toneladas en el 2017. (Figura 3.4)

Figura 3.4: Datos de la producción de plásticos en el mundo y en la Unión Europea. Adaptado de Plastics Europe (2018)



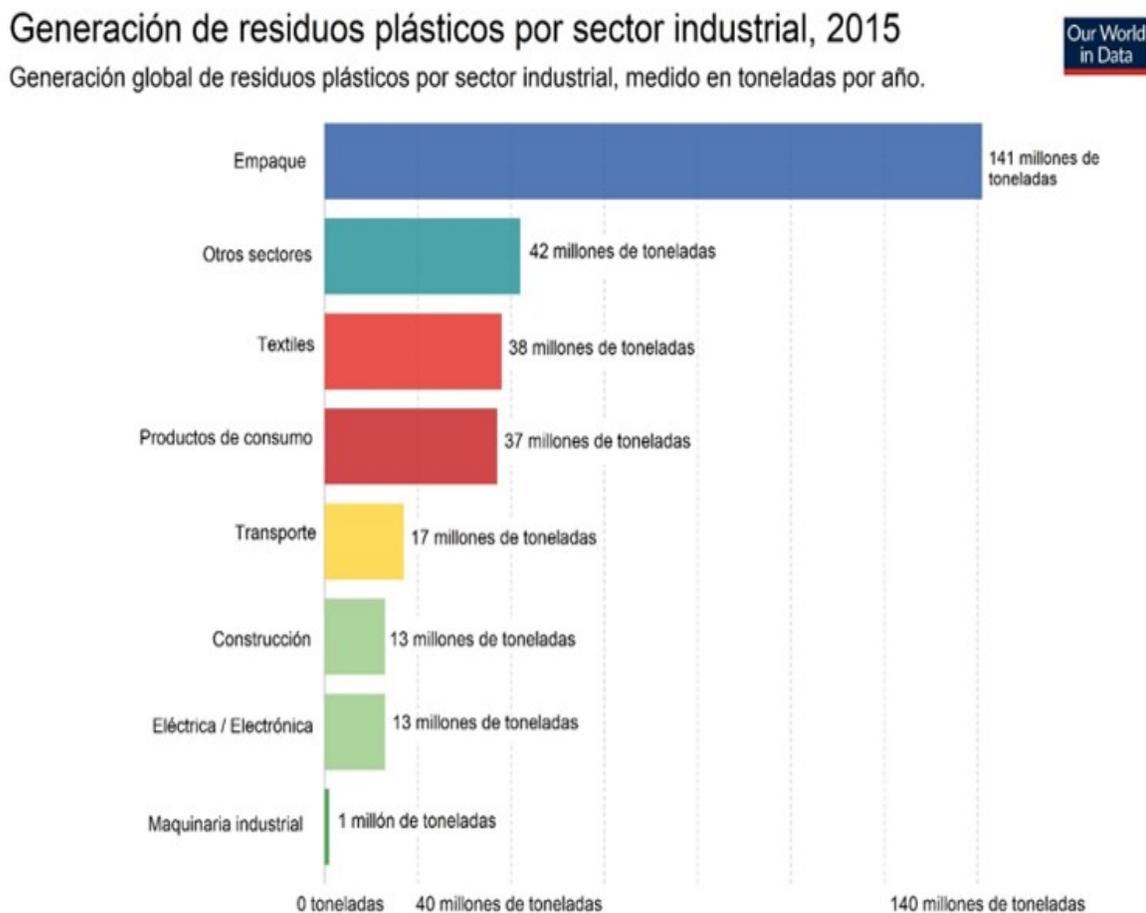
En el mismo reporte de Plastics Europe (2018), se observa en la Figura 3.5 que China es el productor de plásticos más grande, seguido por los países europeos (específicamente los países que integran la Unión Europea) y a los países que integran el Tratado de Libre Comercio de América del Norte.

Figura 3.5: Distribución de la producción global de plásticos. Adaptado de Plastics Europe (2018)



La Figura 3.6, muestra la generación de residuos plásticos por sector industrial. En esta figura se muestra que el sector del empaque es la que genera más residuos plásticos, el cual tiene un valor de 141 millones de toneladas de estos materiales.

Figura 3.6: Generación de residuos plásticos por sector industrial, 2015. Adaptado de Our World in Data (2018)



Fuente: Geyer et al. (2017)

CC BY

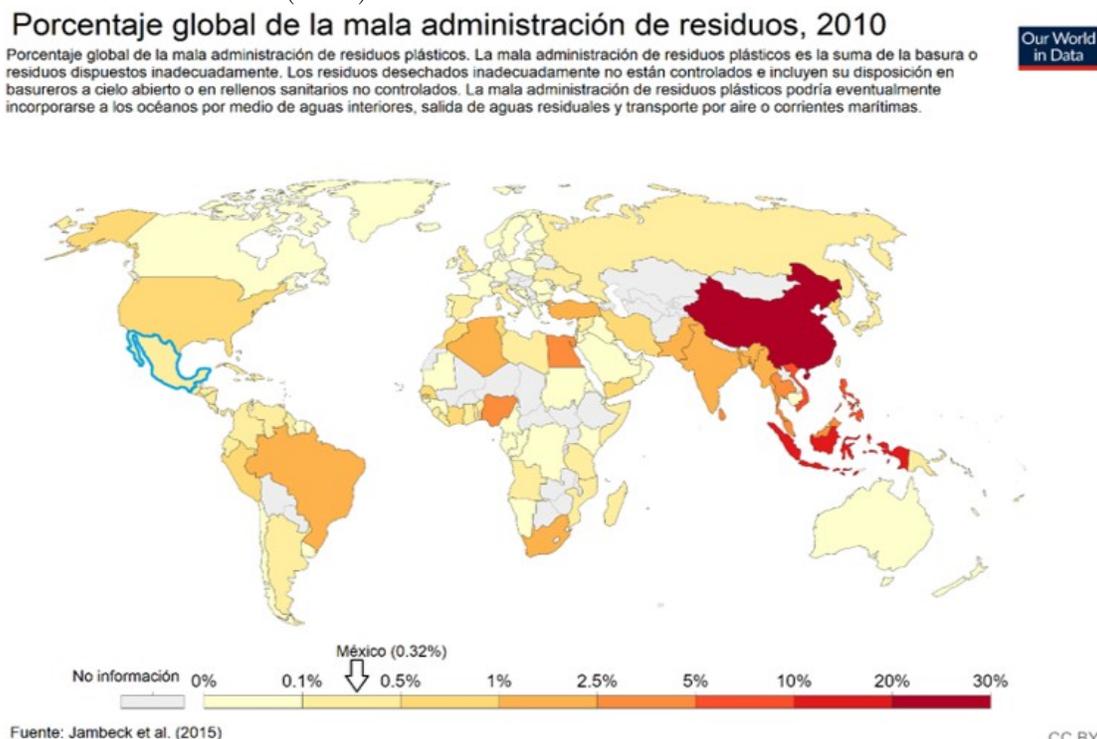
Con lo anterior, la información de la Figura 3.6, valida que el sector de empaques es de suma importancia. En esta categoría se encuentran los plásticos usados por la industria de los alimentos y bebidas, de cuidados hospitalarios, consumos personales, industria de los cosméticos, entre otros. Sin embargo, una de las características de los empaques es que tienen una vida de uso muy limitado, normalmente es de 6 meses (Our World in Data, 2018), o incluso menos, al ser que una parte considerable de ellos sean plásticos de un solo uso. En contraste, los plásticos usados por la industria de la construcción, tienen una vida media de 35 años (Our World in Data, 2018).

Con lo anterior, se habla de que la industria del empaque es el generador dominante de los desechos plásticos, y al no tener una gestión coordinada por el gobierno y la industria, sea responsable de la formación de la Gran Isla de Basura, tal como se desarrolla en la Sección 3.3 de la presente investigación.

3.3. La Gran Isla de Basura

Al saber que China es el principal productor de plásticos a nivel mundial, cabe destacar que ese país es también el que tiene mala administración en la gestión de plástico a nivel mundial, tal como lo muestra la Figura 3.7

Figura 3.7: Porcentaje global de la mala administración de residuos, 2010. Adaptado de Our World in Data (2018)

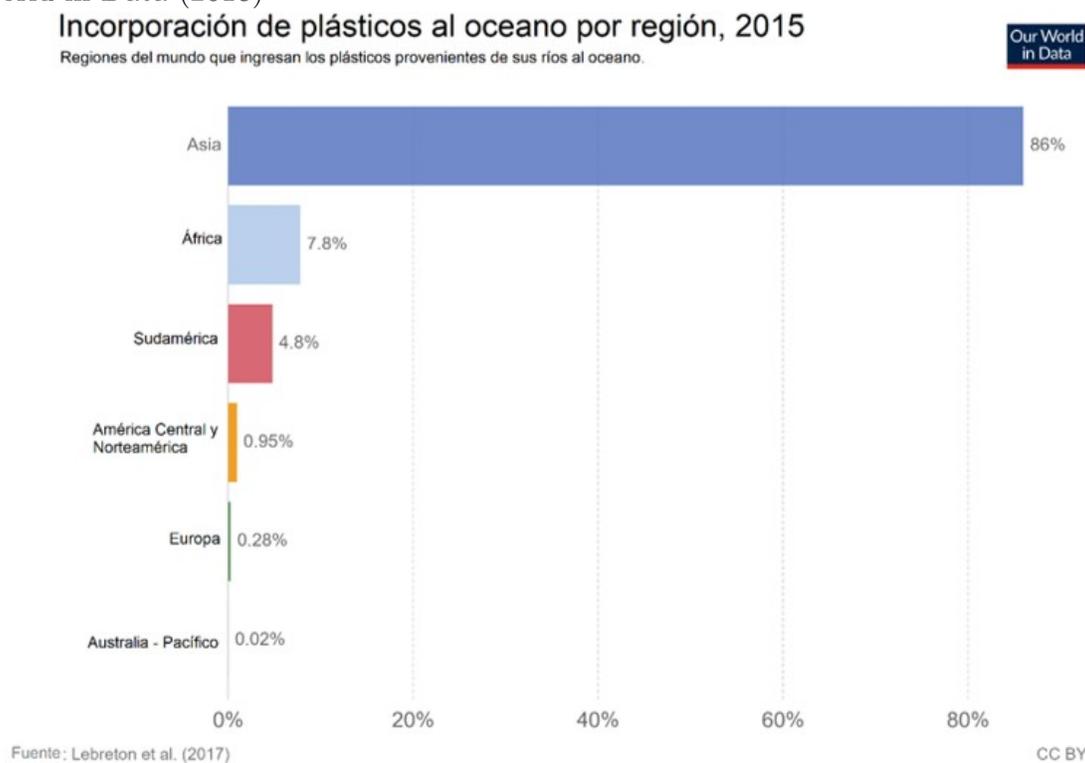


Al consultar la fuente Our World in Data (2018), se encuentra que China tiene

una participación total del 27.7 % en la mala administración del plástico a nivel mundial, seguido de Indonesia, donde hay un 10.1 %, Sri Lanka con un 5 %, mientras que México aporta con un total de 0.32 % en la misma categoría. Si bien esta información es del 2015, hasta la fecha, la producción de plástico a nivel mundial ha aumentado, y China continúa siendo el primer país productor de este material, por lo que se espera que los porcentajes anteriores vayan en aumento.

Complementando la mala administración en la gestión de residuos plásticos, se observa en la Figura 3.8 que la región de Asia es la que ingresa mayor número de plásticos a los océanos, con un porcentaje del 86 %, al ser que, de igual manera, China es uno de los principales países responsables en esta situación desfavorable.

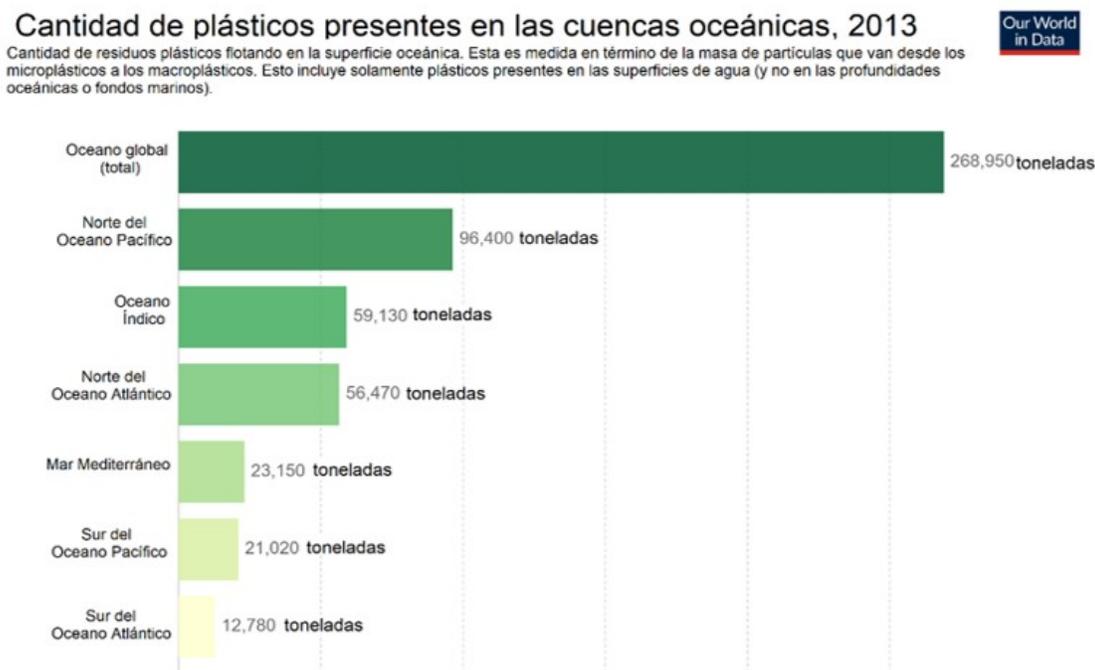
Figura 3.8: Incorporación de plásticos al océano por región, 2015. Adaptado de Our World in Data (2018)



En la Figura 3.9 se presenta la cantidad de residuos plásticos presentes en las cuen-

cas oceánicas. Esta distribución y acumulación de plásticos en los océanos está fuertemente influenciado por las superficies oceánicas y corrientes de viento. Comúnmente, los plásticos flotan sobre la superficie oceánica, permitiéndoles ser transportados por el viento y las corrientes marítimas. Como resultado a este dinamismo, los plásticos tienden a acumularse en giros oceánicos, con altas concentraciones de plásticos en el centro de las cuencas oceánicas y una concentración menor en sus periferias. Después de entrar los plásticos a través de las zonas costeras, estos materiales tienden a migrar hacia el centro de las cuencas oceánicas.

Figura 3.9: Cantidad de plásticos presentes en las cuencas oceánicas, 2013. Adaptado de Our World in Data (2018)



Fuente: Eriksen et al. (2014)

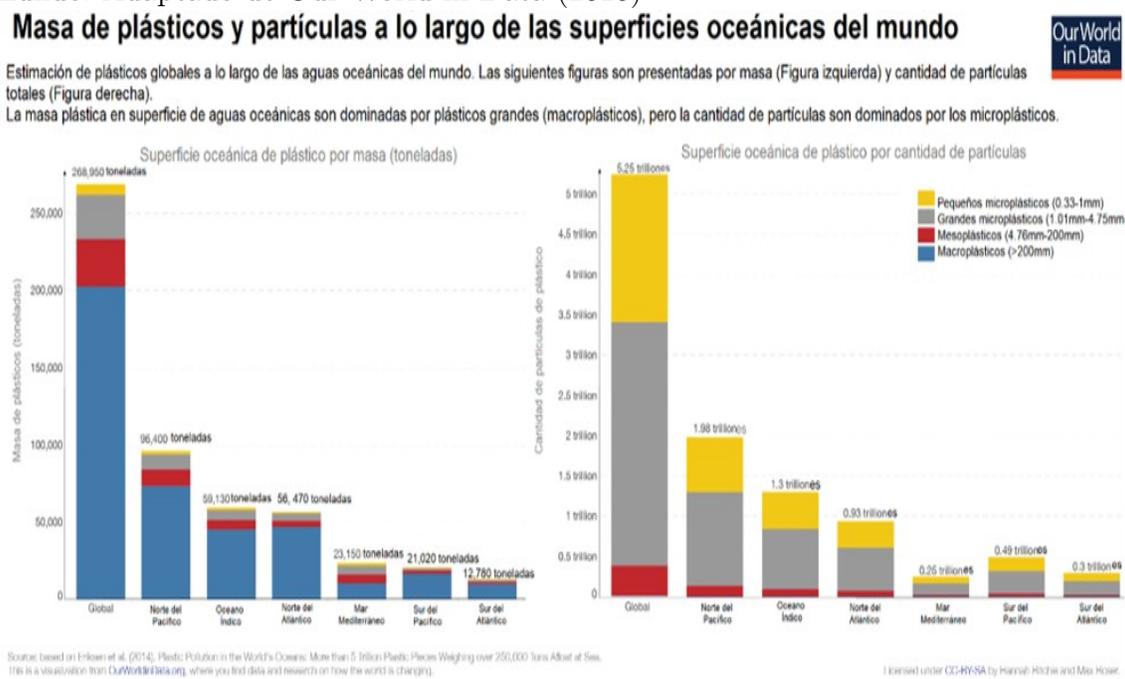
CC BY

Tal como lo muestra la Figura 3.9 el Norte del Océano Pacífico tiene la mayor cantidad de plásticos, en comparación con las otras regiones oceánicas. Esto es en gran medida a que los países que se encuentran en cercanía a esta región son Estados Unidos y China, y como se presentó anteriormente, China es el primer productor

mundial de plástico, al igual que presenta una gran población.

Hasta el 2015, se estimó una cantidad de 5 trillones de partículas de plástico en las superficies de cuerpos de agua en el mundo. La Figura 3.10 muestra la distribución de la masa de plásticos y la cantidad de partículas de este material en las superficies oceánicas de la Tierra.

Figura 3.10: Masa de plásticos y partículas a lo largo de las superficies oceánicas del mundo. Adaptado de Our World in Data (2018)

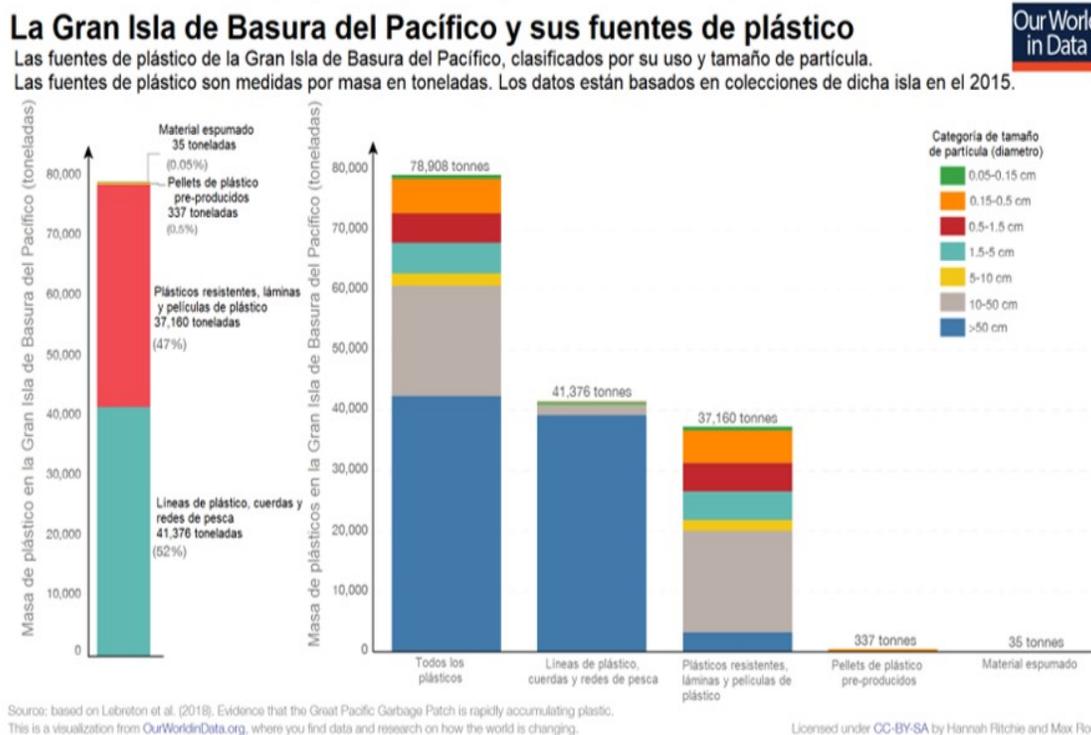


La Figura 3.10, muestra que en el Norte del Pacífico hay una mayor cantidad de masa de plásticos, así como de la cantidad de partículas del mismo material. Por otra parte, la mayoría de los plásticos por su masa, son plásticos grandes (conocidos como macroplásticos), mientras que la mayoría en términos de cantidad de partículas son los microplásticos.

La Figura 3.11 muestra la composición de plástico identificado en la Isla de Batura. Del mismo modo, muestra las toneladas de estos plásticos encontrados en esa

zona, así como la categoría del tamaño de partícula identificados.

Figura 3.11: La Gran Isla de Basura del Pacífico y sus fuentes de plástico. Adaptado de Our World in Data (2018)



En la anterior figura (Figura 3.11) se puede observar que la presencia de las líneas de plástico, cuerdas y redes de pesca son los principales tipos de desechos plásticos que se encuentran en las aguas superficiales de los océanos y que son mayores a los 50 cm, clasificándolos como macroplásticos. En segundo lugar, se encuentran los plásticos resistentes, láminas y películas de plástico, en otras palabras, son los plásticos que pertenecen al sector de los empaques. Cabe mencionar que esta última categoría es el objeto de estudio de esta tesis.

Todo lo anterior, junto con el dinamismo de las corrientes marinas y el viento, dan como resultado la formación de la Isla de Basura (conocida en inglés como ‘The Great Pacific Garbage Patch’, GPGP), tal como se muestra en la Figura 1.12 que,

de acuerdo con National Geographic (2018), menciona que esta zona tiene al menos 700,000 kilómetros cuadrados de largo, el cual es casi del tamaño de Texas.

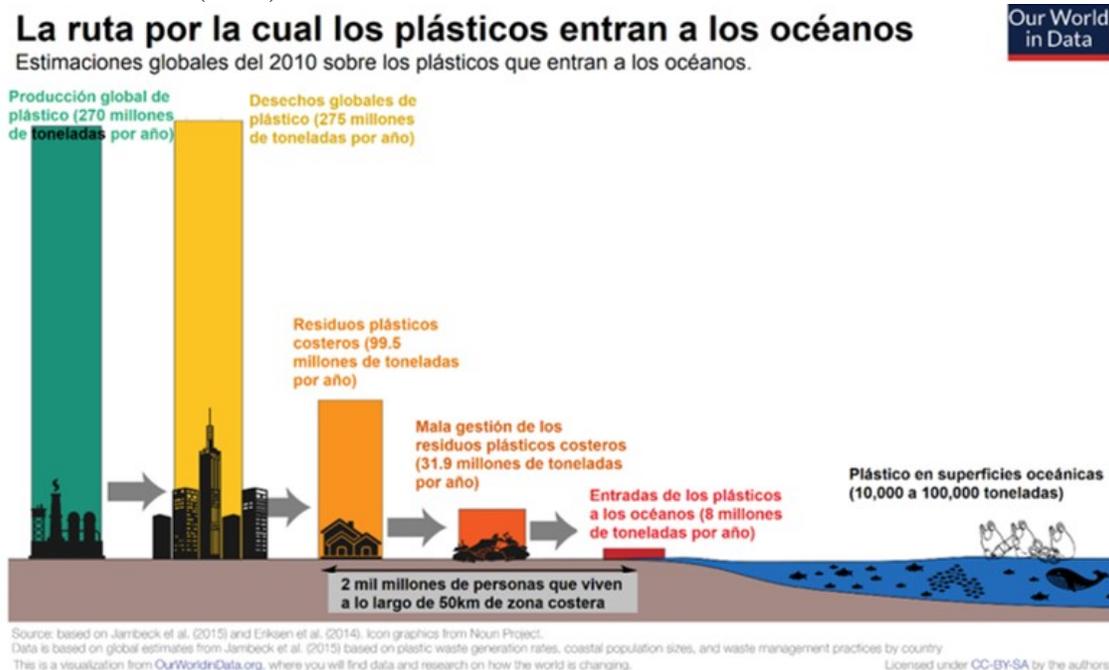
Our World in Data (2018), menciona que:

El GPPG posee 1.8 trillones de piezas de plástico, con una masa de 79,000 toneladas (aproximadamente 29 % de las 269,000 toneladas de plástico estimadas en las superficies oceánicas del mundo). Lamentablemente, con el paso de las décadas, los autores reportan que ha habido un crecimiento exponencial en la concentración de plásticos en esta zona.

Al conocer la formación y las dimensiones que tiene el GPPG, podría parecer que, al existir una mala gestión en la disposición final de los residuos plásticos, todos estos plásticos terminarían en los océanos. Sin embargo, esto no es así: la gran mayoría termina en los rellenos sanitarios y sólo un 3% acaba en los océanos (Our World in Data, 2018).

La Figura 3.12 resume la Sección 3.1 y 3.2

Figura 3.12: La ruta por la cual los plásticos entran a los océanos. Adaptado de Our World in Data (2018)



Si bien esta información abarca un estimado global, la situación en México en la cuestión del plástico es de suma relevancia prestarle atención, debido a que, como se mostró en la Figura 3.7, México aporta un 0.32 % en la mala gestión de plásticos a nivel global. En otro sentido, el Congreso de la Ciudad de México reformó la Ley de Residuos Sólidos en beneficio del medio ambiente. Dicha reforma menciona que a partir de diciembre del 2020 queda prohibida la distribución y entrega de bolsas de plástico (salvo que sean compostables); lo mismo sucede a partir del 1° de enero del 2021 (Congreso CDMX, 2019) con otros plásticos de un solo uso. Se espera que, con el transcurso de los años, el desecho de los plásticos de un solo uso disminuya y también su acumulación excesiva.

Como se ha mencionado antes, uno de los principales problemas del plástico es su tratamiento y disposición final. Para dar soluciones a esta problemática, la Unión Europea ha ido a la vanguardia. Aunque en la Figura 3.4 se observa que la producción global de plástico ha aumentado con el paso del tiempo, en la Figura 3.13 se demuestra que al menos en la Unión Europea y de NO/CH (Noruega/Suiza) se adoptan 3 formas de disposición final de residuos plásticos (las mismas que en la hoja de seguridad de los productos de Indelpro se presentan), así como el porcentaje destinado a dichas tres formas. La siguiente figura es elaborada con datos del 2016.

Figura 3.13: Manejo integral de residuos de plástico en la Unión Europea. Adaptado de Plastics Europe (2018)



La siguiente sección da inicio al panorama del plástico y del PP en México.

3.4. Posición de México en la producción de plásticos

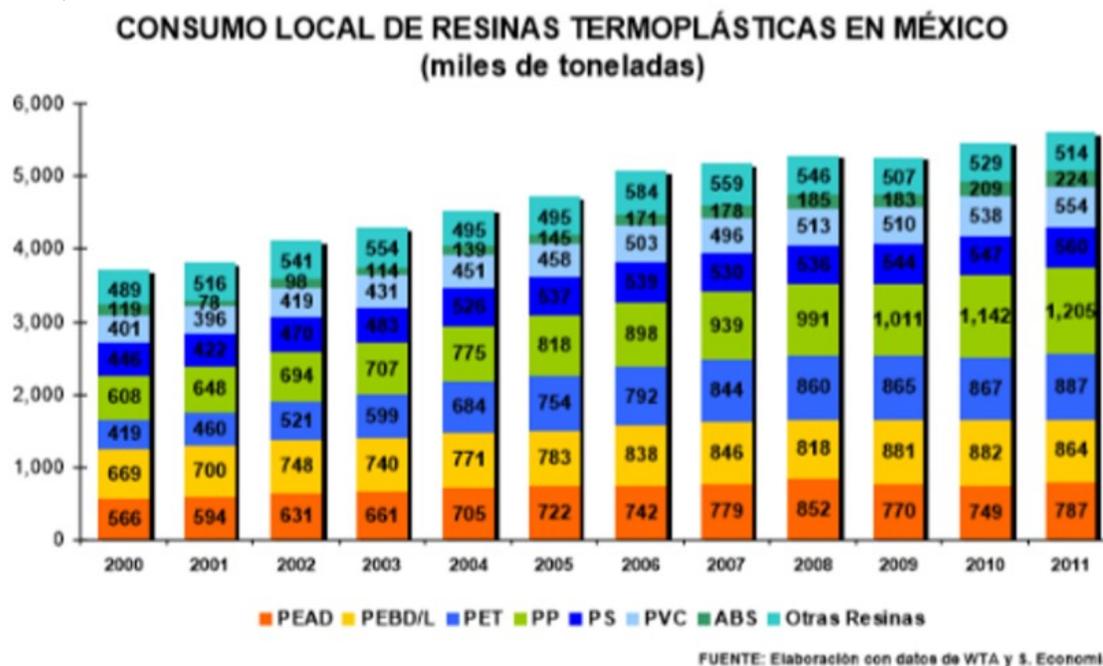
Mendoza (2017) también muestra los siguientes datos del 2017:

Importancia del plástico en México:

- Representa el 25.1 % del PIB del rubro químico.
- Producción: Más de 5 millones de toneladas al año.
- Crecimiento anual: 4.8%.
- Valor de la industria y materias primas: 325 mil 157 millones de pesos.
- Producción mundial: Onceavo lugar (Superado por China, Estados Unidos y Alemania).
- Estados que concentran la mayor producción: Nuevo León, Coahuila, Sonora y Baja California.

En la Figura 3.14 se puede ver que, desde el 2004, la resina termoplástica de mayor consumo en México es el polipropileno, en comparación con las otras resinas termoplásticas.

