

**IMPACTOS AMBIENTALES EN EL APROVECHAMIENTO DE PLÁSTICOS  
PARA LA GENERACIÓN DE COMBUSTIBLES**

**SEBASTIAN PINO RANGEL**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.  
2016**

**IMPACTOS AMBIENTALES EN EL APROVECHAMIENTO DE PLÁSTICOS  
PARA LA GENERACIÓN DE COMBUSTIBLES**

**SEBASTIAN PINO RANGEL**

**Monografía para optar por el título de Especialista en  
Gestión Ambiental**

**Orientador  
DORA MARÍA CAÑÓN RODRÍGUEZ  
Ingeniera química**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.  
2016**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Director de la Especialización

---

Firma del Calificador

Bogotá, D.C., Octubre de 2016

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García Peña

Decano Facultad de Educación Permanente y Avanzada

Dr. Luis Fernando Romero Suárez

Director Especialización en Gestión Ambiental

Dr. Francisco Archer Narváez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores

## **DEDICATORIA**

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A todas aquellas personas que, de una manera u otra, han sido claves en mi vida profesional, y por extensión, en la personal. Y por encima de todo a mi familia quien con amor, paciencia y comprensión ha logrado guiarme a lo largo de las etapas de mi vida.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	15
OBJETIVOS	16
1. MARCO CONCEPTUAL	17
1.1 GENERALIDADES	17
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS	19
1.3 PROPIEDADES DE PLÁSTICOS PARA EL APROVECHAMIENTO	22
1.3.1 POLIESTIRENO (PS)	22
1.3.2 POLIPROPILENO (PP)	23
1.3.3 POLIETILENO (PE)	23
1.3.4 POLICLORURO DE VINILO (PVC)	24
1.4 CICLO DE VIDA DE LOS PLÁSTICOS	25
2. METODOS DE APROVECHAMIENTO DE PLÁSTICOS PARA GENERACIÓN DE COMBUSTIBLE	40
2.1 PIRÓLISIS	41
2.1.1 Proceso BASF	43
2.1.2 Proceso BP	45
2.2 HIDROGENACIÓN	46
3. IMPACTOS AMBIENTALES DE LAS ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE PLÁSTICOS PARA GENERACIÓN DE COMBUSTIBLES Y LOS COMBUSTIBLES GENERADOS	49
3.1 COMPARACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES	50
3.1.1 Impactos ambientales de las alternativas de aprovechamiento	50
□ Calidad del aire, ruido y olores	54
□ Generación de aguas residuales	56
3.1.2 Impactos ambientales de los combustibles	57
3.1.3 Análisis de los resultados	61
4. CONCLUSIONES	65
5. RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFIA	67



## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Generación y recuperación de algunos plásticos en EEUU	19
Tabla 2. Abreviaciones, densidad y temperatura de transición vítrea de los termoplásticos más importantes	21
Tabla 3. Propiedades del Poliestireno comparada con otros termoplásticos	23
Tabla 4. Vida útil según la aplicación de los plásticos en Colombia	33
Tabla 5. Clasificación de los países que mayor cantidad de residuos plásticos marinos generan	34
Tabla 6. Códigos y usos comunes de diferentes plásticos	37
Tabla 7. Descripción de diferentes procesos de reciclaje químico de plásticos	40
Tabla 8. Resultados de principales investigaciones realizadas al proceso de pirólisis con residuos de PE, PP y PS usando varias temperaturas	42
Tabla 9. Factores que intervienen en el proceso y producto final de la Pirólisis	43
Tabla 10. Evaluación de impactos ambientales de las alternativas de aprovechamiento según Choon	52
Tabla 11. Composición típica del gas de combustión usado en el proceso de aprovechamiento	54
Tabla 12. Descripción categorías modelo CML2 Baseline	59
Tabla 13. Resultados evaluación de categorías de impacto ambiental según modelo CML2 Baseline según Dincă.	60
Tabla 14. Comparación impactos ambientales combustibles	61

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Etapas del proceso de extrusión de plásticos	27
Figura 2. Máquina de moldeo por inyección	28
Figura 3. Etapas del proceso de moldeo por soplado	28
Figura 4. Etapas del rotomoldeo	29
Figura 5. Esquema de metodos de reciclaje y cadena productiva del plástico	38
Figura 6. Diagrama de bloques proceso de pirólisis BASF	44
Figura 7. Diagrama del proceso BP	45
Figura 8. Diagrama del proceso Veba Oil Ag	47
Figura 9. Evaluación de Impacto Ambiental en el ciclo de un proyecto	50
Figura 10. Metodología seleccionada por Choon para el estudio de impacto ambiental.	51
Figura 11. Matriz calificación según severidad y probabilidad	53
Figura 12. Esquema de un depurador húmedo por aspersion	55

## LISTA DE GRAFICAS

	<b>pág.</b>
Gráfica 1. Diagrama ciclo de vida producto general	25
Gráfica 2. Esquema general ciclo de vida de los plásticos	26
Gráfica 3. Crecimiento porcentual anual de la Fabricación de Productos Plásticos en Colombia entre el año 2009-2014	30
Gráfica 4. Demanda de plásticos en Europa. 2011	31

## ABREVIATURAS

<b>AC</b>	Potencial de acidificación
<b>ACC</b>	Consejo Americano de Química
<b>ADP</b>	Potencial de agotamiento abiótico
<b>AP</b>	Potencial de acidificación
<b>EP</b>	Potencial de eutrofización
<b>EPA</b>	Agencia de Protección Ambiental
<b>FAETP</b>	Potencial de eco toxicidad en agua dulce
<b>GWP</b>	Potencial de calentamiento global
<b>HDPE</b>	Polietileno de alta densidad
<b>HTP</b>	Potencial de toxicidad humana
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>LPDE</b>	Polietileno de baja densidad
<b>MAETP</b>	Potencial de eco toxicidad en agua de mar
<b>MT</b>	Toneladas métricas
<b>PE</b>	Polietileno
<b>PET</b>	Tereftalato Polietileno
<b>POCP</b>	Potencial de oxidación fotoquímica
<b>PP</b>	Polipropileno
<b>PS</b>	Poliestireno
<b>PVC</b>	Policloruro de Vinilo
<b>SPI</b>	Sociedad de la Industria Plástica
<b>TETP</b>	Potencial de eco toxicidad terrestre

## GLOSARIO

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA:** es una metodología que permite identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto

**APROVECHAMIENTO:** se trata de un proceso que permite recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos mediante la recuperación, el reciclado o la regeneración.

**COMBUSTIBLE:** materiales biológicos o derivados que sirven como fuente de energía

**GASES DE EFECTO INVERNADERO:** son gases de origen natural o antropogénico integrantes de la atmosfera causantes del efecto invernadero.

**HIDROGENACIÓN:** proceso bajo el cual los residuos plásticos son tratados con hidrógeno y calor para romper sus cadenas y producir un petroleo sintético que puede ser usado en refinerías y plantas químicas

**IMPACTO AMBIENTAL:** cualquier alteración en el sistema biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad

**MATERIAL PARTICULADO:** conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (excepto agua pura) presentes en suspensión en la atmosfera originadas de actividades naturales o antropogénicas.

**PLÁSTICO:** son compuestos constituidos por moléculas que permiten ser moldeadas mediante presión y calor, que además se caracterizan por presentar una relación resistencia/densidad alta y propiedades de aislantes térmicos y eléctricos.

**PIRÓLISIS:** Es el craqueo de las moléculas por calentamiento en el vacío (es decir, en ausencia de oxígeno). Este proceso genera hidrocarburos líquidos o sólidos que pueden ser luego procesados en refinerías

**POTENCIAL DE ECO-TOXICIDAD:** Es un indicador del método CML2 Baseline 2000 que se refiere a los efectos sobre los ecosistemas de agua dulce, agua de mar y terrestres, como resultado de las emisiones de sustancias tóxicas a aire, agua y suelo. El indicador se aplica a escala mundial, continental, regional o local.

**RESIDUO:** cualquier material descartado o abandonado, puede encontrarse en estado sólido, líquido, semisólido, o con contenido gaseoso.

## RESUMEN

En la monografía se adelanta una comparación entre los impactos ambientales que pueden asociarse al aprovechamiento de los residuos plásticos y los impactos ambientales del producto final del aprovechamiento, en este caso, combustible. Los impactos ambientales generados por los combustibles se estudian considerando la evaluación realizada por Dincă mediante el modelo CML2 Baseline 2000 para cada etapa del ciclo de vida incluyendo la extracción, tratamiento, transporte y combustión. Se estudia la conversión de los plásticos por ser una alternativa ampliamente investigada, un avance tecnológico que presenta múltiples beneficios en la reducción del volumen de residuos plásticos e impactos ambientales adversos, pero hay una perspectiva que pocos autores han considerado, los combustibles generados entran nuevamente al mercado de los combustibles fósiles repitiendo la problemática ambiental presente en un proceso de combustión.

**Palabras claves:** Plásticos, Combustibles, Ambiental, Aprovechamiento, Residuos.

## INTRODUCCION

Desde 1839 cuando Goodyear invento el caucho vulcanizado y Eduard Simon descubrió el poliestireno se ha desarrollado un trabajo continuo en el campo que ha generado grandes descubrimientos, es así, como en los primeros 50 años del siglo XX se sintetizaron más de 15 nuevos tipos de polímeros. Los plásticos son responsables de un sin número de beneficios que han contribuido a mejorar la calidad de vida del ser humano, desde avances en medicina hasta los deportes, están involucrados en la mayoría de bienes de consumo masivo. La Asociación de la Industria Plástica<sup>1</sup> afirma que en Los Estados Unidos la industria plástica mueve más de 374 billones de dólares anuales y genera cerca de 900.000 empleos directos. El consumo de plásticos actual se debe a los procesos de producción de bienes, en los cuales interactúa como intermediario o como producto final, independiente de su actuar en la cadena productiva, su consumo se ve favorecido por las múltiples ventajas que trae a la fabricación de bienes, entre los que se destaca la relación entre su costo y vida útil. Jambeck<sup>2</sup> estima que durante el año 2010 se generaron 275 millones de toneladas métricas (MT) de plástico en 192 países costeros, de las cuales entre 4,8 y 12,7 millones de MT terminan en el océano, lo anterior basado en un cálculo que considera los residuos sólidos generados mundialmente, la densidad poblacional y el estado económico.

El aprovechamiento de los residuos sólidos plásticos para la obtención de diferentes combustibles es una aplicación ampliamente estudiada en el mundo, en 1998 Hashimoto registró una patente de un proceso para la obtención de combustible mediante un proceso de pirólisis, esta patente considera para su funcionalidad solo plásticos que contienen polivinilo de cloruro. No obstante, a pesar de ser ampliamente estudiado los efectos nocivos que tiene la generación de estos combustibles a partir del plástico es un tema ajeno a los estudios en mención, algunos autores destacan los beneficios del proceso sin llevar a cabo un estudio respecto a los impactos negativos y positivos que tienen este tipo de alternativas en materia medio ambiental. Por lo anterior es difícil apreciar el valor real del aprovechamiento debido a las diferentes posiciones que pueden adoptarse.

El presente documento busca desarrollar una comparación entre los impactos ambientales asociados a la operación de una planta de aprovechamiento de plásticos y el combustible generado mediante una metodología descriptiva soportada por estudios de impacto ambiental encontrados en la literatura para cada caso.

---

<sup>1</sup> PLASTIC INDUSTRY TRADE ASSOCIATION, about plastics [electrónico]. S.F. [consultado 26,enero,2016]. Disponible en: <https://www.plasticsindustry.org/aboutplastics/?navItemNumber=1008>

<sup>2</sup> JAMBECK, Jenna. et al. Plastic waste input from land into the ocean. En: Sciencemag [electrónico]. 13, Febrero, vol 347. p 768-771 [consultado: 19, enero, 2016]. Disponible en: [http://www.iswa.org/fileadmin/user\\_upload/Calendar\\_2011\\_03\\_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71\\_\\_2\\_.pdf](http://www.iswa.org/fileadmin/user_upload/Calendar_2011_03_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71__2_.pdf)

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Comparar los impactos ambientales del aprovechamiento de los plásticos frente al combustible generado como producto del proceso.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Describir las características de los plásticos utilizados en el proceso de aprovechamiento
- Estudiar el ciclo de vida de los plásticos utilizados en el proceso de aprovechamiento
- Presentar las alternativas de producción de combustible a partir de plásticos
- Evaluar los impactos ambientales de las alternativas de aprovechamiento de plásticos para generación de combustibles
- Evaluar los impactos ambientales de los combustibles generados en el proceso de aprovechamiento.
- Comparar los resultados obtenidos en las evaluaciones ambientales realizadas anteriormente.



## 1. MARCO CONCEPTUAL

Este capítulo presentará las características generales de los plásticos utilizados en el proceso de aprovechamiento mediante una caracterización básica y una previa depuración de los mismos para entender los más usados.

### 1.1 GENERALIDADES

Los plásticos son un grupo de compuestos orgánicos ampliamente usados en la actualidad en un sinnúmero de aplicaciones, su masificación se dio para la Segunda Guerra Mundial con fines militares, y desde allí su desarrollo no ha parado. La materia prima en la producción de los plásticos es el petróleo, sin embargo es ampliamente conocido que tan solo un 5% del mismo se usa para tal fin.

Desde 1839 cuando Goodyear inventó el caucho vulcanizado y Eduard Simon descubrió el poliestireno se ha desarrollado un trabajo continuo en el campo que ha generado grandes descubrimientos, es así, como en los primeros 50 años del siglo XX se sintetizaron más de 15 nuevos tipos de polímeros. Los plásticos son responsables de un sinnúmero de beneficios que han contribuido a mejorar la calidad de vida del ser humano, desde avances en medicina hasta los deportes, están involucrados en la mayoría de bienes de consumo masivo. La Asociación de la Industria Plástica<sup>3</sup> afirma que en Los Estados Unidos la industria plástica mueve más de 374 billones de dólares anuales y genera cerca de 900.000 empleos directos.

Los plásticos son compuestos constituidos por moléculas que permiten ser moldeadas mediante presión y calor, que además se caracterizan por presentar una relación resistencia/densidad alta y propiedades de aislantes térmicos y eléctricos. La base principal de los plásticos son los polímeros que están clasificados según su estructura y comportamiento al calor. Es importante destacar que de acuerdo con Garay<sup>4</sup>, la palabra plásticos hace referencia a una gran cantidad de sustancias que se diferencian en su composición y propiedades físicas y químicas, lo que permite que sean usados ampliamente en diferentes industrias para generación de bienes o en los procesos productivos para desarrollo de nuevas tecnologías. Por otra parte la Sociedad de la Industria

---

<sup>3</sup> SOCIETY OF THE PLASTIC INDUSTRY, about plastics [electrónico]. S.F. [consultado 26,enero,2016]. Disponible en: <https://www.plasticsindustry.org/aboutplastics/?navItemNumber=1008>

<sup>4</sup> GARAY, Carlos A. et al. Guías Ambientales – Sector Plástico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [electrónico]. julio. ISBN 958 – 97393 - 4 - 2. 2004. [consultado: 16, enero, 2016] Disponible en: [http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias\\_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf](http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf)

Plástica (SPI, por su sigla en inglés) destaca la similitud con los polímeros orgánicos de alto grado y define los plásticos como cadenas moleculares largas que se forman uniendo cadenas cortas de monómeros mediante una reacción conocida como polimerización.

Para 2004 la producción mundial de plásticos alcanzaba aproximadamente los 100 millones de toneladas anuales según las cifras presentadas por Garay<sup>5</sup>. El consumo actual de plásticos se debe a los procesos de producción de bienes, en los cuales interactúa como intermediario o como producto final, independiente de su actuar en la cadena productiva, su consumo se ve favorecido por las múltiples ventajas que trae a la fabricación de bienes, entre los que se destaca la relación entre su costo y vida útil. Como lo referencia Jambeck<sup>6</sup>, durante el año 2010 se generaron 275 millones de toneladas métricas (MT, por sus siglas en inglés) de plástico en 192 países costeros, de las cuales entre 4,8 y 12,7 millones de MT terminan en el océano, lo anterior basado en un cálculo que considera los residuos sólidos generados mundialmente, la densidad poblacional y el estado económico.

La caracterización de la estructura que poseen los polímeros con los que son fabricados los plásticos hacen que las propiedades de degradación de estos últimos sean muy bajas; de acuerdo con Bell<sup>7</sup> se estima un promedio de tiempo de degradación entre 400 y 1000 años para las bolsas plásticas, siendo uno de los de mayor durabilidad. Considerando entonces, que mundialmente la disposición de plásticos reside principalmente, en la disposición final en rellenos sanitarios a cielo abierto, es posible afirmar que la problemática ambiental asociada a la producción de plásticos se encuentra en la generación de residuos.

La Tabla 1 presenta los residuos plásticos generados y recuperados en Estados Unidos según la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), de la cual se puede inferir que el porcentaje de recuperación de dichos desechos es de apenas el 8,8%.

---

<sup>5</sup> GARAY, Carlos A. et al. Guías Ambientales – Sector Plástico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [electrónico]. julio. ISBN 958 – 97393 - 4 - 2. 2004. [consultado: 16, enero, 2016] Disponible en: [http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias\\_Ambientales/Gu%C3%ADAs%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf](http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADAs%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf)

<sup>6</sup> JAMBECK, Jenna. et al. Plastic waste input from land into the ocean. En: Sciencemag [electrónico]. 13, Febrero, vol 347. p 768-771 [consultado: 19, enero, 2016]. Disponible en: [http://www.iswa.org/fileadmin/user\\_upload/Calendar\\_2011\\_03\\_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71\\_\\_2\\_.pdf](http://www.iswa.org/fileadmin/user_upload/Calendar_2011_03_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71__2_.pdf)

<sup>7</sup> BELL, Kirsty y CAVE, Suzie. Comparison of Enviromental Impact of Plastic, Paper and Cloth Bags. En: Research and Library Service Briefing Note. Northern Ireland Assembly [electronico]. paper 36/11. 23, febrero, 2011. [consultado: 19, enero, 2016]. Disponible en: <http://www.niassembly.gov.uk/globalassets/documents/raise/publications/2011/environment/3611.pdf>

**Tabla 1.** Generación y recuperación de algunos plásticos en EEUU

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Type of Product	Generation (Short Tons)	% of Total Generation	Recovery (Short Tons)	% of Total Recovery	Recovery Rate (%)
HDPE	5,530,000	17.4%	570,000	20.4%	10.3%
LDPE/LLDPE	7,350,000	23.1%	390,000	13.9%	5.3%
PET	4,520,000	14.2%	880,000	31.4%	19.5%
PP	7,190,000	22.6%	40,000	1.4%	0.6%
PS	2,240,000	7.1%	20,000	0.7%	0.9%
PVC	870,000	2.7%	0	0%	0%
<b>All Plastics</b>	<b>31,750,000</b>		<b>2,800,000</b>		<b>8.8%</b>

**Fuente:** PLASTICS. Environmental Protection Agency EPA. [electrónico]. 2015. [consultado: 17, julio, 2016] Disponible en: <https://www3.epa.gov/epawaste/conserve/tools/warm/pdfs/Plastics.pdf>

A pesar del inconveniente antes mencionado, en relación a los largos periodos de biodegradabilidad y por consiguiente su acumulación, los plásticos han generado un cambio en el estilo y la calidad de vida del ser humano, y es básicamente por esto que su consumo se incrementa con el paso del tiempo y a medida que se usan para el desarrollo de nuevos productos que mejoran la salud y la seguridad, entre otros aspectos. En concordancia con Pilz<sup>8</sup> quien para 2005 publicó un estudio bajo el cual se presentaban los ahorros energéticos generados a través de la implementación de los plásticos en diferentes industrias, por ejemplo, el uso de PET como envase de bebidas reduce un 52% el consumo de energía comparado con los envases de vidrio o metal, además se reduce en un 55% las emisiones de gases de efecto invernadero bajo las mismas consideraciones.

## 1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS

Como lo indica Piringer<sup>9</sup> los plásticos pueden ser clasificados de tres maneras diferentes: 1. si son hechos completamente de productos naturales convertidos, o si por el contrario son completamente sintéticos, 2. de acuerdo a sus métodos de producción en términos de las reacciones de polimerización mediante la cual son generados: condensación o reacciones de adición y, 3. según sus propiedades

<sup>8</sup> PILZ. Harald. et al. The contribution of plastic products to resource efficiency. Gesellschaft für umfassende Analysen. [electrónico]. enero. 2005. [consultado: 21, julio, 2016] Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/document/gua---the-contribution-of-plastic-products-to-resource-efficiency-full-report---january-2005.aspx>

<sup>9</sup> PIRINGER, Otto G, BANER, Albert L. Plastic Packaging Interactions with food and pharmaceuticals [electrónico] ISBN 978-3-527-31455-3. [consultado: 17, julio, 2016] Disponible en: [http://vchsc.ajums.ac.ir/\\_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf](http://vchsc.ajums.ac.ir/_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf)

físicas en Termoplásticos, Elastómeros y Termoestables, siendo esta última la clasificación de mayor uso y aceptación. A continuación se presentan las definiciones según Schmid<sup>10</sup> de los 3 tipos de polímeros que se pueden establecer según sus propiedades físicas:

- **Elastómeros:** Los elastómeros son polímeros amorfos formados por miles de monómeros entrecruzados que forman largas cadenas que les proporcionan la propiedad de la elasticidad. Los elastómeros deben cumplir con las siguientes características:
  - ✓ Estirarse rápida y considerablemente bajo presión
  - ✓ Contraerse rápidamente
  - ✓ Recobrar completamente sus dimensiones al librarse de la tensión
  
- **Termoestables:** Los polímeros termoestables presentan fuertes enlaces covalentes formados por moléculas de cadena larga entrelazadas en una organización tridimensional. Estos plásticos no pueden ser moldeados o modificados una vez se han solidificado por efecto de la temperatura.
  
- **Termoplásticos:** Los termoplásticos están constituidos por macromoléculas lineales entre las cuales no existen uniones rígidas, solamente enlaces débiles (Fuerzas de Van der Waals, dipolo-dipolo y puentes de hidrogeno). Dichas uniones débiles hacen que a bajas temperaturas sean quebradizos mientras que al aumentar la temperatura se ablandan y son maleables.

De la anterior clasificación se desprenden los diferentes tipos de plásticos ampliamente usados en la industria de producción de bienes, a continuación se presenta la Tabla 2 con las abreviaciones y densidades para la mayoría de estos plásticos:

---

<sup>10</sup> SCHMID, Steven R. Manufactura, ingeniería y tecnología. [electrónico]. 2008. ISBN 978-970-26-1026-7. [consultado: 08, julio, 2016] Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=gilYI9\\_KKAoC&hl=es](https://books.google.com.co/books?id=gilYI9_KKAoC&hl=es)

**Tabla 2.** Abreviaciones, densidad y temperatura de transición vítrea de los termoplásticos más importantes

Polymer	Abbreviation	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Glass transition temperature (°C)
Low-density polyethylene	LDPE	0.915–0.94	–30 ± 15
High-density polyethylene	HDPE	0.945–0.964	–30 ± 15
Linear low-density polyethylene	LLDPE	0.90–0.935	–30 ± 15
Poly-4-methylpentene-1	P4MP1 (PMP)	0.83	55
Polypropylene	PP	0.90–0.91	–17 ± 5
Polystyrene	PS	1.04–1.12	80–100
Acrylonitrile-butadiene-styrene polymer	ABS	1.03–1.07	–
Polymethyl methacrylate	PMMA	1.18–1.24	99–104
Polyvinyl acetate	PVAC	1.19	28–31
Polyvinyl alcohol	PVAL (PVA)	1.19–1.27	70–85
Ethylene-vinyl acetate copolymer	EVA	0.91–0.97	–
Polyvinyl chloride	PVC	1.39–1.43	80–100
Polytetrafluoroethylene	PTFE	2.28–2.30	115–125
Polyethylene terephthalate	PETP (PET)	1.37	67–81
Polybutylene terephthalate	PBTP (PBT)	1.3–1.5	48–55
Polycarbonale	PC	1.20–1.24	120–150
Polyoxymethylene	POM	1.42–1.435	188–199
Polyamide	PA	1.12–1.14	50–60

**Fuente:** PIRINGER, Otto G, BANER, Albert L. Plastic Packaging Interactions with food and pharmaceuticals [electrónico ISBN 978-3-527-31455-3. [consultado: 17, julio, 2016] Disponible en: [http://vchsc.ajums.ac.ir/\\_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf](http://vchsc.ajums.ac.ir/_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf)

Desde el año 1998 cuando Hashimoto registro ante los Estados Unidos su patente (en la cual proponía un método de conversión de plásticos para producir crudo liviano a partir de residuos plásticos con contenido de poliéster ftálico) se evidencia el crecimiento en el estudio en la materia de producción de combustibles a partir de residuos plásticos, en el recuento bibliográfico realizado se recopilaron patentes que van desde el año 1998 hasta el 2009 desarrolladas por Yoshimura, Shimo, Jeon, Kalnes y el ya mencionado Hashimoto.

En relación con lo anterior se puede establecer que el uso de plásticos para aprovechamiento y generación de combustibles ha sido ampliamente estudiado

teniendo como base diferentes tipos de plásticos y tecnologías, lo que se ve reflejado en resultados variables que se estudian en los próximos capítulos.

Para el desarrollo del estudio es necesario realizar una selección debido a la gran cantidad de resinas plásticas, dicha selección se basa en la cantidad de estudios desarrollados en la generación de combustibles y en las resinas plásticas de mayor consumo mundial. La selección arroja como base de estudio a: Poliestireno (PS, por sus siglas en inglés); Polipropileno (PP, por sus siglas en inglés), Polietileno (PE, por sus siglas en inglés), el Policloruro de Vinilo (PVC, por sus siglas en inglés), Polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés) y Polietileno de baja densidad (LDPE, por sus siglas en inglés). Se puede justificar que la mayoría de estudios se hayan realizado en los plásticos antes mencionados con tan solo revisar los números expuestos por Kunwar<sup>11</sup>, donde afirma que entre un 50-70% del total de desechos plásticos generados está asociado a empaques derivados de polietileno, polipropileno, poliestireno y policloruro de vinilo.

### **1.3 PROPIEDADES DE PLÁSTICOS PARA EL APROVECHAMIENTO**

A continuación se presenta una descripción breve, que considera las principales características y aplicaciones de los plásticos comúnmente usados en la generación de combustibles:

**1.3.1 POLIESTIRENO (PS):** Según PlasticsEurope, quien es la asociación comercial de productores de plásticos en Europa, el poliestireno es un polímero sintético aromático formado por monómeros de estireno, lo que le da un rango de variación en sus propiedades, desde rígido hasta espumoso. En sus principales aplicaciones se encuentra el uso en cubiertas para aparatos electrónicos (de manera rígida, transparente y frágil) y en construcción como aislante, techos, revestimientos, entre otros. Desde el año 1930 ha sido comercializado y actualmente ocupa el cuarto lugar de producción anual con 12 millones de toneladas métricas, solo por detrás del PE, PP y PVC. Su producción no es costosa, lo que se evidencia en un bajo costo por Kg de la resina generada.

Nexant<sup>12</sup> describe el poliestireno como amorfo, claro, sin color y presenta excelentes propiedades ópticas, además de una alta resistencia y fuerza mecánica. Por encima de la temperatura de transición a cristal es fácilmente moldeable gracias a su alta resistencia a ser fundido.

---

<sup>11</sup> KUNWAR, Bidhya. et al. Plastics to fuel: a review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews [electrónico]. p 421-428 [consultado: 21, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115010941>

<sup>12</sup> New Report Alert. PERP Program – Polystyrene [electrónico]. Mayo. 2006. [consultado: 17, julio, 2016]. Disponible en: [http://web.archive.org/web/20120525200318/http://www.chemsystems.com/reports/search/docs/abstracts/0405\\_4\\_abs.pdf](http://web.archive.org/web/20120525200318/http://www.chemsystems.com/reports/search/docs/abstracts/0405_4_abs.pdf)

La Tabla 3 presenta las propiedades de la resina de poliestireno comparada con otros termoplásticos de amplio uso industrial, lo que permite establecer por qué su amplio uso industrial por encima de otras resinas plásticas.

**Tabla 3.** Propiedades del Poliestireno comparada con otros termoplásticos

Density	SPS < nylon 66 < PBT < PET < PPS
Tensile strength	SPS < PBT < PPS < PET < nylon 66
Elongation	SPS < PET < PPS < PBT < nylon 66
Izod notched impact strength	PET < PBT ~ PPS < nylon 66 < SPS
Heat resistance	PBT < PET < nylon 66 ~ SPS < PPS
Volume resistivity	PET ~ nylon 66 ~ PBT ~ PPS < SPS
Dielectric constant	SPS < nylon 66 < PET < PBT < PPS

**Fuente:** WÜNSCH, J. R. Polystyrene Synthesis, Production and Applications. En: Rapra Reviews Report [electrónico] Volume 10, Number 4, 2000. [consultado: 14, julio, 2016] Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=9Oal8DG\\_7GAC&pg=PA5&lpg=PA5&dq=Polystyrene+and+Styrene+Copolymers&source=bl&ots=8IMN0UPBkh&sig=kpA4a5EbYJ4WcSnQ7t9WcFKL7Lo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi\\_ybu77frNAhWCix4KHSVaDSsQ6AEIdzAJ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=9Oal8DG_7GAC&pg=PA5&lpg=PA5&dq=Polystyrene+and+Styrene+Copolymers&source=bl&ots=8IMN0UPBkh&sig=kpA4a5EbYJ4WcSnQ7t9WcFKL7Lo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi_ybu77frNAhWCix4KHSVaDSsQ6AEIdzAJ#v=onepage&q&f=false)

**1.3.2 POLIPROPILENO (PP):** Piringer<sup>13</sup> afirma que desde 1986 aproximadamente, el PP se ha considera como el tercer plásticos de producción, solamente después del PE y el PVC, lo que coincide con las cifras expuestas por Hideki Sato<sup>14</sup>, donde el polipropileno tenía una demanda para 2008 de 47 millones de toneladas en aplicaciones como empaques, componentes industriales y bienes misceláneos, debido a sus buenas propiedades físicas entre las que se encuentran una baja gravedad específica, rigidez, resistencia al calor y maleabilidad que ofrecen un amplio espectro de aplicaciones. Entre sus principales aplicaciones se encuentran los empaques para alimentos y en particular botellas para bebidas debido a su resistencia a altas temperaturas lo que permite que sean llenados con líquido caliente, mediante un proceso previo de inyección y extrusión.

**1.3.3 POLIETILENO (PE):** PlasticsEurope define el polietileno como el plástico de mayor consumo a nivel mundial, lo anterior se confirma con los números

<sup>13</sup> PIRINGER, Otto G, BANER, Albert L. Plastic Packaging Interactions with food and pharmaceuticals [electrónico] ISBN 978-3-527-31455-3. S.F [consultado: 17, julio, 2016] Disponible en: [http://vchsc.ajums.ac.ir/\\_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf](http://vchsc.ajums.ac.ir/_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf)

<sup>14</sup> SATO, Hideki. Review on Development of Polypropylene Manufacturing Process. En: Sumitomo Chemical Co., Ltd. [electrónico]. S.F [consultado: 17, julio, 2016]. Disponible en: [http://www.sumitomo-chem.co.jp/english/rd/report/theses/docs/20090201\\_6jw.pdf](http://www.sumitomo-chem.co.jp/english/rd/report/theses/docs/20090201_6jw.pdf)

expuestos por Piringer<sup>15</sup> donde se estima la producción de Polietileno para 2007 en 79 millones de toneladas métricas por año.

El proceso de producción del Polietileno ocurre normalmente a temperaturas entre los 150 y los 210°C, tiene una estabilidad química similar a la de las parafinas, debido a que no se ve afectado por los ácidos minerales ni alcalinos. La producción en masa se inició en 1936 con la introducción de la polimerización a alta presión, proceso que dio como resultado un polímero con una densidad relativamente baja (LPDE). De acuerdo con Piringer<sup>16</sup>, de las 79 millones de toneladas de PE que se producen al año, 21 millones corresponden a LPDE, 22 millones a LLDPE y las 36 millones restantes a HDPE.