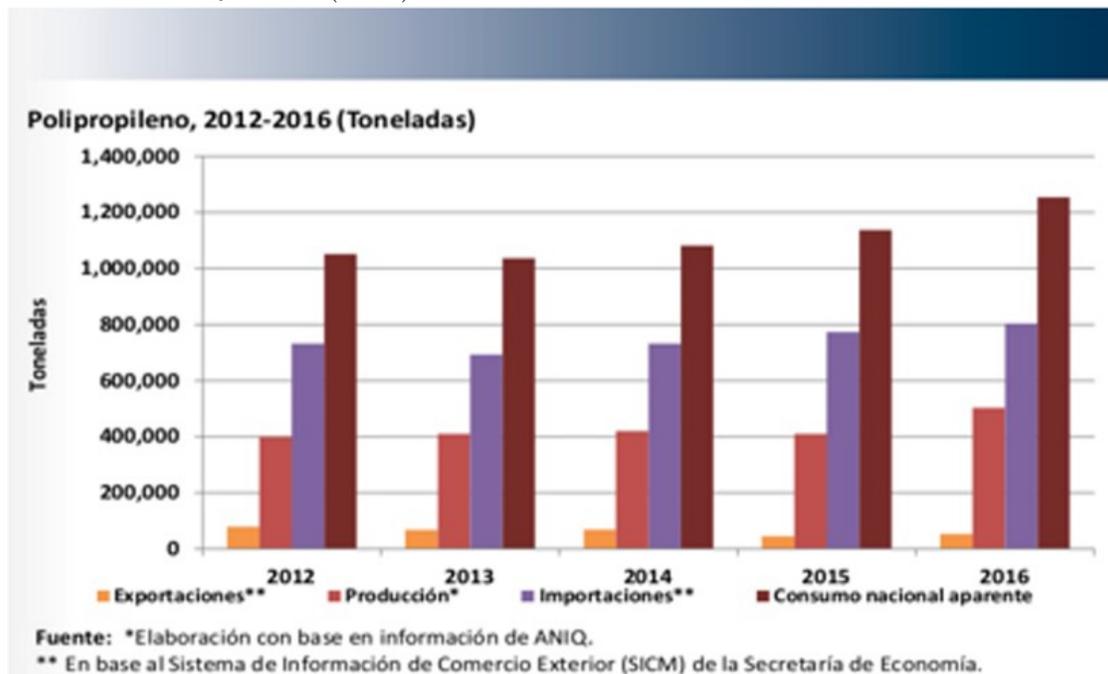
Figura 3.14: Consumo local de resinas termoplásticas en México. Tomado de Flores (2013)



3.5. Industrial del polipropileno en México

El panorama de la producción de polipropileno en México fue obtenido del Anuario Estadístico de la Industria Química Mexicana, 2017. El consumo nacional mexicano aparente del polipropileno en el 2016 fue mayor en comparación a los años anteriores, que superan las 1,200,000 de toneladas (Figura 3.15). Sin embargo, en los sectores de exportación, importación y producción se mantienen en valores ligeramente constantes, lo cual muestra que, si bien en México no se produjo una gran cantidad de polipropileno, su consumo fue mayor, esto podría ser debido a los productos de este tipo de plástico que fueron fabricados con anterioridad años atrás, y fue en el 2016 en el punto en el que hubo mayor consumo de este.

Figura 3.15: Mercado del polipropileno en México. Tomado de la Asociación Nacional de la Industria Química (2017)



Por razones de esta investigación, se presta atención en la disposición final, ya que conforme con la Figura 3.16 tomado del reporte de Affeldt *et al.* (2016), se observa que la ecotoxicidad presente en el fin de ciclo de vida de las películas de polipropileno es amplia, la cual abarca poco más del 80% en esa etapa de su vida.

Figura 3.16: Etapas de los resultados del ciclo de vida en películas del PP. Adaptado de Affeldt *et al.*, (2016)



Una vez que se mencionó que el sector de los empaques es el principal responsable de la generación de residuos plásticos (Our World in Data, 2018), se presenta la compañía Indelpro, ubicada en México. Se escogió esta compañía, ya que ellos se identifican como el “único productor de resinas de polipropileno en México”, el cual continúa con el objeto de estudio de esta investigación. En la página de internet de Indelpro (s.f) se encuentra el catálogo de los vasos desechables de polipropileno y de los contenedores desechables que ellos producen, identificados como “Polipropileno homopolímero, SLY331” (Figura 1.3), y como “Polipropileno homopolímero clarificado de alta cristalinidad, PL395N” (Figura 1.5), respectivamente. Al consultar la hoja de seguridad de ambos productos y en la Sección 5 “Medidas de lucha contra incendios”, (en el apartado de Productos de Combustión Peligrosa), que el dióxido de carbono, monóxido de carbono, cetonas, acroleína, aldehídos y compuestos orgánicos no identificados, son las sustancias identificadas liberadas al exponerlo a una fuente de calor (Figura 3.17). Cabe señalar que, de esas sustancias identificadas, el dióxido de carbono y el monóxido de carbono son gases de efecto invernadero, y su presencia

en la atmósfera contribuye a este efecto. Por el contrario, no sólo se liberan las anteriores sustancias.

Figura 3.17: Hoja de seguridad del polipropileno homopolímero SLY331. Tomado de Indelpro (s.f.)

5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS	
Propiedades inflamables	
Punto de inflamación	>329 °C (625 °F)
Medios de extinción adecuados	Use espuma, dióxido de carbono, o rocío de agua para combatir incendios involucrando este material
<u>Datos sobre Peligros de Explosión</u>	
Sensible a impactos mecánicos	Ninguno
Sensible a descargas estáticas	La descarga estática puede ser una fuente de encendido para una concentración combustible de polvo. Durante el manejo del producto el equipo de transporte debe estar aterrizado para evitar la acumulación de cargas eléctricas estáticas.
Riesgos específicos debidos a la sustancia química	El producto tal cual es embarcado no es un polvo combustible. Sin embargo, puede ocurrir una concentración de polvos finos ya que estos generan un riesgo de explosión
Equipo de protección y precauciones para bomberos	Al igual que para cualquier incendio, use un aparato respirador a demanda de presión integrado, (aprobado por MSHA/NIOSH o equivalente) y equipo completo protector.
Productos de combustión peligrosos: Dióxido de carbono, monóxido de carbono, cetonas, acroleína, aldehídos, compuestos orgánicos no identificados.	

Del mismo modo, en Indelpro (s.f.) se muestra en la Sección 12 “Informaciones Ecológicas”, en el apartado de Ecotoxicidad (Figura 3.18), se menciona que no hay información disponible en Ecotoxicidad; lo mismo en su Persistencia y Degradabilidad; y en su Potencial de Bioacumulación la respuesta es la misma.

Figura 3.18: Información ecológica presente en hoja de seguridad del Polipropileno Homopolimero SLY331. Tomado de Indelpro (s.f.)



INDELPRO
WPS-IND-001 - Profax SLY331 Fecha de revisión 15-Sep-2017

12. INFORMACIONES ECOLÓGICAS

Ecotoxicidad
No está disponible

Persistencia y Degradabilidad
No hay información disponible.

Potencial de bioacumulación
No hay información disponible.

Por último, en Indelpro (s.f) se señala en la Sección 13 “Información relativa a la eliminación de los productos”, en la subsección 13.1. “Métodos para el tratamiento de residuos” (Figura 3.19), se encuentra la siguiente información:

1. Recicle (reprocese),
2. Incineración, incluyendo la recuperación energética de material de desecho en una instalación permitida de acuerdo con las regulaciones locales, estatales o provinciales y federales.
3. Relleno de terrenos en una instalación licenciada en conformidad con las regulaciones locales, estatales o provinciales y federales. Aplicable para el producto y el material de empaque y embalaje.

Figura 3.19: Información relacionada a la eliminación de los productos. Tomado de Indelpro (s.f.)

13. INFORMACIÓN RELATIVA A LA ELIMINACIÓN DE LOS PRODUCTOS	
13.1. Métodos para el tratamiento de residuos	
Desechos de residuos / producto no utilizado	: (1) Recicle (reprocese), (2) Incineración incluyendo la recuperación energética de material de desecho en una instalación permitida de acuerdo con las regulaciones locales, estatales o provinciales y federales. (3) Relleno de terrenos en una instalación licenciada de acuerdo con las regulaciones locales, estatales o provinciales y federales. Aplicable para el producto y el material de empaque y embalaje.
Envases contaminados	No hay información disponible

A lo largo de esta tesis se muestra evidencia de las tres formas de tratamiento de residuos del polipropileno.

Si bien, la empresa Indelpro (s.f) menciona al reciclaje, incineración con recuperación energética y rellenos sanitarios certificados como las opciones de tratamiento de los residuos del plástico, la realidad es que, al menos en México, esto no ocurre. Esto se desarrolla en la Sección 3.6

3.6. Manejo integral de los plásticos

A continuación, se muestran las opciones del manejo integral de los RSU en México.

3.6.1. Rellenos sanitarios

La SEMARNAT (2015) indica que:

En 2013, a nivel nacional la disposición final en rellenos sanitarios y sitios controlados alcanzó poco más del 74.5 % del volumen de RSU generado, lo que representa un incremento de alrededor del 82.7 % con respecto al año 1997, en el cual se disponía cerca del 40.7 % de los residuos. Mientras tanto, de los residuos generados, el 21 % se depositó en sitios no controlados y el 5 % restante fue reciclado (p.444 – 445)

La disposición final por relleno sanitario no es la mejor elección, porque, además del artículo de Palacios *et al.*, (2008), la investigación de North *et al.* (2013) en su artículo mencionan:

La eliminación de plásticos en rellenos sanitarios secuestra cerca del 100 % del carbón de la atmósfera, esto también implica que el material y la energía almacenada en los plásticos son pérdidas (secuestradas por un término largo) en el proceso. Los problemas de espacio son también un problema. Aunque el espacio libre en los Estados Unidos es abundante, en países de menor tamaño como Dinamarca y Japón recurren más a la incineración, esto con el fin de conservar los recursos del espacio. (p.5)

Lo cual vuelve a la opción de relleno sanitario poco eficiente y no viable para tratar los plásticos en su disposición final.

De acuerdo con la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ] (s.f), “el Ministerio de Nueva Zelanda reporta los valores generales de CO₂ equivalentes (CO_{2e}) por cantidad de residuo que se muestra en la Tabla 3.1”.

Tabla 3.1: Factores de emisión de CO₂ en rellenos sanitarios con y sin sistema de captación de gas. Tomado de la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ], (s.f.)

Factores de emisión de CO₂

Compuesto	Valor
CO _{2e} de residuos mixtos (promedio nacional) de relleno sin captación de gas	1.13 [tCO _{2e} /tresiduos]
CO _{2e} de residuos mixtos (promedio nacional) de relleno con captación de gas	0.361 [tCO _{2e} /tresiduos]

FUENTE: Ministry of the environment of New Zealand (2013). Disponible en: <http://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/media/Climate%20Change/voluntary-ghg-reporting-summary-tables-emissions-factors-2015.pdf> Consultado el 19 de julio de 2017.

3.6.2. Incineración

La GIZ (s.f), indica lo siguiente:

En la corriente de RSU existen componentes que incluyen tanto carbono neutro o biogénico (residuos de comida, jardín...), como carbono fósil, integrado mayoritariamente por compuestos derivados de petróleo (plástico, textiles,...). De manera tal que las emisiones de CO₂ a la atmósfera podrán igualmente contener tanto carbono biogénico como carbono de origen fósil. (p.11)

Tabla 3.2: Factores de emisión de plantas de incineración de RSU. Tomado de la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ], (s.f.)

Factores de emisión de plantas de incineración de residuos sólidos urbanos

Componente	Valor	Intervalo de confianza al 95%		Emisiones por la incineración de 4,500 toneladas de RSU
		Inferior [g/t]	Superior [g/t]	
NO _x	1,071 [g/t]	749[g/t]	1,532[g/t]	4,819.5 [kg]
CO	41 [g/t]	7[g/t]	253[g/t]	184.5 [kg]
COVDM ^a	5.9 [g/t]	2.7[g/t]	12.9[g/t]	26.55 [kg]
SO ₂	87 [g/t]	16[g/t]	466[g/t]	391.5 [kg]
NH ₃	3.0 [g/t]	0.5[g/t]	18.3[g/t]	13.5 [kg]
PST ^b	3.0 [g/t]	1.1[g/t]	8.3[g/t]	13.5 [kg]
PM ₁₀	3.0 [g/t]	1.1[g/t]	8.3[g/t]	13.5 [kg]
PM _{2.5}	3.0 [g/t]	1.1[g/t]	8.3[g/t]	13.5 [kg]
CN ^c	3.5 % de PM _{2.5}	1.8% de PM _{2.5}	7% de PM _{2.5}	3.5 % de PM _{2.5}
Pb	58.0 [mg/t]	12.0[mg/t]	280.3[mg/t]	261 [g]
Cd	4.6 [mg/t]	1.1[mg/t]	19.3[mg/t]	20.7 [g]
Hg	18.8 [mg/t]	7.3[mg/t]	48.3[mg/t]	84.6 [g]
As	6.2 [mg/t]	1.3[mg/t]	29.6[mg/t]	27.9 [g]
Cr	16.4 [mg/t]	3.0[mg/t]	88.7[mg/t]	73.8 [g]
Cu	13.7 [mg/t]	3.9[mg/t]	47.3[mg/t]	61.65 [g]
Ni	21.6 [mg/t]	4.2[mg/t]	111.6[mg/t]	97.2 [g]
Se	11.7 [mg/t]	2.2[mg/t]	62.0[mg/t]	52.65 [g]
Zn	24.5 [mg/t]	2.7[mg/t]	219.6[mg/t]	110.25 [g]
PCBs ^d	3.4 [ng/t]	1.2[ng/t]	9.2[ng/t]	15.3 [µg]
PCDD/F ^e	52.5 [ng/t]	16.6[ng/t]	166.3[ng/t]	236.25 [µg]
Benzo(a)pireno	8.4 [µg/t]	2.8[µg/t]	33.6[µg/t]	37.8 [mg]
Benzo(b)fluoranteno	17.9 [µg/t]	6.0[µg/t]	71.4[µg/t]	80.55 [mg]
Benzo(k)fluoranteno	9.5 [µg/t]	3.2[µg/t]	37.8[µg/t]	42.75 [mg/t]
Indeno(1,2,3-cd) pireno	11.6 [µg/t]	3.9[µg/t]	46.2[µg/t]	52.2 [mg/t]
Hexaclorobenceno (HCB)	45.2 [µg/t]	8.0[µg/t]	254.1[µg/t]	203.4 [mg/t]

FUENTE: European Environmental Agency (2016). "Guidebook 2016, Municipal Waste Incineration".

^a Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano

^b Partículas suspendidas totales

^c Carbono negro

^d Policlorobifenilos

^e Dibenzo-p-dioxinas policloradas y Dibenzofuranos policlorados

En la misma referencia (GIZ, s.f), se menciona lo siguiente:

Si bien los datos de emisiones que se muestran en la Tabla 3.2 se refieren al año 2002, se han incluido en este documento ya que aportan valores para las descargas directas de los gases de combustión, es decir, antes de que los gases emitidos sean tratados en los equipos de control de emisiones. Esto permite tener una idea de la magnitud de las emisiones sin tratamiento y compararlos con los valores reales de los parámetros monitoreados. (p.13)

Complementando lo anterior, GIZ (s.f) indica lo siguiente:

En los años recientes se ha venido considerando cada vez con mayor frecuencia, la posibilidad de aprovechar el contenido energético del biogás mediante su combustión para la generación de energía eléctrica. Si ésta no es viable, por lo menos se ha de considerar la captación y la quema del biogás en un quemador abierto. En ambos casos, el metano ya no es emitido a la atmósfera, sino que es captado y conducido al equipo de combustión, lo que reduce el impacto ambiental del relleno sanitario al mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. (p.15)

Tabla 3.3: Factores de emisión de infraestructura y equipo funcionando con biogás de rellenos sanitarios de EU. Tomado de la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ], (s.f.)

Factores de emisión de infraestructura y equipo funcionando con biogás de rellenos sanitarios de Estados Unidos

Equipo	Compuesto	Producción típica [kg/10 ⁶ dscm CH ₄]
Quemador abierto	NO ₂	631
	CO	737
	PM	238
	Dioxinas/Furanos	6.7*10 ⁻⁶
Motor combustión interna	NO ₂	11,620
	CO	8,462
	PM	232
Caldera/turbina de vapor	NO ₂	677
	CO	116
	PM	41
	Dioxinas/Furanos	5.1*10 ⁻⁶
Turbina de gas	NO ₂	1,400
	CO	3,600
	PM	350

FUENTE: EPA (2008). "Background Information Document for Updating AP42 Section 2.4 for Estimating Emissions from Municipal Solid Waste Landfills".

3.6.3. Reciclaje

La SEMARNAT (2014), menciona:

Debe aclararse que el total que se recicla en el país incluye no sólo la que se podría recuperar en sitios no controlados, sino también lo que se separa en diversas fuentes de generación y es llevada por los usuarios a centros de acopio, aparte de lo que se recupera en contenedores y vehículos de recolección.

Affeldt *et al.* (2016) muestran que “el porcentaje de reciclaje, tal como lo reportó la EPA para los plásticos en el 2012, es igual al 8.8%, al menos en los Estados Unidos”. Por el contrario, esos plásticos son clasificados como RSU. La mayoría de los plásticos no son biodegradables, y para los plásticos que sí lo son, no se degradan suficientemente rápido para igualar la entrada de otro desecho de plástico, y provoca una presión en el uso de tierra al optar por rellenos sanitarios.

SEMARNAT (2015) muestra que:

Según el CDGMD (INEGI, 2013), del volumen total reciclado en el país en 2012, el mayor porcentaje correspondió a papel, cartón y productos de papel (32%), seguido de PET (15.8%), vidrio (13.8%), plásticos (9.2%), metales (7.6%) y los electrónicos y electrodomésticos (5.1%). (p.444)

3.7. Situación de la disposición final del polipropileno

Al volver al plástico de polipropileno, el artículo creado por Affeldt *et al.* (2016) muestra los escenarios de fin de ciclo de vida de las resinas de polipropileno, y lo que llama la atención es que en Japón el 100% de los desechos de los tres materiales estudiados se dirigen a incineración (Tabla 3.4), por otro lado, España cuenta con dos formas de disposición final para esos materiales, ya sea por relleno sanitario o por incineración, al ser que el relleno sanitario es el de mayor uso con un 70% (Tabla 3.5).

Tabla 3.4: Escenario de fin de vida de los tres materiales de investigación en Japón. Adaptado de Affeldt *et al.*, (2016)

Escenario de fin de vida en Japón					
Material	Tipo	Porcentaje	Fuente	Nombre del proceso del ciclo de vida	Fuente de datos del ciclo de vida
Stone Paper	Incineración	100%	Ver 2.2.8.2	Municipal Solid Waste (waste scenario) {JP} treatment of municipal solid waste, incineration	Ecoinvent 3
Coated Paper	Incineración	100%	Ver 2.2.8.2	Municipal Solid Waste (waste scenario) {JP} treatment of municipal solid waste, incineration	Ecoinvent 3
PP Film	Incineración	100%	Ver 2.2.8.2	Municipal Solid Waste (waste scenario) {JP} treatment of municipal solid waste, incineration	Ecoinvent 3

Tabla 3.5: Escenario de fin de vida de los tres materiales de investigación en España. Adaptado de Affeldt *et al.*, (2016)

Escenario de fin de vida en España					
Material	Tipo	Porcentaje	Fuente	Nombre del proceso del ciclo de vida	Fuente de datos del ciclo de vida
Stone Paper	Incineración	30%	Ver 2.2.8.2	Municipal Solid Waste (waste scenario) {JP} treatment of municipal solid waste, incineration	Ecoinvent 3
	Relleno Sanitario	70%	Ver 2.2.8.2	Municipal Solid Waste (waste scenario) {JP} treatment of municipal solid waste, landfill	Ecoinvent 3
Coated Paper	Incineración	30%	Ver 2.2.8.2	Municipal Solid Waste (waste scenario) {JP} treatment of municipal solid waste, incineration	Ecoinvent 3
	Relleno Sanitario	70%	Ver 2.2.8.2	Municipal Solid Waste (waste scenario) {JP} treatment of municipal solid waste, landfill	Ecoinvent 3
PP Film	Incineración	30%	Ver 2.2.8.2	Municipal Solid Waste (waste scenario) {JP} treatment of municipal solid waste, incineration	Ecoinvent 3
	Relleno Sanitario	70%	Ver 2.2.8.2	Municipal Solid Waste (waste scenario) {JP} treatment of municipal solid waste, landfill	Ecoinvent 3

3.7.1. Manejo integral de residuos del polipropileno en México

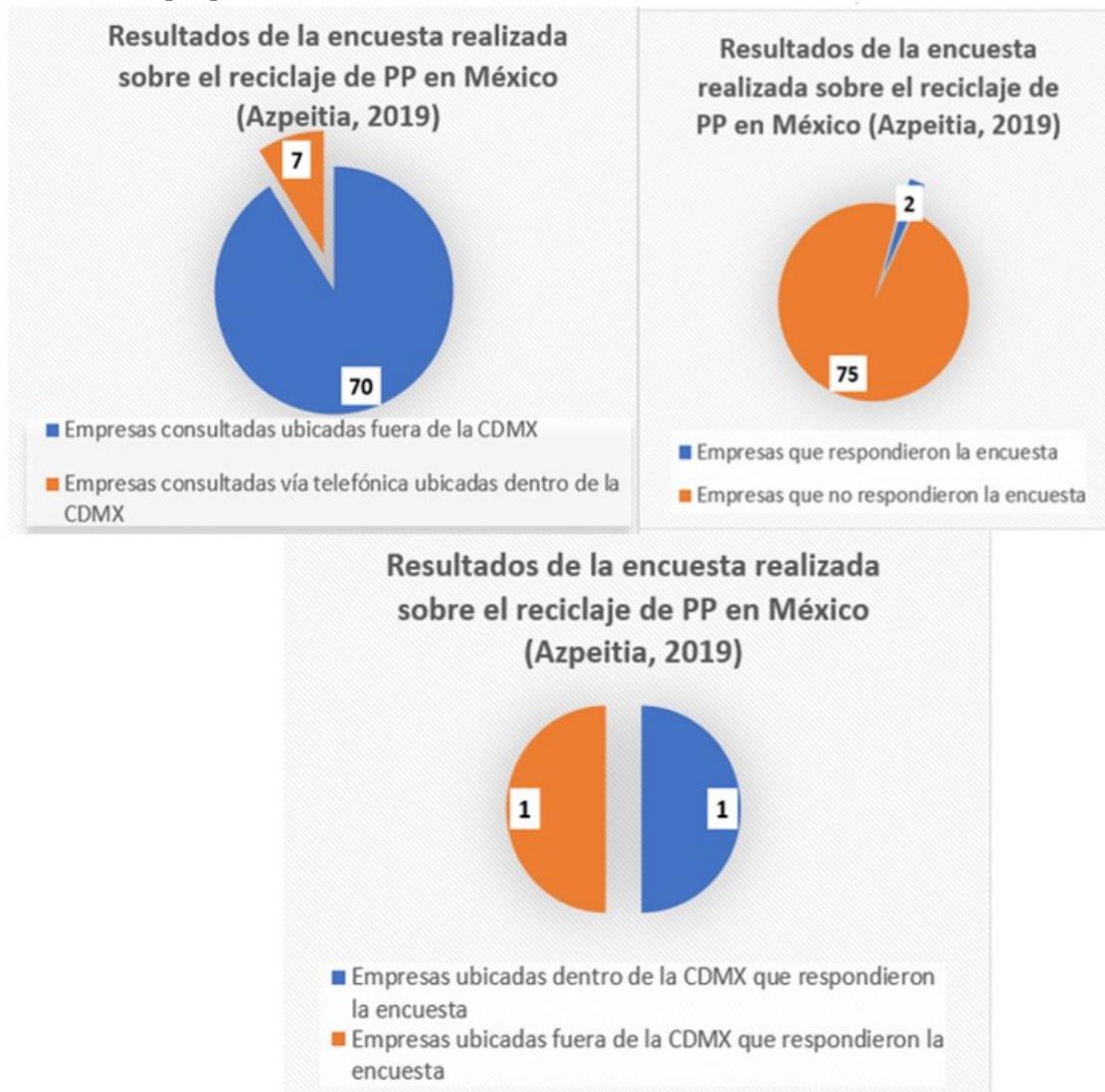
Para conocer la situación actual de la disposición final de los plásticos de polipropileno de México, se realizó una encuesta vía telefónica a empresas que se encuentran en el “Directorio de Centros de Acopio de Materiales Provenientes de Residuos en México 2010”, por la SEMARNAT. Los resultados que se obtuvieron están en la Tabla 3.6:

Tabla 3.6: Resultados de las encuestas realizadas a empresas presentes en el Directorio de Centros de Acopio de Materiales Provenientes de Residuos en México 2010. Elaboración propia.

Resultados	
Empresas consultadas vía telefónica	77
Empresas consultadas vía telefónica ubicadas en la CDMX	7
Empresas consultadas ubicadas en el Interior de la República Mexicana	70
De las cuales, empresas ubicadas en la CDMX que respondieron la encuesta	1
De las cuales, empresas ubicadas en el interior de México que respondieron la encuesta	1

En otra visualización se observan los resultados anteriores en forma gráfica (Figura 3.20).

Figura 3.20: Resultados de la encuesta realizada sobre el reciclaje del PP en México. Elaboración propia.



Dicha encuesta consistía en responder las siguientes 10 preguntas:

1. ¿Cuántos kilogramos de residuos de plástico de polipropileno ustedes recolectan?
2. ¿En qué tiempo?
3. ¿Cuál es la presentación de estos plásticos (vasos desechables, empaques, juguetes, electrodomésticos, otros)?

4. ¿Son personas civiles o son empresas quienes les mandan estos plásticos?
5. Si es posible, ¿me puede compartir el nombre de estas empresas?
6. ¿Cuánto dinero ustedes les dan a las personas por 1 kg de este plástico?
7. ¿Cuáles son los requisitos para reciclar polipropileno?
8. Una vez que ustedes recolectan el polipropileno, ¿a dónde lo dirigen o qué hacen con él?
9. En caso de que ustedes lo lleven a un centro de tratamiento de este plástico, ¿cuánto dinero ustedes reciben por 1 kg de polipropileno?
10. ¿Han observado una disminución en el reciclaje de polipropileno?

Por razones de confidencialidad, no se muestran los nombres de estas dos empresas que respondieron estas preguntas. En su lugar se identifican como “Empresa 1” y “Empresa 2”. Por otra parte, se coloca el nombre del estado en el que se encuentran. La Tabla 3.7 muestra las respuestas a esa encuesta:

Tabla 3.7: Resultados de la encuesta realizada a la Empresa 1 y a la Empresa 2, sobre el reciclaje del PP. Elaboración propia.

Empresa 1	Ubicación: Querétaro
Preguntas	Respuestas
¿Cuántos kilogramos del plástico de polipropileno ustedes recolectan?	1000 kg aproximadamente
¿En qué tiempo?	15 días
¿Cuál es la presentación de estos plásticos (vasos desechables, empaques, juguetes, electrodomésticos, otros)?	Todo: vasos desechables, empaques, juguetes, electrodomésticos, etc.
¿Son personas civiles o son empresas quienes les mandan estos plásticos?	Tanto personas civiles como empresas
Si es posible, ¿me puede compartir el nombre de estas empresas?	No
¿Cuánto dinero ustedes les dan a las personas por 1 kg de este plástico?	De acuerdo con el tipo de presentación del plástico, el precio va desde los \$2.00 hasta los \$5.00
¿Cuáles son los requisitos para reciclar polipropileno?	Que no tengan residuos.
Una vez que ustedes recolectan el polipropileno, ¿a dónde lo dirigen o qué hacen con él?	Hacer materia prima para otras empresas
En caso de que ustedes lo lleven a un centro de tratamiento de este plástico, ¿cuánto dinero ustedes reciben por 1 kg de polipropileno?	No
¿Han observado una disminución en el reciclaje de polipropileno?	No hay disminución en el caso del polipropileno, pero en otros plásticos sí, y es por el tipo de gobierno actual que dañó las PyMES.
Empresa 2	
Ubicación: CDMX	
Preguntas	Respuestas
¿Cuántos kilogramos del plástico de polipropileno ustedes recolectan?	1000 kg
¿En qué tiempo?	30 días
¿Cuál es la presentación de estos plásticos (vasos desechables, empaques, juguetes, electrodomésticos, otros)?	Empaques
¿Son personas civiles o son empresas quienes les mandan estos plásticos?	Personas civiles
Si es posible, ¿me puede compartir el nombre de estas empresas?	No
¿Cuánto dinero ustedes les dan a las personas por 1 kg de este plástico?	\$7.80
¿Cuáles son los requisitos para reciclar polipropileno?	Que no contengan residuos
Una vez que ustedes recolectan el polipropileno, ¿a dónde lo dirigen o qué hacen con él?	Comercializan con algunas alianzas que tienen
En caso de que ustedes lo lleven a un centro de tratamiento de este plástico, ¿cuánto dinero ustedes reciben por 1 kg de polipropileno?	\$6.50
¿Han observado una disminución en el reciclaje de polipropileno?	Sí

Posterior a esta encuesta se acudió a las dos oficinas de la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ), que están ubicadas en Insurgentes Sur 1070 y en la calle Angel Urraza 505. En las dos oficinas no dieron respuesta. En la oficina que está ubicada en la calle Angel Urraza, el personal de vigilancia comentó que para solicitar la información que se requiere, se necesita primero agendar una cita en la sección de contactos. Se solicitó la cita por correo electrónico, y no hubo respuesta. De modo similar, se acudió a la oficina de Indelpro, ubicada en Insurgentes Sur 619, para solicitar información, y la respuesta fue que para pedir dicha información se tiene que mandar un mensaje al correo electrónico de la persona que atendió la petición, para que después se canalizara ese mensaje a uno de los directivos de esta empresa para dar la respuesta a las preguntas. Se mandó el mensaje por correo electrónico y no se recibió respuesta. Finalmente se acudió a la oficina de la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (ANIPAC), ubicada en la calle Manuel María Contreras 133, y quien atendió esta solicitud, pidió que se mandara un mensaje por correo electrónico al Gerente de Atención a Asociados en la ANIPAC, con la información que se requiere. Se hizo, y sí hubo respuesta. Dicha respuesta fue la siguiente:

Ofrezco una disculpa por la demora en la respuesta. Te pido que nos des oportunidad de publicar el anuario estadístico, ya que es la única información que podemos vender, éste estará disponible a finales del mes de julio del 2019. Actualmente se trabaja en un ACV de Bolsas plásticas de distintos materiales, que seguramente estará disponible a partir de diciembre de este año. De cualquier forma, si tuviera algún dato antes de lo mencionado, con gusto me pongo en contacto contigo (Stroobants, 2019).

En este mismo sentido, con ayuda del Dr. Rolando Bernal, quien es el asesor de esta tesis, se presenta la oportunidad de contactar con Oswaldo Piña, quien es ejecutivo en la empresa UBE. Esta empresa se dedica a la producción y distribución de productos químicos de valor añadido. Si bien esta empresa fabrica poliamida y nylon (materiales que no forman parte del objeto de estudio de la presente investigación), una de sus líneas de trabajo son los empaques. Dicho esto, el objetivo de este contacto fue que pudiera responder las siguientes preguntas:

1. ¿Qué porcentaje del polipropileno termina en las opciones de la disposición final en México?
2. ¿Qué le ocurre al polipropileno una vez que llega a centros de reciclaje o a relleno sanitario?
3. ¿Qué impactos ambientales tienen esas opciones de fin de ciclo de vida?
4. ¿Existen medidas implementadas para el tratamiento final del polipropileno?
5. Dadas las nuevas tendencias en las disposiciones normativas, ¿el polipropileno podría ser sustituido por materiales “biodegradables”?

La respuesta obtenida fue recomendar uno de sus contactos, quien podría tener conocimiento a esta información requerida. Por ello, se contacta con el Ing. Rodolfo Araujo, junto con las preguntas que fueron hechas a Oswaldo Piña, y no hubo respuesta.

En conclusión, no hubo respuesta en ANIPAC, ANIQ, Indelpro ni en UBE.

Por otra parte, se contactó al Mtro. Raúl Quintero Rodríguez, quien ha realizado estudios de caracterización de RSU en rellenos sanitarios, para conocer la situación actual de los residuos de polipropileno dirigidos a esta forma de disposición final y comenta lo siguiente:

Respecto al PP, no conozco algún relleno que separe este plástico. Cuando existe separación de subproductos en cuestión de plástico solo separan PET, PEAD, algunos separan PEBD, pero son contados. Te puedo comentar que he realizado estudios de caracterización y el PP tiene una presencia aproximada del 1 por ciento del total de la composición de los residuos sólidos. No conozco por el momento quien separe este tipo de plástico, situación que es de llamar la atención dada su alta producción de este tipo de residuos.

3.7.2. Cálculo del peso promedio y vida útil del PP en un relleno sanitario de la CDMX

Después de esto, se agendó una reunión con el Mtro. Quintero y se obtuvo información que permite calcular el peso volumétrico del PP y con este valor se hace una extrapolación para obtener la vida útil de este material en un relleno sanitario. Él comenta lo siguiente:

Al tomar como criterio el valor máximo de compactación de acuerdo con la NOM-083- SEMARNAT-2003, representado como 700 kg/m^3 , en este caso la composición de los residuos es heterogénea, es decir va compuesta por diferentes subproductos (orgánicos, plásticos, metales, papel, etc.). Lo anterior se complementa con la NMX-AA-22-1985 que establece la selección y el método para la cuantificación de subproductos contenidos en los residuos sólidos municipales. Dicha norma establece un listado de subproductos para llevar a cabo su selección y cuantificación. Sin embargo, se incorporan nuevos subproductos que no aparecen en ella y que actualmente se generan de manera importante en México tales como: plásticos de acuerdo con su composición (PVC, PEBD, PP, PET y PEAD), Tetrapak, entre otros (Quintero, 2019).

El Mtro. Quintero propuso obtener el volumen del polipropileno generado en la Ciudad de México. Él comparte la siguiente información:

De acuerdo con estudios de generación que he realizado sobre los RSU, el 1% corresponde al PP presente en los RSU. Con lo anterior se puede seguir el siguiente razonamiento al poner de ejemplo la generación aproximada de residuos de la CDMX

$$12,000 \text{ ton de RSU generadas al día en la CDMX} \left(\frac{1 \text{ m}^3}{0.7 \text{ ton de RSU compactadas}} \right) = 17,143 \text{ m}^3 \text{ de RSU compactados al día}$$

El anterior resultado equivale a llenar 3.8 albercas olímpicas al día con dimensiones de 50 m de largo, 30 m de ancho y 3 m de profundidad.

Nota: El factor de 0.7 ton de RSU compactadas / 1 m^3 fue obtenido de la NOM-083-SEMARNAT-2003.

Una vez con el dato de que la composición de polipropileno es del 1%, entonces:

$$17,143 \text{ m}^3 \text{ de RSU generados diariamente en la CDMX} \left(\frac{1\% \text{ de PP presente en los RSU}}{100\%} \right) = 171.43 \text{ m}^3 \text{ de PP generados diariamente en la CDMX}$$

El resultado anterior es obtenido por un día. Ahora si se dimensiona por año, se obtiene lo siguiente:

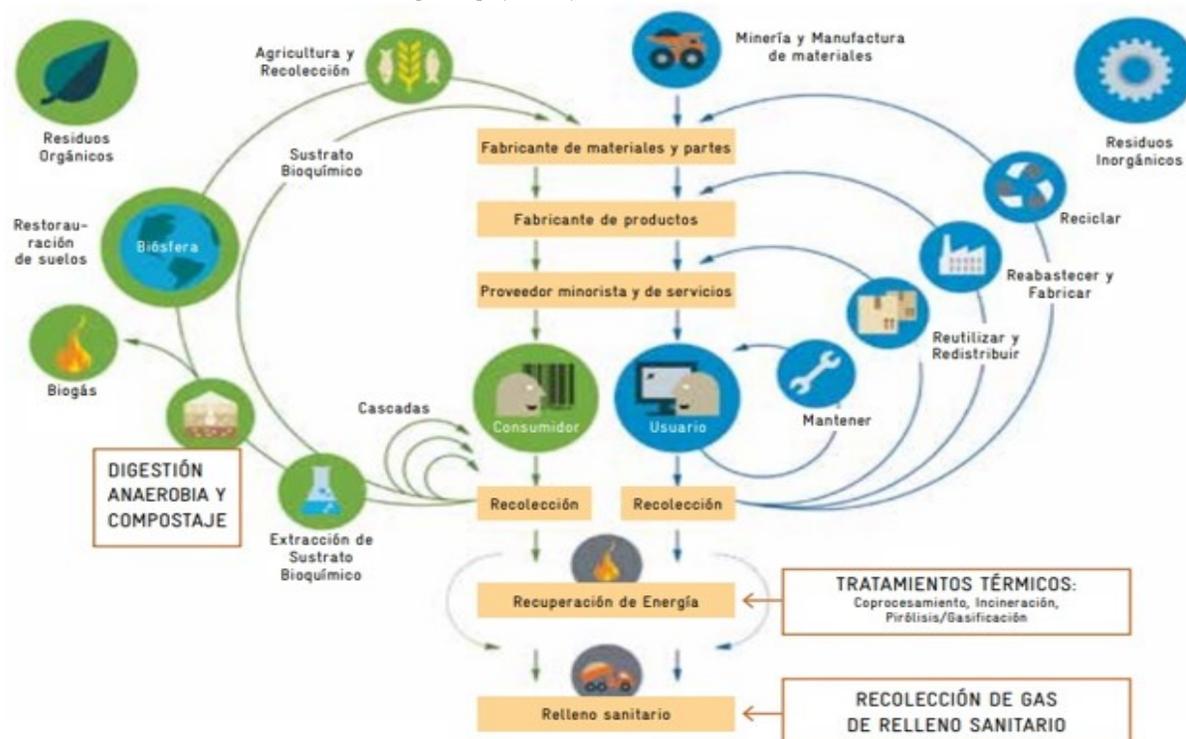
$$171.43 \text{ m}^3 \text{ de PP generados diariamente en la CDMX} \left(\frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \right) = 62,571.95 \text{ m}^3 \text{ de PP generados anualmente en la CDMX}$$

Lo anterior equivale a llenar 13.9 albercas olímpicas al año de únicamente residuos de PP. Esto origina que se acaben los espacios para los sitios de disposición final en el país o que su vida útil se vea reducida considerablemente.

3.8. Economía circular

El objetivo de adoptar la cultura de la economía circular y que diferentes empresas y la sociedad en general participen en ella, permite, al citar a GIZ (2017) “adoptar un sistema moderno para la gestión de residuos en ofrecer a la economía materias primas secundarias y energía generadas a partir de estos residuos”. La Figura 3.21 representa las diferentes tecnologías de aprovechamiento energético de residuos que desempeñan diferentes roles en la economía circular.

Figura 3.21: El principio de la economía circular. Tomado de la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ] (2017)



El principio de la Economía Circular. El papel de las tecnologías de aprovechamiento energético de residuos discutidas en esta guía se indica en los recuadros. Fuente: Fundación Ellen MacArthur [9].

3.9. Contaminantes presentes en los RSU

La Tabla 3.8 compara varias sustancias tóxicas, entre ellas la plata, aluminio, asfalto, cobre, níquel, cinc, vanadio, entre otros; que son liberados por la incineración de RSU. Para ello, Lisk (1988) presenta lo siguiente: “la incineración de RSU resulta en la producción de metales pesados que con la combustión de carbón (Carlsson, 1986)”. De igual manera, Lisk (1988) menciona que “un número de elementos contaminantes son de preocupación cuando los RSU son incinerados”.

Tabla 3.8: Intervalos de concentraciones reportadas en RSU y cenizas de fondo, cenizas volátiles y partículas suspendidas de la incineración de RSU. Tomado de Lisk (1988)

Some reported concentration ranges of elements in MSW and bottom ash, fly ash and suspended particulates from MSW incineration

Element	Concentration ($\mu\text{g g}^{-1}$ unless % indicated)				Element enrichment in fine ash ^e	Possible carcinogens ^f
	MSW (combustible fraction) ^a	Bottom ash ^b	Fly ash ^c	Suspended particulates ^d		
Ag	< 3-7		52-220	84-2000	x	
Al(%)	0.54-1.17	2.6-14.2	9.0-14.2	0.58-4.8		
As			9.4-74	81-510	x	x
Ba	47-447	80-9000	1600-3600	40-1700	x	
Be	< 2					x
Bi	< 15-30					
C(%)		1.0-28.7	1.7-7.4	1.8-2.2		
Ca(%)	0.59-1.65	3.6-11.2	3.3-8.6	0.66-5.3	x	
Cd	4-22	3.8-442	< 1-477	520-2100	x	x
Cl(%)		0.2-1.0	0.12-1.12	9.29	x	
Co	< 3-5		25-54	3.8-28	x	
Cr	22-96		730-1900	122-1800	x	x
Cu	79-877	630-4281	69-2000	3000	x	
F	140-200	130-250	1500-3100	990-6800		
Fe(%)	0.10-0.35	2.1-32	2.4-8.7	0.17-1.8		
Hg	1-4.4	0.03-3.5	0.09-25	20-2000	x	
K(%)	0.09-0.19	0.42-2.41			x	
Mg(%)	0.09-0.21	0.04-0.86	0.5-2.1	0.31-2.8	x	
Mn(%)	0.005-0.02	0.08-39	0.20-0.85	0.03-0.57	x	
Mo					x	
N(%)		0-0.35	0			
Na(%)	0.18-0.74	2.3-14.2	1.12-1.94	5.1-9.8	x	
Ni	9-90	110-210	38.6-960	65-440	x	x
P(%)		0.04-0.83				
Pb(%)	0.01-0.15	0.04-0.80	0.06-0.54	2.5-15.5	x	x
S(%)		0.27-1.0	1.9-3.6	0.001-0.01		
Sb	20		139-760	610-12000	x	
Se			1.4-13	7.0-122	x	
Si(%)		4.7-9.4				
Sn(%)	< 0.002-0.004	0.01-0.1	0.12-0.26	0.4-1.51	x	
Sr	11-35		110-220		x	
Ti(%)	0.14-0.31	0.04-0.90	2.5-4.2	0.13-1.29	x	
Tl				150	x	
V			110-166	6-60	x	
Zn(%)	0.02-0.25	0.35-3.61	0.08-2.6	4.7-24	x	

^a From Haynes et al., 1977; Law and Gordon 1979; Reimann, 1986; Baccini et al., 1987.^b From Hruđey et al., 1974; Hocking, 1975; Brunner and Mönch, 1986; Carlsson, 1986; Lisk, 1988.^c From Greenberg et al., 1978a; Brunner and Mönch, 1986; Carlsson, 1986; Lisk, 1988.^d From Greenberg, 1978b; Brunner and Mönch, 1986; Carlsson, 1986; Vogg, 1987.^e From Davison et al., 1974; Kaakinen et al., 1975; Klein et al., 1975; Campbell et al., 1978; Greenberg et al., 1978a,b; Smith et al., 1979; Henry and Knapp, 1980; Gounon and Milhau, 1986; Brunner and Mönch, 1986.^f From Goyer, 1986.

Ahora, para comprobar la investigación de Affeldt *et al.* (2016), quienes mencionan que “un 97% de los impactos ecotóxicos para películas del PP son por la liberación al agua de vanadio, cinc y cobre, en ese orden”, se encontró en la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (conocida como la Agency for Toxic

Substances and Disease Registry, [ASTDR]) (2012), lo siguiente:

La mayor cantidad de emisiones de vanadio ocurre naturalmente a través de la erosión de agua de superficies terrestres. Se ha estimado que aproximadamente 32,300 toneladas de vanadio están disueltos y transportados a los océanos por agua, y se piensa que 308,650 toneladas adicionales son transportadas en la forma de sedimentos particulados y suspendidos (Van Zinderen Bakker & Jaworski 1980). (p.128)

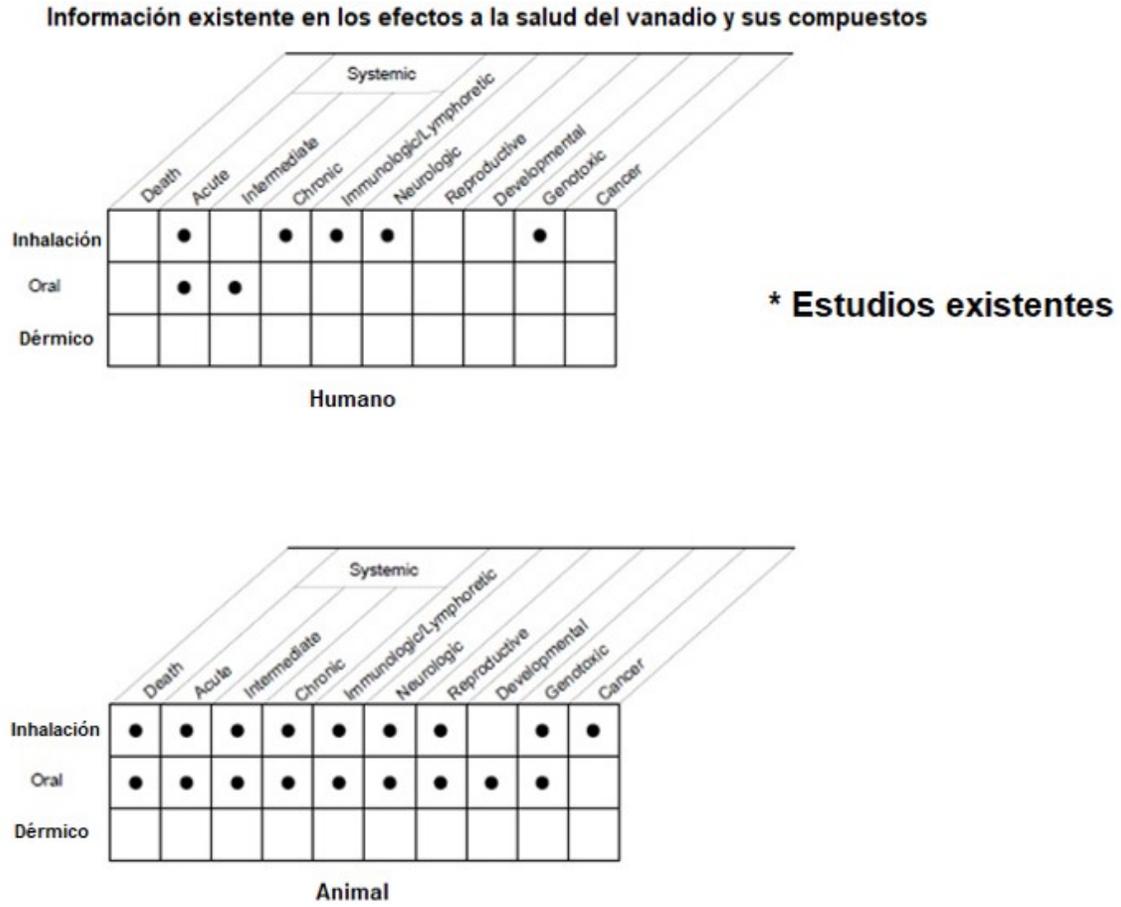
A razón de lo anterior, se consultó a la ASTDR (2012) cuáles son los efectos potenciales a la salud en seres vivos y se encontró la siguiente información (Tabla 3.9):

Tabla 3.9: Descripción de las vías de exposición en 3 grupos de estudio. Adaptado de la Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], (2012)

Grupo de estudio	Vía de exposición	Descripción
Trabajadores	Inhalación	Respirar aire con presencia de pentóxido de vanadio resulta en tos, la cual se puede presentar después de estar expuesto.
Animales de laboratorio	Inhalación	En ratas y ratones se ha observado daño en los pulmones, garganta y a la nariz, al haber estado expuestos al pentóxido de vanadio. Cáncer de pulmón ha sido encontrado en ratones expuestos al pentóxido de vanadio. La Agencia Internacional para la Investigación de Cáncer (IARC) ha determinado que el vanadio es posible cancerígeno para los humanos.
	Oral	Un número de efectos han sido encontrados en ratas y ratones, al ingerir compuestos de vanadio. Estos efectos incluyen: - Disminución en el número de eritrocitos. - Incremento en la presión sanguínea.
Humanos	Oral	Náusea, diarrea y cólicos estomacales han sido reportados en personas que tomaron metavanadato sódico o sulfato de vanadilo para el tratamiento experimental de diabetes.

Finalmente, en la Figura 3.22 muestra la información existente en los efectos a la salud del vanadio y sus componentes:

Figura 3.22: Información existente de los efectos a la salud por los compuestos de vanadio. Adaptado de la Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], (2012)



Capítulo 4

Análisis de resultados

Con la información del entorno teórico y los resultados obtenidos, se procede a realizar sus análisis correspondientes.

Cabe señalar que los envases de alimentos de polipropileno se encuentran en la categoría de RSU, por lo que en esta tesis se referirá en repetidas ocasiones a este grupo como si fuera uno solo.

De acuerdo con la SEMARNAT (2015):

La predominancia de residuos orgánicos o inorgánicos se asocia a la condición económica de la población: en los países con menores ingresos dominan los de composición orgánica, mientras que en los países con mayores ingresos los residuos son principalmente inorgánicos, con una cantidad importante de productos manufacturados. (Acurio *et al.*, 1997, p.438)

En el caso de las empresas petroquímicas (por ejemplo, Indelpro) que fabrican, transforman y diseñan plásticos, mencionan que al hacer un buen uso de sus productos plásticos y proporcionado a lo que dice la ley con las normas establecidas por un determinado país, el impacto ambiental que estos materiales provocan es menor. Incluso en la hoja de seguridad del producto que ellos fabrican, presente en la Figura 3.19, se muestran los 3 métodos para el tratamiento de residuos: reciclar, incinerar y relleno sanitario (en ese orden), cuando en realidad este orden no se sigue.

En la Figura 3.18, la cual exhibe la hoja de seguridad de la Sección 12 “Informaciones ecológicas”, se menciona que tanto el Homopolímero Profax SLY331 como el Homopolímero Profax PL395N no tienen disponibles sus estudios de ecotoxicidad, lo mismo para su persistencia y degradabilidad ni su potencial de bioacumulación. Sin embargo, North *et al.* (2013), apunta que:

La liberación del uso de plástico aumenta el contacto continuo de estos materiales con el cuerpo humano y con ello, la exposición diaria a los ingredientes en los plásticos. Aunque los componentes del plástico no tienen significativo potencial de bioacumulación (excepto cuando se ingesta accidentalmente y quedan atrapados en el sistema gastrointestinal), los estudios de biomonitoreo han demostrado la presencia de la concentración en estado estacionario de los componentes de los plásticos en el cuerpo humano. Esta situación implica que, hoy en día, no hay grupos control para analizar los efectos en la salud humana desde el nivel bajo de exposiciones ambientales a los constituyentes del plástico. (p.4)

La SEMARNAT (2015) complementa lo anterior:

Desde el punto de vista ambiental y de salud pública, el manejo adecuado de los residuos en las etapas que siguen a su generación permite mitigar los impactos negativos sobre el ambiente, la salud y reducir la presión sobre los recursos naturales. (p.439)

4.1. Disposición final de los RSU

De acuerdo con la SEMARNAT (2018), “La disposición final se refiere al depósito permanente de los residuos en un sitio, ésta puede ser en condiciones adecuadas para evitar daños a los ecosistemas”. De igual modo, el SNIARN (2012) menciona:

El manejo adecuado de los RSU tiene como objetivo final, además de proteger la salud de la población, reducir su exposición a lesiones, accidentes, molestias y enfermedades causadas por el contacto con los desperdicios, evitar el impacto potencial que podrían ocasionar sobre los ecosistemas. Por el contrario, la situación del manejo de estos residuos dista mucho de ser la adecuada a lo largo del país. Aún a la fecha es relativamente común que los residuos se depositen en espacios cercanos a las vías de comunicación o en depresiones naturales del terreno como cañadas, barrancas y cauces de arroyos.

El artículo por Zhang *et al.* (2010) demuestra que la mayor cantidad de RSU son destinados a relleno sanitario principalmente en China, al ser el porcentaje del

89.3%. Esto causa interés, ya que de acuerdo con la Figura 3.5, China es el principal productor de plásticos mundial con una participación global del 29.4%, y el reporte del Banco Mundial (2005) fue publicado 5 años antes que el de Zhang *et al.* (2010) al ser que ese país no está tomando las medidas en la disposición final de plásticos. Lo mismo se complementa con la Figura 3.7, la cual muestra la mala administración de residuos de este país.

4.1.1. Contexto

Si bien hay tres formas de disposición final de plásticos identificadas por los autores como rellenos sanitarios, sitios de incineración, de reciclaje y de biodegradación (North *et al.*, 2010), se supondría que habría mayor oportunidad al decidir a dónde estos materiales se pueden dirigir en su fin de su ciclo de vida. Al contrario, la realidad es que no es así. Esto se demuestra con la SEMARNAT (2012), al señalar que “en el país se cuenta con dos tipos de sitios de disposición final: los rellenos sanitarios y los rellenos de tierra controlados”. Esta ausencia de más opciones se debe a que en México no se cuentan con las instalaciones, tecnologías y normas para realizar otras opciones de disposición final de RSU de forma legalizada y regulada. Por su parte, Affeldt *et al.* (2016) mencionan que “los problemas ambientales más grandes del polipropileno, y de los plásticos en general, yacen en su disposición final”, lo cual vuelve a la gestión de los RSU un asunto importante por resolver.

La SEMARNAT (2015) menciona:

Desde el punto de vista económico, un menor volumen de residuos que requieren de disposición final reduce los costos de operación; según estimaciones de la OCDE, el monto destinado al manejo y tratamiento de residuos en los países miembro asciende a cerca de un tercio de los recursos financieros que destina el sector público para el abatimiento y control de la contaminación. (p.439)

4.1.2. Rellenos sanitarios

En cuanto a los rellenos sanitarios, en México sigue presente el manejo básico de los RSU que consiste en recolectarlos y disponerlos en esa opción de disposición final. No obstante, se desaprovechan aquellos residuos que son susceptibles a reincorporarse al sistema productivo o a la cadena de fabricación de algún otro material, lo que disminuiría así la demanda y explotación de nuevos recursos, a diferencia de otros países que lo realizan y la singularidad que presentan esos países es que son pequeños en extensión territorial, y por lo mismo, han buscado formas de disponer sus RSU con menor impacto ambiental.

De acuerdo con el cálculo del peso promedio del PP, se obtuvo un valor de $62,571.95\text{m}^3$, el cual representa a la cantidad de residuos de PP generados en un año en la CDMX, y que van dirigidos a rellenos sanitarios. Para tener una idea más clara, ese valor es equivalente a llenar 13.9 albercas olímpicas. Si esta magnitud representa únicamente al PP, y sabiendo que este material representa el 1% de los RSU (Quintero, 2019), entonces la cantidad de residuos que se generan y que se dirigen a rellenos sanitarios será inmenso, y, como se ha presentado anteriormente, en esta forma de disposición final, ya no hay recuperación energética.

Si este mismo cálculo se extrapola al resto de la República Mexicana, una vez en cuenta el porcentaje del PP presente en los RSU, el peso promedio y su vida útil aumenta, lo que causa que el resultado sea aún mayor. Este resultado es preocupante, porque aproximadamente un 9.2% de los plásticos son reciclados (SEMARNAT, s.f.), y que la opción principal de disposición final es en rellenos sanitarios, lo cual llega a tener impactos negativos al medio ambiente.

En la sección 4.1.3 Incineración, se presentará el escenario hipotético de qué sucedería si esta cantidad de PP fuera dirigido a una planta termovalorizadora.

En otro orden de ideas, de acuerdo con la SEMARNAT (2015):

En México, la mejor solución para la disposición final de los RSU son los rellenos sanitarios. De acuerdo con lo establecido en la LGPGIR, este tipo de infraestructura debe incorporar obras de ingeniería particulares y métodos que permitan el control de la fuga de lixiviados y el adecuado manejo de los biogases generados. (p.444)

En la anterior referencia (SEMARNAT, 2015), se indica:

Todas las entidades, excepto el Distrito Federal, cuentan con rellenos sanitarios para disponer sus residuos. Los residuos del Distrito Federal se disponen en cuatro rellenos sanitarios en el Estado de México: La Cañada, Cuautitlán, El Milagro y Tepoztlán; y uno más en el estado de Morelos, en Cuautla. (p.445)

La Ciudad de México contaba con el relleno sanitario conocido como “Borde Poniente”. Este sitio dejó de laborar hasta el 2012, por lo cual, los residuos de la CDMX se depositan en rellenos sanitarios del Estado de México (SEMARNAT, 2018). Esto es, mayor carga y mayor impacto negativo hacia las regiones externas a la CDMX.

Además de los rellenos sanitarios, se identifican otras opciones similares a esta opción, las cuales son los rellenos de tierra controlados y los rellenos de tierra no controlados.

Para ello, el SNIARN (2010) menciona que un relleno de tierra controlado “es un sitio destinado para la disposición final de residuos sólidos urbanos, que cuenta parcialmente con inspección, vigilancia y aplicación de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones establecidas”. En el caso de los rellenos de tierra no controlados (también conocidos como tiraderos a cielo abierto), en la misma referencia del SNIARN (2010) se señala que “es un sitio en donde son vertidos y mezclados diversos tipos de residuos sólidos urbanos sin ningún control o protección al ambiente”, los cuales no cumplen con la NOM-083-SEMARNAT-2003. Este problema de los RSU en esa forma de disposición final, acorde a la SEMARNAT (2019), se debe a que “los rellenos sanitarios en México son insuficientes frente al volumen de residuos que produce una población calculada en 118 millones de habitantes”, dado que como se tratan de sitios no controlados, los residuos plásticos no tienen tratamiento de su disposición final y obstruyen desagües, causar inundaciones, contaminar los cuerpos

de agua, entre otras consecuencias más. Lamentablemente este problema se ha expandido en todo el territorio nacional. Así mismo, si no se realizan buenas prácticas en los rellenos sanitarios, hay registro de emisiones de CO₂ en este tipo de opciones de disposición final que cuentan con sistemas de captación de gas, y los que no lo cuentan, tal como lo indica la Tabla 3.1.

Al consultar la NOM-083-SEMARNAT-2003, la cual muestra las 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, expone lo siguiente:

El crecimiento demográfico, la modificación de las actividades productivas y el crecimiento en la demanda de los servicios, han rebasado la capacidad del ambiente para asimilar la cantidad de residuos que genera la sociedad; por lo que es necesario contar con sistemas de manejo integral de residuos adecuados con la realidad de cada localidad (SEMARNAT, 2003).

Palacios, Rosas, Gutiérrez, Rivera, Rojas, Romero y Laura Romero (2008) complementan lo anterior:

Los rellenos sanitarios son ya obsoletos en los países desarrollados y que los que funcionan, según la NOM – 083 – SEMARNAT – 2003, son muy pocos y son muchas sus desventajas, como el alto costo de construcción y manejo, y la permanente e irreversible pérdida de suelos.

GIZ (s.f) menciona que “al igual que en los incineradores de RSU, las dioxinas y furanos se encuentran presentes en las emisiones de los rellenos sanitarios cuando existe algún tipo de combustión del biogás generado”.

El INECC (2018) muestra el sector de los residuos al referirse a ellos de la siguiente manera:

En el sector de los residuos sólidos en México y desde el punto de vista de instrumentos de política, está pendiente la actualización del Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, que queda como instrumentos de referencia para el sector el PROMARNAT 2013-2018 y el PECC 2014-2018; el primero de ellos bajo el precepto de “cero tiraderos a cielo abierto, estableciendo para ello el fomentar su saneamiento y clausura así como la de sitios abandonados y rellenos en desuso” y con el segundo instrumento, reducir las emisiones de metano al “Promover

manejo apropiado de residuos sólidos mediante clausura de tiraderos, apoyos a construcción de rellenos sanitarios, biodigestores y organismos operadores” y “Llevar a cabo acciones de cierre y abandono de los sitios contaminados con residuos municipales y peligrosos para la captura de gas metano”. (p.4)

Lo anterior muestra que México está en transición en disminuir y llegando a clausurar el flujo de los RSU hacia tiraderos a cielo abierto (Figura 4.1), sitios abandonados y rellenos en desuso; el cual es un avance significativo porque dichas opciones no están reglamentadas y causan un problema social y ambiental. Sin embargo, se menciona que habrá apoyos a la construcción de rellenos sanitarios, biodigestores y organismos operadores.