**1.3.4 Policloruro de vinilo (PVC):** Según Piringer<sup>17</sup>, el PVC inicio su industrialización hacia el año 1930 cuando se pudo superar los problemas de estabilidad que presenta el compuesto mediante la incorporación de aditivos que ayudaran a tal fin. Para inicios del año 1970 la producción anual de PVC y de PE era similar, pero para 1971 empezaron a registrarse los primeros problemas graves a la salud de las personas que eran expuesta al Cloruro de Vinilo en el aire, a pesar de los grandes esfuerzos para minimizar el residual de dicho compuesto en el aire alcanzando valores menores a 1 ppm de concentración, la aceptación de los consumidores al producto se vio afectada lo que termino evidenciándose en una reducción en el uso del PVC comparado con el PE.

De acuerdo con El Consejo Europeo de Fabricantes de Vinilo<sup>18</sup> las principales características que hacen al PVC un plástico atractivo para su uso en diferentes industrias dentro de las que se puede mencionar:

- Retardante de fuego, propiedad que debe a su contenido de cloro

---

<sup>15</sup> PIRINGER, Otto G, BANER, Albert L. Plastic Packaging Interactions with food and pharmaceuticals [electrónico ISBN 978-3-527-31455-3. [consultado: 17, julio, 2016] Disponible en: [http://vchsc.ajums.ac.ir/\\_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf](http://vchsc.ajums.ac.ir/_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf)

<sup>16</sup> PIRINGER, Otto G, BANER, Albert L. Plastic Packaging Interactions with food and pharmaceuticals [electrónico ISBN 978-3-527-31455-3. [consultado: 17, julio, 2016] Disponible en: [http://vchsc.ajums.ac.ir/\\_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf](http://vchsc.ajums.ac.ir/_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf)

<sup>17</sup> PIRINGER, Otto G, BANER, Albert L. Plastic Packaging Interactions with food and pharmaceuticals [electrónico ISBN 978-3-527-31455-3. [consultado: 17, julio, 2016] Disponible en: [http://vchsc.ajums.ac.ir/\\_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf](http://vchsc.ajums.ac.ir/_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf)

<sup>18</sup> THE EUROPEAN COUNCIL OF VINYL MANUFACTURERS, PVC's Physical Properties [electrónico]. S.F. [consultado 23, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.pvc.org/en/p/pvcs-physical-properties>

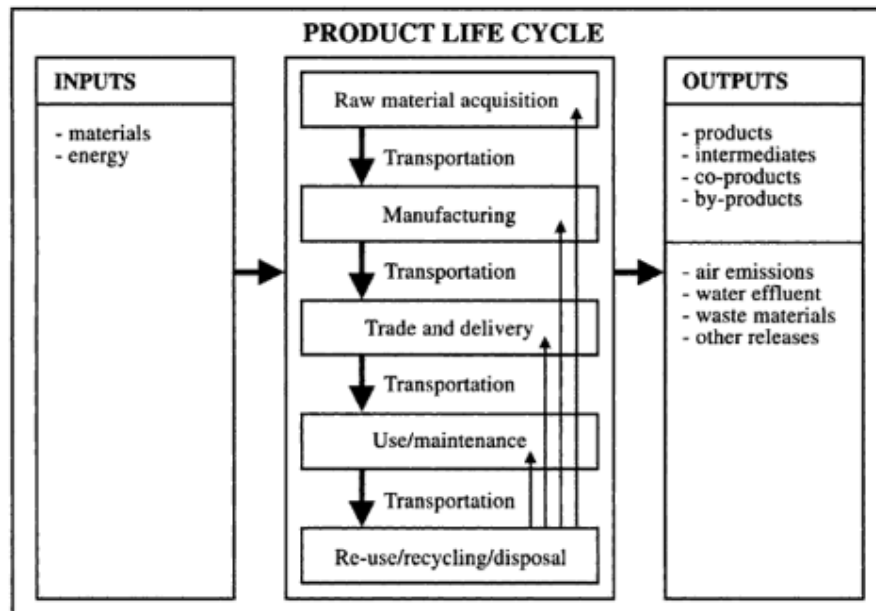


- Durabilidad bajo condiciones normales de uso cuando se tiene como mayor influencia la oxidación debido al aire atmosférico.
- Resistencia química a ácidos, álcalis y en su mayoría a todos los químicos inorgánicos.
- Estabilidad mecánica comparada con otros termoplásticos debido a su limitado movimiento molecular a temperatura ambiente.

#### 1.4 CICLO DE VIDA DE LOS PLÁSTICOS

El Ciclo de Vida de un producto permite identificar las etapas que se encuentran inmersas en su vida útil y los diferentes aspectos que se ven involucrados en cada una. Una vez se identifican dichas etapas pueden llevarse a cabo diferentes estudios que permiten evaluar impactos ambientales, uno de ellos es el Análisis de Ciclo de Vida, que de acuerdo con Romero<sup>19</sup> es una metodología que permite identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto. A continuación se presenta el esquema de ciclo de vida para cualquier producto a analizar.

**Gráfica 1.** Diagrama ciclo de vida producto general

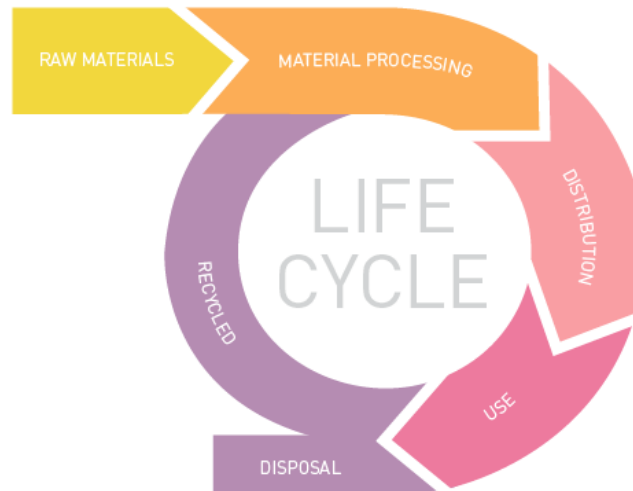


**Fuente:** O'Neil T.J. Life Cycle Assessment and environmental impact of polymeric products. Rapa Review Report 156. [electronic] ISSN 0889-3144. Vol 13. Numero 12.2003 [consultado: 26, agosto, 2016] Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=PKmmhcl2QFIC&pg=PP1&hl=es&source=gbs\\_selected\\_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=PKmmhcl2QFIC&pg=PP1&hl=es&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false)

<sup>19</sup> ROMERO. Paulo . Ciclo de vida de los productos. Diseño y análisis para la innovación sostenible ISBN: 9789587612363. 2012 [consultado: 10, junio, 2016]

El ciclo de vida de los plásticos ha sido estudiado considerando diversas variables y productos, como tal no existe un estudio general sobre los plásticos, pero si sobre bolsas plásticas, envases plásticos, entre otros. En la Gráfica 2 se presenta un esquema general del ciclo de vida de los plásticos.

**Gráfica 2.** Esquema general ciclo de vida de los plásticos



**Fuente:** PRATT CSDS. Plastic: Life Cycle [sitio web]. Disponible en: <http://csds.pratt.edu/resource-center/materials-research/material-life-cycles/plastic/>

En concordancia se propone realizar una recopilación de los puntos en común encontrados en los diferentes estudios y así poder ofrecer un punto de vista global. Las etapas principales presentes en el ciclo de vida pueden establecerse como: materias primas, producción, consumo y por último disposición, tema sobre el cual se hará mayor énfasis debido a la importancia que representa para el presente estudio.

**1.4.1 MATERIAS PRIMAS:** En esta etapa se consideran los procesos de extracción y/o producción de aquellos materiales naturales o sintéticos que son necesarios para la síntesis de los plásticos como producto final de consumo. Según el análisis presentado por el Consejo Americano de Química<sup>20</sup> (ACC, por sus siglas en inglés), los plásticos usan como materia prima crudo y gas natural, a partir de los cuales se obtienen monómeros de hidrocarburos mediante un proceso de cracking, estos monómeros son el etileno y el propileno. Etapas de proceso adicionales conllevan a la obtención de diferentes monómeros como el estireno, cloruro de vinilo, etilenglicol, ácido tereftálico, entre otros.

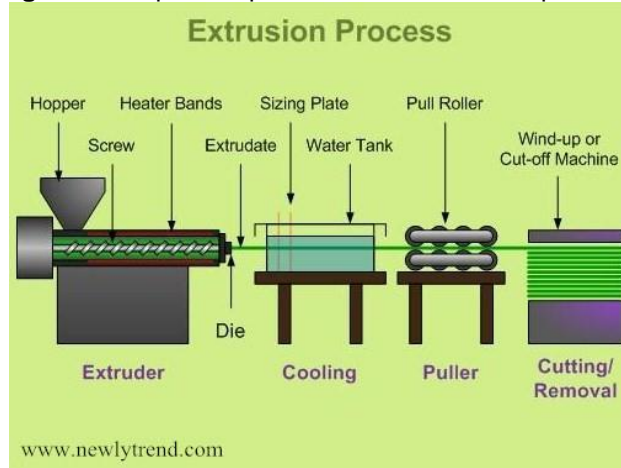
<sup>20</sup> AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, Lifecycle of a plastic product [electrónico]. S.F. [consultado 23, julio, 2016]. Disponible en: <https://plastics.americanchemistry.com/Lifecycle-of-a-Plastic-Product/>

**1.4.2 PRODUCCIÓN:** Existen una cantidad considerable de procesos bajo los cuales se obtienen productos plásticos que dependen de las propiedades esperadas del producto, el tipo de plástico, el uso del mismo, entre otros. A continuación se presenta una breve descripción de los cuatro (4) procesos de producción más importantes de acuerdo con la información del Consejo Americano de Química<sup>21</sup>:

- Extrusión: Es un proceso en el cual los *pellets* o gránulos de plástico se alimentan a un extrusor, el cual lleva el material a una cámara con una temperatura alta y mediante un tornillo sin fin se transporta el plástico hasta el extremo final del extrusor donde se le da la forma deseada para el producto final. Por último se enfría con agua o aire.

En la Figura 1 se presentan las etapas de un proceso convencional de producción de plásticos por extrusión.

**Figura 1.** Etapas del proceso de extrusión de plásticos

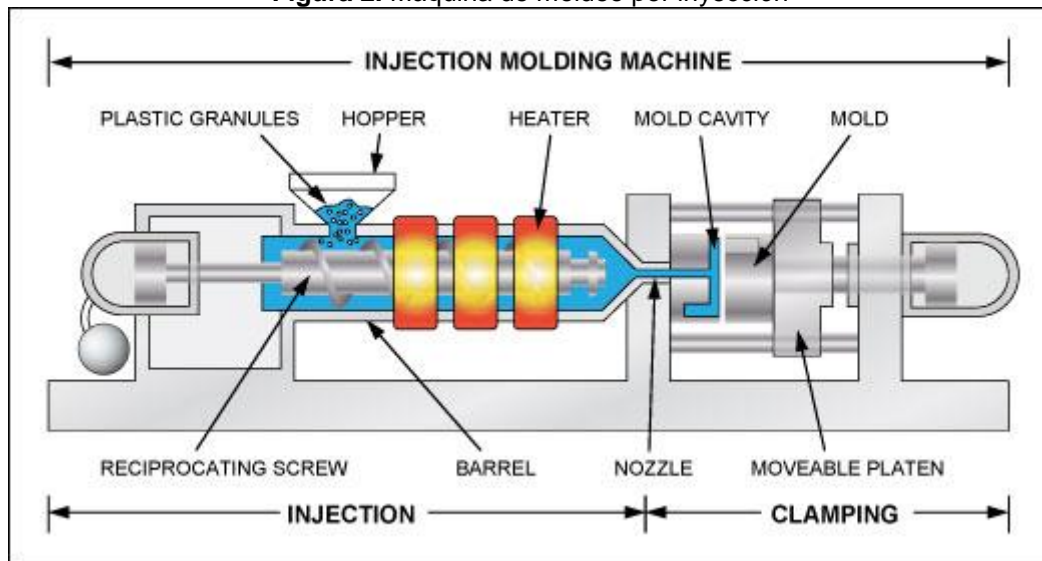


**Fuente:** Newlytrend Industrial CO., Limited. Extrusion Process [sitio web] Disponible en: <http://www.newlytrend.com/content/48-plastics-extrusion-process>

- Moldeo por inyección: El proceso de moldeo por inyección presenta similitudes con el de extrusión, mediante este proceso el plástico granular se alimenta a una cámara a alta temperatura hasta que se alcanza un estado líquido, posteriormente se inyecta a alta presión a un molde, previamente enfriado. Al cabo de un tiempo el molde se abre para extraer como producto una pieza plástica con la forma del molde usado (ver Figura 2).

<sup>21</sup> AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, Lifecycle of a plastic product [electrónico]. S.F. [consultado 23, julio, 2016]. Disponible en: <https://plastics.americanchemistry.com/Lifecycle-of-a-Plastic-Product/>

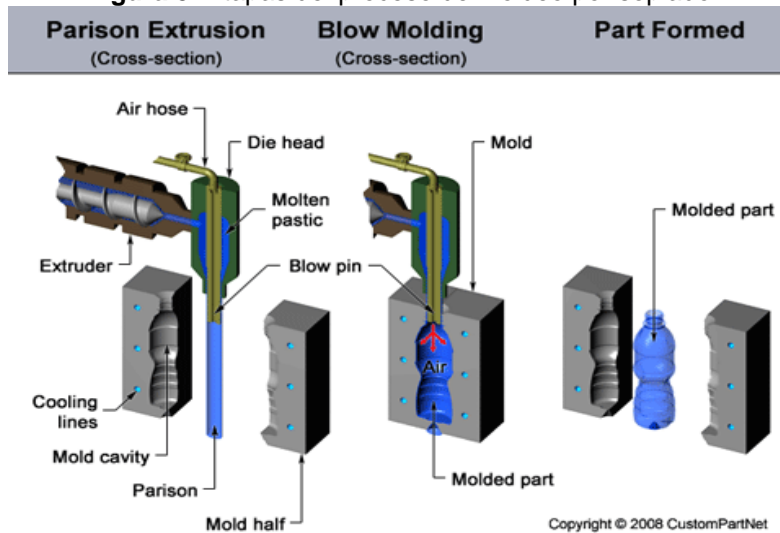
**Figura 2.** Máquina de moldeo por inyección



**Fuente:** Creative Mechanisms. Injection molding machine. [sitio web]. Disponible en: <https://www.creativemechanisms.com/blog/five-things-you-need-to-know-about-injection-molding>

- Moldeo por soplado: Es el proceso comúnmente usado en la industria de bebidas para dar forma a los envases, este proceso va acompañado generalmente de extrusión o el moldeo por inyección. En la Figura 3 se presenta el diagrama del proceso de extrusión en el cual se crean tubos con una boquilla, dicho tubo se coloca en un molde y posteriormente se le inyecta aire comprimido para que el tubo se dilate alcanzando la forma del molde que lo contiene.

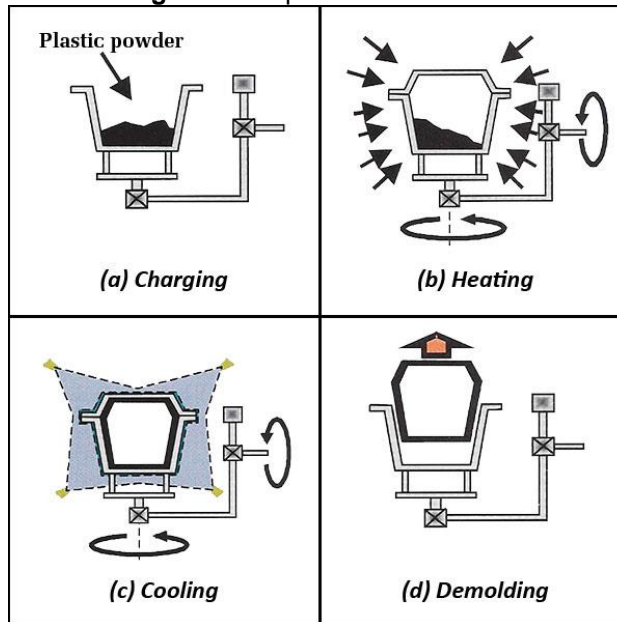
**Figura 3.** Etapas del proceso de moldeo por soplado



**Fuente:** Custompart.net. Extrusion blow molding. [sitio web]. <http://www.custompartnet.com/wu/blow-molding>

- Moldeo rotacional o rotomoldeo: Es un proceso que tiene como fin crear piezas huecas al igual que el moldeo por soplado. Se lleva a cabo mediante la inyección del plástico granular en un molde calentado previamente y que gira en dos ejes haciendo que el plástico se adhiera a las paredes del molde y tome la forma del mismo, para posteriormente ser enfriado. El diagrama del proceso en mención se presenta en la Figura 4.