Figura 4.1: Tiradero a cielo abierto, factor de contaminación. Tomado de Jerónimo (2016)



Los rellenos sanitarios no son la opción para disponer los RSU, porque necesitan un gran espacio para su instalación y funcionamiento, así como su nulo aprovechamiento en la recuperación de energía contenida en ellos. La opción de biodigestores y organismos operadores son opciones para dar una solución innovadora y que se logren implementar en México. La GIZ (2017) indica que, para la recuperación de biogás,

es necesario que la fracción orgánica se separe en forma eficiente de la fracción inorgánica, por lo que la digestión anaerobia desempeñará así un papel importante en la recuperación de biogás y composta en el ciclo biológico.

4.1.3. Incineración

En el caso de la opción por incineración, la NOM-098-SEMARNAT-2002 establece medidas de protección ambiental-incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. Dicha norma menciona que como una alternativa tecnológica de disposición de residuos es la incineración, “la cual permite reducir el volumen y peligrosidad de estos” (SEMARNAT, 2002). Sin embargo, dicha definición aplica para los residuos peligrosos, y no a los RSU. Tal como se muestra a continuación:

El manejo de los residuos peligrosos busca básicamente dos propósitos. Por un lado, reducir los riesgos del contacto de dichas sustancias con el ser humano y el ambiente; por otro, recuperar los materiales que sean útiles (por medio del reciclaje y reutilización), prepararlos para reducir su peligrosidad (ya sea por medio de neutralización, incineración bajo condiciones controladas) (...). (SEMARNAT, 2015, p.456)

Por mencionar un ejemplo, Cruz (2018), menciona que Japón es un caso de éxito en implementar eficientes formas de disposición final de RSU, ya que “ese país cuenta con 190 plantas de incineración, legisladas y controladas, y donde el proceso de incineración permite producir energía eléctrica, con un mínimo de 25 % de plástico a quemar”. Japón es un modelo en la recuperación energética contenida en dichos residuos, para usarse en otras aplicaciones. Además de ser una alternativa a la construcción de rellenos sanitarios que es poco viable para la poca extensión territorial que este país cuenta. Esta información se confirma con la Tabla 3.4

Si bien North *et al.* (2013) menciona que la incineración libera dioxinas, hay algunas empresas que cuentan con plantas de incineración con la más alta tecnología, y es el caso de Nexus 2F. Dicha empresa menciona:

Se cuenta con dicho proceso de incineración con recuperación de energía que es zero waste, ecofriendly y que no libera dioxinas, ya que usan un tratamiento de cambios de temperatura y en un compartimiento cuentan con un contenido de oxígeno menor a 6%, el cual impide la formación de dichas sustancias tóxicas. (Nexus 2F, 2015)

Lo cual se propone que la inversión a este tipo de opciones de disposición final de RSU es la adecuada, siempre y cuando cumpla con normas de protección ambiental y humana. Un ejemplo de una empresa que ve la ausencia de opciones de disposición final de RSU, específicamente en la opción por incineración, es el caso de Veolia.

En la sección de "Preguntas Frecuentes de la Planta de Termovalorización CDMX" (Veolia, 2018), se conoce más acerca de este proyecto:

El esquema diseñado por el Gobierno local para el desarrollo de la Planta de Termovalorización de RSU de la CDMX es el de un Proyecto de Prestación de Servicios (PPS) a largo plazo, que tendrá una duración de 33 años, de los cuales, tres se destinarán al diseño, construcción y puesta en funcionamiento, y 30 años a la operación y mantenimiento.

Se especuló mucho sobre su alto costo de inversión, el cual se estimó en 11 mil millones de pesos mexicanos, el cual serán invertidos en su totalidad por el consorcio liderado por Veolia (Veolia, 2018). Asimismo, la empresa menciona que dicho proyecto no implica inversiones, ni requiere de la emisión de deuda por parte del gobierno capitalino.

Por otra parte, se señala que cuando la planta empezaría a funcionar y a entregar la energía eléctrica, el Gobierno de la CDMX pagará al consorcio, encabezado por Veolia, 2,300 millones de pesos más IVA al año (Veolia, 2018). Aunque puede llegar a ser elevada la cantidad que el gobierno tendría que pagar a la empresa, Veolia señala que dicho monto sería cubierto con los recursos de gasto corriente que, en ese entonces, paga el Metro a la Comisión Federal de Electricidad por el consumo de energía eléctrica, más el pago que se cubre por traslado y disposición final de los RSU en rellenos sanitarios (Veolia, 2018).

Si bien, lo que pretendía Veolia a través de la recuperación de energía vinculada al

proceso de Termovalorización, era generar energía eléctrica que movilizaría al Sistema de Transporte Colectivo Metro, se consultó la fuente web metro.cdmx.gob.mx, y menciona que en el 2018, el Sistema de Transporte Colectivo Metro de la CDMX, consumió aproximadamente 786,772,431 kWh (786,772.4 MWh) (MetroCDMX, s.f.) En contraste, la empresa Veolia menciona que la Planta de Termovalorización aprovechará 4,500 toneladas de residuos generados en la CDMX, para convertirlas en 965,000 MWh por año de energía eléctrica, y la cual, es una cantidad equivalente al consumo actual de las 12 líneas del metro (Veolia, 2018). Dicho valor que presenta Veolia, en efecto, cubre el consumo de energía eléctrica que fue usado por el metro de la CDMX en el 2019, e incluso, hay una diferencia de 178,226 MWh a favor y que podría usarse para otra situación o proyecto que demande energía eléctrica.

Siguiendo la misma idea de la recuperación de energía a través de una planta termovalorizadora, enseguida se expone el escenario hipotético en que los residuos del PP generados en un año en la CDMX sean dirigidos a este tipo de disposición final, y cuál sería la relación de la energía presente en los residuos del PP con el Servicio de Transportes Eléctricos de la CDMX.

Si bien el resultado del peso promedio y vida útil del PP en un relleno sanitario de la CDMX es de $62,571.95\text{m}^3$, a continuación se muestra la magnitud de los kilogramos y kilojoules que serán almacenados en los rellenos sanitarios, y por ende, ya no podrán ser recuperados para reincorporarse en las líneas de producción para la creación de otros materiales o para la creación de energía:

Primero se considera la densidad del PP. El cual es de 0.93 g/cm^3 , y para facilitar la operación, se convertirán a kg/m^3 :

$$0.93 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left(\frac{1 \text{ cm}^3}{10^{-6} \text{ m}^3} \right) = 930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

La densidad de 930 kg/m³ del PP será multiplicada por el valor de 62,571.95m³. Esto con el fin de obtener la masa del PP generado.

$$930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (62,571.93 \text{ m}^3) = \mathbf{58,191,894.90 \text{ kg del PP acumulado proveniente de la CDMX y en un año}}$$

Finalmente, el valor de 58,191,894.90 kg del PP acumulado, será multiplicado por el poder calorífico del PP, el cual es de 46 kJ/kg. Este valor es teórico, y se encuentra en tablas y en artículos.

$$58,191,894.90 \text{ kg} (46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) = \mathbf{2,676,827,165 \text{ kJ que serán almacenados en RS, provenientes de la CDMX, y generados en un año}}$$

Ahora para conocer la relación de los residuos del PP almacenados en rellenos sanitarios, con el Servicio de Transportes Eléctricos de la CDMX, los 2,676,827,165 kJ contenidos en los residuos del PP, se convierten en kWh, dando así un valor de 743,563.101 kWh que podrían usarse como energía eléctrica.

$$2,676,827,165 \text{ kJ} \left(\frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}} \right) = \mathbf{743,563.10 \text{ kWh que son almacenados anualmente en RS}}$$

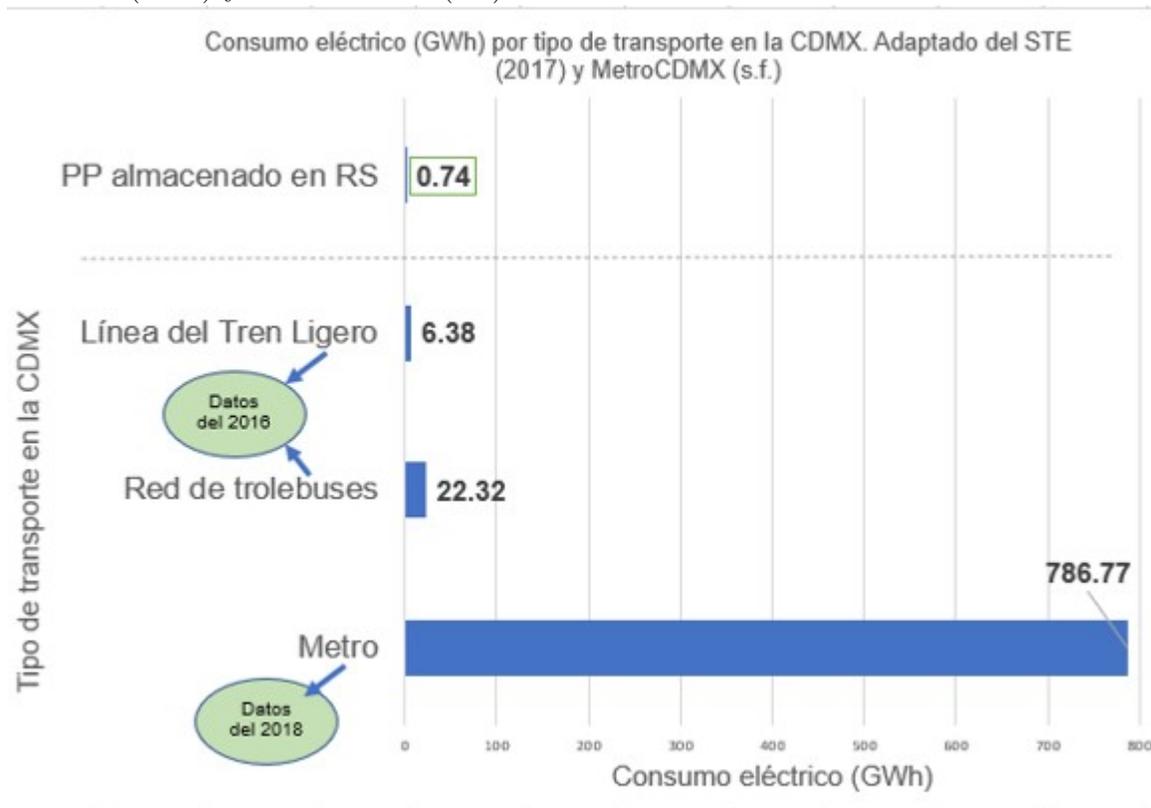
Transformando el anterior valor a unidades de GWh:

$$\mathbf{743,563.10 \text{ kWh} \left(\frac{1 \text{ GWh}}{1,000,000 \text{ kWh}} \right) = 0.74 \text{ GWh que son resinas de PP almacenados anualmente en RS}}$$

Complementando lo valor anterior, se desarrolló una gráfica de barras que mostrara el consumo eléctrico, en GWh, por el tipo de transporte en la CDMX (Tabla 4.1). Los datos fueron obtenidos del Servicio de Transportes Eléctricos de la CDMX [STE] (STE, 2017) y por el MetroCDMX (s.f.). Cabe decir que los valores del tren

ligero y del trolebús son del 2016, siendo los más recientes y que están publicados. Mientras que el valor del metro son del 2018 y que están publicados.

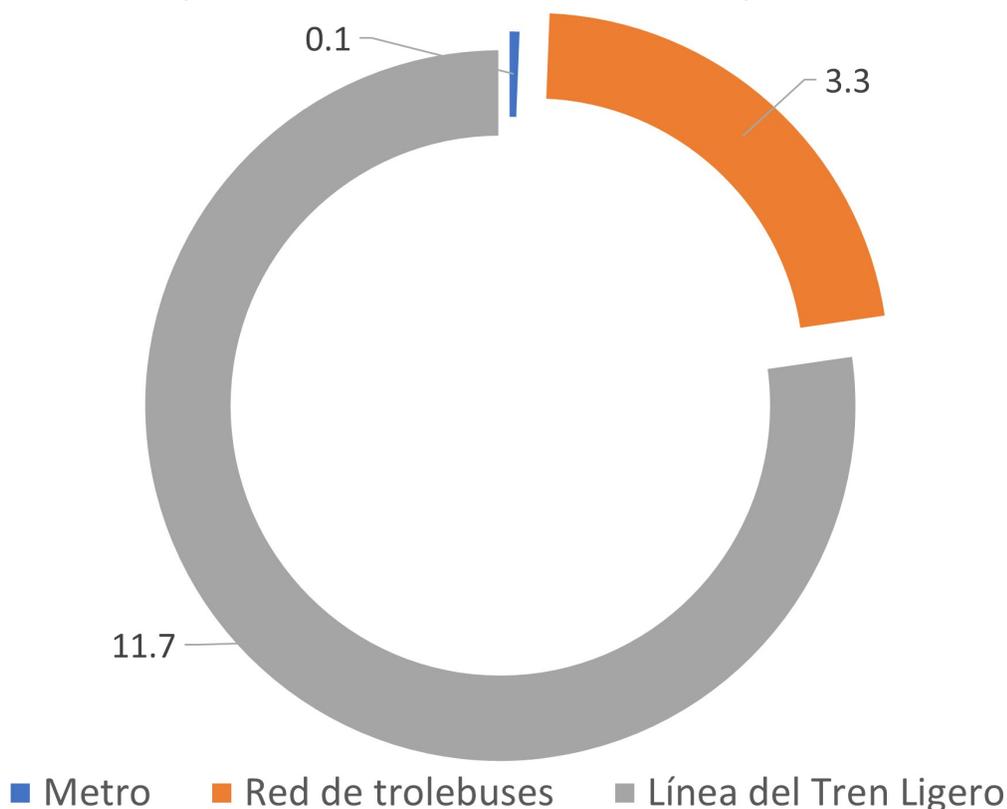
Tabla 4.1: Consumo eléctrico (GWh) por tipo de transporte en la CDMX. Adaptado del STE (2017) y MetroCDMX (s.f.)



Viendo la anterior tabla (Tabla 4.1), el aporte que podrían generar los residuos del PP si fueran dirigidos a plantas de termovalorización, es mínima, apenas representa el 0.09%, respecto al consumo eléctrico del metro. Sin embargo, al compararlo con el consumo de la línea del tren ligero, su aporte sería del 11.64%, el cual ya es un valor representable, y aún más sabiendo que únicamente esto representa a los residuos del PP, los cuales conforman el 1% de los RSU generados en la CDMX (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Porcentaje del aporte energético del PP almacenado al año en RS de la CDMX, frente a los tipos de transporte eléctrico de la CDMX

Porcentaje del posible aporte energético del PP almacenado al año en RS de la CDMX, frente a los tipos de transportes eléctricos de la CDMX (Azpeitia, 2021)



Con base en todo lo anterior, la energía eléctrica proveniente de la termovalorización de los residuos del PP pueden dirigirse a sectores de la población que requieren de este tipo de energía, tal como el ejemplo mostrado del transporte público.

No obstante, aunque la planta termovalorizadora, en este caso la que propone Veolia, pudiera ser una buena opción como forma de disposición final de los residuos del PP, y que pudiera ser un eje para adoptar la economía circular, el 15 de octubre del 2018 el Tribunal de Justicia Administrativa de la Ciudad de México ordenó la detención de las obras de la planta (Veolia), en tanto no se resuelva el juicio de nulidad que

se interpuso por considerar que representa un gasto excesivo para la administración pública (El Universal, 2019). Ante esto, el 27 de mayo del 2019 se entrevistó a la Jefa de Gobierno de la CDMX, la Dra. Claudia Sheinbaum, quien mencionó que “no va a haber termovalorizadora”, refiriéndose a la empresa Veolia (El Universal, 2019).

Con lo anterior, El Economista (2020), publica un artículo en el cual menciona que “Los legisladores de CDMX piden que se reconsidere el proyecto de planta de tratamiento de residuos sólidos”. Esto porque, “en conferencia de prensa, el diputado local, Jorge Gaviño Ambriz, argumentó que, por las nuevas modificaciones a la Ley de Residuos Sólidos de la capital, así como los retos medioambientales que se están presentando se necesita regresar este proyecto” (El Economista, 2020).

Por otro lado, aunque Veolia llegara a implementar su planta de tratamiento, se debe poner atención. Esto porque la GIZ (2017) menciona que “algunas compañías ofrecen opciones responsables, pero muchos debates sobre el tema pueden estar sesgados y ser poco transparentes”. Dicho reporte incluso comenta que “es importante estar conscientes de los mitos más comunes que persisten acerca del aprovechamiento energético de residuos, que las empresas sin experiencia buscan aprovecharse de los municipios pueden usar como recurso”. Para no mencionar los 5 mitos que en este documento se presentan, sólo se exhibirá uno, y es el siguiente:

- “El aprovechamiento energético de residuos es una solución fácil para deshacerse de los problemas de los residuos de una ciudad”.

Ese mito es claro. No es que todos los RSU deben ser dirigidos a este tratamiento si anteriormente no hay estudios de impacto ambiental e incluso si no hay ACV de los productos que fueron elegidos a este tratamiento. Eso se sustenta con:

La situación es mucho más compleja, y el aprovechamiento energético de residuos requiere planeación, construcción y operación profesionales (...) Los responsables de la toma de decisiones deben tener conciencia de que su

objetivo es, en primer lugar “vender” su producto y no resolver el problema local. (p.16)

En ese contexto, la incineración como aprovechamiento energético de residuos debe realizarse con profesionales en el área, y que no haya intereses políticos ni económicos de por medio.

Por su parte, Cruz (2019) propone que “la incineración con recuperación energética es el único remedio para los RSU, ya que, en el caso de las 3Rs, se propicia la acumulación de plásticos”.

Conjuntamente, GIZ (2017) comenta:

Un tratamiento térmico, como la incineración o el coprocesamiento, que cumpla con los estándares de emisiones ambientales, también puede jugar un papel en la destrucción de sustancias orgánicas tóxicas y su eliminación del flujo circular de materiales. (p.14)

Aunque se aborda la opción de incineración para los RSU, también tiene aplicación en los metales. Por ello, referenciando a GIZ (2017), expone:

Algunas materias valiosas, como los metales, se pueden recuperar de las escorias o cenizas remanentes del proceso de incineración; sin embargo, el resto debe ser tratado en forma independiente (...). (p.14)

En la misma línea del caso de la incineración, North *et al.* (2013) exponen lo siguiente:

En las zonas rurales de Estados Unidos y en otros países en vías de desarrollo, la combustión abierta es común, y los procedimientos de este tipo de incineración producen cenizas que contienen metales tóxicos que pueden poseer riesgos a los recursos de aguas subterráneas, con base en los rellenos sanitarios empleados para la eliminación de cenizas. (p.5)

De las cenizas que contienen metales tóxicos, uno de ellos es el vanadio, que, como se presentó previamente, es liberado al ambiente en procesos de incineración.

Asimismo, como contraste de la liberación de vanadio, se menciona la Tabla 3.8, la cual presenta que otras sustancias tienen mayor impacto ambiental, por ejemplo,

el cobre está presente en las cuatro categorías y que incluso llega a tener mayores valores en las categorías de “cenizas volátiles” y de “partículas suspendidas”. No obstante, dicha información menciona la incineración como disposición final de RSU. En cambio, en el artículo de Affeldt *et al.* (2016) las emisiones de las tres sustancias anteriormente descritas están presentes en el agua, y en su artículo mencionan que “el 95 % de los impactos para la película de polipropileno son de su tratamiento en un relleno sanitario, por incineración y en la extrusión de este material” (Affeldt *et al.*, 2016).

4.1.4. Reciclaje

En cuanto al reciclaje de las resinas del PP, se observó que este tipo de plásticos pertenece a la categoría de termoplásticos, y específicamente a los “commodities thermoplastics”, los cuales tienen un potencial de reciclaje, ya que la característica principal de este tipo de plásticos es que son “resinas con una estructura molecular lineal, que durante el moldeo en caliente no sufren ninguna modificación química” (Flores, 2013), y que además presentan muy pocas o casi nulas estructuras reticuladas o entrelazadas, contrario a los plásticos termofijos que “sólo pueden ser fundidas una sola vez y que una estructura molecular reticulada o entrelazada, se funden por la acción del calor, pero si se continua la aplicación de calor, experimentan un cambio químico irreversible, el material no puede ser utilizado nuevamente”. Lo cual daría una oportunidad a que se despierten mercados y formas de reciclaje para los termoplásticos.

Por otra parte, Gimeno (2018) menciona que el reciclaje es limitado. Esto quiere decir, que una vez llevado a cabo un número determinado de ciclos de reciclaje, ya el material dejará de ser eficiente, y entonces, debe de explotarse la otra vía alternativa, que es la valorización energética.

La anterior introducción a la opción de reciclaje da inicio al análisis de la Tabla

3.7 que muestra las respuestas a las dos encuestas de los centros de acopio del PP en México, a través del Directorio de Centros de Acopio de Materiales Provenientes de Residuos en México 2010. Dicho documento fue obtenido después de acudir al área de Atención Ciudadana ubicada en el edificio de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ubicado en Av. Ejército Nacional 223, Col. Anáhuac, Ciudad de México. C.P. 11320. Allí dieron las indicaciones para encontrar dicho documento.

En los resultados de la encuesta realizada para conocer la situación actual del reciclaje de polipropileno en México, se observan cuatro situaciones:

1. 77 empresas son consultadas vía telefónica, a partir del número telefónico de contacto que se encuentra presente en el “Directorio de Centros de Acopio de Materiales Provenientes de Residuos en México 2010”, por la SEMARNAT, de las cuales, siete se encuentran en la Zona Metropolitana del Valle de México y las 70 empresas restantes en el interior de la república. Sin embargo, las empresas que respondieron esta encuesta fueron dos: una ubicada en la Ciudad de México y la otra en Querétaro. Las otras 75 empresas no dan respuesta porque el número telefónico ya no corresponde con la empresa y dificulta así la obtención de las respuestas a las preguntas de la encuesta.
2. La razón por la que se decidió realizar esta encuesta vía telefónica fue por la dificultad en ir a las ubicaciones donde se encuentran dichas empresas, debido a que la gran mayoría de estos centros se encuentran en el interior de la República Mexicana.
3. Previo a realizar la encuesta telefónica, para el caso de las 7 empresas ubicadas en la Ciudad de México, se consulta la herramienta de Google Maps para comprobar que las ubicaciones presentes en el directorio corresponden a centros de acopio o reciclaje. Lamentablemente, no se mostraron locales dedicados al reciclaje de este plástico o de plásticos en general, lo cual deduce que ya no se

dedican a este negocio, a excepción de la “Empresa 2” que continúa dedicándose a reciclar este plástico. Por la razón anterior no se procedió a ir de forma presencial a estos centros. Cabe decir que, aunque en Google Maps no se veían centros de acopio o reciclaje del PP, se procedió de todas formas a hacer las llamadas telefónicas para comprobar su existencia.

4. Las preguntas de la encuesta fueron realizadas para ser sencillas de responder y que no se tomaran más de 5 minutos. De las anteriores preguntas, las siguientes respuestas no se esperaban obtener:

Una vez que ustedes recolectan el polipropileno, ¿a dónde lo dirigen o qué hacen con él?

- Empresa 1: Transformamos los materiales recolectados en materia prima para otras empresas.
- Empresa 2: Comercializamos con algunas alianzas que tenemos.

La respuesta de la Empresa 1 muestra que además de recolectar los plásticos de polipropileno, los transforman y los comercializan con otras empresas que necesitan de este plástico para otras actividades.

La respuesta de la Empresa 2 exhibe una situación similar que la Empresa 1. Sólo que esta empresa no menciona que sometan a un tratamiento a los plásticos recolectados, visto que actúan como intermediarios, y los dirigen a otras alianzas que tienen con otras empresas.

¿Han observado una disminución en el reciclaje de polipropileno?

- Empresa 1: No hay disminución en el caso del polipropileno, pero en otros plásticos sí, y es por el tipo de gobierno actual que dañó las PyMES.
- Empresa 2: Sí.

La respuesta de la Empresa 1 menciona la situación actual con las medidas tomadas por el gobierno actual. Ya no quiso decir más al respecto.

La respuesta de la Empresa 2 confirma que hay una disminución en el acopio de plástico de polipropileno, que, de acuerdo con lo que un trabajador de aquí mencionó, recolectan empaques de dicho material.

De igual manera, GIZ (2017) indica que:

Incluso con un reciclado intensivo, siempre habrá residuos remanentes que no tienen valor material o de mercado y que, en algunos casos, se clasifican como peligrosos. Estos residuos con cierto poder calorífico se pueden aprovechar para recuperar energía y sustituir el uso de combustibles fósiles. (p.14)

4.2. Manejo integral de los residuos plásticos

López (2000) apunta que “Los residuos sólidos urbanos contienen la mayor parte de plástico a eliminar, pero presentan mayor dificultad para su separación y reciclado que los residuos industriales”.

En cuanto a los desechos plásticos industriales, López (2000) menciona que “Estos desechos se producen a lo largo de todas las etapas del proceso, es decir, en la producción o síntesis de las resinas plásticas, en la formulación de esas resinas o en la transformación de las resinas para obtención de productos semiacabado”.

Como se puede ver en la Figura 3.13, en la Unión Europea se toman acciones para mitigar el impacto ambiental de los desechos plásticos generados, a consecuencia de que la recuperación de energía (incineración), es la opción de disposición final de mayor recurrencia, en comparación con la de relleno sanitario. En cambio, esta información únicamente representa a los países que integran la Unión Europea, además

de Noruega/Suiza [NO/CH]. Sin embargo, en la Tabla 3.5 se observa el escenario de fin de ciclo de vida de las películas del PP en España, al ser que la opción del relleno sanitario representa el 70 % para las películas del PP y la incineración representa el 30 % restante para el mismo material.

Desde otra perspectiva, si bien la UE se ubica en la posición número 2 de las regiones del mundo productoras de plástico (Figura 3.5), en el caso de las medidas de disposición final de desechos plásticos en China, al tomar en cuenta que este país ocupa el primer lugar en el mundo en la producción de estos materiales, Zhang, Tan y Gersberg (2010), mencionan:

La cantidad total de los residuos sólidos urbanos recolectados y transportados fue de 148 millones de toneladas en el 2006, de los cuales 91.4% fue dirigido a relleno sanitario, 6.4% fue incinerado y 2.2% fue dirigido a composta. En otros números, hay 460 instalaciones de disposición final de RSU, los cuales incluyen 366 sitios de rellenos sanitarios, 17 plantas de composta y 66 plantas de incineración. (p.1623)

Anterior al artículo de Zhang *et al.* (2010), el Banco Mundial (2005) publica el reporte sobre las medidas que debe de tomar China debido al gran salto en la producción de plásticos a nivel mundial. Este reporte menciona:

China necesita moverse a la 'jerarquía de administración de desechos' al promocionar la minimización de desechos, reuso y reciclaje, antes de que otros métodos de disposición de desechos sean propuestos. Sin embargo, incluso con el desvío de actividades, las necesidades para la disposición de desechos futuros de China son enormes. Por ejemplo, las ciudades de China necesitan desarrollar 1400 rellenos sanitarios adicionales en los siguientes 20 años. (p.3)

4.3. La Gran Isla de Basura

En la Sección 1.6, titulada Ecotoxicidad, se mencionó a la Gran Isla de Basura, o también conocida como la Great Pacific Garbage Patch [GPGP]. Ahora, ¿qué tiene de relevancia mencionar esta zona global con el problema del polipropileno? Esto se desglosa en esta sección.

De acuerdo con la Figura 3.5, China produce la mayor cantidad de plástico en el mundo, seguido por Europa y en tercer lugar Norteamérica (liderado por los Estados Unidos). En el caso de China, existe una relación de producción y mala gestión del plástico, como lo muestra la Figura 3.7, en la cual, ese país se encuentra en la posición número uno en la incorrecta forma de disponer sus desechos plásticos. Sin embargo, eso no significa que es la única razón por la cual se encuentran desechos plásticos en los océanos del mundo. Para entender eso, la referencia World in Data (2018) indica que hay que tomar en cuenta los siguientes factores:

- La proximidad de poblaciones cercanas a la costa.
- Estrategias de gestión de residuos.

Por otra parte, sólo el 3% de los plásticos terminan en los océanos (Our World in Data, 2018). De hecho, en muchos países la cantidad de residuos plásticos que terminan en los océanos es mínimo.

Por su parte, Jambeck Jenna, Geyer Roland, Wilcox Chris, Siegler Theodore, Perryman Miriam, Andrady Anthony, Narayan Ramani y Law Kara (2015), intentaron cuantificar la cantidad de plásticos que podrían ingresar a los océanos. Para ello, proponen la generación de residuos plásticos en dos vías:

- Cuantificaron la generación de residuos plásticos en poblaciones costeras (aquellas ubicadas a lo largo de 50 km de la zona costera).
- Solucionaron el cálculo para la cantidad de desechos plásticos que son mal gestionados.

Los desechos mal gestionados en las poblaciones costeras tienen un alto potencial de ingresar a los océanos, ya sea a través del aire o de la marea, o incluso por cursos

de agua, como ríos (Our World in Data, 2018). Esto permite obtener la Figura 3.7, en el cual se muestra que China contribuye con el 28 % de la mala gestión de residuos plásticos en el mundo.

Si se considera la información de la Figura 3.4 (Datos de la producción de plástico en la Unión Europea y en el mundo), se podría esperar que tanto Europa como Norteamérica tendrían una mala gestión en sus desechos plásticos, pero no es así. Estas dos zonas globales tienen un sistema de gestión de desechos plásticos más eficiente que la que tiene China, lo que significa que el ingreso de sus desechos plásticos al océano es mínimo. Para ello, Our World in Data (2018) señala que, si estas dos zonas eliminaran el uso del plástico, la mala gestión global del plástico disminuiría sólo el 5 %.

De acuerdo con la Figura 3.11, la acumulación de plásticos en la Isla de Basura del Pacífico está compuesta en gran medida por líneas de plástico, cuerdas y redes de pesca, lo que representa el 52 %; y en segundo lugar los plásticos resistentes, láminas y películas de plástico (47 %). El origen de estos materiales es que aproximadamente el 80 % de los plásticos presentes en los océanos provienen de las fuentes terrestres, y el 20 % de fuentes marinas (Our World in Data, 2018). De este 20 %, un 10 % son de flotas pesqueras. Esta contribución varía, dependiendo de la localización geográfica y del contexto.

Complementando, hay diferentes vías por las cuales los plásticos pueden ingresar a los océanos. Uno de ellos es por los ríos. Esta vía puede transportar desechos plásticos desde lejos de la costa, hasta las zonas costeras, donde pueden ingresar al océano.

Una vez que los plásticos han ingresado a los océanos, su distribución y acumulación es influenciado por el viento y las corrientes marinas. Cabe decir que la densidad del plástico es menor que la del agua, por lo que flotan, lo que facilita su distribución y transportación. Como un resultado a este transporte y distribución dinámico de los

plásticos en el océano, estos materiales se suelen acumular en “giros oceánicos”, con altas concentraciones de plástico en su interior y menores en la periferia (Our World in Data, 2018).

De acuerdo con la Figura 3.9, el norte del Océano Pacífico tiene la mayor cantidad de masa de plásticos, seguido por el Océano Índico. Esta presencia de desechos plásticos en diferentes océanos, es en gran medida por los “giros oceánicos”, el aire y las corrientes marinas.

El mejor ejemplo de la acumulación de desechos plásticos en la superficie oceánica es la llamada Isla Basura, al ser que se encuentra en el norte del Océano Pacífico, tal como se comentó anteriormente. Esto es resultado del impacto combinado de la gran entrada de plásticos proveniente de zonas costeras, además de la actividad de pesca en el Océano Pacífico. Sin embargo, cabe señalar que no todo el desecho de plástico termina en el océano. Sólo el 3% ingresa ahí (Our World in Data, 2018). En otro orden de ideas, la mayoría de los plásticos que se producen son menos densos que el agua, y por ello es que flotan sobre la superficie oceánica. Sin embargo, se ha estimado que los desechos plásticos que flotan son en menor cantidad que los plásticos que entran al océano, tal como se muestra en la Figura 3.12. Ante esto surge la siguiente pregunta: ¿qué ocurrió con la cantidad de plástico que no se encuentra en el océano, pero que salió de la zona costera? Esta discrepancia es conocida como “el problema del plástico perdido”, y es un dilema que permite conocer en dónde se encuentra el plástico perdido (Our World in Data, 2018).

De acuerdo con Our World in Data (2018), hay muchas hipótesis para explicar dicho dilema:

- Medida imprecisa. Puede ser que exista una sobreestimación/subestimación de la cantidad de plástico que ingresa o que se encuentra flotando en el océano.

- Los rayos uv y los movimientos de las corrientes marítimas rompen los plásticos a piezas más pequeñas, como los microplásticos, los cuales son fácilmente incorporados a los sedimentos o ser digeridos por organismos.
- Sedimentos de fondo marino. Un estudio encontró que los microplásticos eran hasta 4 veces más abundantes en los sedimentos de fondo marino en el Océano Atlántico, Mar Mediterráneo y Océano Índico.
- Los plásticos en el océano se rompen más lento de lo que se pensaba, y muchos de estos plásticos perdidos están enterrados en los litorales.

4.4. Legislación

Por su parte, el artículo 10 de la LGPGIR (Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos) “establece que los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consisten en la recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final” (SEMARNAT, 2017). De forma similar, la SEMARNAT (2017) reconoce que:

La realidad de los municipios es que se enfrentan a diversas circunstancias que en muchos casos se escapan de sus capacidades técnicas y financieras, debido a la dificultad de contar con personal capacitado, de adquirir o comprometer recursos financieros que den certeza a las inversiones del sector privado y por el corto tiempo de las administraciones municipales, lo que conlleva a la ruptura de la curva de aprendizaje y por ende a una falta de continuidad en las acciones y proyectos que garanticen una gestión integral de los residuos sólidos urbanos.

Al retomar lo anterior de “diversas circunstancias que se escapan de las capacidades técnicas y financieras de los municipios” (SEMARNAT, 2017), en esta investigación se menciona a la pepena, al ser una práctica que está presente en México y la cual dificulta obtener información cuantitativa sobre los plásticos que llegan a rellenos sanitarios, ya que estos materiales tienen valor económico para los centros de reciclaje, por lo que también la pepena da una solvencia monetaria a las personas que lo practican. Sin embargo, están expuestos a contraer alguna enfermedad o infección

al estar en contacto con otros tipos de materiales y sustancias (por ejemplo, fluidos corporales, materiales punzocortantes, entre otros).

Del mismo modo, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, en el Título Sexto, “De la prevención y manejo integral de residuos sólidos urbanos y de manejo especial”, Capítulo único, Artículo 100, se menciona lo siguiente: “La legislación que expidan las entidades federativas, en relación con la generación, manejo y disposición final de residuos sólidos urbanos podrá contener las siguientes prohibiciones:

1. Verter residuos en la vía pública, en cuerpos de agua, cavidades subterráneas, áreas naturales protegidas y zonas de conservación ecológica, zonas rurales y lugares no autorizados por la legislación aplicable;
2. Incinerar residuos a cielo abierto y
3. Abrir nuevos tiraderos a cielo abierto”. (p.72)

En el II se menciona que está prohibido incinerar residuos a cielo abierto. Cabe señalar que no se encontraron datos de la incineración de RSU en tiraderos a cielo abierto en México. Sin embargo, se estima que esta actividad se realiza. Para ilustrar esto, la SEMARNAT (2019), en coalición con la CAME (Comisión Ambiental de la Megalópolis), el Gobierno de la Ciudad de México y el Gobierno del Estado de México, publicaron un documento que narra lo acontecido en el mes de mayo del 2019, en el cual, la CDMX fue declarada en “contingencia ambiental” por unos días, ya que la ciudad presentaba “concentraciones de contaminantes que superan los niveles establecidos para la protección de la salud” (SEMARNAT, 2019), al ser que el ozono y otros emisores de partículas como PM2.5 y PM10 son provocadas por diversas fuentes, entre ellas la quema a cielo abierto. Si bien la causa de este problema que presentó la ciudad se debió también a la presencia de un sistema de alta presión, así como el transporte de humo de incendios de los estados de Oaxaca, Guerrero y Morelos, también ocurrió por las actividades de incineración de RSU a cielo abierto (además de incineración de árboles) y del mismo modo fue responsable de la contingencia ambiental en la CDMX y en estados aledaños.

Otro aspecto que es importante mencionar, es que la modificación a la reforma de RSU en la CDMX, que se planea que entre en vigor a finales del 2020 y principios del 2021, no es la primera vez que ocurre este comunicado para disminuir el consumo de plástico. En el 2010, el Centro de Estudios Jurídicos y Ambientales (CEJA), publicó un artículo que menciona que el Distrito Federal (en ese entonces) decidió aprobar una serie de reformas a la Ley de Residuos Sólidos en esta entidad federativa con dicho fin. Esto es, evitar el consumo desmedido de las bolsas de plástico. Este centro menciona que “con estas reformas, México empieza a formar parte de los países que intentan impedir que la problemática ambiental a causa de las bolsas de plástico se extienda de forma descontrolada” (CEJA, s.f). En dicho artículo se menciona el caso de la Unión Europea que está a la vanguardia en la imposición de medidas que prohíben los plásticos de un solo uso. Por otra parte, en el anterior artículo CEJA (s.f) señalan que:

Se han presentado en el Congreso de la Unión puntos a través de los cuales se pretende recomendar o exhortar a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y a la Asociación Nacional de Tiendas de Autoservicio y Departamentales a promover programas y campañas tendentes a disminuir el uso de bolsas de plástico y a difundir el uso de bolsas de tela, así como de elaborar una Norma Oficial Mexicana aplicable a la materia, a fin de hacer el plástico con material y sustancias que las hagan biodegradables. (p.2)

Al atender esta última cita, en las tiendas de autoservicio y departamentales, es notorio y es común que una persona que compró algo, lo coloque dentro de una bolsa de plástico desechable. En lo personal, se observa que algunas tiendas venden las bolsas reutilizables, y que incluso están localizadas a un lado de la caja. Por otro lado, son más las personas que optan por usar bolsas de plástico desechables. En otro ángulo, algunas tiendas de autoservicio y departamentales mencionan que sus bolsas son “biodegradables”, e incluso cuentan con un logo de un planeta encerrado por el símbolo mundialmente conocido del reciclaje. Empero, la realidad es que no son del todo degradables con el ambiente. De acuerdo con la UNEP (2015), en las conclusiones de su investigación señalan:

Algunas evidencias, si bien sugerencias limitadas, acerca de las percepciones públicas sobre si un artículo es biodegradable, puede influenciar en un comportamiento de arrojarlo a los contenedores de residuos sólidos urbanos; por ejemplo, si una bolsa es marcada como biodegradable, es más probable que sea desechada inapropiadamente. (p.31)

Además, en la misma referencia UNEP (2015) se expone que “en el balance de la evidencia disponible, los plásticos biodegradables no juegan un rol importante en la reducción de RSU presentes en los mares”. Esto es porque se consumen y por lo tanto se acumulan.

Como se ha mencionado antes, el artículo CEJA (s.f) menciona:

Las disposiciones y reformas entran en vigor a partir del día siguiente a su publicación en la Gaceta Oficial del Distrito Federal, es decir el día 19 de agosto de 2009, las sanciones no se aplican sino un año después, es decir el 19 de agosto de 2010, por tanto, existe un periodo de gracia a fin de que el cambio no sea drástico, de forma tal que las empresas fabricantes de bolsas de plástico, los establecimientos comerciales y los habitantes del Distrito Federal, tengan la oportunidad y tiempo de tomar las precauciones, medidas y decisiones necesarias a fin de evitar ser sancionados, de evitar pérdidas económicas y sí de promover la protección de el ambiente. (p.4)

Cabe señalar que las bolsas de plástico comerciales están hechas con bases de polietileno de baja y alta densidad. Por esa razón, para conocer más sobre el consumo nacional aparente de esos dos tipos de plástico, se consultó a ANIQ (2017). Por ello, en cuanto al consumo de polietileno de alta densidad (que es el constituyente en la fabricación de bolsas de plástico desechables), en el 2012 fue de 797,377 toneladas y en el 2016 disminuyó a 652,858 toneladas. Así mismo, el consumo nacional aparente del polietileno de baja densidad, en el 2012 fue de 781,630 toneladas y en el 2016 descendió a 692,906 toneladas. Del mismo modo, la producción de ambos plásticos disminuyó del 2012 al 2016. El resultado final es que sí se redujo la producción y consumo de estos dos tipos de plásticos. Si se cumple esta ley, el consumo nacional aparente de los plásticos del PP será menor.

López (2000) señala:

Una propuesta para lograr una reducción de plástico sería por medio de una legislación adecuada, de imposición de impuestos a determinados productos, de implementar campañas intensas e ininterrumpidas de concientización a través de los medios de comunicación y en las escuelas para restringir los productos plásticos, los artículos desechables y de un solo uso o alargando el tiempo de vida útil del artículo mediante aditivos y sistemas de reestabilización. (p.27)

4.5. Contaminantes tóxicos presentes en el PP

Como se muestra en el reporte de Affeldt *et al.* (2016) sobre las películas del PP que liberan vanadio al agua, seguido del cinc y cobre, en la Tabla 3.8 resulta curioso ver que el vanadio no figura en la categoría de la “fracción de combustión de RSU” ni en la de “cenizas pesadas. Así mismo, en la Tabla 3.2 “Factores de emisión de plantas de incineración de RSU”, el Vanadio no se encuentra presente como componente emitido por la incineración de RSU. Sin embargo, se indica que el vanadio está presente en cantidades traza en el petróleo crudo, y en el momento en que este recurso se dirige a refinerías, se emite vanadio al aire, entre otras sustancias más. Con el conocimiento de que los sistemas acuáticos, aéreos y terrestres no son sistemas aislados, al ser que, si uno de estos sistemas es afectado, probablemente afecte al otro. Por citar un ejemplo, Amorrím, Welz, Costa, Lepri, Vale, y Ferreira (2007) apuntan que “El vanadio es reconocido alrededor del mundo como el constituyente metálico más abundante en el petróleo. Lo cual causa efectos no deseados en el proceso de refinamiento y corrosión en centrales eléctricas de gasoil”. Esto señala que este elemento se encuentra presente en este recurso natural de forma inherente. Amorrím *et al.* (2007) señala que “hay una necesidad para la cuantificación de vanadio en petróleo crudo y sus derivados de que este elemento es un serio veneno catalítico”.

Con la información consultada no se encuentra evidencia para declarar que el vanadio es el principal contaminante de las películas del PP presentes en el agua, tal como lo mencionan Affeldt *et al.* (2016), a diferencia de otras sustancias clasificadas como tóxicas como las dioxinas y furanos presentes en la incineración de residuos plásticos (North *et al.*, 2013), o incluso del cobre y níquel (Lisk *et al.*, 1988), así como del Bisfenol A, ftalatos y los Retardantes de Llama Bromados (Verma *et al.*, 2016). Empero, estos anteriores autores, además de Amorrím *et al.* (2007), la UK Marine Special Areas of Conservation y la ASTDR (2012) coinciden que este elemento se encuentra presente en el petróleo crudo y se emite al ambiente cuando este recurso se destila. Sin embargo, el perfil toxicológico de este elemento, desarrollado por la

ASTDR (2012), y presente en esta investigación como la Figura 3.22, “Información existente de los efectos a la salud por los compuestos de vanadio”, no describe al vanadio como de alta preocupación en la salud de los seres vivos a una cantidad o a un tiempo al que fue expuesto a este elemento. Lo cual pone en duda la certeza del artículo de Affeldt *et al.* (2016).

Para sustentar este último punto, y que sea aún más específico para el caso del PP, Hwang, Choi, Han, Choi, y Hong, (2019), investigaron la toxicidad de los microplásticos del PP en células humanas, y señalan lo siguiente “las partículas de PP son conocidas por ser polímeros inocuos. Sin embargo, se ha mostrado que la toxicidad de este plástico es debida principalmente a su incineración y al gas propileno”. Del mismo modo, Hwang *et al.* (2019) señalan que “aunque muchas investigaciones han sido dirigidas al estudio de la toxicidad relacionada con el gas propileno, hay estudios limitados que evalúan la toxicidad directa de las partículas del PP”. Por otra parte, Hwang *et al.* (2019) proponen que, en los resultados de su investigación, “la toxicidad de las partículas de PP fue relacionada al tamaño de estas partículas. Al ser que las partículas de polipropileno sean más pequeñas, pueden tener más área de superficie que impidan el crecimiento celular”. Esto, provoca que “el contacto directo de las micropartículas del PP con otras células, y la liberación potencial de sustancias químicas del PP fueran las principales causas de la citotoxicidad” (Hwang *et al.*, 2019). En esta investigación, Hwang *et al.* (2016) no mencionan cuáles son dichas sustancias químicas del PP las que provocan la citotoxicidad, sin embargo, podría ser razón por la cual mencionan la poca disponibilidad de estudios que evalúan la toxicidad directa de las partículas del PP.

Por otra parte, no hay que olvidar la acumulación excesiva de los plásticos post-consumo. Si bien se mencionó que en el Océano Pacífico hay dos grandes masas de estos materiales, y que hay especies de animales que los ingieren, se consultó el artículo redactado por Smith, Love, Rochman y Neff (2018), quienes mencionan que en “un reporte en el 2016 realizada por la ONU, documentó más de 800 especies contami-

nadas con plástico vía ingestión o que estaban enredados, lo cual provoca su asfixia”. Además, Smith *et al.* (2018) señalan:

La ingestión de plásticos ocurre en los diferentes niveles tróficos, los cuales incluyen a los mamíferos marinos, peces, invertebrados y aves piscívoras. Las partículas de plástico son frecuentemente concentrados en el tracto digestivo de un organismo durante la disección de cadáver. (p.377)

Con la información disponible, aún no es posible dar una conclusión sobre la cantidad de microplásticos presentes en el cuerpo humano:

Debido a la falta de datos en investigación de microplásticos, hay insuficiente información en el estudio de la cantidad real de esos materiales que los humanos podrían estar expuestos por la alimentación. Se ha predicho que los microplásticos totales ingeridos de sales es de máximo 37 partículas por individuo anualmente (...) Sin embargo, las consecuencias son desconocidas (Smith *et al.*, 2018), p.380.

Así mismo, Smith *et al.*, (2018) mencionan:

Si bien el cuerpo humano elimina un 90% de los micro- y nanoplásticos por vía de las heces fecales, los efectos adversos severos dependen de las exposiciones en la naturaleza de las sustancias químicas tóxicas, en la exposición, susceptibilidad del individuo y controles de peligro. (Smith *et al.*, 2018, p.380)

Finalmente, Smith *et al.* (2018) apuntan:

Los efectos físicos de los microplásticos acumulados son poco comprendidos en comparación con la distribución y almacenamiento de sustancias tóxicas en el cuerpo humano, pero preliminarmente, la investigación ha demostrado impactos importantes de alto potencial, que incluye el aumento de la respuesta inflamatoria, toxicidad del tamaño de las partículas del plástico, la transferencia de sustancias químicas de los contaminantes químicos absorbidos y de la disrupción de la microbiota intestinal. (p.380)

4.6. 3Rs, 5Rs y Economía circular

Al retomar las 3Rs, como se vio en la Sección 2.5 de esta investigación, se menciona que el orden por el cual debe adoptar el consumidor y el fabricante es reducir, seguido de reusar y, por último, reciclar. Sin embargo, este orden no llega a seguirse, ya que a las industrias no les favorece económicamente reducir su línea de producción, y mejor optan por lanzar campañas que invitan a las personas a que tomen la postura

de reciclar los productos postconsumo, cuando en realidad este es un mensaje poco claro, debido a que en México no se cuenta con suficientes centros de reciclaje de plásticos, específicamente del PP. Por lo cual, en el mejor de los casos, el consumidor tira dichos plásticos en el contenedor de RSU mezclada con otros tipos de residuos donde posteriormente el 67 % de ellos se dirigen a rellenos sanitarios donde permanecen por varios años.

Lo ideal de la economía circular es obtener al máximo los componentes presentes en los materiales postconsumo. Estos componentes son tanto los materiales como los energéticos.

A pesar de que la adopción de la economía circular pudiera ser la opción más recomendada para disponer los residuos del PP y de los RSU en general, de acuerdo con Acceleratio (s.f.), menciona que este sistema presenta varios desafíos para su implementación. Entre ellos son las barreras políticas, sociales, económicas y tecnológicas. Por ejemplo:

- Las compañías no tienen capacidad o conocimiento para implementar dicho sistema.
- Los precios no reflejan el costo real.
- Las campañas para la transición a la adopción de la economía circular no son lo suficientemente fuertes ni consistentes.

Otra opción que podría generar una solución es el concepto de las 5Rs. De acuerdo con Gjetley y Pierre (2003), “las 5Rs’ es un método que fue aplicado en las instalaciones japonesas Ricoh. Dicho método fue muy efectivo en Japón y fue usado en algunas instalaciones de América del Norte. Las 5Rs comprenden lo siguiente: rechazar, regresar, reducir, reusar, reciclar”. Dicha metodología, ha permitido a la empresa

Ricoh Electronics cumplir con muchos objetivos ambientales. El objetivo más grande fue el desvío de sus residuos en rellenos sanitarios. El término “rechazar” se refiere a rehusar los productos que lleguen a tener un gran número de empaques plásticos de un solo uso. Sobre la economía circular, en la Figura 3.21 se muestra el principio de este sistema. El centro de este modelo representa a la economía lineal, mientras que las curvas representan las acciones que se deben de tomar para que la producción sea más circular.

4.7. Propuestas de implementación

La ISO 14040:2006, muestra las cuatro características más importantes del ACV. Una de ellas es “informar a los tomadores de decisiones en la industria, organizaciones gubernamentales, o no gubernamentales para el propósito de colocar estrategias, planeaciones en el diseño o rediseño de algún producto”. Al enfatizar esta característica, manifiesta que, si la sociedad empresarial realiza ACV de sus productos, permite identificar áreas en la producción que requieran de un menor consumo de materia prima o de recursos naturales, así como mejorar el tratamiento final de sus productos y materias primas. Por tal razón, se consulta la revista *Plastics Technology México* (2019), y en ella se menciona un artículo titulado “Busca ANIPAC que los plásticos no dañen el medio ambiente”, en el cual se ratifica la participación de la ANIPAC en el programa Operation Clean Sweep (OCS), que propone gestionar los residuos plásticos dentro de la industria e implementar mejores prácticas para evitar que esos residuos terminen en ríos y mares. Esto de cierta forma evidencia que en México se realizaba un mal ejercicio de la gestión de los residuos plásticos y por lo tanto eventualmente llegaban a estos cuerpos de agua. Por lo anterior, la ANIPAC, reconocida a sí misma decidió sumarse a esta campaña. Por ello, Torres (2019) hace un llamado a los industriales del plástico a sumar esfuerzos, también lanza ese llamado a las autoridades para establecer un programa serio, eficaz y eficiente de residuos sólidos. En pocas palabras, que haya participación social.

En esta misma revista, Rebitzer (2018) muestra su presentación durante el Consumer Goods Forum, cuyo título es “¿Podrán coexistir los envases de plástico y la Economía Circular?”, se menciona que “si bien la prohibición de los plásticos puede reducir sus residuos, tendría la consecuencia indirecta de un aumento en los residuos de alimentos, así como el incremento de las emisiones de carbono de materiales de empaque alternativos”.

Se menciona el caso de que “cerca de 1,300 millones de toneladas de alimento producidos para consumo humano son desperdiciados. Por ello, el impacto del cambio climático causado por alimentos desechados equivale a 11 % de las emisiones globales de carbono al año” (Rebitzer, 2018).

Entonces, de cierta manera, al prohibir el uso de plásticos, habría un aumento en el desperdicio de alimentos. De otra manera, en esa revista, señalan que el uso de otros reemplazos al uso de plástico, por ejemplo, el vidrio y metal, son inadecuados, ya que:

A pesar de que estos dos materiales son más fáciles de reciclar al usar los procedimientos de reciclaje actuales, la verdad es que suelen tener una mayor huella de carbono y está presente a lo largo de su producción, además que su forma y tamaño son menos eficientes para el transporte. (Rebitzer, 2019, p.18)

Adicionalmente, Cruz (2019) escribe en lo siguiente: “Las estrategias que se han seguido desde la aparición del polipropileno y polietileno, han sido buenos pasos, pero el alto consumo por sus grandes beneficios ya presenta una amenaza real”. El autor explica:

Al hablar específicamente de México, creo que la recolección no ha sido eficiente. La separación es solo un paso conveniente y tampoco se ha realizado bien. Piden la separación en orgánica e inorgánica, que no es suficiente, y que además ni los recolectores de basura saben cuál es cuál. (Cruz, 2019, p.68).

4.8. ¿Las alternativas al plástico son la solución?

Se escucha comentarios locales de personas que comentan que “volvamos al uso del vidrio como alternativa al plástico desechable y de un solo uso”. No obstante, tampoco es la solución. De acuerdo con Humbert, Rossi, Margni, Jolliet y Loerincik (2009) señalan:

Al observar los impactos por el proceso de preservación y empaque, el sistema de potes de plástico tiene una pequeña pero significativa ventaja sobre el sistema del frasco de vidrio en todos los países. El sistema de pote de plástico tiene del 14 % a 27 % en menor uso de energía primaria, tiene del 28 % al 31 % menor efecto al calentamiento global, del 28 % al 31 % menor acidificación/nutrición terrestre que el sistema de frasco de vidrio, el cual varía del país. (p.105)

En este mismo modo, Humber *et al.* (2009) indican que:

Los factores responsables de los beneficios ambientales asociados con el cambio en el empaque son los siguientes:

- La producción y el fin de vida de empaque: el pote de plástico tiene menor impacto que el frasco de vidrio;
- La masa del empaque: el empaque de plástico es más ligero, el cual tiene una reducción importante en la transportación de empaque. (p.105)

En este escenario parecido, López (2000) demuestra que al reemplazar los plásticos por otros materiales para empaque resultaría un 300 % de incremento en el peso, 150 % en volumen, 100 % en energía consumida y 100 % en el costo del material de empaque. Un ejemplo es en las aerolíneas que comentan reducen sus facturas en miles de dólares utilizando plástico en lugar de vidrio en las botellas de bebidas, se estima que en países desarrollados se tiene un 3 % de descomposición de alimentos debido a un inadecuado empaque, pero un 30 % en países en desarrollo.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

A lo largo de esta tesis se mostró que la ineficiente gestión integral de los plásticos en su disposición final presenta diversos problemas como su acumulación en cuerpos de agua y su nulo aprovechamiento energético. Esto llega a tener dilemas económicos, sociales y ambientales. Si bien, en la presente investigación no se consideró suficientemente el aspecto económico, y se consideró el aspecto social con las respuestas a la encuesta para conocer el reciclaje del polipropileno en México (esto se muestra en la Sección 3.6.1 "Manejo integral de residuos de polipropileno en México"), el aspecto ambiental fue el eje central.

La principal conclusión de esta tesis es la ausencia de información relacionada con la disposición final de resinas de polipropileno en México. Esto va en paralelo con la falta de respuesta de las empresas y asociaciones que se contactaron, lo cual es preocupante, porque son empresas que se dedican a la producción y transformación de diferentes plásticos, y que incluso dichos materiales llegan a presentarse en sus reportes anuales; y al no existir una respuesta de dichas empresas, continúa presente un desconocimiento sobre lo que ocurre en la disposición final de estos materiales en México. Sin embargo, la información que se obtuvo del Mtro. Quintero, es un llamado urgente en conocer la situación de la disposición final del polipropileno. Esto se comprueba, al haber obtenido el cálculo del peso volumétrico de este material

(ejemplificado en cantidades de albercas olímpicas) y su extrapolación en un relleno sanitario, y esto únicamente es en la Ciudad de México. La incógnita es obtener los anteriores parámetros para toda la República Mexicana, y así, mediante otra investigación, se pueda resolver esta interrogante. No obstante, se mostró el posible porcentaje del aporte energético que daría el PP proveniente de la CDMX al Servicio de Transportes Eléctricos de la CDMX. Tal vez no sería buena opción que todo el aporte energético de los residuos del PP sean destinados al Sistema de Transporte Colectivo Metro (como lo mencionaba Veolia en dirigir la energía proveniente de los RSU generados en la CDMX y que esa energía sea destinada al metro), ya que dicho aporte del PP sería del 0.09 % para este medio de transporte. Sin embargo, sí sería una excelente idea que, ese aporte energético fuera dirigido a la línea del tren ligero, ya que dicho aporte sería del 11.65 % para este medio de transporte (Tabla 4.2). Si esto únicamente representa el 1 % que es el PP almacenado en RS en México, el otro 99 % correspondería a otros residuos que son desechados en exceso, y que algunos de estos residuos pueden tener gran capacidad calorífica, similar o un poco diferente a la del PP. Aquí se desprende otra línea de investigación.

La segunda conclusión es crear una propuesta que disminuya la cantidad de plástico presente en océanos, tal como se presenta en la Sección 3.2 “La Gran Isla de Basura”, así como en ecosistemas terrestres, como se presenta en la Sección 4.1.2 “Rellenos sanitarios”. Con la creación de dicha propuesta, me refiero a un manejo integral de los residuos sólidos urbanos, que sea eficaz y eficiente, en el cual la separación de residuos, para posteriormente disponerlos en reciclaje, incineración y relleno sanitario (en este orden) sean capaces de reutilizar componentes de los materiales o de aprovechar su valoración térmica. Asimismo, será necesario “seguir los lineamientos establecidos por el gobierno en cuanto a la disposición final de RSU”. Por ejemplo, que se emitan multas considerables como castigo al verter residuos en la vía pública, tiraderos a cielo abierto, incinerar RSU a cielo abierto, entre otros.

La tercera conclusión es la adopción de la economía circular. Esto por lo siguien-

te: “Hay una urgencia por desarrollar un sistema de reciclaje eficiente de plásticos del PP”. Cambiar la forma de reciclaje, al desarrollar un sistema que involucre a la industria - consumidor final – opción de disposición final (desde perspectiva personal, identificadas como “las 3 esferas del desarrollo sostenible”) generaría empleos, áreas de oportunidad y abriría nichos de mercado para su implementación. Esto daría paso a la adopción de una cultura de las 5Rs y de economía circular y se proponen las siguientes razones:

- En primer lugar, “no hay que satanizar al plástico”. El plástico ha estado presente desde muchos años atrás. En el Capítulo 7 Anexos, de la presente investigación, se menciona brevemente la etapa histórica en el uso de este material. Además, se encuentra presente de manera habitual. En el sector automotriz, de comunicación, hospitalario, entre otros.
- En segundo lugar, no es una opción el eliminar todos los plásticos desechables y de un solo uso, porque hay sectores en la sociedad que los requieren indispensablemente, por ejemplo, en el sector salud. En este sector, algunos plásticos desechables de polipropileno son usados en hospitales porque así se evitaría la propagación de enfermedades. Por otra parte, una gran cantidad de personas dependen económicamente de la existencia de la industria de plásticos. Como se vio en la presente tesis, en general la industria química genera un PIB considerable en México. La industria del plástico en México representa más de un 4% del PIB manufacturero y arriba del 2.6% del PIB nacional (ANIPAC, 2019). Prohibir el uso de plásticos desechables y de un solo uso, afectaría a este sector.
- En tercer lugar, es indispensable realizar análisis del ciclo de vida de los plásticos que sean producidos, e incluso también de los materiales que sean producidos. La norma ISO 14040:2006 describe la metodología que permite realizar el ACV de cualquier producto.
- En cuarto lugar, actualizar los datos de las empresas de acopio presentes en el “Directorio de Centros de Acopio de Materiales Provenientes de Residuos en

México 2010”, por la SEMARNAT. Esta actualización permite confirmar la existencia o desaparición de dichas empresas para que los consumidores o empresas se dirijan a ellas para solicitar alguna información. Me permito mencionar un punto que el Lic. Quintero (2019) mencionó y es el siguiente:

Es necesario incorporar a la NMX-AA-22-1985 nuevos subproductos, que, como se mencionó anteriormente, son generados en gran magnitud en México. Tales subproductos son los plásticos (de acuerdo con su composición como PVC, PEBD, PP, PET y PEAD), Tetrapack, entre otros.