**Figura 4.** Etapas del rotomoldeo

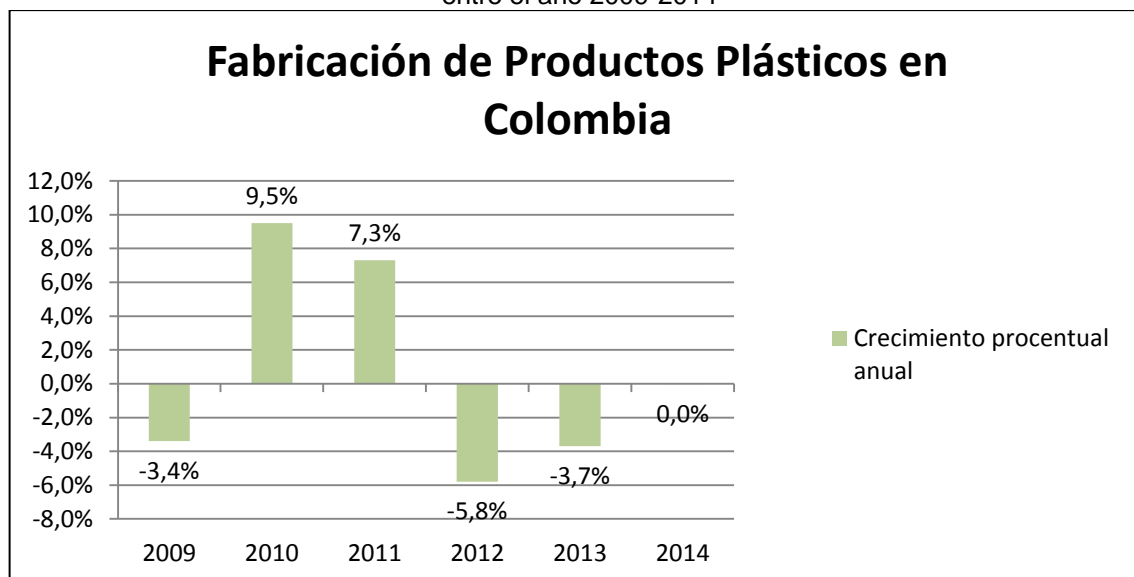


**Fuente:** British Plastics Federation. Rotational Moulding [sitio web]. Disponible en: [http://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/rotational\\_moulding.aspx](http://www.bpf.co.uk/plastipedia/processes/rotational_moulding.aspx)

En Colombia, Garay<sup>22</sup> afirma 461 establecimientos se dedican a transformar materia plásticas, lo que corresponde a un 6,3% del total de la industria de manufactura Colombiana, generando 31.349 empleos directos que son equivalentes a un 5,9% de los puestos de trabajo en la industria. El IDEAM lleva a cabo un seguimiento al crecimiento de la industria de fabricación de plásticos y los resultados pueden observarse en la Gráfica 3.

<sup>22</sup> GARAY, Carlos A. et al. Guías Ambientales – Sector Plástico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [electrónico]. julio. ISBN 958 – 97393 - 4 - 2. 2004. [consultado: 16, enero, 2016] Disponible en: [http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias\\_Ambientales/Gu%C3%ADAs%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf](http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADAs%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf)

**Gráfica 3.** Crecimiento porcentual anual de la Fabricación de Productos Plásticos en Colombia entre el año 2009-2014

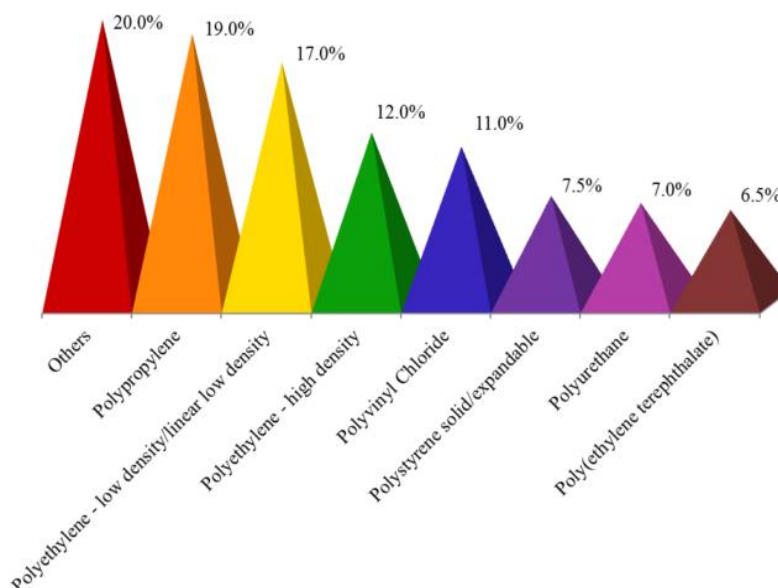


**Nota:** IDEAM. Informe de Industria. [electronico]. marzo. 2015. [consultado: 19, agosto, 2016] Disponible en: [www.mincit.gov.co/descargar.php?id=74482](http://www.mincit.gov.co/descargar.php?id=74482). Modificado por el autor

En el mismo informe, el IDEAM resalta a la industria de producción de plásticos como uno de los 10 subsectores más dinámicos para el primer trimestre del año 2015, impulsando la recuperación del sector manufacturero colombiano.

**1.4.3 CONSUMO:** Los plásticos se encuentran inmersos en todos los productos de consumo masivo, su implementación ha sido progresiva y se ha dado pensando en mejorar el estilo y la calidad de vida del ser humano. Encontramos plásticos en empaques para alimentos, mejorando la inocuidad y la duración de los mismos en estado óptimo para el consumo, plásticos que reducen el peso de vehículos mediante la incorporación de partes en dicho material que ayudan a que el esfuerzo del motor sea menor para generar el movimiento.

**Gráfica 4.** Demanda de plásticos en Europa. 2011



**Fuente:** WEBB, Hayden. et al. Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly (ethylene terephthalate). 2012. p. 4. Modificado por el autor.

Los aportes en el tema social de los plásticos acarrear mejores desempeños y progreso en la sociedad, a continuación se presentan las principales aplicaciones y sus beneficios de acuerdo con Garay<sup>23</sup>:

- **Empaques:** La industria alimenticia ha realizado importantes avances en el estudio de los plásticos para su uso como empaques. De acuerdo con PlasticsEurope<sup>24</sup>, el peso de los empaques se ha reducido un 28% en los últimos 10 años gracias a la implementación de nuevos plásticos que además ayudan en la reducción de costos asociados a transporte (el mismo volumen pero con menor peso), reducción de gasto energético y de desechos generados. Como se mencionó anteriormente también ayudan en la conservación y preservación de los alimentos manteniendo el valor nutricional de los mismos.

<sup>23</sup> GARAY, Carlos A. et al. Guías Ambientales – Sector Plástico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [electrónico]. julio. ISBN 958 – 97393 - 4 - 2. 2004. [consultado: 16, enero, 2016] Disponible en: [http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias\\_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf](http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf)

<sup>24</sup> PLASTICSEUROPE, Packaging [electrónico]. S.F. [consultado 24, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/use-of-plastics/packaging.aspx>

- Medicina: En esta área se ven avances importantes en la esperanza de vida del ser humano, claramente no todo se debe al uso de plásticos pero en gran medida si han aportado a este fin común, la medicina actual no podría concebirse sin productos como: jeringas plásticas, bolsas de sangre, empaques plásticos, capsulas de medicamentos, prótesis plásticas (más livianas que cualquier otro material), corneas artificiales, entre otros.
- Construcción: Su amplio uso en el sector de la construcción se debe a las ventajas que ofrecen sobre otros materiales como su resistencia, durabilidad, bajo peso y bajo costo. PlasticsEurope<sup>25</sup> asegura que para 2014 en Europa se consumieron 9.6 millones de toneladas de plásticos que corresponden a un 20% del consumo total de plásticos en Europa, haciendo esta aplicación la segunda aplicación después de empaques.
- Agricultura: Los plásticos en el sector de la agricultura han sido proveedores de beneficios tecnológicos que permiten incrementar la producción, la calidad de los alimentos y reducir la huella ecológica asociada a la actividad industrial en mención. Gracias a los plásticos se pueden cultivar alimentos en áreas desérticas mediante la acumulación de agua en grandes áreas, las tuberías de irrigación permiten tener un mayor control del agua suministrada a los cultivos, se simulan condiciones ambientales mediante el uso de plásticos para cerrar áreas y crear invernaderos lo que además ayuda a controlar las plagas en comparación con un cultivo a cielo abierto.
- Deportes y recreación: Esta aplicación está directamente ligada a la mejora en las condiciones de vida de las personas. Realizar algún deporte es una actividad saludable que debe llevarse a cabo regularmente, pero además se encuentran los deportistas de alto rendimiento que requieren condiciones en sus trajes y equipamiento especiales que solo los plásticos han podido cumplir: trajes livianos, balones, raquetas, zapatillas, entre muchas otras, que permiten mostrar en un amplio espectro la diversidad de propiedades que pueden otorgar los plásticos a los diferentes bienes de fabricación masiva.

En la Tabla 4 ,se ponen en contexto algunas de las aplicaciones antes mencionadas y el tiempo de vida útil asociado a ellas, la tabla considera como geolocalización el territorio Colombiano.

---

<sup>25</sup> PLASTICSEUROPE, Building & Construction [electrónico]. S.F. [consultado 24, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/use-of-plastics/building-construction.aspx>



**Tabla 4.** Vida útil según la aplicación de los plásticos en Colombia

VIDA UTIL EN ALGUNAS APLICACIONES DE LOS PLASTICOS	
Tuberías de PVC en construcciones	Vida de la vivienda
Tuberías de PVC en infraestructura	Hasta 50 años
Cajas de polipropileno para herramientas	10 a 15 años
Cajas de polietileno de alta densidad para bebidas	5 a 7 años, en promedio
Películas de invernadero de polietileno	2 a 3 años
Envases para productos de higiene y aseo	1 a 2 años
Bolsas plásticas de polietileno	Menor de 1 año
Envases PET	Menos de 6 meses o más de 1 año si son retornables

**Fuente:** GARAY, Carlos A. et al. Guías Ambientales – Sector Plástico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [electrónico]. julio. ISBN 958 – 97393 - 4 - 2. 2004. [consultado: 16, enero, 2016] Disponible en: [http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias\\_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf](http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf)

**1.4.4 DISPOSICIÓN:** Según el Departamento de Conservación Ambiental del Estado de New York un residuo sólido es cualquier material descartado o abandonado, puede encontrarse en estado sólido, líquido, semisólido, o con contenido gaseoso. No obstante, en la Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos<sup>26</sup> realizada por el Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe, se presentan las diferentes definiciones dependiendo del alcance y el ámbito: según la ONU es todo material que no tiene un valor de uso y que es descartado por su propietario, para el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) incluye cualquier material descrito como tal en la legislación nacional, cualquier material como residuo en las listas o tablas apropiadas, y en general cualquier material excedente o de desecho que ya no es útil ni necesario y que se destina al abandono, para el convenio de Basilea son las sustancias u objetos a cuya eliminación se procede, se propone proceder o se está obligado a proceder en virtud de lo dispuesto en la legislación, según el Programa Regional de Manejo de Residuos Peligroso del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) es todo material que no tiene un valor de uso directo y que es descartado por su propietario, y por último la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) lo define como todo material (sólido, semisólido, líquido o contenedor de gases) descartado, es decir que ha sido abandonado, es reciclado o considerado inherentemente residual.

<sup>26</sup> MARTINEZ, Javier. *Et al.* Fundamentos I, Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe [electrónico]. Septiembre. 2005. [consultado: 08, julio, 2016] Disponible en: [http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/gestion\\_r01\\_fundamentos.pdf](http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/gestion_r01_fundamentos.pdf)

En Colombia, desde la expedición del Decreto 4741 de 2005 se unificó el término de residuo o desecho a través del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el Ministerio de Protección Social y el Ministerio de Transporte, como:

“Es cualquier objeto, material, sustancia, elemento o producto que se encuentre en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, cuyo generador descarta, rechaza o entrega porque sus propiedades no permiten usarlo nuevamente en la actividad que lo generó o porque la legislación o la normatividad vigente así lo estipula<sup>27</sup>”.

Para el periodo comprendido entre el año 1997 – 2000, Garay<sup>28</sup> afirma que el consumo de plásticos en Colombia fue de 530.000 toneladas anuales, mientras que la cantidad de residuos plásticos urbanos generados se estima entre 220.000 y 280.000 toneladas por año, el problema a en la generación de residuos plástico radica en la mala disposición de los mismos por parte de los consumidores.

Se ha encontrado que una de las principales afectaciones se da en los ecosistemas marinos, Jambeck<sup>29</sup> estima que durante el año 2010 se generaron 275 millones de toneladas métricas (MT, por sus siglas en inglés) de plástico en 192 países costeros, de las cuales entre 4,8 y 12,7 millones de MT terminan en el océano. En la Tabla 5 se presentan la clasificación de los países que más residuos plásticos aportan a los océanos

**Tabla 5.** Clasificación de los países que mayor cantidad de residuos plásticos marinos generan

País	Residuos plásticos marinos (MT/año)
China	1,32 - 3,53
Indonesia	0,48 - 1,29
Filipinas	0,28 - 0,75
Vietnam	0,28 - 0,73

<sup>27</sup> COLOMBIA. PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Decreto 4741 (30, diciembre, 2005). Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Bogotá D.C. 2005

<sup>28</sup> GARAY, Carlos A. et al. Guías Ambientales – Sector Plástico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [electrónico]. julio. ISBN 958 – 97393 - 4 - 2. 2004. [consultado: 16, enero, 2016] Disponible en: [http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias\\_Ambientales/Gu%C3%A1s%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf](http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%A1s%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf)

<sup>29</sup> JAMBECK, Jenna. et al. Plastic waste input from land into the ocean. En: Sciencemag [electrónico]. 13, Febrero, vol 347. p 768-771 [consultado: 19, enero, 2016]. Disponible en: [http://www.iswa.org/fileadmin/user\\_upload/Calendar\\_2011\\_03\\_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71\\_\\_2\\_.pdf](http://www.iswa.org/fileadmin/user_upload/Calendar_2011_03_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71__2_.pdf)

**Tabla 5. Continuación**

<b>País</b>	<b>Residuos plásticos marinos (MT/año)</b>
Sri Lanka	0,24 - 0,64
Tailandia	0,15 - 0,41
Egipto	0,15 - 0,39
Malasia	0,14 - 0,37
Nigeria	0,13 - 0,34
Bangladesh	0,12 - 0,31
Sur África	0,09 - 0,25
India	0,09 - 0,24
Argelia	0,08 - 0,21
Turquía	0,07 - 0,19
Pakistán	0,07 - 0,19
Brasil	0,07 - 0,19
Birmania	0,07 - 0,18
Marruecos	0,05 - 0,12
Corea del Norte	0,05 - 0,12
Estados Unidos	0,04 - 0,11

**Fuente:** JAMBECK, Jenna. et al. Plastic waste input from land into the ocean. En: Sciencemag [electrónico]. 13, Febrero, vol 347. p 768-771 [consultado: 19, enero, 2016]. Disponible en: [http://www.iswa.org/fileadmin/user\\_upload/Calendar\\_2011\\_03\\_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71\\_\\_2\\_.pdf](http://www.iswa.org/fileadmin/user_upload/Calendar_2011_03_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71__2_.pdf).  
Modificado por el autor

La afectación a los organismos que tiene como hábitat dicho ecosistema fue estudiada por Allsopp<sup>30</sup> donde se afirma que al menos 267 especies han sufrido enredos o ingestión de desechos marinos con consecuencias en el desarrollo de su vida. Es por tal motivo que la disposición es el punto crítico y de mayor importancia en el ciclo de vida actual de los plásticos.