- En quinto lugar, en México se debe de adoptar y reglamentar otras opciones de disposición final de residuos plásticos. La incineración con recuperación de energía, el reciclaje y la biodegradación aún no son reconocidos por la SEMARNAT como formas de disposición final para estos materiales. Al hacer mención a la opción de incineración, debe de cumplir una serie de normas y leyes ambientales para que no haya liberación de sustancias tóxicas que lleguen a causar daños al ambiente que lo rodea.
- En sexto lugar, “hay que resolver fuera de la burbuja”. Los profesionales de la química no pueden resolver todos los problemas que existen actualmente. Sería muy difícil. Por esta razón, se deben crear alianzas con otros profesionales de otras carreras y mediante estos equipos multidisciplinarios, se podría resolver un problema desde diferentes aristas. La UNAM cuenta con más de 120 licenciaturas, y en el caso de Ciudad Universitaria, se pueden conectar con diferentes facultades que tienen visiones distintas a los que hay en la Facultad de Química. Sería cuestión de “navegar” las Islas y que se puedan crear proyectos de investigación sobre los RSU, y hasta crear startups para crear solución a estos problemas.
- En séptimo lugar, “que las industrias productoras de plásticos cuenten con especialistas de sostenibilidad” esto permite que el especialista en esta área tenga voz en las etapas tempranas del proceso de producción temprana de plásticos y en las etapas finales de disposición final, para ofrecer mejores opciones de fabricación de estos materiales, además de incluir evaluaciones del ciclo de vida.

- En octavo lugar, “la industria química debe de conocer el fin de ciclo de vida de sus productos plásticos”, y con la recomendación de la anterior propuesta, reciclar aquellos que cumplan con sus estudios de calidad. Los que no lo cumplan, pueden fabricar otros productos o comercializarlos con otras empresas. Esto generaría alianzas estratégicas.
- En noveno lugar, a partir de la reforma a la Ley de Residuos Sólidos que plantea prohibir el uso de los plásticos de un solo uso, la Ciudad de México tiene una transición importante en esta materia. Habría que hacer un análisis más profundo sobre esta prohibición, al incluir el desarrollo social y el desarrollo económico.

Finalmente, se identificaron las sustancias que están presentes en las resinas termoformadas de polipropileno en su fin de ciclo de vida, de las cuales, de acuerdo con Affeldt et al. (2016), el vanadio fue el elemento que se pretendía tener la mayor ecotoxicidad para los cuerpos de agua. Sin embargo, no se encontró evidencia suficiente para declarar que esa sustancia sea un contaminante alarmante que perjudique la salud de los seres vivos en comparación con otras sustancias como los furanos, dioxinas, e incluso el níquel y cobre.

Bibliografía

- [1] Acceleratio (s.f.). Circular Economy. Recuperado el 4 de abril del 2021, de <https://www.acceleratio.eu/circular-economy/>
- [2] Affeldt, C., Leung, A., Yang, K. (2016). Life Cycle Assessment of Stone Paper, Polypropylene Film, and Coated Paper for Use as Product Labels [Estudio de ciclo de vida del papel Piedra, película de polipropileno y papel recubierto para su uso en etiquetas de productos]. Recuperado el 14 de enero del 2019, de: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/117675>
- [3] Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ASTDR] (2012). Toxicological Profile for vanadium [Perfil toxicológico del vanadio]. Recuperado el 9 de junio de 2019, de <http://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/>
- [4] Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ASTDR] (2017a). ASTDR's Substance Priority List. Recuperado el 28 de octubre del 2019, de <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/>
- [5] Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ASTDR] (2017b). Support Document to the 2017 Substance Priority List. Candidates for Toxicological Profiles. Recuperado el 28 de octubre del 2019, de <https://n9.cl/xbli7>
- [6] Alpro Shop (s.f). Contenedor color gris, para los residuos inorgánicos con potencial de reciclaje. Recuperado el 19 de mayo de 2019, de <https://alproshop.com/235231-gri-bote-de-basura-gris-con-tapa-swing-de-35-lts/>

- [7] American Chemical Society [ACS] (1999), Discovery of polypropylene and the development of a new high-density polyethylene. [Descubrimiento del polipropileno y el desarrollo de un nuevo polietileno de alta densidad]. Recuperado el 18 de enero del 2019, de <https://n9.cl/15t9h>
- [8] American Chemistry Council (2016). Reporte de inventario de polipropileno de enero a marzo del 2013. Recuperado el 3 de marzo del 2019, de <https://plastics.americanchemistry.com/resin-report-subscriptions/PP-InventoryReport.pdf>
- [9] Anónimo (s.f). Edwin Drake. Recuperado el 18 de marzo de 2019, de https://www.pbs.org/wgbh/theymadeamerica/whomade/drake_hi.html
- [10] 9. Anónimo (2012b). ToxFAQs sobre el vanadio. junio 20, 2019., de Agency for Toxic Substances and Disease Registry Sitio web: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts58.pdf
- [11] Anónimo (2017c). FEATURE: UN's mission to keep plastics out of oceans and marine life. [Misión de la Unión Europea para mantener los plásticos fuera de los océanos y de la vida marina]. Recuperado el 13 de marzo del 2019, de <https://n9.cl/07x63>
- [12] Anónimo (2018d). Mitos y realidades sobre las bolsas de plástico. Recuperado el 5 de marzo de 2019, de <https://anipac.com/wp-content/uploads/2018/07/Bolsas.jpg>
- [13] Asociación Nacional de la Industria del Plástico [ANIPAC] (s.f). Mitos y realidades sobre las bolsas de plástico. Recuperado el 26 de marzo de 2019, de <https://anipac.com/wp-content/uploads/2018/07/Bolsas.jpg>
- [14] Asociación Nacional de la Industria Química [ANIQ] (2017). Anuario estadístico de la Industria Química Mexicana. Recuperado el 16 de febrero de 2019, de <http://www.aniq.org.mx/anuario/2017/index.html>

- [15] Asta de ciervo (s.f). Asta de ciervo. Recuperado el 24 de marzo de 2019, de <https://n9.cl/kawve1>
- [16] Centro de Estudios Jurídicos y Ambientales [CEJA] (s.f). Adiós a las bolsas de plástico. Reformas a la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, ¿una manera de reducir la basura?. Recuperado el 3 de mayo del 2019, de <https://n9.cl/9bst>
- [17] Centro de Investigación en Química Aplicada [CIQA] (2019) Bio-ciencias y Agrotecnología. Recuperado el 10 de abril del 2019, de <https://www.ciqa.mx/index.php/departamentos/19- plasticos-en-la-agricultura>
- [18] Chamber of Commerce (1998). Environmental Issues in Mexico Under NAFTA. [Asuntos ambientales en México bajo el TLCAN] Recuperado el 9 de abril de 2019, de <https://n9.cl/aapt>
- [19] Chávez, C. (2015). Gestión de Residuos en México. Recuperado el 10 de marzo de 2019, de <https://n9.cl/w1rd1>
- [20] Chem Guide (s.f). Ejemplo de cracking. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <https://www.chemguide.co.uk/organicprops/alkanes/cracking.html>
- [21] Ciencia UANL (s.f) Códigos de identificación de plástico. Recuperado el 6 de marzo de 2019, de <http://cienciauanl.uanl.mx/?p=5352>
- [22] Clark, J. (2015). Cracking alcanes. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <https://www.chemguide.co.uk/organicprops/alkanes/cracking.html>
- [23] Commission Ocean Indien (s.f). Importancia y estructura de la industria plástica. Recuperado el 18 de marzo de 2019, de <http://www.commissionoceanindien.org/archives/environment.ioonline.org/fr/solid-waste-management/recycling-of-plastics.html>
- [24] Congreso de la Ciudad de México (2019) Diputados prohíben la venta de productos de plásticos “de un solo uso” en la CDMX; las empresas tendrán que fabricar artículos biodegradables. Recuperado el 2 de mayo de

- 2019, de <https://www.congresocdmx.gob.mx/diputados-prohiben-la-venta-de-productos-de-plasticos-de-un-solo-uso-en-la-cdmx-las-empresas-tendran-que-fabricar-articulos-biodegradables/>
- [25] Conservación y Restauración (s.f) Goma laca descerrada. Recuperado el 24 de marzo de 2019, de <https://conservacionyrestauracion.cl/es/resinas/14-46-goma-laca-descerada.html>
- [26] Crawford C. Quinn B. (2017) Physiochemical properties and degradation. Microplastic Pollutants. Recuperado el 26 de enero de 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128094068000049>
- [27] Cruz, E. (2019). La incineración elimina la acumulación. *Plastics Technology México*, 4 (2), 68.
- [28] Day, R. (1985). The quantitative distribution and characteristics of Neuston Plastics in the North Pacific Ocean. [La distribución cuantitativa y las características de Neuston Plastics en el norte del Océano Pacífico]. Recuperado el 8 de septiembre de 2019, de http://swfsc.noaa.gov/publications/TM/SWFSC/NOAA-TM-NMFS-SWFSC-154_P247.PDF
- [29] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ] (s.f). Plantas de incineración de residuos sólidos urbanos. Revisión de costos y emisiones a la atmósfera, con una aproximación a los rellenos sanitarios. Recuperado el 16 de julio de 2019, de <https://n9.cl/7qhzv>
- [30] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ] (2017a). El principio de la economía circular. p.15
- [31] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ] (2017b). Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos. Recuperado el 10 de septiembre de 2019, de <https://www.giz.de/en/downloads/WasteToEnergy-sp-web-klein.pdf>

- [32] Diario Oficial de la Federación [DOF] (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. México. Recuperado el 29 de junio del 2019, de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_190118.pdf
- [33] Dynamic Science Education (s.f) Cracking. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <https://n9.cl/7yl0n>
- [34] EBay (s.f). Heavy plastic pellets/Beads. Recuperado el 12 de abril de 2019, de <https://www.ebay.co.uk/itm/Heavy-Plastic-Pellets-Beads-Stuffing-Filling-Bear-Doll-Autism-Blankets/181788394973>
- [35] Ellen Macarthur Foundation (s.f) Economía Circular. Recuperado el 2 de septiembre de 2019, de <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto>
- [36] El Economista (2020) Legisladores de CDMX piden que se reconsidere el proyecto de planta de tratamiento de residuos sólidos. Recuperado el 5 de mayo del 2020, de <https://www.economista-com-mx/amp/estados/Legisladores-de-CDMX-piden-que-se-reconsidere-el-proyecto-de-planta-de-tratamiento-de-residuos-solidos-20200204-0085.html>
- [37] El Financiero (2018) Termovalorizadora, la mayor deuda que adquirió el gobierno de la CDMX: Sheinbaum. Recuperado el 5 de mayo del 2020, de <https://amp.elfinanciero.com.mx/nacional/termovalorizadora-la-mayor-deuda-que-adquirio-el-gobierno-de-la-cdmx-sheinbaum>
- [38] El Universal (2019) Reitera Sheinbaum que termovalorizadora no va. Recuperado el 2 de febrero del 2019, de <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/reitera-sheinbaum-que-termovalorizadora-no-va>
- [39] Environmental Protection Agency [EPA] (2015). Cifras sobre la cantidad de RSU que terminan en rellenos sanitarios en EU. Recuperado el 2 de marzo de 2019, https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-03/documents/infographic_full-060513_v4.pdf

- [40] Environmental Protection Agency [EPA] (2018) Advancing Sustainable Materials Management: 2015 Factsheet. [Gestión del avance de materiales sostenibles. Hoja informativa 2015]. Recuperado el 26 de marzo de 2019, de <https://n9.cl/k9uf>
- [41] European Union (2016). New biotechnological approaches for biodegrading and promoting the environmental biotransformation of synthetic polymeric materials.
- [42] Evers, J. (2014). Great Pacific Garbage Patch. [La Isla Basura del Pacífico] Recuperado el 26 de marzo de 2019, de <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/great-pacific-garbage-patch/>
- [43] Facultad de Estudios Superiores [FES] Iztacala (s.f). Gutapercha. Recuperado el 24 de marzo de 2019, de <https://n9.cl/bwiaw>
- [44] Flores, R. (2013). Diagnóstico de la Industria del Plástico en México. Tesis de Ingeniería. UNAM.
- [45] Franklin Associates (2007) Cradle-to-gate life cycle inventory of nine plastic resins and two polyurethane precursors. [Inventario del ciclo de vida de la cuna a la puerta de nueve resinas plásticas y dos precursores del poliuretano]. Recuperado el 20 de febrero de 2019, de <https://plastics.americanchemistry.com/LifeCycle-Inventory-of-9-Plastics-Resins-and-4-Polyurethane-Precursors-Rpt-Only/>
- [46] Franklin Associates (2011) Life Cycle Inventory of Plastic Fabrication Processes: Injection Molding and Thermoforming [Inventario del ciclo de vida del proceso de fabricación del plástico: moldeo por inyección y termoformado]. Recuperado el 22 de febrero de 2019, de <https://plastics.americanchemistry.com/Education-Resources/Publications/LCI-of-Plastic-Fabrication-Processes-Injection-Molding-andThermoforming.pdf>
- [47] Gaceta Oficial del Distrito Federal, NADF-024-AMBT-2013. Que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del Distrito Federal. Recuperado el 3 de abril

de 2019, de <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/images/infografias/NADF-024-AMBT-2013.pdf>

- [48] García, S. (2009). Referencias Históricas y Evolución De Los Plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 10(1), 71–80.
- [49] García, S. (2009). Referencias Históricas y Evolución De Los Plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 10(1), 71–80.
- [50] Gestores de residuos (2015). La clasificación de los plásticos. Recuperado el 4 de febrero de 2019, de <https://gestoresderesiduos.org/noticias/la-clasificacion-de-los-plasticos>
- [51] Gimeno I Gallego, Enric (2018). Estudio de la Evolución del Contenido Energético de un polipropileno tras sucesivos ciclos de reciclado mecánico. Recuperado el 2 de abril del 2021.
- [52] Gobierno del Distrito Federal (2010). Diagnóstico de la gestión integral de los residuos sólidos. Recuperado el 27 de abril del 2019, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187455/Distrito_Federal.pdf
- [53] Góngora, J. (2014). La industria del plástico en México y el mundo. *Comercio Exterior*. 64 (5), 6 – 7
- [54] Green Planet de Pi (s.f). Código de identificación presente en un envase de plástico. Recuperado el 26 de marzo de 2019, de <https://greenplanetdepi.wordpress.com/2015/07/12/plastico-como-identificar-si-es-seguro-o-no/>
- [55] Grupo Reyma (s.f). Materiales. Recuperado el 26 de marzo del 2019, <https://reyma.com.mx/materiales/>
- [56] Gummow, B. (2011). Vanadium: Environmental Pollution and Health Effects. [Vanadio: Contaminación ambiental y efectos a la salud]. *Encyclopedia of Environmental Health* 628–636

- [57] Gutiérrez, C. (2012). Problemas y soluciones en el manejo de los Residuos Sólidos Urbanos en México. Recuperado el 9 de marzo de 2019, de <https://n9.cl/7edup>
- [58] Humbert, S., Rossi, V., Margni, M., Joliet, O., Loerincik, Y. (2009). Life cycle assessment of two baby food packaging alternatives: glass jars vs. plastic pots. [Estudio de ciclo de vida de dos alternativas al empaque de dos alimentos para bebés: frascos de vidrio vs potes plásticos]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(2), 95–106.
- [59] Hwang, J., Choi, D., Han, S., Choi, J., Hong, J. (2019). An assessment of the toxicity of polypropylene microplastics in human derived cells. *Science of the Total Environment*, 684, 657–669. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.071>
- [60] Indelpro, (s.fa). Hoja de seguridad del polipropileno homopolímero SLY331. Recuperado el 3 de abril de 2019, de https://indelpro.com/webapp/product.html?id=item_01a064c5-72d4-e792-8e00-dd02d02b3d37lan=es
- [61] Indelpro (s.fb). Polipropileno, homopolímero clarificado de alta cristalinidad, PL395N. Recuperado el 18 de marzo de 2019, de https://indelpro.com/webapp/product.html?id=item_01a064c5-72d4-e792-8e00dd02d02b3d37lan=es
- [62] Indelpro (s.fc) Polipropileno, homopolímero, SLY331. Recuperado el 18 de marzo de 2019, de https://indelpro.com/webapp/product.html?id=item_03db6f34-02f4-19f6-cd44ddbe8d03e88clan=es
- [63] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] (2012). Tipo de disposición final de RSU, por entidad federativa. Recuperado el 2 de mayo de 2019, de <https://n9.cl/fhd6>
- [64] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] (2018) Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (GYCEI) del

sector Residuos Sólidos Urbanos en México, como insumo para la sexta comunicación nacional del cambio climático. Recuperado el 1 de septiembre de 2019, de <https://n9.cl/vefwp>

[65] Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (s.f). Transformación del petróleo. Recuperado el 1 de abril de 2019, de <http://cuentame.inegi.org.mx/impresion/economia/petroleo.asp>

[66] International Pellet Watch, (s.f). What's plastic resin pellet? Recuperado el 3 de marzo de 2019, de <http://web.tuat.ac.jp/gaia/ipw/en/what.html>

[67] International Standard Organization [ISO] (2006). ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. [ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Estudio de ciclo de vida. principios y contexto]. Recuperado el 3 de marzo de 2019, de <https://www.iso.org/standard/37456.html>

[68] Jerónimo, L. (2016). Tiradero a cielo abierto, factor de contaminación. Recuperado el 11 de abril de 2019, de <https://oaxaca.quadratin.com.mx/Tiradero-cielo-abierto-factor-contaminacion/>

[69] Junta de Galicia (s.f). Visualización de las estructuras moleculares de tres categorías de plásticos. Recuperado el 10 de febrero de 2019, de <http://www.edu.xunta.gal/centros/iessantomefreixeiro/system/files/plastico.pdf>

[70] La ciencia es bella (2013). Los colores del vanadio. Recuperado el 12 de abril de 2019, de <https://lacienciaesbella.blogspot.com/2013/10/los-colores-del-vanadio.html>

[71] Lali, Z. (2018). Release of Dioxins from Solid Waste Burning and its Impacts on Urban Human Population. Recuperado el 26 de enero del 2020, de <https://www.longdom.org/open-access/release-of-dioxins-from-solid-waste-burning-and-its-impacts-on-urbanhuman-population-a-review-2375-4397-1000215.pdf>

- [72] Kershaw, P. (2015). Biodegradable Plastics Marine Litter. Misconceptions, concerns and impacts on marine environments. [Plásticos biodegradables y desechos marinos: conceptos erróneos, preocupaciones e impactos a ambientes marinos]. Recuperado el 11 de mayo de 2019, de <http://hdl.handle.net/20.500.11822/7468015BiodegradablePlasticsAndMarineLitter.pdf.pdf?sequence=3isAllowed=y>
- [73] López, G. (2000). Desarrollo de un proceso para el reciclado de polipropileno. Tesis de ingeniería, UNAM.
- [74] Mendoza, R. (2017). Industria del plástico, con gran potencial en manufactura. Recuperado el 7 de febrero de 2019, de <http://mundoejecutivo.com.mx/economia-negocios/2017/01/23/industria-plastico-gran-potencial-manufactura/>
- [75] MetroCDMX (s.f.). Cifras de operación. Recuperado el 10 de mayo del 2021, de <https://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/cifras-de-operacion>
- [76] National Geographic (s.f.). Great Pacific Garbage Patch. Recuperado el 25 de abril de 2019, de <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/great-pacific-garbage-patch/>
- [77] Nexus (2015) Nexus 2F. Recuperado el 13 de abril del 2019, de <https://youtu.be/UrK0917n8ro>
- [78] Nzihou, A., Themelis, N. J., Kemiha, M., Benhamou, Y. (2012) Dioxin emissions from municipal solid waste incinerators (MSWIs) in France. [Emisión de dioxinas de los incineradores de residuos sólidos urbanos (RSU) en Francia]. *Waste Management*, 32(12), 2273–2277. Recuperado el 6 de marzo de 2019, de la base de datos ElSevier.
- [79] NMX-AA-22-1985, Protección al ambiente – contaminación del suelo – residuos sólidos municipales – selección y cuantificación de subproductos. Recuperado el 23 de marzo de 2019, de <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa022.pdf>
- [80] 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. Recuperado el 23 de marzo de 2019, de http://www.maypa.mx/index.php?option=com_contentview=articleid=99:nom-083-semarnat-2003-especificaciones-para-sitio-de-disposicion-final-de-residuos-solidos-urbanos-catid=40:normasItemid=94

- [81] NOM-098-SEMARNAT-2002. Protección ambiental incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. Recuperado el 23 de marzo de 2019, de <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1309/1/nom-098-semarnat-2002.pdf>
- [82] North, E. J., y Halden, R. U. (2013). Plastics and environmental health: The road ahead. [Plásticos y salud Ambiental: el camino por recorrer]. *Reviews on Environmental Health*. *Rev Environ Health*, 28(1), 1–8. Recuperado el 13 de abril de 2019 de la base de datos DeGruyter.
- [83] Our World in Data (2018). Plastic Pollution. Recuperado el 3 de marzo de 2020, de <https://ourworldindata.org/plastic-pollutionplastic-waste-generation-across-the-world>
- [84] Palacios, S., Rosas, I., Gutiérrez, F., Rivera, L., Rojas, N., Romero, F., Romero, L. (2008). Deben desaparecer los rellenos sanitarios en el país. Recuperado el 20 de marzo de 2019, de <http://www.acervo.gaceta.unam.mx/index.php/gum00/article/view/59122>
- [85] Petróleos Mexicanos [PEMEX] (s.f) El Petróleo. Recuperado el 1 de abril de 2019, de <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/petroleo/default.aspx?tema=S>
- [86] Petroleum (s.f). Componentes básicos de la producción de plásticos. De monómero a polímero. Recuperado el 28 de febrero de 2019, de <http://www.petroleum.co.uk/plastic-production>

- [87] Petroleum (2015). Plastic production. Recuperado el 28 de febrero de 2019, de <http://www.petroleum.co.uk/plastic-production>
- [88] PlasticsEurope (s.f) Historia del plástico. Recuperado el 20 de marzo de 2019, de <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics/history>
- [89] PlasticsEurope (2018) Plastics – the Facts 2018 An analysis of European plastics production, demand and waste data. [La realidad de los plásticos 2018. Un análisis de la producción de plásticos europeo, demanda y datos de residuos]. Recuperado el 20 de febrero de 2019, de <https://n9.cl/4j76j>
- [90] Polymer Science Learning Center (s.f). Componentes de la reacción Ziegler - Natta. Recuperado el 9 de febrero de 2019, de <https://pslc.ws/macrog/ziegler.htm>
- [91] Rebitzer, G. (2019). ¿Podrán coexistir los envases de plástico y la Economía Circular? *Plastics Technology México*, 4(2), pp. 16-20.
- [92] Reciclación (s.f). Ley de las 3R. Recuperado el 26 de enero de 2020, de <http://www.reciclacion.cl/noticias/ley-de-las-3r/>
- [93] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (s.f) Sitios contaminados. Recuperado el 28 de abril de 2019, de <https://n9.cl/63qj7>
- [94] Secretaría de Marina y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2012) Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado el 27 de abril de 2019, de <https://n9.cl/3b9y7>
- [95] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2014a). Disposición final estimada de residuos sólidos urbanos. Recuperado el 20 de mayo de 2019, de <https://n9.cl/eb81w>
- [96] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2014b). Recolección y disposición de residuos sólidos urbanos. Recuperado el 3 de marzo de 2019, de https://apps1.semarnat.gob.mx:445/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_2.html

- [97] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2015a). Generación de residuos peligrosos. Recuperado el 28 de abril de 2019, de <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/materiales-y-actividadesriesgosas/residuos-peligrosos>
- [98] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2015b). Informe de la situación del medio ambiente. Recuperado el 20 de agosto de 2019, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/index.html>
- [99] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2017a). Información sobre residuos sólidos urbanos. Recuperado el 28 de abril de 2019, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>
- [100] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2017b). Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial. Recuperado el 7 de julio de 2019, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-y-de-manejo-especial>
- [101] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2018). Disposición final estimada de residuos sólidos urbanos. Recuperado el 28 de abril de 2019, de <https://n9.cl/ejxv>
- [102] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] (2019). Tiraderos a cielo abierto dañan ambiente y salud humana. Recuperado el 9 de julio de 2019, de <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto-danan-ambiente-y-salud-humana?idiom=es>
- [103] Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca [SEMARNAP] (1999). Parte III. La situación de los residuos sólidos en México. En Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos. Recuperado el 29 de junio de 2019, de http://centro.paot.org.mx/documentos/ine/mini_manejo_residuos_solidos.pdf

- [104] Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México [SEDEMA] (2018) Inventario de Residuos Sólido CDMX, 2017. Recuperado el 22 de abril de 2019, de <https://n9.cl/7cgoo>
- [105] Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246–265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>
- [106] Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales [SNIARN] (2010) Compendio de Estadísticas Ambientales. Recuperado el 1 de septiembre de 2019, de <https://n9.cl/ipfvc>
- [107] Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., y Neff, R. A. (2018). Microplastics in Seafood and the Implications for Human Health. *Current Environmental Health Reports*, 5(3), 375–386. Recuperado el 3 de agosto de 2019, de la base de datos SpringerLink.
- [108] Statista (s.f.). Energía eléctrica consumida por el metro de la Ciudad de México de 2011 a 2019. Recuperado el 4 de abril del 2021, de <https://es.statista.com/estadisticas/609286/energia-electrica-consumida-por-el-metro-ciudad-de-mexico/statisticContainer>
- [109] Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México [STE] (2017). Plataforma Nacional de Transparencia. Solicitud de Acceso a la Información Pública Folio Núm. 0322000001117. Recuperado el 4 de abril del 2021, de <https://transparencia.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/59d/7d8/c92/59d7d8c92670c2184>
- [110] Strangis (s.f). Insecto atrapado en un fragmento de ámbar. Recuperado el 24 de marzo de 2019, de <https://strangisfanzine.wordpress.com/2014/02/06/que-se-utilizaba-antes-delos-plasticos-los-polimeros-naturales/>
- [111] The Blastic Project (s.f.a) Plastic Ingestion by Birds. [Ingestión de plástico por aves]. Recuperado el 8 de abril de 2019, de web:https://www.blastic.eu/knowledge-bank/impacts/plastic-ingestion/birds/

- [112] The Blastic Project (s.fb) Toxicity of plastics. [Toxicidad de los plásticos]. Recuperado el 2 de marzo de 2019, de <https://www.blastic.eu/knowledge-bank/impacts/toxicity-plastics/>
- [113] The National Academies Press [NAP] (2014) Chapter 7. Assessment of Ecotoxicity. A Framework to Inform Government and Industry Decisions. [Capítulo 7: Estudio de ecotoxicidad. Un contexto para informar al gobierno y a las decisiones de la industria]. Recuperado el 5 de marzo de 2019, de <https://www.nap.edu/read/18872/chapter/992>
- [114] This is Plastics (s.f) Fragmento del artículo de la revista Popular Mechanics. Recuperado el 20 de marzo de 2019, de <https://www.thisisplastics.com/plastics-101/155-years-of-plastic/>
- [115] Treviño, S., Díaz, A., Sánchez-Lara, E., Sanchez-Gaytan, B. L., Perez-Aguilar, J. M., y González-Vergara, E. (2019). Vanadium in Biological Action: Chemical, Pharmacological Aspects, and Metabolic Implications in Diabetes Mellitus. *Biological Trace Element Research*. [Vanadio en acción biológica: aspectos químicos y farmacológicos, e implicaciones metabólicas en Diabetes Mellitus. Investigación biológica de elementos traza]. 188(1), 68–98. Recuperado el 14 de mayo de 2019, de la base de datos SpringerLink.
- [116] Urban Development Working Papers East Asia Infrastructure Department World Bank (2005). Waste Management in China: Issues and Recommendations. [Gestión del residuo en China: cuestiones y recomendaciones]. Recuperado el 2 de mayo de 2019, de <http://documents.worldbank.org/curated/en/237151468025135801/Waste-management-in-China-issues-and-recommendations>
- [117] UK Marine Special Areas of Conservation (s.f) Vanadium. [Vanadio]. Recuperado el 18 de mayo de 2019, de http://www.ukmarinesac.org.uk/activities/waterquality/wq8_10.htm

- [118] United States Energy Information Administration (s.f). How much oil is used to make plastic?. Recuperado el 13 de marzo del 2019, de <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=34t=6>
- [119] Vázquez, A., Espinosa, R., Beltrán, M., y Velasco M. (2016). Reciclaje de plásticos. Recuperado el 2 de abril de 2019, de <http://biblioteca.anipac.mx/biblioteca/reciclaje/medio-ambiente-reciclaje/el-reciclaje-de-los-plasticos>
- [120] Veolia (2017a) Diagrama general sobre la producción de Veolia en México. Recuperado el 9 de abril del 2019, de <https://www.veolia.com/en/news/waste-to-energy-renewable-energy-mexico>
- [121] Veolia (2017b). Waste to energy renewable in Mexico. [Residuo a energía renovable en México]. Recuperado el 28 de abril de 2019, de <https://www.veolia.com/en/news/waste-to-energy-renewable-energy-mexico>
- [122] Veolia (2018). Preguntas frecuentes. Planta de termovalorización CDMX. Recuperado el 4 de abril del 2021, de https://www.veolia.com.mx/termocdmx/sites/g/files/dvc2021/files/document/2018/05/2018_-_Preguntas_Frecuentes-_Planta_de_Termovalorizacion-_FAQ.pdf
- [123] Verma, R., Vinoda, K., Papireddy, M., Gowda, A.. (2016). Toxic Pollutants from Plastic Waste – A Review. . Marine Pollution Bulletin , 44, 842-852. 2020, mayo 5, De ElSevier Base de datos.
- [124] Whigham, W. (1965). Production of vanadium values from crude oil. [Producción de vanadio del petróleo crudo]. US3416882A. Recuperado el 20 de junio de 2019, de <https://patents.google.com/patent/US3416882A/en>

Capítulo 6

Anexos

6.1. Plásticos

6.1.1. Etimología

Acorde a la Real Academia Española, la palabra plástico viene del latín *plastĭcus*, y este del griego *plastikós*, la forma del latín tardío *plastĭca*, y este del griego *plastik*.

Su definición es la siguiente:

Adj. Capaz de ser modelado.

Adj. Dicho de un material: Que, mediante una compresión, puede cambiar de forma y conservar esta de modo permanente, a diferencia de los cuerpos elásticos.

Adj. Dicho de ciertos materiales sintéticos: Que pueden moldearse fácilmente y están compuestos principalmente por polímeros, como la celulosa.

6.1.2. ¿Qué son?

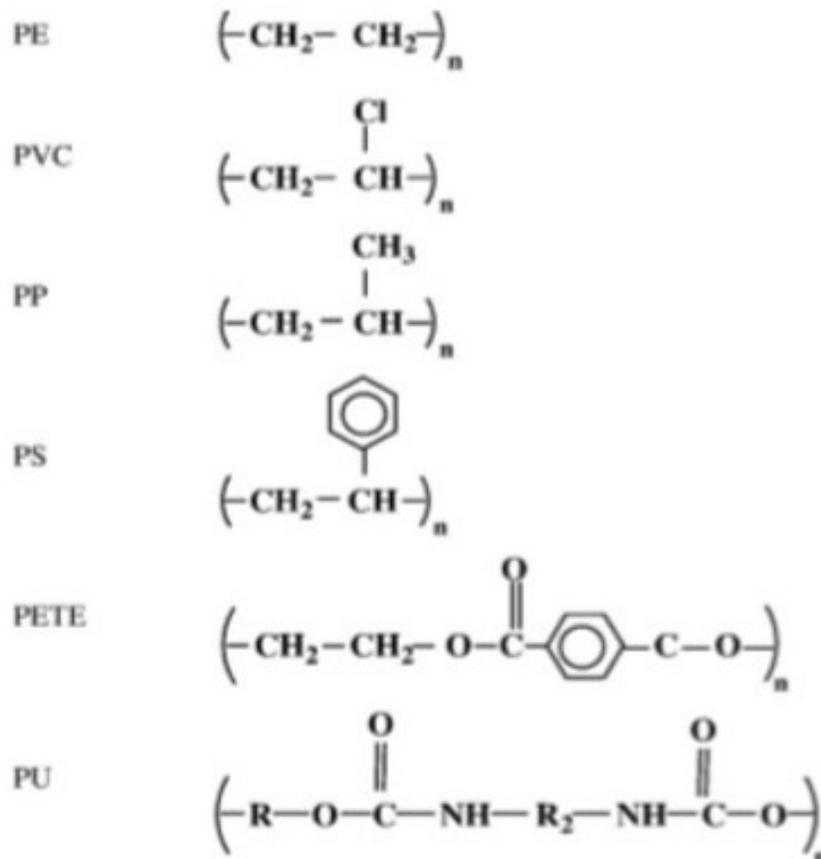
Flores (2013) propone la siguiente definición de los plásticos:

Los plásticos son polímeros orgánicos, que pueden ser moldeados mediante calor y presión y que contienen en su estructura carbono e hidrógeno principalmente, aunque también pueden estar

presentes el oxígeno, nitrógeno, azufre o el cloro. (p.15)

En este contexto, el autor propone que no sólo los polímeros son grandes agrupaciones de átomos de carbono e hidrógeno, sino que también pueden estar presentes otros átomos, en menor proporción en comparación con los dos átomos mencionados anteriormente. Al saber que otro tipo de átomos pueden estar presentes en la estructura del plástico, se debe a que estos le confieren diversas propiedades al plástico en su aplicación final, y por lo mismo los diferencian entre otros grupos y tipos de plásticos. En la Figura 7.1 se observan las diferentes estructuras que están presentes en algunos plásticos.

Figura 6.1: Estructuras de plásticos petroquímicos convencionales. Tomado de Shah, Hasan, Hameed y Ahmed, (2008)



Por otra parte, menciona que los plásticos son polímeros orgánicos, los cuales entrarían en contradicción con la separación primaria de los RSU, que consiste en identificarlos como residuos orgánicos e inorgánicos, ya que, conforme con la NADF-024-AMBT-2013, “los plásticos deben ser identificados como residuos inorgánicos”. La anterior norma pretende establecer criterios y especificaciones técnicas bajo las cuales se debe realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y valorización de los RSU.

Visto que la cantidad de RSU iba en aumento, no bastó únicamente con la separación primaria en residuos orgánicos e inorgánicos, ya que los residuos inorgánicos son de mayor volumen y tienen mayor complejidad en su reciclaje, por lo que, con respecto a este tipo de residuos, éstos son clasificados conforme con lo indicado en la separación primaria avanzada o en la clasificación acorde con la separación secundaria. Finalmente, esta norma clasifica a los residuos de plástico, de acuerdo con la separación primaria avanzada, en la asignación del color gris que representa a los residuos inorgánicos con potencial de reciclaje (Figura 7.2).

Figura 6.2: Contenedor color gris, para los residuos inorgánicos con potencial de reciclaje. Tomado de Alpro Shop (s.f.)



6.1.3. Contexto histórico de los plásticos

García (2009) comenta que los plásticos han estado presentes desde antes que el ser humano empezara a perforar los pozos petroleros, debido a que los primeros plásticos estuvieron presentes en la naturaleza y al alcance del ser humano. Del mismo modo muestra en su artículo la connotación histórica de cuatro “plásticos naturales”, tratándose del ámbar, el asta natural, la goma laca y la gutapercha.

- En la naturaleza, encontramos al ámbar (Figura 7.3) como una resina de coníferas que, tras derramarse del árbol, se endureció y atrapó en su interior a insectos o plantas al quedar incluidos en ella y han llegado hasta nosotros como fieles testimonios del pasado. (p.70)

Figura 6.3: Insecto atrapado en un fragmento de ámbar. Tomado de Strangis (s.f.)



- “El asta natural (Figura 7.4) del mismo modo tuvo sus aplicaciones en Europa durante el medievo, los trabajadores del cuerno (asteros) realizaban objetos cotidianos con este material, como cucharas, peines o faroles” (García, 2009, p.70).

Figura 6.4: Asta de ciervo. Tomado de Asta de Ciervo (s.f.)



- “La Goma Laca (Figura 7.5) es un polímero natural producido por las secreciones de la hembra de una chinche llamada Lac, originaria de la India y el sudeste de Asia” (García, 2009, p.70).

Figura 6.5: Goma laca descerrada. Tomado de Conservación y Restauración (s.f.)



Por último, “la gutapercha (Figura 7.6) es una goma vegetal similar al caucho que se extraía por sangrado al practicar incisiones a determinados árboles que se hallan en las Indias orientales y en Indonesia” (García, 2009, p.70).

Figura 6.6: Gutapercha. Tomado de Facultad de Estudios Superiores Iztacala (s.f.)



Estos son algunos ejemplos de cuatro recursos naturales que tuvieron gran aplicación por varios años.

A partir de que los primeros plásticos se encontraron en la naturaleza, el ser humano buscó la manera de usarlos para su beneficio. Su asombro fue al conocer la aplicación que tenían dichos plásticos. Se podría pensar que el ser humano buscaba más materiales que tuvieran aplicaciones similares a los plásticos que ya conocía en ese momento, y, por lo tanto, podría haber existido una sobreexplotación de estos, lo que causaría que la disponibilidad por obtener estos materiales en la naturaleza cada vez disminuyera.

A continuación, se muestra un cronograma general sobre la historia del plástico. Dicha información es tomada de Plastics Industry Association, a menos que se muestre otra referencia consultada.

1284

Se tiene la primera mención registrada en The Horners Company of London, del uso del cuerno y conchas, como los plásticos naturales de mayor predominancia.

Siglo XIX

1855

Alexander Parkes inventó la parkesina, conocido el día de hoy como celuloide.

1859

Edwin Drake perforó el primer pozo petrolero del mundo en Pensilvania, quien logró extraer petróleo de una profundidad de aproximadamente 21m.

1862

En la Gran Exhibición Internacional de Londres, el mundo vio el primer ejemplo del plástico hecho por el hombre en la forma de medallones, peines y cuchillos hechos de parkesina. El material, inventado por Alexander Parkes, fue originalmente usado como un sustituto para el marfil.

Siglo XX

1907

Dr. Leo Baekeland inventó la baquelita, el primer plástico sintético creado en el mundo. Fue el material de elección para dispositivos eléctricos, el cual fue usado en las siguientes décadas.

1920

El químico orgánico alemán, Hermann Staudinger, probó la existencia de lo que nosotros conocemos el día de hoy como polímeros. En esos años, las compañías como Dow Chemical y DuPont desarrollaron polímeros para las fuerzas militares, quienes tenían dificultades para encontrar alternativas de fuentes naturales, como la goma laca, caucho, alcanfor y seda

1940

Un artículo de la revista *Popular Mechanics*, publicado en mayo, ilustró las grandes esperanzas para el mundo el poseer materiales plásticos. Este artículo es el siguiente: “Ropas con plásticos de la cabeza a los pies. El estadounidense del mañana vivirá en una casa de plástico, conducirá autos de plástico y volará en aviones de plástico”

“Clothed in plastics from head to foot, the American of tomorrow will live in a plastics house, drive a plastics auto and fly in a plastics airplane.”

1940 – 1950

Góngora (2014) muestra el acontecimiento histórico de la segunda guerra mundial con el impacto de los plásticos:

Tras la Segunda Guerra Mundial, el costo de fundir metales se incrementó de forma acelerada, mientras que moldear plástico era relativamente más barato. Aunque al principio la calidad del plástico era bastante deficiente, a partir de los años cincuenta, la calidad de los productos plásticos fue en aumento, y con ayuda de diseñadores que creían que el plástico podría ser utilizado de modo más eficiente, no sólo como un sustituto de otros materiales, sino para crear nuevos productos, más versátiles y con mejor diseño. (Góngora, 2014, p.6)

1950

García (2009) termina el recorrido histórico con lo siguiente “Durante la década de los años 50, Karl Ziegler y Giulio Natta realizan estudios e investigaciones sobre catalizadores metalocénicos, trabajo que culminó con el Premio Nóbel de Química que recibieron ambos en 1963” (García, 2009, p.77).

Hoy

- Impresoras 3D.
- Pantallas de plástico flexibles.

- Celdas de plástico solar.

Futuro

- Producción de plásticos biodegradables y compostables.
- Reducción de componentes plásticos en objetos y reciclaje.
- Todas las industrias cuenten con sistemas de tratamiento de sus productos en su vida final.
- Producción de plástico al usar recursos que no provengan del petróleo o gas natural.
- Lo que la imaginación desee.

Si se analiza la cronología anterior, la industria del plástico tiene menos de 2 siglos de existencia, y la realidad es que esta industria ha simplificado la forma de uso y consumo de las personas en los sectores automotriz, salud, construcción, entre otros.

Sin embargo, este aumento en la producción y uso de estos productos ha provocado que surja la problemática de la acumulación excesiva de plásticos en diversos ecosistemas, y que causa que varias industrias se sumen a la tendencia amable con el ambiente y apuesten por la producción de plásticos biodegradables o compostables, así como aumentar la eficiencia y eficacia en el uso de recursos.

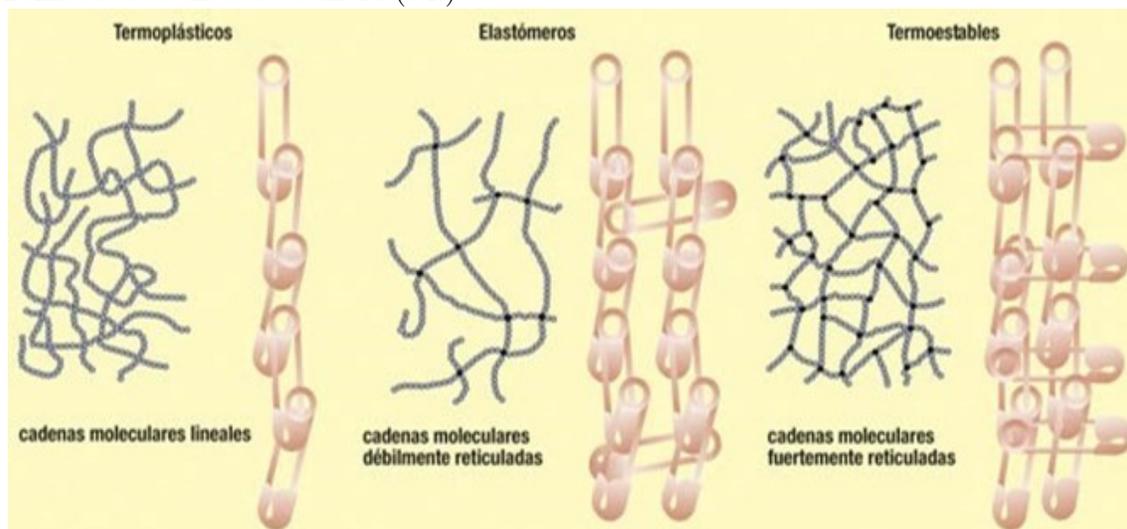
6.1.4. Categorías de plásticos

Al retomar la investigación de Góngora (2014), resume lo siguiente: “Existen tres categorías generales:

- Plásticos naturales: aquellos productos de la naturaleza que pueden ser moldeados mediante calor.
- Plásticos semisintéticos: aquellos que derivan de productos naturales y que han sido modificados o alterados mediante la mezcla con otros materiales. A este tipo de plástico corresponden los derivados celulósicos, como el nitrato de celulosa y el acetato de celulosa.
- Plásticos sintéticos: aquellos derivados de alterar la estructura molecular de materiales a base de carbono (petróleo crudo, por lo general, carbón o gas) (Góngora, 2014, p.6)

Al complementar lo anterior, Maddah (2016) clasifica a los plásticos por su estructura interna “Los plásticos están categorizados en cuatro grupos principales: termoplásticos, elastómeros, termofijos (o termoestables) y materiales compuestos derivados de polímeros”. (Figura 7.7)

Figura 6.7: Visualización de las estructuras moleculares de tres categorías de plásticos. Tomado de Junta de Galicia (s.f.)



Desde otra perspectiva, López (2000) menciona que hay una clasificación de plásticos conforme con su composición química. La misma autora señala que “se encuentran los plásticos que pueden ser homopolímeros o copolímeros:

Homopolímero: Contiene una sola clase o tipo de monómero que reacciona mediante ciertos iniciadores (peróxido orgánico) a una determinada presión y temperatura.

Copolímero: Contiene dos o más monómeros que polimerizan conjuntamente (cada uno llamado co-monómero). Según el arreglo que toman en la cadena pueden ser:

- Al azar.- Cuando no existe ningún orden entre los monómeros.
- Alternados.- Se alternan los diferentes monómeros en una secuencia.
- Bloque.- Las moléculas toman lugar por grupos definidos, primero dos monómeros o más de un tipo, después dos monómeros de otro tipo, etc.
- Injerto.- Hay una cadena principal de un solo monómero, pero se insertan pequeñas cadenas de otro tipo de monómero. (p.10 - 11)

En la clasificación de plásticos por su estructura interna, Flores (2013) explica que:

- Los termoplásticos son resinas con una estructura molecular lineal, que durante el moldeo en caliente no sufren ninguna modificación química. Su comportamiento deriva de las propiedades y de la misma estructura molecular del polímero. Se estima que, de todos los plásticos usados en el mundo, más del 75 por ciento son termoplásticos.
- Los termofijos sólo pueden ser fundidas una sola vez. Las resinas de este grupo se caracterizan por tener una estructura molecular reticulada o entrelazada, se funden por la acción del calor, pero si se continua la aplicación de calor, experimentan un cambio químico irreversible, el material no puede ser utilizado nuevamente, como ejemplo de resinas termoestables tenemos resinas fenol-formaldehído, epóxicas, etc. (p.16)

Por otra parte, López (2000) define a los elastómeros como:

- Polímeros elásticos, sus macromoléculas están entrecruzadas por enlaces químicos y comprenden los hules naturales y todos los hules sintéticos. Son materiales que recuperan casi totalmente su forma original después de aplicar una fuerza sobre ellos. (p.12)

Una vez con el conocimiento de que los plásticos constituyentes de los envases de alimentos pertenecen a la categoría de los termoplásticos, estos plásticos en teoría se pueden reciclar, pero la realidad es que, al menos en México, esta opción está alejada de ser la primera forma de disposición final.

Con lo ya conocido sobre los termoplásticos, y a partir de López (2000), expone que este tipo de plásticos se subdividen acorde con su arreglo molecular en amorfos y cristalinos.

- Amorfos: son materiales que funden en un intervalo de temperatura, esto es, no existe un punto de fusión preciso, en su lugar el material pasa del estado sólido al viscoso a medida que aumenta la temperatura para finalmente convertirse en un fluido. Las moléculas están en completo desorden, por lo que a través de los huecos dejan pasar la luz. Son plásticos transparentes o translúcidos y como ejemplo de estos se tienen a resinas celulósicas, metacrílicas, entre otras.
- Semicristalinos: están constituidos por partes amorfas y partes cristalinas, presentan un punto de fusión característico. La estructura semicristalina hace a estos materiales más resistente a los agentes químicos, solventes, sustancias ácidas o básicas y menos sensibles a los aumentos de temperatura, en tanto que mantienen las características de resistencia mecánica y de rigidez hasta la proximidad del punto de fusión. El paso de la luz en estas moléculas se dificulta por consecuencia son materiales translúcidos. (p.11)

Por su parte, Maddah (2016) expone que los termoplásticos están divididos en dos clasificaciones, los cuales son:

- “Commodity thermoplastics”. A este grupo pertenecen las resinas de termoplástico de uso común.
- “Engineering thermoplastics”. Es el segundo grupo de termoplásticos, y los productos en esta clase están relacionados a aplicaciones mecánicas y eléctricas. (p.3)

Fabricación de plásticos

La fabricación del plástico surge principalmente a partir del petróleo crudo, aunque esto no indica que sea la única fuente. Por ese motivo, en la página *Plastics Europe* (s.f), complementa con lo siguiente:

La producción del plástico empieza con la extracción del petróleo y posteriormente con la destilación en una refinería, donde el petróleo crudo se separa en grupos de componentes más ligeros, denominados fracciones. Una de esas fracciones, la nafta, es el compuesto esencial para la producción del plástico. (Figura 7.8)

Figura 6.8: Transformación del petróleo. Tomado de Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (s.f.)



En la página del INEGI (s.f), se describe la transformación del petróleo. En dicha página señalan que:

El crudo que no se lleva a los buques-tanque para su exportación, es conducido a las refinerías. De ahí, el petróleo se introduce en torres o recipientes alargados de acero (columnas de destilación) en cuyo interior hay compartimientos que permiten la separación de los diferentes hidrocarburos, según su densidad. La torre se calienta hasta alcanzar los 400°C y hace que los vapores suban a través de diferentes secciones, donde las sustancias se condensan de acuerdo con sus características.

Cracking

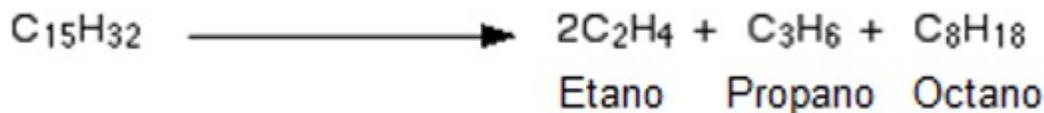
Para esta sección de la tesis, se consultó el documento en línea realizado por Clark (2003). Ante esta aclaración se procede a su descripción:

El cracking es el nombre dado para el rompimiento de moléculas hidrocarbonadas largas en unidades más pequeñas y más útiles. Esto es logrado al usar altas presiones, así como altas temperaturas, sin el uso de un catalizador, o bajas temperaturas, así como bajas presiones, en presencia de un catalizador.

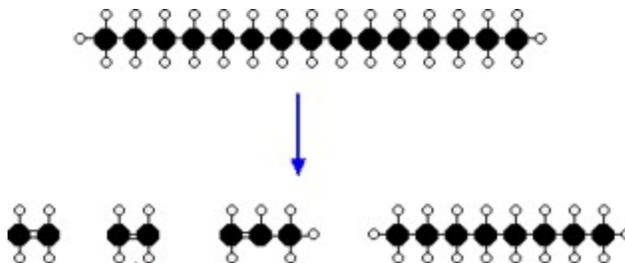
La fuente de las moléculas largas de hidrocarburo es frecuentemente la fracción nafta o la fracción del gasóleo (o diésel) de la destilación fraccional del petróleo crudo. Estas fracciones son obtenidas del proceso de destilación como líquidos, pero son revaporizados antes del cracking. Al consultar Plastics Europe(2016), “cerca del 23 % del propileno usado es producido en refinerías por el cracking catalítico fluido (FCC por sus siglas en inglés) de materias primas pesadas, por ejemplo, el gasóleo y otros residuos de destilación”.

A su vez, Clark (s.f) indica que:

No hay una reacción única que ocurre en el cracker. Las moléculas de hidrocarburo son separadas en una manera aleatoria para producir mezclas de hidrocarburos más pequeños, algunos de los cuales tienen enlaces dobles carbono – carbono. Una de las reacciones posibles que involucra el hidrocarburo $C_{15}H_{32}$ sería:



O, mostrado de diferente forma lo que les ocurre a los átomos y enlaces:



Esta es sólo una manera en la cual esta molécula se rompe. El eteno y el propeno son materiales importantes para la producción de plásticos o también para otras sustancias químicas orgánicas. El octano es una de las moléculas encontradas en la gasolina.

Cracking catalítico

De igual forma, el mismo autor señala:

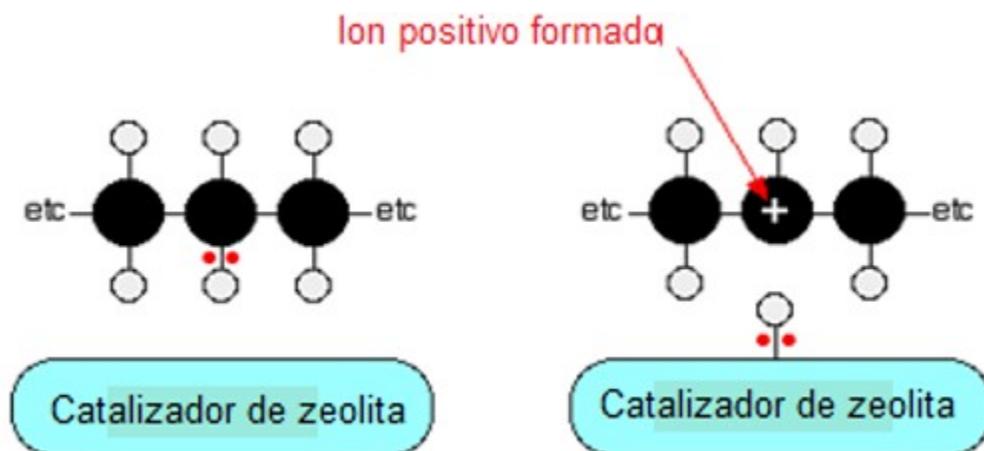
El cracking moderno usa zeolitas como catalizador. Estos son aluminosilicatos complejos y son largas rejillas de átomos de aluminio, silicón y oxígeno, que portan una carga negativa. Estos están asociados con iones positivos como los iones de sodio.

El alcano es puesto en contacto con el catalizador a la temperatura de 500°C y a baja presión.

Las zeolitas usadas en el cracking catalítico son buscadas para dar grandes porcentajes de hidrocarburos entre 5 y 10 átomos de carbono – particularmente usados para gasolina. También produce grandes proporciones de alcanos ramificados e hidrocarburos aromáticos como el benceno.

El catalizador de zeolita tiene sitios, los cuales pueden remover un hidrógeno de un alcano junto con los dos electrones los cuales se unen al carbono. Esto libera el átomo de carbono con una carga positiva (Figura 7.9). Los iones como este son llamados iones carbonio (o carbocationes). La reorganización de estos conduce a los varios productos de la reacción.

Figura 6.9: Formación de un catión en el proceso de cracking. Tomado de Chem Guide (s.f.)



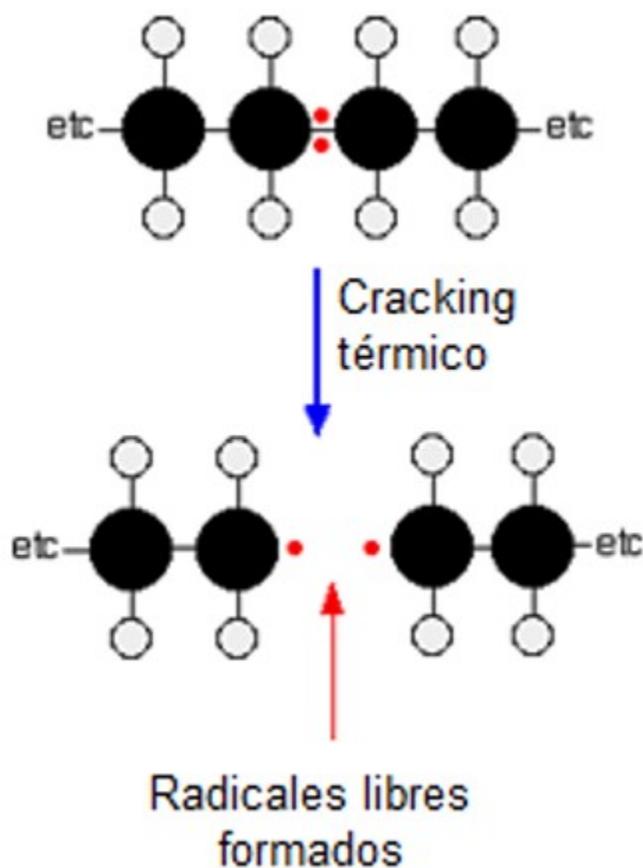
Cracking térmico

En la misma línea que el autor describe el proceso de cracking, se ilustra ahora el proceso de cracking térmico:

En el cracking térmico, se usan altas temperaturas (típicamente en el intervalo de 450 °C a 750 °C) y presiones (mayores de 70 atm), las cuales son usadas para separar las largas cadenas de hidrocarburo y obtener pequeñas cadenas. El cracking térmico da una mezcla de productos que contiene altas proporciones de hidrocarburos con dobles enlaces – alquenos.

El cracking térmico no va por vía de intermediarios iónicos como el cracking catalítico. En lugar de eso, los enlaces carbono – carbono son separados y esto causa que cada átomo de carbono termina con un electrón sencillo. En otras palabras, son formados radicales libres (Figura 7.10).

Figura 6.10: Formación de radicales en el proceso de cracking térmico. Tomado de Chem Guide (s.f.)



Las reacciones de los radicales libres conducen a varios productos.

Figura 6.11: Secuencia de pasos para el cracking. Tomado de Dynamics Science (s.f.)

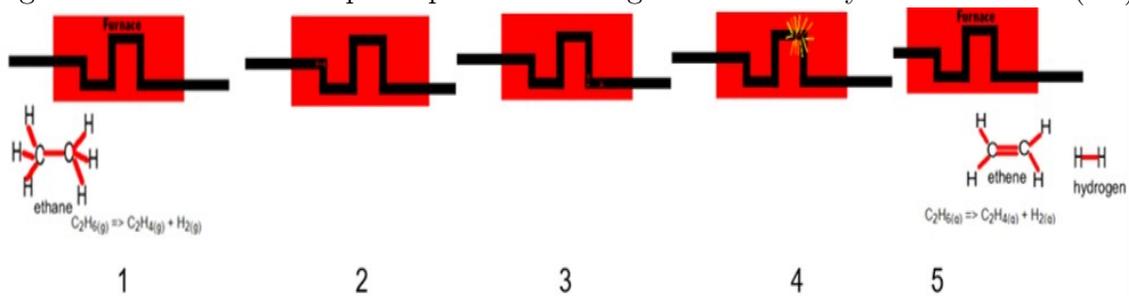
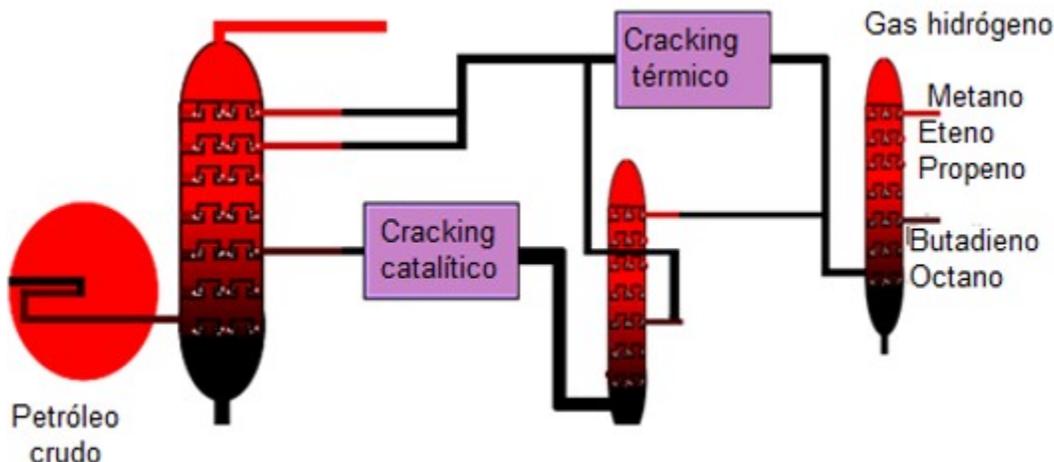


Figura 6.12: Formación de productos en el proceso de cracking térmico y catalítico. Tomado de Dynamics Science (s.f.)