De acuerdo con Webb<sup>31</sup>, actualmente existen tres (3) métodos principales de manejo de residuos plásticos: enterrar en vertederos, incineración y reciclaje:

---

<sup>30</sup> ALLSOPP, Michelle. Et al. Plastic Debris in the World's Oceans. GREENPEACE [electrónico]. 2006. [consultado en: 19. Agosto. 2016] Disponible en: [http://www.unep.org/regionalseas/marine\\_litter/publications/docs/plastic\\_ocean\\_report.pdf](http://www.unep.org/regionalseas/marine_litter/publications/docs/plastic_ocean_report.pdf)

<sup>31</sup> WEBB, Hayden K. et al. Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly (ethylene terephthalate) [electrónico]. 28. Diciembre. 2012. ISSN 2073-4360. [consultado: 25. julio. 2016]

- **VERTEDEROS:** La principal limitación de esta práctica está relacionada con el uso del espacio. De acuerdo con la Comisión Europea<sup>32</sup> (EC, por sus siglas en inglés) cerca del 50% del plástico generado en la Unión Europea aún se lleva a vertederos lo que acarrea una pérdida de energía y materia prima que se podría obtener al reciclar dichos residuos. Sin embargo, es necesario reconocer que la cantidad de vertederos en el mundo ha disminuido, de acuerdo con Bailey<sup>33</sup> en 1988 había alrededor de 8.000 vertederos en los Estados Unidos que se redujeron a 2.300 para 1998.

Además del inconveniente mencionado del uso del espacio y por consiguiente la pérdida de tierra para uso en actividades industriales y productivas, también se presentan daños en la tierra, generación de gases tóxicos y en algunos casos cancerígenos como benceno, tolueno, xilenos, etilbencenos, entre otros.

- **INCINERACIÓN:** La incineración es una técnica de disposición usada con los plásticos que no presenta limitaciones en cuanto al uso del espacio físico y por el contrario ayuda a la generación de energía en forma de calor. Sin embargo, presenta problemas asociados a la generación de sub-productos que tiene directa afectación sobre la salud humana y sobre el medio ambiente como PAHs, PCBs, metales pesados, radicales libre de oxígeno y carbono, gases de efecto invernadero.

- **RECICLAJE Y APROVECHAMIENTO:** El Decreto 4741 ofrece una definición de aprovechamiento o valorización de residuos según la cual se trata de un proceso que permite recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos mediante la recuperación, el reciclado o la regeneración. Por otra parte, la División de Estadísticas de las Naciones Unidas<sup>34</sup> (UNSD, por sus siglas en inglés) define el aprovechamiento de residuos como todas aquellas actividades que involucran el control, monitoreo, regulación de la producción, recolección, transporte, tratamiento y disposición de residuos y la prevención de la producción del mismo a través de modificaciones en los procesos de generación, reusó y reciclado.

---

<sup>32</sup> EUROPEAN COMMISSION, Plastic waste [electrónico]. 08. junio. 2016. [consultado 24, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/use-of-plastics/building-construction.aspx>

<sup>33</sup> BAILEY, Ronald. et al. Solid waste disposal and recycling. En: Chemistry of the Environment. [electrónico]. p. 772-775. 2002 [consultado:25, julio, 2016]

<sup>34</sup> UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION, Environment Glossary [electrónico]. S.F. [consultado 31, mayo, 2016]. Disponible en: <http://unstats.un.org/unsd/environmentgl/gesform.asp?getitem=1182>

Para McDOUGALL<sup>35</sup> el aprovechamiento de residuos integral, es un sistema que combina las corrientes de residuos, colección de residuos, tratamiento y los métodos de disposición con el objetivo de alcanzar un beneficio ambiental, optimización económica y aceptación social.



La Asociación de la Industria Plástica introdujo para 1988 el Código de Identificación de Resinas el cual fue implementado con el objetivo de ayudar al consumidor con los planes de reciclaje y reducir la cantidad de plásticos que se disponen. En la Tabla 5 se muestran los códigos con los principales usos en el hogar:

**Tabla 6.** Códigos y usos comunes de diferentes plásticos

Código del plástico	Tipo de Plástico	Usos Comunes
 PETE	Tereftalato de Polietileno	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Botellas de agua mineral y refrescos.</li> <li>✓ Empaques de alimentos.</li> <li>✓ Fibras para alfombras y ropa</li> <li>✓ Algunas botellas de shampoo y enjuague bucal</li> </ul>
 HDPE	Polietileno de Alta Densidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Botellas de detergente, blanqueador y suavizantes.</li> <li>✓ Leche y bebidas no carbonatadas.</li> <li>✓ Juguetes, baldes, tubos rígidos, cajas, macetas de madera plástica y muebles de jardín.</li> </ul>
 V	Policloruro de vinilo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tarjetas de crédito</li> <li>✓ Revestimientos de suelos y alfombras</li> <li>✓ Marcos de ventanas y puertas</li> <li>✓ Tuberías y accesorios, recubrimientos de alambre y cables</li> <li>✓ Productos de cuero sintético</li> </ul>
 LDPE	Polietileno de baja densidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bolsas de fertilizantes.</li> <li>✓ Plástico de burbujas, plásticos de embalar.</li> <li>✓ Botellas flexibles</li> <li>✓ Tuberías de irrigación</li> <li>✓ Aplicaciones de alambre y cable.</li> </ul>
 PP	Polipropileno	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ La mayoría de tapas de botellas plásticas.</li> <li>✓ Empaques de yogurt y margarina.</li> </ul>

<sup>35</sup> MCDUGALL Forber. Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory. [electrónico].ISBN 0-632-05889-7. 2001. [consultado: 09, junio, 2016] Disponible en:<https://thecitywasteproject.files.wordpress.com/2013/03/integrated-solid-waste-managemen-a-life-cycle-inventory.pdf>

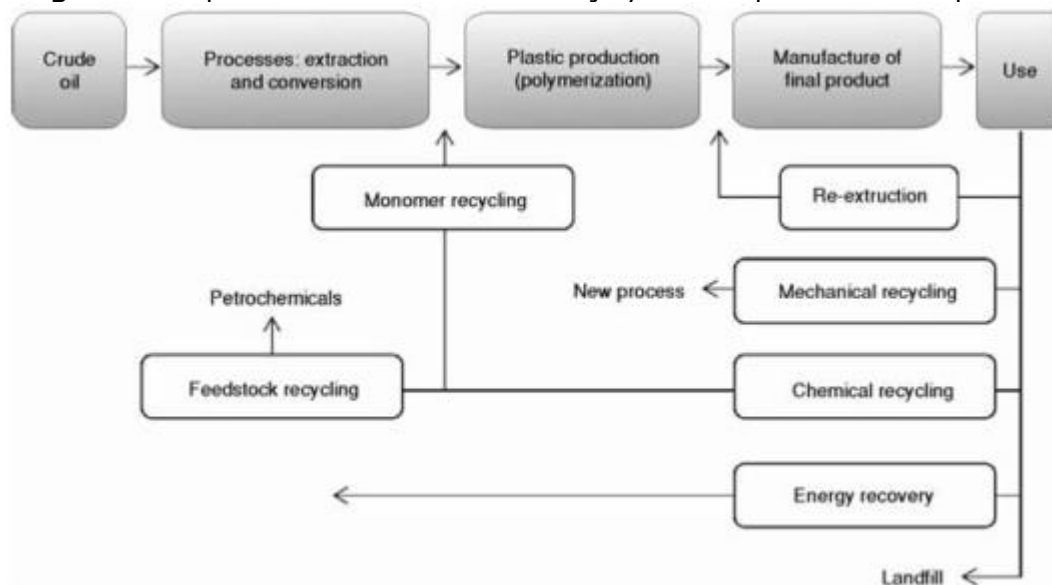
**Tabla 6. (Continuación)**

Código del plástico	Tipo de Plástico	Usos Comunes
 PS	Poliestireno	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Empaques de yogurt, cajas de huevos</li> <li>✓ Empaques de comida rápida</li> <li>✓ Vasos y cubiertos desechables</li> <li>✓ Juguetes de bajo costo</li> </ul>
 OTHER	Otros	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Otros polímeros que han sido usados en diferentes rangos de aplicación, particularmente en sectores de ingeniería.</li> </ul>

**Fuente:** DIFFERENT TYPES OF PLASTICS AND THEIR CLASSIFICATION. SPI. Disponible en: [http://www.ryedale.gov.uk/attachments/article/690/Different\\_plastic\\_polymer\\_types.pdf](http://www.ryedale.gov.uk/attachments/article/690/Different_plastic_polymer_types.pdf). Modificado por el autor

El reciclaje de plásticos puede ser implementado principalmente bajo dos técnicas, el reciclaje mecánico o reciclaje químico. Brems<sup>36</sup> presenta un esquema que ubica los métodos de reciclaje a la par con el proceso productivo del plástico

**Figura 5.** Esquema de metodos de reciclaje y cadena productiva del plástico



**Fuente:** BREMS, Anke. et al. Recycling and recovery of post-consumer plastic solid waste in a European context. En: Thermal Science [electrónico]. vol 16. no 3. p 669-685. 2012. [consultado: 20, enero, 2016]. Disponible en: <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2012/0354-98361200121B.pdf>

<sup>36</sup> BREMS, Anke. et al. Recycling and recovery of post-consumer plastic solid waste in a European context. En: Thermal Science [electrónico]. vol 16. no 3. p 669-685. 2012. [consultado: 20, enero, 2016]. Disponible en: <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2012/0354-98361200121B.pdf>

De acuerdo con PlasticsEurope el reciclaje mecánico busca recuperar los residuos plásticos mediante procesos como molienda, lavado, secado, separación, regranulación lo que hace que se puedan generar productos plásticos nuevos que entran al mercado a sustituir los plásticos vírgenes.

De acuerdo con Garay, el reciclaje químico es considerado un proceso terciario el cual se basa en reacciones físico-químicas que rompen las moléculas de los residuos plásticos para volverlos monómeros o hidrocarburos, algunos de los procedimientos de reciclaje química aplicado traen numerosas ventajas entre las que se destacan el aprovechamiento de la mayoría de los residuos ya que no se requiere de una separación por tipo de resina. Las técnicas de aprovechamiento de plásticos para generación de combustibles se encuentran catalogadas como reciclaje químico y son discutidas a profundidad en el Capítulo 2.

## 2. METODOS DE APROVECHAMIENTO DE PLÁSTICOS PARA GENERACIÓN DE COMBUSTIBLE

Los métodos de aprovechamiento permiten la recuperación de materias primas dando un valor agregado a los residuos, estos procesos son basados en el reciclaje químico, a pesar de que muchas de ellos se encuentran en un estado experimental avanzado ya existen empresas que comercializan equipos para la generación de combustibles a partir de residuos.

Al-Salem<sup>37</sup> define el reciclaje químico como los procesos de tecnología avanzada que permiten degradar los plásticos hasta su estado molecular, convirtiéndolos en gases o líquidos, y que además dan un valor agregado al generar como producto hidrocarburos aptos para su uso como combustibles. Este tipo de reciclaje es el más viable para las corrientes de residuos, ya que supera las dificultades que se presentan en el reciclaje mecánico (separación de plásticos y clasificación de los mismos), sin embargo los costos asociados al desarrollo de los equipos de alta tecnología hacen que los procesos sean factibles solo a gran escala.

Garay presenta una descripción básica de las diferentes tecnologías que se han estudiado de reciclaje químico en orden de importancia debido a los resultados obtenidos experimental e industrialmente, de la siguiente manera:

**Tabla 7.** Descripción de diferentes procesos de reciclaje químico de plásticos

PROCESO	DESCRIPCIÓN
Pirólisis	Es el craqueo de las moléculas por calentamiento en el vacío (es decir, en ausencia de oxígeno). Este proceso genera hidrocarburos líquidos o sólidos que pueden ser luego procesados en refinerías. Existen catalizadores especiales capaces de producir cantidades apreciables de gasolina de una calidad comparable a la utilizada actualmente en los automóviles (proceso Mobil oil y proceso fuji Recycle)
Hydrogenación	En este caso los plásticos son tratados con hidrógeno y calor. Las cadenas poliméricas son rotas y convertidas en un petróleo sintético que puede ser utilizado en refinerías y plantas químicas.
Gasificación	Los plásticos son calentados con aire o con oxígeno, así se obtienen como fases de síntesis, el monóxido de carbono e hidrogeno, que pueden ser utilizados para la producción de metanol o amoniaco o incluso como agentes para la producción de acero en hornos de venteo.
Extrusión degradativa	Es una técnica de reciclaje que utiliza equipos de extrusión (por lo general doble husillo y varias extrusoras en cascada) que permite la descomposición de los plásticos en ceras y materias primas para el sector petroquímico. También permite tratar los desechos plásticos con el fin de eliminar la interferencia entre polímeros. Se emplea como procedimiento previo a la mayoría de los procesos de reciclaje químico

<sup>37</sup> AL-SALEM, S.M. et al. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. En: Waste Management [electrónico]. P. 2625-2643. 2009. [consultado: 20, enero, 2016]. Disponible en: <http://www.journals.elsevier.com/waste-management>



**Tabla 7. Continuación**

PROCESO	DESCRIPCIÓN
Chemolysis	Este proceso se aplica a poliésteres, poliuretanos, poli- acetales y poliamidas. Requiere altas cantidades separadas por tipo de resina. Consiste en la aplicación de procesos solvolíticos como hidrólisis, glicólisis o alcoholólisis para reciclarlos y transformarlos nuevamente en sus monómeros básicos para la re-polimerización en nuevos plásticos.
Metánolisis	Es un avanzado proceso de reciclado que consiste en la aplicación de metanol en el PET. Este poliéster (el PET) es descompuesto en sus moléculas básicas, incluido el dimetiltereftalato y el etilenglicol, los cuales pueden ser luego repolimerizados para producir resina virgen. Varios productores de polietilentereftalato están tratando de desarrollar este proceso para aplicarlo a las botellas de bebidas carbonatadas. Las experiencias llevadas a cabo por empresas como Hoechst-Celanese, Dupont e Eastman han mostrado que los monómeros resultantes del reciclado químico son lo suficientemente puros para ser reutilizados en la fabricación de nuevas botellas de PET.

**Fuente:** GARAY, Carlos A. et al. Guías Ambientales – Sector Plástico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [electrónico]. julio. ISBN 958 – 97393 - 4 - 2. 2004. [consultado: 16, enero, 2016] Disponible en: [http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias\\_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos](http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos).

En este capítulo se presentan los dos procesos de reciclaje químico de plástico con más estudios y principalmente con aplicaciones industriales a gran escala que permiten tener más información acerca de su implementación: pirólisis e hidrogenación.

## 2.1 PIRÓLISIS

De acuerdo con Kunwar<sup>38</sup> la pirólisis o tratamiento termoquímico rompe los polímeros en hidrocarburos de menor tamaño con diferentes números de carbonos y puntos de ebullición, en un ambiente inerte y libre de aire.

Churkunti<sup>39</sup> afirma que este es uno de los procesos de aprovechamiento para generación de combustibles más prometedor debido al bajo consumo energético que tiene, aproximadamente un 10% del total de la energía contenida en los desechos plásticos. El combustible generado a partir del proceso de pirólisis depende del tipo de residuo plástico alimentado al proceso, continuando con la

---

<sup>38</sup> KUNWAR, Bidhya. et al. Plastics to fuel: a review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews [electrónico]. p 421-428 [consultado: 21, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115010941>

<sup>39</sup> CHURKUNTI, Preetham R. et al. Combustion analysis of pyrolysis end of life plastic fuel blended with ultra low sulfur diesel. En: Fuel Processing Technology 142 [electrónico]. P 212-218. 2016 [consultado: 15, abril, 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03783820>

información presentada por Churkunti<sup>40</sup> se puede aseverar que el Poliestireno tiene una conversión casi total en productos gaseosos y líquidos, por otra parte el polipropileno, el polietileno y el policloruro de vinilo arrojan conversiones intermedias encontrando que el HDPE y el LDPE son los plásticos con mayor resistencia a la conversión.

En la Tabla 8 se presenta un resumen de las principales investigaciones realizadas considerando el tipo de residuo plástico alimentado al proceso y los porcentajes de conversión, entre otros factores.

**Tabla 8.** Resultados de principales investigaciones realizadas al proceso de pirólisis con residuos de PE, PP y PS usando varias temperaturas

Investigation	Plastics	Reactor	Pyrolysis temperature (°C)	catalyst	Crude oil (wt %)	Residue (wt %)	Gas (wt %)
William et Al. [18]	PE	Parr mini bench top	500	None	93	0.0	7.0
	PP				95	0.0	5.0
	PS				71	27	2.0
	PET				15	53.0	32.0
Sarker et al. [19]	Mixed	Proprietary (Natural State Research Inc)	370–420	None	90	5.0	5.0
Alston et al. [6]	Mixed	2 L batch reactor	800	None	73	23.5	30.4
Sharma et al. [40]	HDPE		440	None	74	17.0	9
Buekens et al. [10]	PP		740	None	48.8	1.6	49.6
	PE		760		42.4	1.8	55.8
	PS		581		24.6	0.6	9.90
Beltrame et al. [51]	PE		400	None	44.0	30.0	20.0
				H-Y-Zeolite	91.0	0.0	9.0
				Silica-Alumina	93.0	7.0	0.0
				None	29.0	65.0	6.0
Sarker et al. [52]	PETE-1	Distillation unit	405	Ca(OH) <sub>2</sub>	14.25 (21.7 H <sub>2</sub> O)	51.5	12.4
Scott et al. [12]	PE	Activated carbon bed	515-795	None	88-96		
Miskolczi et al. [41]	HDPE	Continuous reactor	520	ZSM-5			
	PP			None			
Elordi et al. [43]	HDPE	Conical spouted bed	500	HZSM-5	58-70		
				HY			
Uemichi et al. [53]	LDPE	Fixed-bed tubular flow reactor	425	β zeolite			
Lin et al. [54]	Mixed	Fluidized bed reactor	330-450	HZSM-5 SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Hybrid fluid catalytic cracking series	15-87		

**Fuente:** KUNWAR, Bidhya. et al. Plastics to fuel: a review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews [electrónico]. p 421-428 [consultado: 21, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115010941>

El uso de los combustibles se puede estimar de acuerdo a su punto de ebullición, Kunwar<sup>41</sup> establece que los hidrocarburos con puntos de ebullición entre 35 y 185 °C pueden usarse como gasolina para motores, entre 185 y 290 °C como diesel #1, entre 290 y 350 °C como diesel #2, entre 350 y 538 °C como gasóleo de vacío y mayores a 538°C como residuos. De acuerdo con Buekens<sup>42</sup> son 9 los

<sup>40</sup> CHURKUNTI, Preetham R. et al. Combustion analysis of pyrolysis end of life plastic fuel blended with ultra low sulfur diesel. En: Fuel Processing Technology 142 [electrónico]. P 212-218. 2016 [consultado: 15, abril, 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03783820>

<sup>41</sup> KUNWAR, Bidhya. et al. Plastics to fuel: a review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews [electrónico]. p 421-428 [consultado: 21, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115010941>

<sup>42</sup> BUEKENS, A. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. Vrije Universiteit Brussel (V.U.B). [electrónico]. 2006. [consultado en: 10. Agosto. 2016]. Disponible en:

principales factores que afectan tanto el proceso como el producto final, y se presentan a continuación:

**Tabla 9.** Factores que intervienen en el proceso y producto final de la Pirólisis

<b>Factor</b>	<b>Efecto</b>
Composición química de las resinas	Los productos del proceso de pirólisis están directamente relacionados con la composición y estructura de la resina, además de los mecanismos de descomposición (únicamente térmico o catalítico).
Temperatura y velocidad de calentamiento del proceso de pirólisis	Temperaturas altas y velocidades de calentamiento altas ayudan a la ruptura de enlaces y favorecen la producción de moléculas pequeñas
Tiempo del proceso de pirólisis	Tiempos de residencia mayores favorecen una segunda conversión de los productos primarios, produciendo coque, alquitrán y productos térmicamente estables.
Tipo de reactor	Determina principalmente la calidad de la transferencia de calor, el mezclado, tiempos de residencia de la fase líquida y gaseosa, y la pérdida de productos primarios.
Presión de operación	Una baja presión reduce la condensación de reactivos formando coque y productos pesados.
Presencia de gases reactivos como (aire) oxígeno o hidrógeno	La presencia de los compuestos en mención genera calor internamente, diluye los productos y tiene influencia directa sobre el equilibrio, cinética y mecanismos de reacción.
Uso de catalizadores	Su uso influencia la cinética y los mecanismos de reacción, y por lo tanto, la distribución del producto.
Incorporación de aditivos	Los aditivos influyen en la cinética y los mecanismos de reacción y generalmente se evaporan o se descomponen.
Fases líquidas y gaseosas	La fase líquida retarda el escape de productos en evolución, mejorando así las interacciones

**Fuente:** BUEKENS, A. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. Vrije Universiteit Brussel. [consultado en: 23, Agosto, 2016]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Alfons\\_Buekens/publication/228054449\\_Introduction\\_to\\_Feedstock\\_Recycling\\_of\\_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Alfons_Buekens/publication/228054449_Introduction_to_Feedstock_Recycling_of_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication_detail). Modificado por el autor

### 2.1.1 Proceso BASF

Una de las tecnologías más importantes de pirólisis es el proceso BASF, el cual inicio con una planta piloto ubicada en Ludwigshafen en 1994 con capacidad para 15.000 toneladas/año, el proceso de tratamiento se mantuvo hasta 1996 cuando se tomó la decisión de cerrar la planta piloto argumentando que no se tenía garantizada la cantidad suficiente de plásticos para que el proyecto pudiera implementarse a escala industrial.

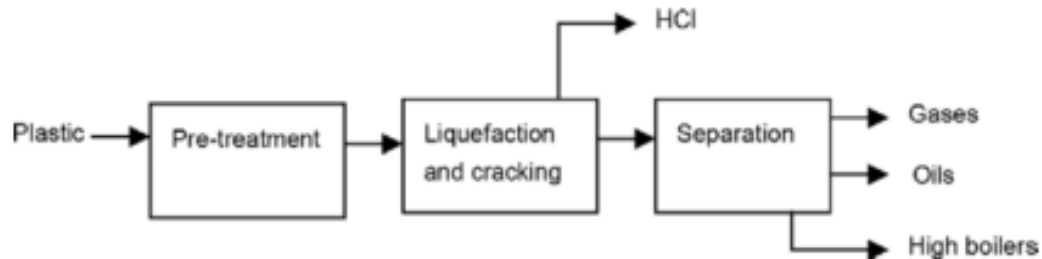
El proceso inicia con un pretratamiento donde se separan los metales y materiales aglomerados de los residuos plásticos, luego la corriente de residuos plásticos es

---

[https://www.researchgate.net/profile/Alfons\\_Buekens/publication/228054449\\_Introduction\\_to\\_Feedstock\\_Recycling\\_of\\_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Alfons_Buekens/publication/228054449_Introduction_to_Feedstock_Recycling_of_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication_detail)

alimentada a un proceso multi-etapas donde se dan lugar la fusión y reducción. En la Figura 6 se presenta el diagrama de bloques para el proceso de pirólisis BASF.

**Figura 6.** Diagrama de bloques proceso de pirólisis BASF



**Fuente:** BUEKENS, A. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. Vrije Universiteit Brussel (V.U.B). [electrónico]. 2006. [consultado en: 10. Agosto. 2016]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Alfons\\_Buekens/publication/228054449\\_Introduction\\_to\\_Feedstock\\_Recycling\\_of\\_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Alfons_Buekens/publication/228054449_Introduction_to_Feedstock_Recycling_of_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication_detail)

Como se mencionó anteriormente, la primera etapa es un pretratamiento donde se lleva a cabo una depuración de los materiales para dejar únicamente los residuos plásticos separando otros residuos como el aglomerado, materiales metálicos, entre otros. Posterior al pretratamiento, se realiza el proceso de fusión y licuefacción en un tanque agitado, el ácido clorhídrico gaseoso producto del calentamiento del PVC por encima de los 300°C se absorbe mediante agua de enjuague, dicha corriente es tratada para generar de ácido clorhídrico acuoso que sirve como materia prima para los procesos productivos de BASF. La tercera etapa de tratamiento se lleva a cabo en un reactor de craqueo tubular, al cual se alimenta el aceite obtenido en la etapa de licuefacción, el reactor se encuentra a una temperatura cercana a los 400°C y es allí donde se rompen los hidrocarburos en cadenas de diferentes tamaños y altos puntos de ebullición. Según Buekens<sup>43</sup> cerca de un 20-30% son gases y el 60-70% son combustibles que son separados posteriormente en una columna de destilación.

Las principales corrientes obtenidas del proceso son:

- Ácido clorhídrico, el cual puede ser neutralizado o procesado en la planta de ácido clorhídrico.
- Nafta que es convertida en monómeros mediante un craqueo con vapor
- Monómeros, que pueden ser usados para la producción de plásticos vírgenes

---

<sup>43</sup> BUEKENS, A. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. Vrije Universiteit Brussel (V.U.B). [electrónico]. 2006. [consultado en: 10. Agosto. 2016]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Alfons\\_Buekens/publication/228054449\\_Introduction\\_to\\_Feedstock\\_Recycling\\_of\\_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Alfons_Buekens/publication/228054449_Introduction_to_Feedstock_Recycling_of_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication_detail)

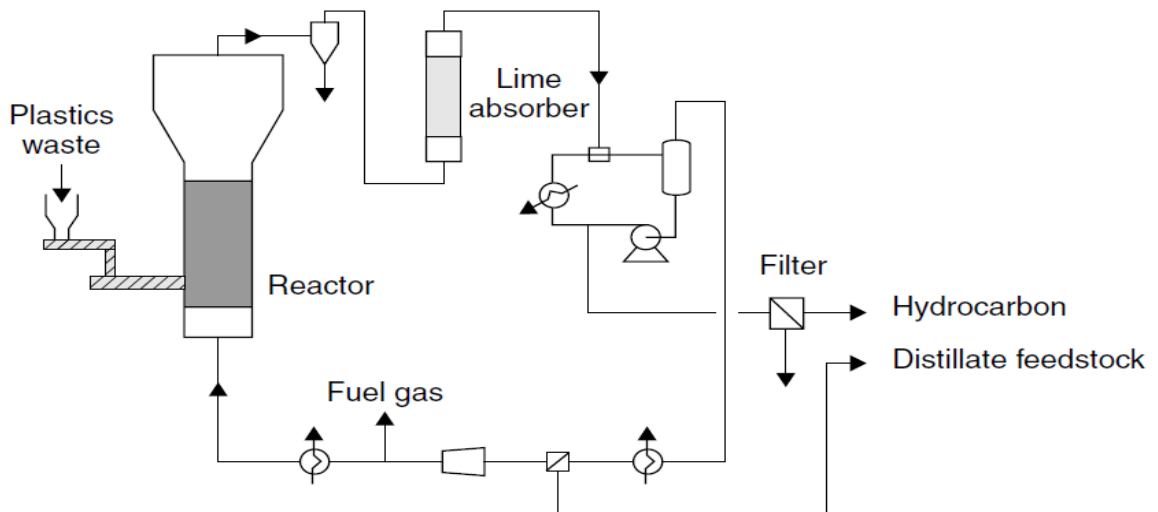
- Aceites con altos puntos de ebullición que pueden ser procesados en gas de síntesis o coque de conversión.
- Residuos de proceso, típicamente un 5% son minerales y metales.

De acuerdo con Tukker<sup>44</sup>, procesar residuos plásticos en la planta de BASF tiene un costo de 160€/tonelada para una capacidad de 300.000 toneladas/año y 250€/tonelada para una capacidad de 150.000 toneladas/año.

### 2.1.2 Proceso BP

Como en el proceso BASF, es necesario realizar un pretratamiento que permita remover la mayor cantidad de residuos no plásticos, una vez se ha llevado a cabo dicho proceso, la corriente de residuos plásticos se alimenta a un reactor de lecho fluidizado que se ha llevado previamente a una temperatura que oscila los 500 °C y en ausencia de oxígeno. A esta temperatura las moléculas de los plásticos se rompen en cadenas de hidrocarburos que dejan el lecho en estado gaseoso. Algunos residuos salen en la misma corriente mezclados con los hidrocarburos por lo cual es necesario realizar una purificación del gas en dos operaciones principalmente, la primera un ciclón donde los sólidos (carbón y algunos estabilizadores) se separan, y una etapa de neutralización necesaria debido a la síntesis de ácido clorhídrico en la degradación del PVC.

**Figura 7.** Diagrama del proceso BP



**Fuente:** BUEKENS, A. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. Vrije Universiteit Brussel (V.U.B). [electrónico]. 2006. [consultado en: 10. Agosto. 2016]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Alfons\\_Buekens/publication/228054449\\_Introduction\\_to\\_Feedstock\\_Recycling\\_of\\_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Alfons_Buekens/publication/228054449_Introduction_to_Feedstock_Recycling_of_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication_detail)

<sup>44</sup> TUKKER, A. et al. Chemical Recycling of Plastics Waste (PVC and other resins). TNO Institute of Strategy, Technology and Policy [electrónico]. Diciembre. 1999. [consultado: 09, agosto, 2016]. Disponible en: [http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pvc/chem\\_recycle.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pvc/chem_recycle.pdf)

De acuerdo con Buekens<sup>45</sup> el costo de inversión de una planta de 25.000 toneladas/año, ubicada en Europa Occidental, para el año 1998 se estimó en 15-20 millones de libras esterlinas. Adicionalmente se requiere de los siguientes servicios industriales:

- 60 kWh/tonelada de plástico alimentado
- Agua para enfriamiento 40 m<sup>3</sup>/tonelada de plástico alimentado
- 1,2 toneladas de vapor/tonelada de plástico alimentado

## 2.2 HIDROGENACIÓN

Garay<sup>46</sup> define la hidrogenación como el proceso bajo el cual los residuos plásticos son tratados con hidrógeno y calor para romper sus cadenas y producir un petróleo sintético que puede ser usado en refinerías y plantas químicas. La hidrogenación se ha usado para la conversión de polímeros como PE, PP, PS, PET y mezclas de los mismos, el principal referente de esta tecnología es el proceso Veba.

De acuerdo con Buekens<sup>47</sup>, Veba Oil Ag operaba desde 1981 una planta de hidrogenación de carbón a petróleo en Alemania. En 1992/1993 se añadió una unidad de depolimerización al proceso con el fin exclusivo de tratar residuos plásticos de empaques, hacia 1998 la planta tenía capacidad de 87.000 toneladas tratadas, sin embargo hacia 1999 se tomó la decisión de terminar el contrato de forma anticipada (planeado para culminar en el 2003) debido a que la hidrogenación no era económicamente competitiva.