Se mencionó anteriormente que los plásticos son largas cadenas de polímeros, las cuales están conformadas por varias unidades de monómeros (Figura 7.13). Una vez que se obtiene la nafta y se somete a cracking, se obtienen los monómeros por la refinación del petróleo. De acuerdo con Petroleum (2015), menciona que “es importante que los monómeros deben tener un alto grado de pureza, porque en presencia de contaminación, pueden conducir a la producción de un plástico débil o quebradizo al final”.

Figura 6.13: Componentes básicos de la producción de plásticos. Adaptado de Petroleum (s.f.)



Polimerización

Para que los monómeros permanezcan en ‘una cadena’, ocurre el proceso de polimerización (Figura 7.14):

Es el proceso de conectar monómeros unidos en una cadena. Hay dos métodos básicos de polimerización: adición y condensación. Al momento en que los mismos monómeros son usados en una reacción, son llamados polímeros, pero si dos o más diferentes monómeros son usados para hacer una cadena, el producto resultante es llamado copolímero.

Figura 6.14: Representación de un polímero y copolímero. Adaptado de Petroleum (s.f.)

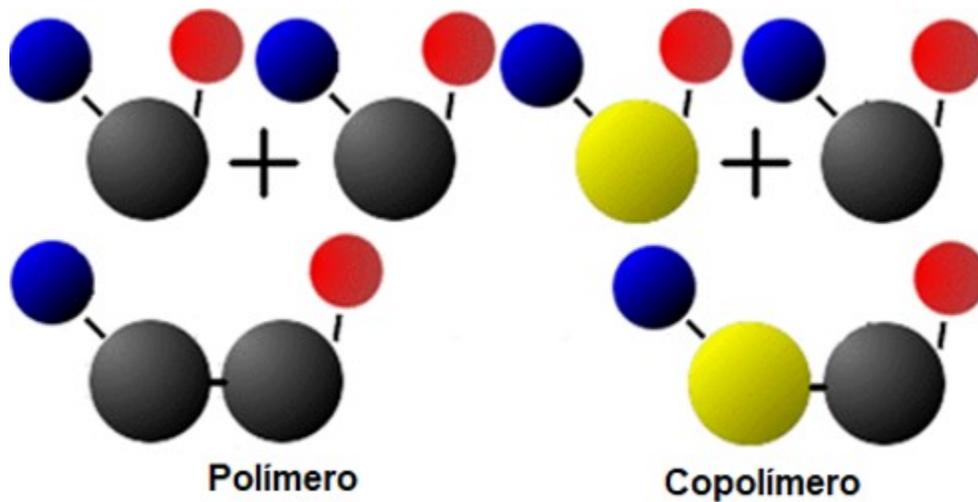
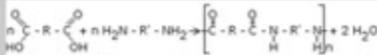


Tabla 6.1: Diferencias de los dos tipos de polimerización. Adaptado de Petroleum (s.f.)

Diferencias de los dos tipos de polimerización	
Polimerización de condensación	Polimerización de adición
Una reacción de condensación un producto secundario como agua o alcohol	No involucran la pérdida de cualquier otro átomo o molécula, así que lo que va en la reacción, permanece en la reacción.
No sólo es usada para producir plásticos, sino que también es usada por organismos vivos para hacer moléculas largas y complejas como el DNA, RNA, proteínas, triglicéridos, almidón, glucógeno, y muchas más. Sin la polimerización de condensación, es seguro que no habría vida en la tierra.	No se encuentra presente en las reacciones biológicas
En la producción de plásticos, la condensación es usada para fabricar plásticos como los poliésteres y el nylon.	Los polímeros formados por este proceso incluyen al polipropileno, cloruro de polivinilo, el teflón, poliestireno y muchos otros tipos de cauchos.
La mayoría de estos plásticos son biodegradables.	No son biodegradables
$nM \rightarrow \{M\}_n$ <p style="text-align: center;">(Monómero) (Polímero)</p>	 $n \text{HO}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{R} + n \text{H}_2\text{N}-\text{R}'-\text{NH}_2 \rightarrow \left[\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{R}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{N}-\text{R}'-\text{NH} \right]_n + 2n \text{H}_2\text{O}$

Pellets

En la misma página (Petroleum (s.f.)) se menciona lo siguiente:

En general, para su uso en la industria, los plásticos deben primero estar presentes en la forma de pellets. Esto es, en forma de fibras largas. Esto ocurre en caso de que una reacción de polimerización es realizada continuamente, y que produce una larga y delgada fibra de plástico. Esta fibra es después extruida en una forma estándar y cortada en delgadas láminas. Estas láminas son llamadas pellets y pueden ser transportados a cualquier lugar, para posteriormente ser recalentados y producir así un producto final.

Producción final Del mismo modo, por terminar, en la referencia de Petroleum (2015) indican que:

Los pellets pueden ser calentados y modificados en productos de diferentes formas, al ser que lo más importantes son los que se indican a continuación:

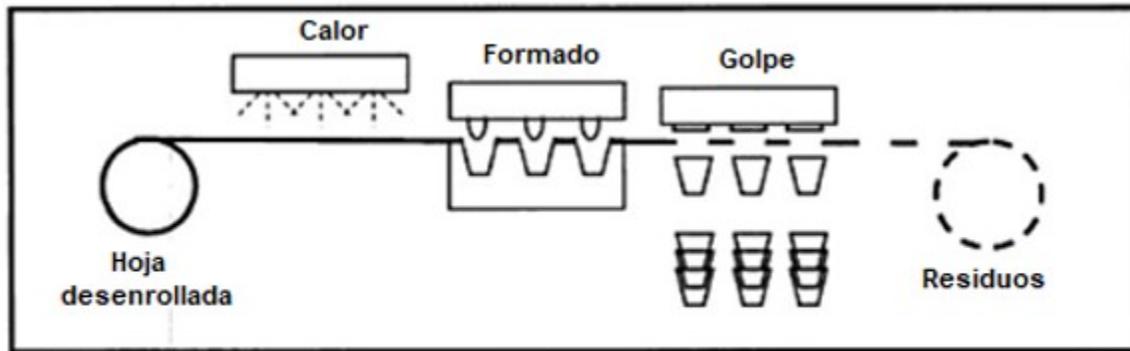
- **Extrusión:** Los pellets están forzados por una apertura pequeña (la forma varía) para hacer una cadena larga y continua.
- **Moldeo por inyección:** Los pellets son forzados, bajo una alta presión en un molde que tiene una forma específica. El molde es enfriado y expulsa un plástico que tiene la misma forma. Esto es como los contenedores y los tubos son hechos.
- **Blow molding (moldeo por soplado):** Los pellets son calentados y comprimidos en un tubo que es forzado en un molde. El aire es después inflado en el plástico caliente para forzarlo contra los lados del molde. El molde es después enfriado y al final es liberado. Este proceso es como las botellas de plástico están hechas.
- **Rotational Molding (moldeo rotacional):** En este proceso, el molde es rotado con los pellets calentados dentro, y posteriormente con el paso del tiempo son lentamente enfriados. Este proceso está presente en los juguetes, muebles y las latas”.

Por su parte, Franklin Associates (2011), menciona que el proceso de termoformado es:

Parecido al moldeo por inyección, una lámina de polipropileno extruida es alimentada en un rollo o a un extrusor de una cámara calentada donde el plástico es ablandado. Después la lámina está sujeta a un molde que adopta la forma presente en el mismo.

La Figura 7.15 muestra el proceso de termoformado para los plásticos.

Figura 6.15: Principales fases del proceso de termoformado. Adaptado de Franklin Associates (2011)



Principales fases del proceso de termoformado, por Hannay 2002

En el proceso de termoformado:

En el momento en que se hace uso de una lámina de plástico de grosor delgado, o tipo película, se utiliza para producir empaques reciclables; desechables; para instrumentos médicos y productos generales, tales como contenedores, vasos, tapas y bandejas. En otra parte, la fibra de plástico de espesor gruesa es utilizada para producir elementos más grandes y normalmente más permanentes, tales como tarimas plásticas, soportes de camas, entre otros usos más. (Franklin Associates, 2011, p.40).

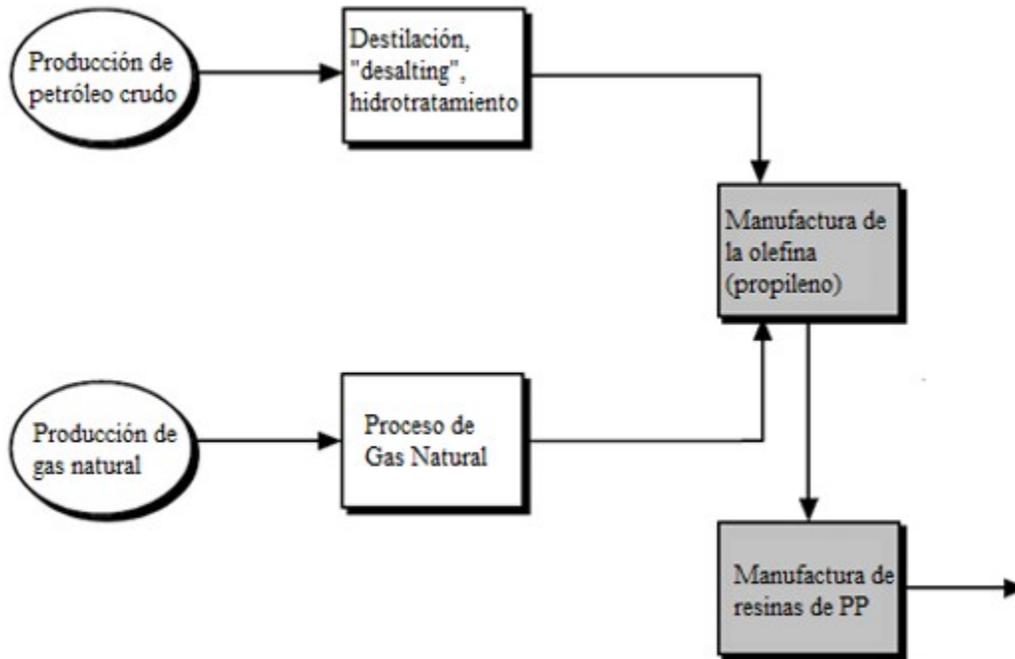
Al revisar de nuevo a Franklin Associates (2011) se describe que “el proceso de termoformado es una técnica de fabricación para la creación rápida de grandes cantidades de artículos plásticos”.

En la Figura 7 se observa que para la producción de resinas de polipropileno se parte de una materia prima que procede del petróleo crudo y gas natural. De acuerdo con el U.S. Energy Information Administration (s.f) se cita lo siguiente:

Aunque el petróleo crudo es una fuente de materia prima para la producción de plásticos, no es la mayor fuente de materia prima para la fabricación de dichos productos en los Estados Unidos. Los plásticos son producidos también por el gas natural, materias primas derivados del procesamiento de gas natural, y las materias primas derivadas de la refinación de petróleo crudo. La Administración

de Información de Energía de los Estados Unidos (EIA) está incapacitada para determinar las cantidades específicas o el origen de las materias primas que son usadas actualmente para la producción de plásticos en los Estados Unidos.

Figura 6.16: Diagrama de flujo para la producción de resinas vírgenes del PP. Adaptado de Franklin Associates (2011)

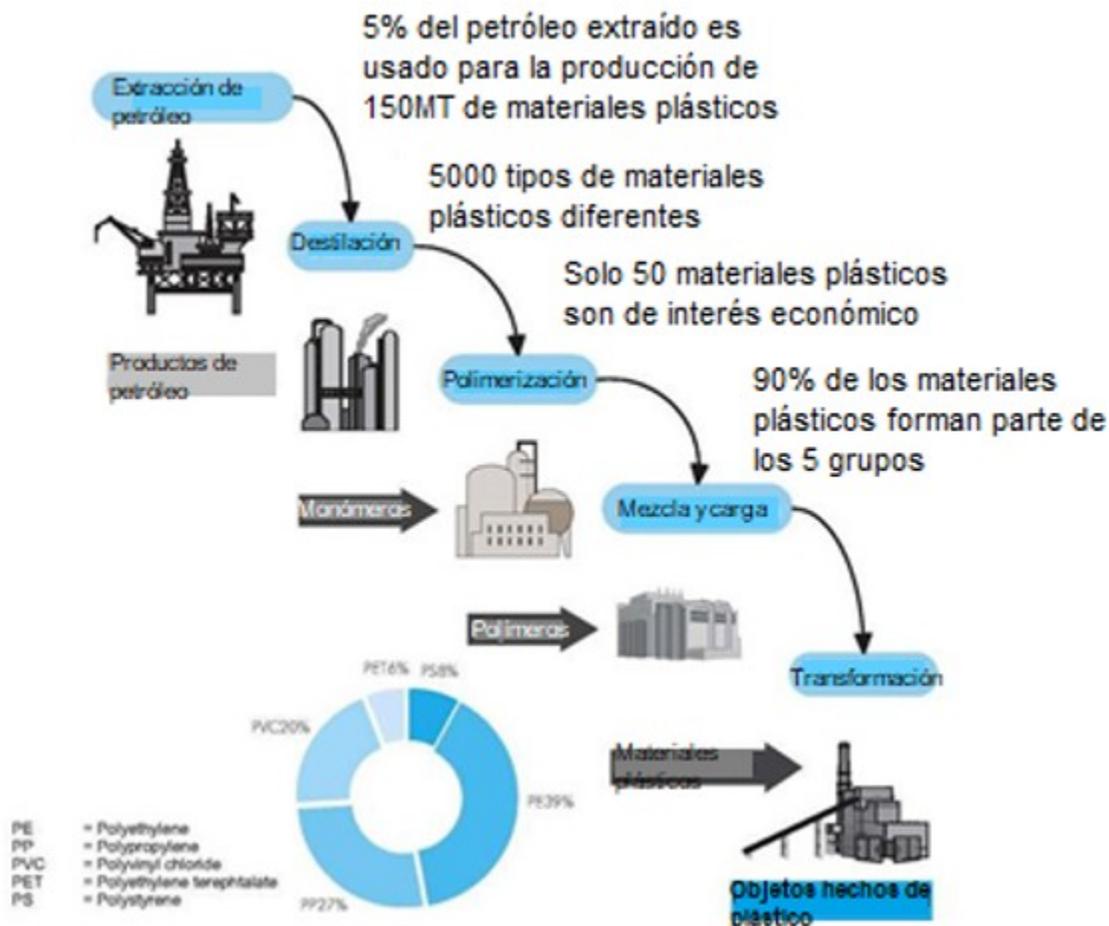


En la anterior referencia (USEIA, s.f.) se indica que:

“La industria petroquímica también consume grandes cantidades de líquidos de hidrocarburos gaseosos (hydrocarbon gas liquids, HGL), el cual podría ser producido por refinerías petroleras o plantas de procesamiento de gas natural. En el 2017, 86 % del HGL producido en los Estados Unidos fueron subproductos del procesamiento de gas natural, y el restante 14 % fueron de refinerías de petróleo crudo”.

Para ilustrar la sección 2.1.8 “Fabricación de plásticos”, se puede resumir a grandes rasgos en la Figura 7.16: primero se extrae el petróleo crudo o el gas natural, después se somete a destilación. Posteriormente se somete a cracking para así dirigirlo al proceso de la destilación. Después se mezcla y se carga, para finalmente transformarlo.

Figura 6.17: Importancia y estructura de la industria plástica. Adaptado de Commission Ocean Indien (s.f.)



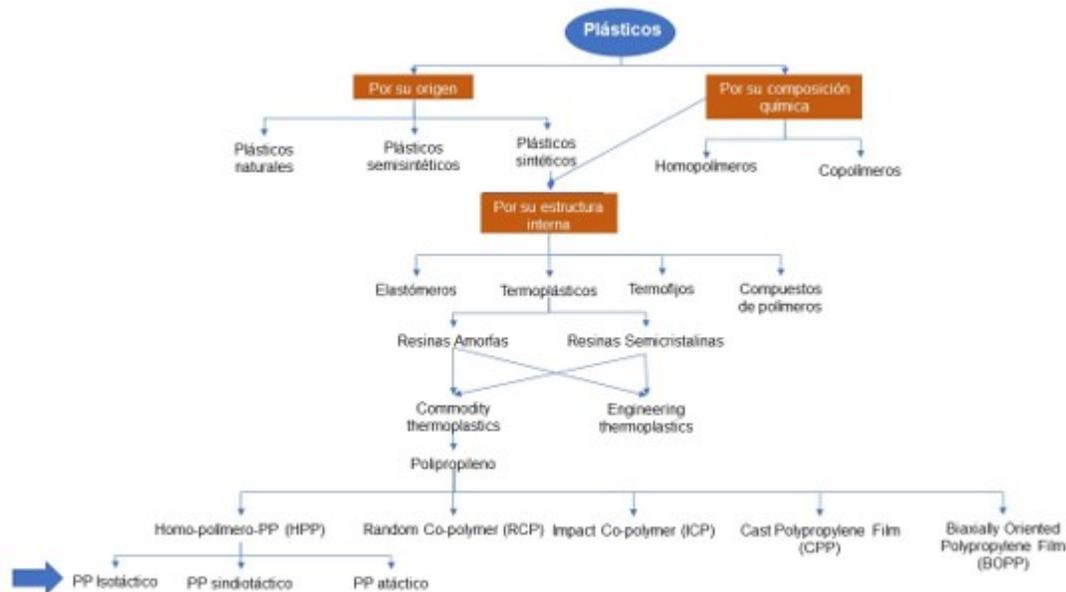
En otras palabras, Affeldt et al. (2016) comentan que se debe notar que hay dos principales tipos de películas de polipropileno que pueden ser producidas “cast polypropylene film (CPP) y biaxially oriented polypropylene film (BOPP). Estos diferentes tipos de películas del PP tienen diferentes propiedades. La variación del “cast film” es más blando debido a una densidad más baja, y es resistente al “cross directional tears”. Por otra parte, BOPP es más rígido y tiene propiedades de barrera más fuertes que el CPP”.

Los anteriores autores presentan la participación de mercado para los tipos del

PP: “HPP 65 – 75 %, el ICP 20 – 30 % y el RCP 5 – 10 %. Generalmente, los diferentes grados del PP dependen de la aplicación requerida. Los grados comerciales están disponibles en una variedad de distribuciones de peso molecular, y los tipos de co-monómeros así como contenidos y aditivos”.

Con las clasificaciones anteriores, se compila la clasificación de plásticos en un solo diagrama, el cual es la que se muestra a continuación (Figura 7.18):

Figura 6.18: Clasificación de los plásticos. Creación propia

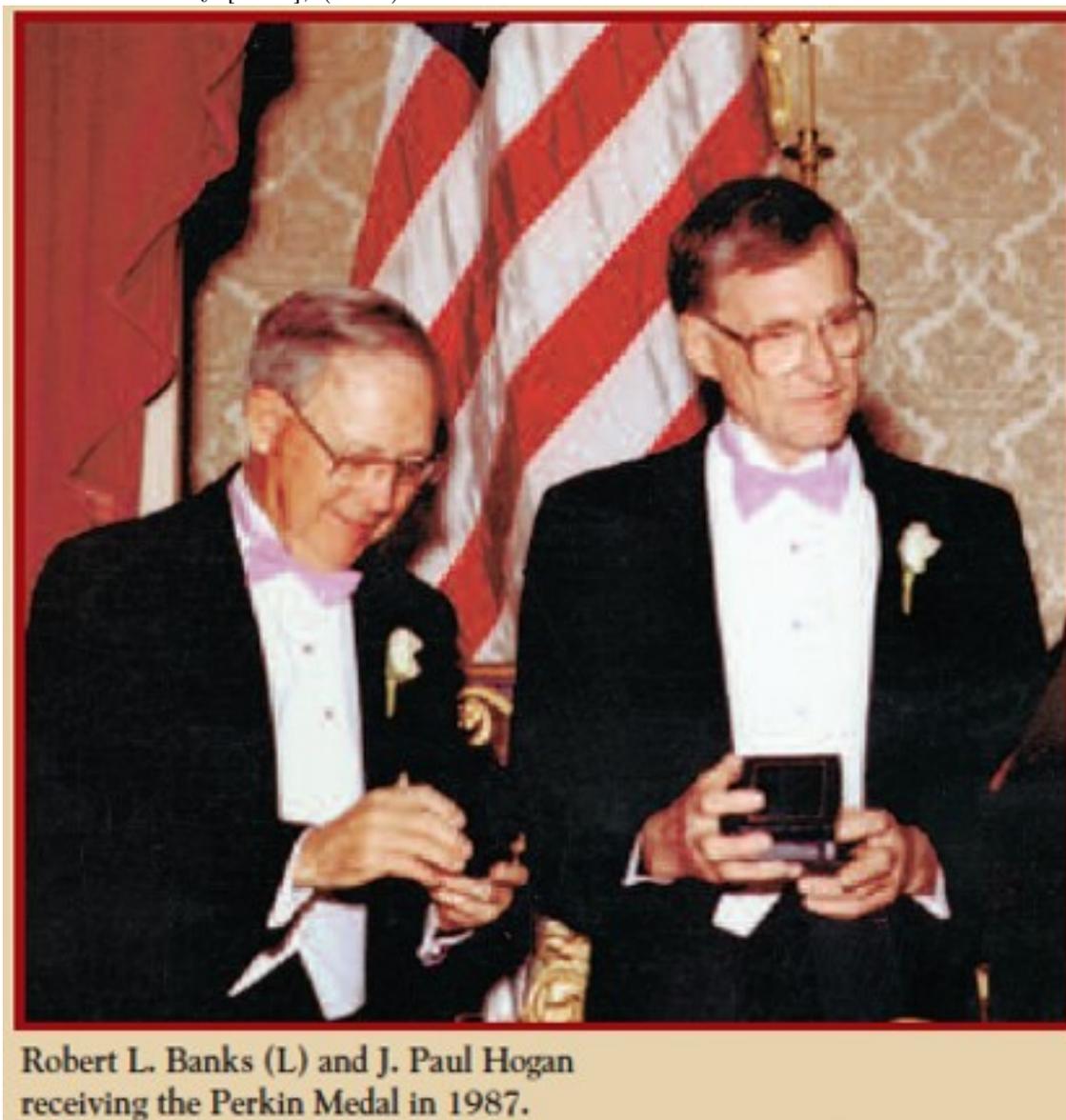


6.1.5. Contexto histórico

El contexto histórico del polipropileno fue consultado del documento redactado por Phillips Petroleum Company (Figura 7.19). El extracto de este documento es el que se muestra a continuación: “La compañía Phillips Petroleum en Bartlesville, Oklahoma, entró comercialmente a la industria del plástico en 1951, con el descubrimiento de los investigadores J. Paul Hogan y Robert L. Banks. Los dos investigadores habían buscado formas de convertir el etileno y propileno – hidrocarburos producidos

al refinar el gas natural – en componentes para gasolina. En el proceso, ellos encontraron los catalizadores que transformarían estos productos en polímeros sólidos. Los plásticos que descubrieron polipropileno cristalino y polietileno de alta densidad son ahora el núcleo de una industria global multibillonaria.

Figura 6.19: Banks y Hogan al recibir la Medalla Perkin en 1987. Tomado de American Chemical Society [ACS], (1999)



Robert L. Banks (L) and J. Paul Hogan receiving the Perkin Medal in 1987.

A finales de 1940, como la segunda guerra mundial estaba en su punto más alto

y la demanda de gasolina aumentaba, Phillips buscó maneras de expandir sus líneas de producción. Con grandes cantidades de gas natural en la industria, los químicos e ingenieros de Phillips, investigaron maneras de utilizar el propileno y etileno, productos del proceso de refinamiento. Hogan y Banks fueron responsables de estudiar los procesos por los cuales estos gases podrían convertirse en componentes de gasolina. En el curso de estas investigaciones, Hogan y Banks empezaron a estudiar catalizadores y lo que los hace funcionar. En junio de 1951, ellos realizaron un experimento, en el cual, modificaron los catalizadores originales (óxido de níquel) por pequeñas cantidades de óxido de cromo. Normalmente, la combinación fue pensada en producir hidrocarburos de bajo peso molecular. Al mismo tiempo, alimentaron el propileno, junto a un transportador de propano, en una manguera empacada con el catalizador y esperaron por el resultado que estaban acostumbrados a obtener. Como Paul Hogan lo recuerda, él estaba afuera del laboratorio y de pronto Banks lo alcanzó con lo siguiente: ‘Hey, hemos obtenido algo nuevo que nunca habíamos visto antes, que viene de nuestra caldera’. Al regresar al laboratorio, ellos vieron que el óxido de níquel había producido los líquidos esperados (componentes de gasolina), pero el óxido de cromo había producido un material sólido y blanco. Hogan y Banks descubrieron un nuevo polímero – el polipropileno cristalino - Hogan dijo que su reacción fue inmediata: se sentó en su escritorio y escribió la idea para patente y él y Banks lo firmaron. Con el apoyo de la administración de Phillips, Hogan y Banks rápidamente cambiaron sus actividades de investigación de la producción de gasolina al descubrimiento de plásticos. La administración de Phillips fomentó la creación de nuevos plásticos desde la producción en laboratorio a la producción a escala comercial en menos de 6 años – lo cual no significó una dificultad para una nueva compañía petrolera para la industria de plásticos. Paul Hogan y Robert Banks firmaron la idea de patente al describir el proceso por el cual ellos produjeron el polipropileno cristalino una hora después de su descubrimiento. (Phillips Petroleum Company, 1999)

Se creyó por muchos años que el Prof. Ziegler y el científico italiano Giulio Natta fueron los responsables del descubrimiento del polipropileno, porque ellos habían sido

los primeros en publicar sus resultados – y porque ellos recibieron el Premio Nobel en 1963 por sus descubrimientos en el campo de la química y tecnología de grandes polímeros. “Sin embargo, en 1983 una corte apeló que la patente pertenecía a Hogan, Banks y a Phillips Petroleum Company”.

6.1.6. Generalidades sobre el vanadio

En conformidad con el UK Marine Special Areas of Conservation [UKMarine-SACs] (s.f) se indican las características más generales del vanadio:

El vanadio es un metal grisáceo que se encuentra en la forma de dos isótopos naturales ^{50}V y ^{51}V , lo cual forma los estados de oxidación de -1, 0, +2, +3, +4, y +5. Los estados de oxidación +3, +4, y +5 son los más comunes. El estado de oxidación +4 es el más estable. (Figura 7.20)

Figura 6.20: Los colores del vanadio. Adaptado de La ciencia es bella (2013)

Estados de oxidación	+5	+4	+3	+2
Óxidos	V_2O_5	VO_2	V_2O_3	VO
Especies en medio ácido	VO_2^+ Amarillo	VO^{2+} Azul	V^{3+} Verde	V^{2+} Violeta
Propiedades redox	Oxidante fuerte	Oxidante débil	Reductor muy débil	Buen reductor

Por su parte, la ATSDR (2012) menciona que “el vanadio elemental no está presente en la naturaleza”.

La Figura 7.21 muestra los compuestos de vanadio que son de interés farmacoló-

gico:

Figura 6.21: Compuestos del vanadio toxicológicamente importantes. Adaptado de Gummow (2011)

Compuestos del vanadio toxicológicamente importantes

Nombre del compuesto	Fórmula química
Pentóxido de vanadio	V_2O_5
Metavanadato de sodio	$NaVO_3$
Ortovanadato de sodio	Na_3VO_4
Sulfato de vanadil	$VOSO_4$
Metavanadato de amonio	NH_4VO_3

Exposición al vanadio en humanos

Tabla 6.2: Rutas de exposición al vanadio. Adaptado de Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], (2012)

Exposición al vanadio	
Ruta de exposición	Descripción
Ingesta	<p>La mayoría de los alimentos contienen bajas concentraciones de vanadio. Los productos del mar generalmente contienen concentraciones más altas de vanadio que animales terrestres.</p> <p>La ingesta diaria de vanadio va desde los 0.01 mg hasta los 0.02 mg. En promedio, las concentraciones de vanadio en el agua son de aproximadamente 0.001mg/L.</p> <p>El vanadio también puede ser encontrado en varios suplementos nutricionales comerciales y multivitamínicos en cantidades de 0.0004 a 12.5 mg.</p>
Aire	<p>La mayoría de las personas respiran una baja cantidad de vanadio.</p> <p>Los individuos expuestos al humo de cigarro también podrían estar expuestos a niveles elevados del vanadio. Aproximadamente 0.0004 mg de vanadio es liberado en el humo de un cigarro.</p>
Agua y suelo	<p>Las concentraciones de vanadio en aguas superficiales pueden estar en un intervalo de 0.04 a 220 µg/L.</p>

Efectos potenciales a la salud en seres vivos

Tabla 6.3: Descripción de las vías de exposición en 3 grupos de estudio. Adaptado de Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], (2012)

Grupo de estudio	Vía de exposición	Descripción
Trabajadores	Inhalación	Respirar aire con presencia de pentóxido de vanadio resulta en tos, la cual se puede presentar después de estar expuesto.
Animales de laboratorio	Inhalación	En ratas y ratones se ha observado daño en los pulmones, garganta y a la nariz, al haber estado expuestos al pentóxido de vanadio. Cáncer de pulmón ha sido encontrado en ratones expuestos al pentóxido de vanadio. La Agencia Internacional para la Investigación de Cáncer (IARC) ha determinado que el vanadio es posible cancerígeno para los humanos.
	Oral	Un número de efectos han sido encontrados en ratas y ratones, al ingerir compuestos de vanadio. Estos efectos incluyen: - Disminución en el número de eritrocitos. - Incremento en la presión sanguínea.
Humanos	Oral	Náusea, diarrea y cólicos estomacales han sido reportados en personas que tomaron metavanadato sódico o sulfato de vanadilo para el tratamiento experimental de diabetes.