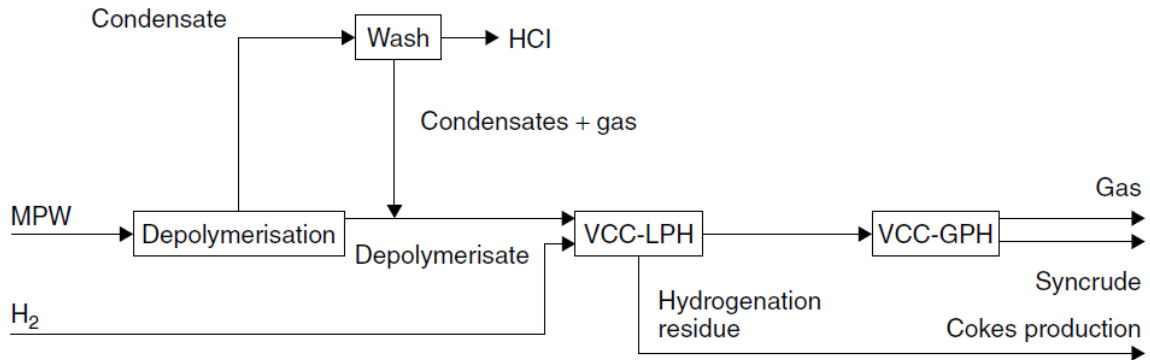
---

<sup>45</sup> BUEKENS, A. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. Vrije Universiteit Brussel (V.U.B). [electrónico]. 2006. [consultado en: 10. Agosto. 2016]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Alfons\\_Buekens/publication/228054449\\_Introduction\\_to\\_Feedstock\\_Recycling\\_of\\_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Alfons_Buekens/publication/228054449_Introduction_to_Feedstock_Recycling_of_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication_detail)

<sup>46</sup> GARAY, Carlos A. et al. Guías Ambientales – Sector Plástico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [electrónico]. julio. ISBN 958 – 97393 - 4 - 2. 2004. [consultado: 16, enero, 2016] Disponible en: [http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias\\_Ambientales/Gu%C3%ADAs%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf](http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADAs%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf)

<sup>47</sup> BUEKENS, A. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. Vrije Universiteit Brussel (V.U.B). [electrónico]. 2006. [consultado en: 10. Agosto. 2016]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Alfons\\_Buekens/publication/228054449\\_Introduction\\_to\\_Feedstock\\_Recycling\\_of\\_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Alfons_Buekens/publication/228054449_Introduction_to_Feedstock_Recycling_of_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication_detail)

**Figura 8.** Diagrama del proceso Veba Oil Ag



**Fuente:** BUEKENS, A. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. Vrije Universiteit Brussel (V.U.B). [electrónico]. 2006. [consultado en: 10. Agosto. 2016]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Alfons\\_Buekens/publication/228054449\\_Introduction\\_to\\_Feedstock\\_Recycling\\_of\\_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Alfons_Buekens/publication/228054449_Introduction_to_Feedstock_Recycling_of_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication_detail)

Donde,

- LPH= Hidrogenación de la fase líquida
- GPH=Hidrogenación de la fase gaseosa

Para llevar a cabo satisfactoriamente el proceso es necesario alimernar el residuo plástico a tratar bajo las siguientes condiciones:

- Tamaño de partícula <1 cm
- Densidad 300 Kg/m<sup>3</sup>
- Contenido de agua <1% (peso)
- PVC <4% (2% en peso de cloro)
- Inertes <4.5% (peso) a 650°C
- Contenido de resinas plásticas >90% (peso)

Y se obtienen las siguientes salidas:

- Crudo sintético libre de cloro, con bajo contenido de oxígeno y nitrógeno
- Residuo sólido hidrogenado, que puede ser tratado para incorporarlo a la producción de carbón
- Ácido clorhídrico (HCl)
- Gases

Se pudo estimar en la investigación realizada por Buekens<sup>48</sup> que la inversión para este tipo de proceso es de aproximadamente 250€/tonelada, para una instalación

<sup>48</sup> BUEKENS, A. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. Vrije Universiteit Brussel (V.U.B). [electrónico]. 2006. [consultado en: 10. Agosto. 2016]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Alfons\\_Buekens/publication/228054449\\_Introduction\\_to\\_Feedstock\\_Recycling\\_of\\_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Alfons_Buekens/publication/228054449_Introduction_to_Feedstock_Recycling_of_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication_detail)

con capacidad para 40.000 toneladas/año tomando como caso de estudio la planta ubicada en Bottrop. Una tonelada de residuos plásticos tratados bajo el proceso Veba en la planta Bottrop, generan los siguientes productos y sub-productos:

- 800 Kg de producto líquidos de alta calidad
- 100 Kg de gas mezcla butano-metano
- 100 Kg de residuos de hidrogenación, que contienen componentes inorgánicos e inertes



### **3. IMPACTOS AMBIENTALES DE LAS ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE PLÁSTICOS PARA GENERACIÓN DE COMBUSTIBLES Y LOS COMBUSTIBLES GENERADOS**

En este capítulo se abordan los estudios de impacto ambiental existentes que permitan establecer mediante un posterior análisis la viabilidad ambiental del aprovechamiento de los residuos plásticos para la generación de combustibles.

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, mediante las disposiciones generales del Decreto 2820 de 2010 define el impacto ambiental como cualquier alteración en el sistema biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad. Para 1999, la Asociación Internacional para Evaluación del Impacto en cooperación con el Instituto de Evaluación Ambiental del Reino Unido<sup>49</sup> definieron la evaluación del Impacto Ambiental como el proceso para identificar, predecir, evaluar y mitigar los efectos biofísicos, sociales y otros efectos relevantes de propuestas de desarrollo teniendo como prioridad la toma de decisiones y los compromisos que se puedan generar estableciendo 4 objetivos de la evaluación, así:

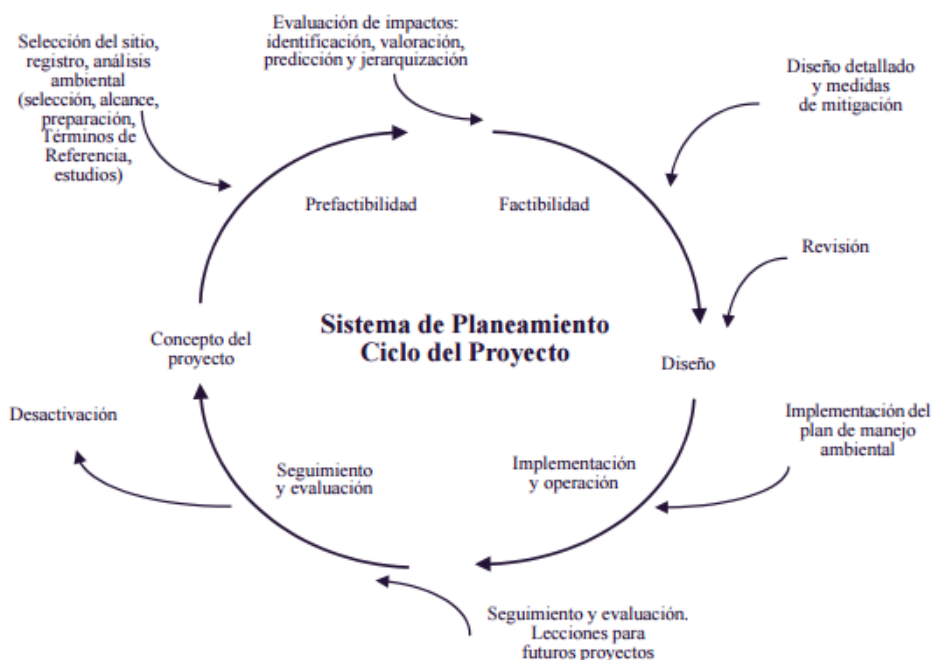
- Asegurar que los factores ambientales sean considerados e incorporados en la toma de decisiones en el desarrollo del proceso
- Para anticipar, evitar, minimizar o compensar los efectos adversos biofísicos, sociales y otros significativos en el desarrollo del proceso.
- Proteger la productividad y la capacidad de los sistemas naturales y los procesos ecológicos manteniendo sus funciones
- Promover el desarrollo sostenible, optimizar los recursos y gestionar las oportunidades de mejora.

La exploración sistemática de las interrelaciones a través de los componentes ambientales es indispensable para el correcto desarrollo de la evaluación junto a una selección correcta de la metodología utilizada la cual debe facilitar un análisis integrado de las diferentes actividades.

---

<sup>49</sup> SENÉCAL, Pierre. International Association for Impact Assessment. Principles Of Environmental Impact Assessment Best Practice. [electrónico]. enero. 1999. [consultado: 31, mayo, 2016] Disponible en: [http://www.iaia.org/uploads/pdf/principlesEA\\_1.pdf](http://www.iaia.org/uploads/pdf/principlesEA_1.pdf)

**Figura 9.** Evaluación de Impacto Ambiental en el ciclo de un proyecto



**Fuente:** ESPINOZA, G. Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental. [electrónico]. Centro de Estudios para el Desarrollo (CED) de Chile. 2001. [consultado: 31, agosto, 2016] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd51/fundamentos.pdf>

La Figura 9 permite entender como se desarrolla la evaluación de impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de un proyecto.

### 3.1 COMPARACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES

#### 3.1.1 Impactos ambientales de las alternativas de aprovechamiento

Los impactos ambientales asociados al aprovechamiento de residuos plásticos no es un tema que se haya desarrollado ampliamente en el mundo, lo anterior puede deberse a que como herramienta de reciclaje se considera implícito su beneficio por encima de las afectaciones que puede generar. Sin embargo, es necesario realizar un análisis para determinar que la afirmación es correcta, el mencionado análisis se llevará a cabo tomando como caso de estudio el trabajo realizado por Ministerio de Ambiente de la República de Islas Mauricio.

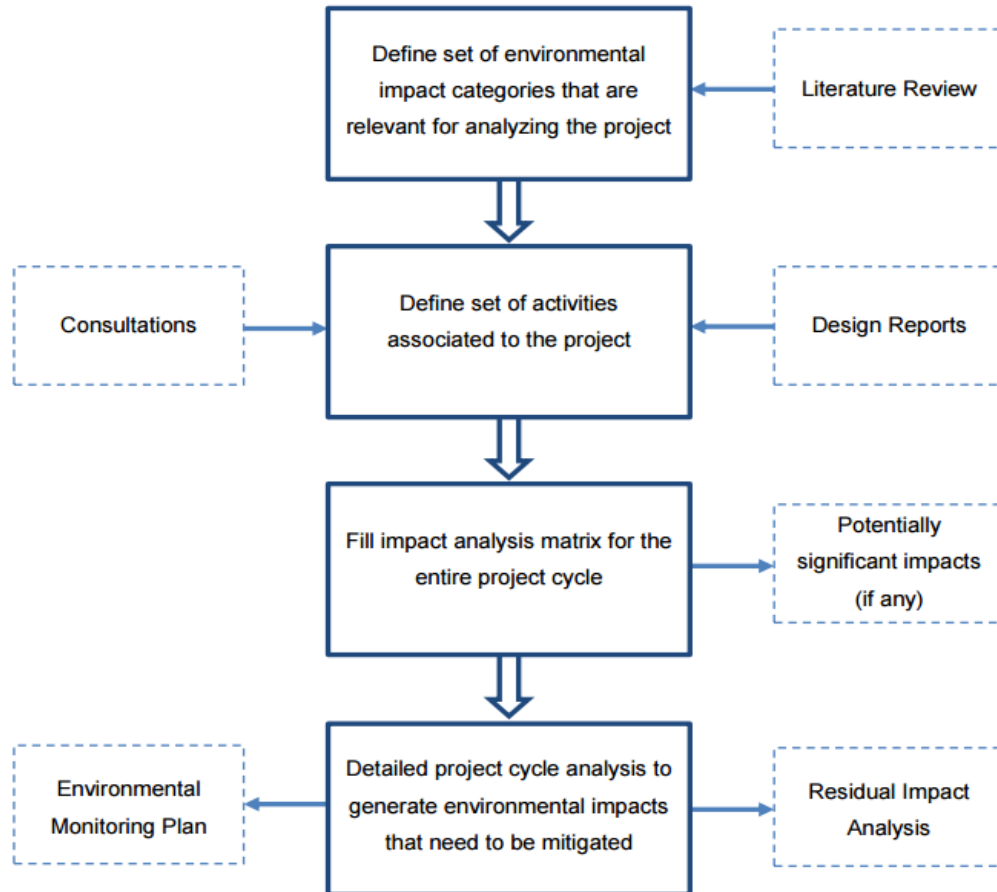
Choon<sup>50</sup> llevo a cabo un estudio de impacto ambiental dirigido al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Islas Mauricio para obtener

<sup>50</sup> CHOON, W. Environmental impact Assessment Report. [electrónico]. 2015. [consultado: 20, agosto, 2016] Disponible en: [http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/res\\_kwongpl\\_15/chap4.pdf](http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/res_kwongpl_15/chap4.pdf)

una licencia ambiental. Dicho documento contiene el estudio de impactos ambientales y medidas de mitigación para una planta de pirólisis de llantas usadas y mezclas de plásticos para 3 etapas de la industria; construcción, operación y cierre de instalaciones.

La metodología que implementada por Choon para el desarrollo del estudio de impacto ambiental es la que se muestra en la Figura 10.

**Figura 10.** Metodología seleccionada por Choon para el estudio de impacto ambiental.



**Fuente:** CHOON, W. Environmental impact Assessment Report. [electrónico]. 2015. [consultado: 20, agosto, 2016] Disponible en: [http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/res\\_kwongpl\\_15/chap4.pdf](http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/res_kwongpl_15/chap4.pdf).

Para efectos del presente estudio solo se considerará la etapa de operación argumentando que es la etapa en la cual se desarrolla el proceso de aprovechamiento que se quiere evaluar. Para llevar a cabo el análisis se consideraron 11 categorías de impacto a evaluar:

- Emisiones de gases efecto invernadero
- Consumo de energía

- Recursos hidricos
- Ecosistemas marinos y terrestres
- Temas culturales y sociales
- Planeación y uso del suelo
- Calidad del aire, ruido y olores
- Aguas residuales
- Residuos solidos
- Riesgos a la seguridad y salud

De acuerdo con la evaluación realizada por el Ministerio antes mencionado se puede establecer que los efectos con un impacto negativo son la alteración calidad de aire, generación de ruidos, olores y de agua residual, como se puede observar en la Tabla 10:

**Tabla 10.** Evaluación de impactos ambientales de las alternativas de aprovechamiento según Choon

Actividad	Aspecto	Impacto	Tipo	N/P	Severidad	Probabilidad	Significancia
Fase de operación de la planta de pirólisis	Emisiones de efecto invernadero	Contaminación del aire	E	N	2	2	4
	Consumo de energía	Contaminación del agua, suelo y aire	E	N	1	5	5
	Consumo de agua fresca	Agotamiento de las fuentes hídricas	E	N	1	5	5
	Generación de empleo	Socio Cultural y Económico	SE	P	1	1	1
	Gestión y uso del suelo	Contaminación del suelo	E & SE	N	1	1	1
	Almacenamiento de residuos plásticos	Contaminación del agua, suelo y aire	E & H&S	N	3	2	6
	Emisión de material particulado, ruido y olor	Contaminación del aire, salud humana	E, SE & H&S	N	4	3	12
	Generación de aguas residuales	Contaminación del agua	E	N	4	3	12
	Generación de residuos solidos	Contaminación del agua, suelo y aire	E	N	3	1	3

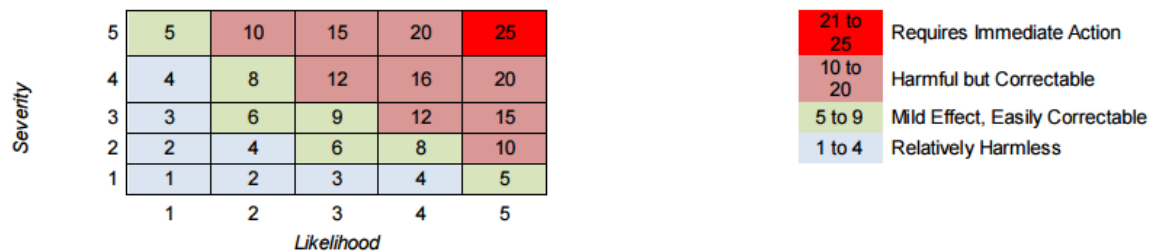
**Fuente:** CHOON, W. Environmental impact Assessment Report. [electrónico]. 2015. [consultado: 20, agosto, 2016] Disponible en: [http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/res\\_kwongpl\\_15/chap4.pdf](http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/res_kwongpl_15/chap4.pdf). Modificado por el autor

La Tabla 10 se modifico para incluir los aspectos asociados a los impactos y permitir tener mayor claridad respecto a los efectos que tiene sobre los diferentes recursos naturales. La cualificación considera los impactos como Negativos (N) o Positivos (P) a cuatro (4) factores: Ambiente (E), Seguridad (S), Salud (H), Socioeconomico (SE). Mientras que la calificación de los impactos se muestra a continuación:

- Severidad
  1. Sin Impacto
  2. Impacto despreciable
  3. Impacto considerable
  4. Impacto alto
  5. Impacto muy alto
  
- Probabilidad
  1. Muy improbable
  2. Improbable
  3. Ocurre rara vez
  4. De vez en cuando
  5. Sucede regularmente

La matriz de calificación según severidad y probabilidad se presenta en la Figura 11:

**Figura 11.** Matriz calificación según severidad y probabilidad



**Fuente:** CHOON, W. Environmental impact Assessment Report. [electrónico]. 2015. [consultado: 20, agosto, 2016] Disponible en: <http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/beemanique/pimpmm.pdf>

Los datos obtenidos a partir de la matriz muestran que solamente 2 actividades del total de evaluadas tienen una significancia relevante (12), y pueden catalogarse como dañinas pero corregibles.

### 3.1.1.1 Medidas de mitigación

#### ➤ Calidad del aire, ruido y olores

Nivel de significancia: 12 (dañino pero corregible)

Aspecto: Calidad del aire

Impacto negativo ambiental, de salud y seguridad.

En el proceso de pirólisis no se generan gases de efecto invernadero debido a que el proceso se lleva a cabo en ausencia de oxígeno (Ver Capítulo 2), mientras que la producción de ácido clorhídrico (HCl) se puede abordar de distintas maneras, bien sea restringiendo el consumo de PVC para la producción de combustibles o haciendo recuperación de dicha corriente de ácido para procesos productivos paralelos. Sin embargo, se presentará generación de material particulado (PM<sub>10</sub>) debido a la presencia de metales y aditivos, entre otros factores.

El proceso de pirólisis está diseñado para generar la menor cantidad de contaminantes atmosféricos debido a que las corrientes gaseosas se recirculan al proceso como gas de combustión para alcanzar las temperaturas de reacción. La caracterización típica del gas recirculado se presenta en la Tabla 11. Asumiendo una combustión completa los residuos generados serán agua, dióxido de carbono y nitrógeno, los óxidos de nitrógeno solo se presentan en temperaturas por encima de 1300°C (el proceso se desarrolla en temperaturas cercanas a los 760°C, por lo cual no habrá generación de óxidos de nitrógeno).

**Tabla 11.** Composición típica del gas de combustión usado en el proceso de aprovechamiento

Constituent	Weight Percent (%)
Hydrogen	0.22
Methane	2.87
Ethane	3.39
Ethene	5.65
Propane	1.26
Propene	5.53
Butane	6.35
Butene	0.24

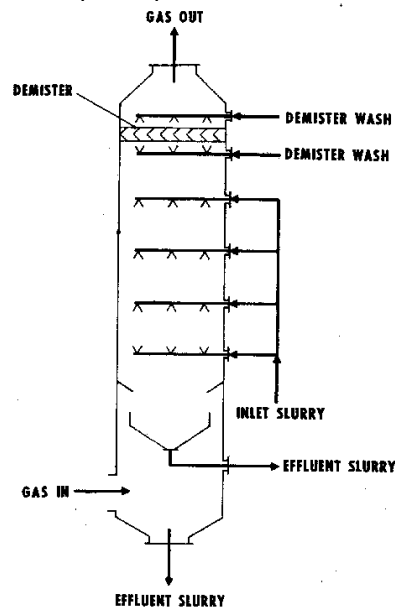
**Fuente:** CHOON, W. Environmental impact Assessment Report. [electrónico]. 2015. [consultado: 20, agosto, 2016] Disponible en: <http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/beemanique/pimpmm.pdf>

Sin embargo de este proceso se genera un impacto significativo por material particulado debido a los inertes que se encuentran en el proceso. Establecer una composición típica para el material particulado no es posible debido a la diversidad de contaminantes que pueden haber ingresado al proceso dentro de la matriz de los plásticos.

- **Medidas de mitigación:** Como principal medida de mitigación para la emisión de material particulado que genera impactos negativos a la calidad del aire, Choon<sup>51</sup> propone la implementación de un depurador húmedo (Wet Scrubber, en inglés).

Un depurador húmedo es definido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) como un dispositivo de control de material particulado. Su funcionamiento se resume en el contacto con una corriente acuosa que tiene como fin llevar las partículas de la fase gaseosa a la fase líquido.

**Figura 12.** Esquema de un depurador húmedo por aspersión



**Fuente:** ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Wet Scrubbers. [electrónico] S.F [consultado: 22, Julio, 2016] Disponible en: <https://www3.epa.gov/ttn/caaa/t1/reports/sect5-4.pdf>

En la Figura 12 se presenta el esquema de un depurador húmedo de tipo Torre de aspersión, sin embargo la elección del tipo de sistema debe llevarse a cabo mediante la implementación de un diseño detallado de acuerdo a las necesidades del proyecto considerando el de menor consumo energético, reducción de efluentes y residuos sólidos.

<sup>51</sup> CHOON, W. Environmental impact Assessment Report. [electrónico]. 2015. [consultado: 20, agosto, 2016] Disponible en: <http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/beemanique/pimpmm.pdf>

➤ **Generación de aguas residuales**

Las corrientes de agua generadas en el proceso son de 2 tipos: domésticas e industriales. Se consideran como aguas residuales domésticas las generadas en las áreas de baños, para establecer el caudal de generación Choon<sup>52</sup> plantea una tasa de consumo de agua por persona y un coeficiente de retorno, así:

$$Q = 10 \text{ trabajadores} \times 162 \frac{L}{\text{trabajador. dia}}$$

$$Q = 1620 \frac{L}{\text{dia}} \times 80\% = 1296 \frac{L}{\text{dia}} \approx 1.3 \frac{m^3}{\text{día}}$$

Donde,

- Se consideran 10 trabajadores durante la operación normal del sistema.
- Una dotación de 162 Litros de agua diarios por trabajador.
- Un coeficiente de retorno del 80% del agua de consumo.

Las aguas residuales industriales son aquellas que se generan en el depurador húmedo debido a que es la principal fuente de generación de efluentes industriales. Debido a que el depurador propuesto usa agua, se generan reacciones que dan formación a ácidos como el ácido sulfuroso (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

- **Medidas de mitigación:** Debido al bajo caudal de generación de aguas residuales domésticas, Choon<sup>53</sup> propone la implementación de un sistema de tratamiento de bajo costo como un pozo séptico.

En cuanto a las aguas residuales industriales debe llevarse a cabo un ajuste de pH debido a la tendencia de generación de ácidos en el contacto de los gases con las gotas de agua, este proceso se puede llevar a cabo en un tanque de reacción y en el que se dosifica hidróxido de sodio (NaOH) hasta alcanzare un pH neutro. El agua tratada se lleva a una etapa de separación física para remover los sólidos en suspensión, lo cual se puede realizar usando filtros de bolsa. Los sólidos retenidos en los filtros son recolectados para secarlos y disponerlos como material inerte.

---

<sup>52</sup> CHOON, W. Environmental impact Assessment Report. [electrónico]. 2015. [consultado: 20, agosto, 2016] Disponible en: <http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/beem-anique/pimpmm.pdf>

<sup>53</sup> CHOON, W. Environmental impact Assessment Report. [electrónico]. 2015. [consultado: 20, agosto, 2016] Disponible en: <http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/beem-anique/pimpmm.pdf>



### 3.1.2 Impactos ambientales de los combustibles

Según el Tesouro Ambiental<sup>54</sup> desarrollado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, los combustibles están definidos como materiales biológicos o derivados que sirven como fuente de energía. Además, la Resolución 18 0887 de 2003 expedida por el Ministerio de Mina y Energía, hace una definición clasificando los combustibles en 2 tipos: básicos y oxigenados, donde los básicos son aquellas mezclas de hidrocarburos derivados del petróleo que han sido creados para ser usados en motores de combustión interna y se entienden como gasolina corriente, gasolina extra, diesel corriente y el diesel extra o de bajo azufre.

Los impactos ambientales de los combustibles son un tema de amplio espectro que se ha desarrollado a nivel detallado para los diferentes aspectos ambientales que pueden afectar (positiva o negativamente).

Como caso de estudio se propone la evaluación realizada por DINCĂ<sup>55</sup>. El estudio en mención tiene como principal objetivo comparar los impactos ambientales del ciclo de vida de los combustibles fósiles. La metodología usada corresponde a la de Análisis del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) tomando como referencia los procesos de producción existentes, este método permite determinar los contaminantes presentes en cada etapa: extracción, tratamiento, transporte y combustión. Para el desarrollo de la evaluación de impacto ambiental DINCĂ<sup>56</sup> selecciono el método CML2 Baseline 2000 bajo el cual se cuantifican los impactos en diferentes categorías estandarizadas.

#### 3.1.2.1 Método CML2 Baseline 2000

Este método fue desarrollado originalmente por el Instituto de Ciencias Ambientales (CML) de la Universidad de Leiden para el año 1992<sup>57</sup> e incluía las siguientes categorías:

---

<sup>54</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Tesouro Ambiental para Colombia [electrónico]. S.F. [consultado 31, mayo, 2016]. Disponible en: <http://biblovirtual.minambiente.gov.co:3000/>

<sup>55</sup> DINCĂ, Cristian. et al. Life Cycle Impact Assessment of Fossil Fuels. UPB. [electrónico]. Series C, Vol 71, 2010. ISSN 1454-234x [consultado: 01, septiembre, 2016]. Disponible en: [http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full5321.pdf](http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full5321.pdf)

<sup>56</sup> DINCĂ, Cristian. et al. Life Cycle Impact Assessment of Fossil Fuels. UPB. [electrónico]. Series C, Vol 71, 2010. ISSN 1454-234x [consultado: 01, septiembre, 2016]. Disponible en: [http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full5321.pdf](http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full5321.pdf)

<sup>57</sup> BUONOCORE, Elvira. Et al. Project title : Synergies in Multi-scale Inter-Linkages of Eco-social systems. [electronico]. 2009. [consultado en: 08, septiembre, 2016]. Disponible en: <http://www.smile-fp7.eu/deliverables/SMILE%20D14%20Energy%20and%20LCA%20evaluation.pdf>

- Mejora del efecto invernadero
- Acidificación de la lluvia
- Agotamiento de la capa de ozono
- Eutrofización de los cuerpos de agua
- Formación de Niebla
- Eco-toxicidad (Agua dulce, marina y terrestre)
- Toxicidad humana
- Producción de residuos sólidos
- Uso de fuentes de energía primarias

Sin embargo, para el año 2000 se llevó a cabo una normalización de los factores y se hizo una actualización del método:

- Dos categorías de impacto se retiraron: producción de residuos sólidos y uso de fuentes de energía primarias.
- La categoría de formación de niebla fue reemplazada por Oxidación fotoquímica.
- Se introdujo una nueva categoría llamada Agotamiento del factor abiótico.

Este método es probablemente el más actualizado para el estudio de impactos ambientales sin embargo para poder desarrollarlo es necesario tener un estudio de ciclo de vida con sus respectivos resultados. Las categorías del método CML2 Baseline se explican en la Tabla 12 de acuerdo con Buonocore<sup>58</sup>:

---

<sup>58</sup> BUONOCORE, Elvira. Et al. Project title : Synergies in Multi-scale Inter-Linkages of Eco-social systems. [electronico]. 2009. [consultado en: 08, septiembre, 2016]. Disponible en: <http://www.smile-fp7.eu/deliverables/SMILE%20D14%20Energy%20and%20LCA%20evaluation.pdf>

**Tabla 12.** Descripción categorías modelo CML2 Baseline

<b>Categoría</b>	<b>Descripción</b>
Potencial de calentamiento Global	Para caracterizar este factor se sigue el modelo desarrollado por el grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Los factores se calculan tomando como base de tiempo 100 años y se expresan en unidades de gramos de dióxido de carbono/g de emisión.
Acidificación de la lluvia	En el caso de la lluvia ácida el gas que se usa como referencia ácida es el dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ), para el caso de los impactos de las otras emisiones se usan factores de equivalencia con el fin de dejar como base de acidez relativa las unidades Kg SO <sub>2</sub> equivalentes/Kg de emisiones. Cabe denotar que el resultado obtenido de potencial de acidificación (AC, por sus siglas en inglés) es una medida de sugerida de impacto ambiental, y que debe analizarse en función de los receptores medio ambientales (suelo, cuerpos hídricos, etc) debido a las diferentes tolerancias que pueden tener a la lluvia ácida.
Eutrofización de los cuerpos de agua	El compuesto que se usa como referencia es el PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , las equivalencias para otros compuestos deben hallarse por medio de estequiometría y sus unidades son g PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> equivalentes/g emisión.
Oxidación fotoquímica	Sus unidades son g de etileno/g emisión y usualmente se calculan por medio de Modelos de trayectoria fotoquímica, entre los más destacados se encuentra el desarrollado por la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE, por sus siglas en inglés). El impacto real depende altamente de las condiciones climáticas (irradiación promedio, la temperatura y la humedad) y la co-presencia de óxidos de nitrógeno en la troposfera.
Toxicidad humana	Los impactos toxicológicos en humanos dependen del grado de exposición y efectos de las sustancias químicas y biológicas. El efecto potencia sobre los seres humanos depende de la emisión real y el destino de las sustancias específicas emitidas. El método de caracterización que se usa para el cálculo fue desarrollado por la Unión Europea para la Evaluación de Sustancias, y se expresa en unidades de equivalentes de 1,4-diclorobenceno/g emisión.

**Nota:** BUONOCORE, Elvira. Et al. Project title : Synergies in Multi-scale Inter-Linkages of Eco-social systems. [electronic]. 2009. [consultado en: 08, septiembre, 2016]. Disponible en: <http://www.smile-fp7.eu/deliverables/SMILE%20D14%20Energy%20and%20LCA%20evaluation.pdf>  
Modificado por el autor

Considerando la información que recolecto y al estudio de ciclo de vida realizado, DINCÁ, obtuvo los resultados para las categorías del modelo CML2 Baseline en cada etapa del ciclo de vida, a continuación se presentan los resultados para la etapa de combustión únicamente debido al interés que representa en el presente trabajo.

**Tabla 13.** Resultados evaluación de categorías de impacto ambiental según modelo CML2 Baseline según Dincă.

Impact indicators	Stages				
	Extraction	Treatment	Transport	Combustion	Total
ADP [t Sb eq.]	4,848	0	0	0	4,848
GWP [t CO <sub>2</sub> eq.]	32,459	28,938	137	865,937	927,471
AP [t SO <sub>2</sub> eq.]	306	129	12	2,186	2,633
POCP [t ethene eq. ]	16.5	7.6	0.5	75	99.6
EP [t PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.]	13	8.5	0.3	195	216.8
HTP [t 1,4 DCB eq.]	302	14,128	7	1,202	15,639
FAETP [t 1,4 DCB eq.]	0,4	25	0	154	179.4
MAETP [t 1,4 DCB eq.]	588	46,028	17	32	46,665
TETP [t 1,4 DCB eq.]	1.7	129	0	17	147.7

**Fuente:** DINCĂ, Cristian. et al. Life Cycle Impact Assessment of Fossil Fuels. UPB. [electrónico]. Series C, Vol 71, 2010. ISSN 1454-234x [consultado: 01, septiembre, 2016]. Disponible en: [http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full5321.pdf](http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full5321.pdf)

Donde,

- ADP: Potencial de agotamiento abiótico
- GWP: Potencial de calentamiento global
- AP: Potencial de acidificación
- POCP: Potencial de oxidación fotoquímica
- EP: Potencial de Eutrofización
- HTP: Potencial de toxicidad humana
- FAETP: Potencial de eco toxicidad en agua dulce
- MAETP: Potencial de eco toxicidad en agua de mar
- TETP: Potencial de eco toxicidad terrestre

En el modelo CML2 Baseline los valores positivos reflejan impactos ambientales negativos mientras que los valores negativos indican positivos.

A modo de referencia a continuación se presenta la comparación entre los valores obtenidos para el combustible y el gas natural:

**Tabla 14.** Comparación impactos ambientales combustibles

Indicador	Combustible	Gas Natural
	Total	Total
ADP [t Sb eq.]	4848	3192
GWP [t CO <sub>2</sub> eq.]	927471	516631
AP [t SO <sub>2</sub> eq.]	2633	643
POCP [t ethene eq.]	99.6	49
EP [t PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.]	216.8	90
HTP [t 1,4 DCB eq.]	15639	12805
FAETP [t 1,4 DCB eq.]	179.4	93
MAETP [t 1,4 DCB eq.]	46665	39363
TETP [t 1,4 DCB eq.]	147.7	119

**Nota:** DINCĂ, Cristian. et al. Life Cycle Impact Assessment of Fossil Fuels. UPB. [electrónico]. Series C, Vol 71, 2010. ISSN 1454-234x [consultado: 01, septiembre, 2016]. Disponible en: [http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full5321.pdf](http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full5321.pdf). Modificado por el autor

Los resultados presentados en la Tabla 14 permiten dar una idea de los impactos y la magnitud asociada al ciclo de vida de dos combustibles, el gas natural presenta valores menores a los combustibles líquidos en los indicadores de potencial de calentamiento global y acidificación, factores que están directamente involucrados en el efecto invernadero y por consiguiente en el cambio climático.

### 3.1.3 Análisis de los resultados

Los estudios presentados permiten tener noción del tipo de impacto generado en cada etapa del ciclo de vida del combustible (negativo o positivo) para poder desarrollar una comparación cualitativa que presente un resultado en cuanto a los beneficios que puede generar la implementación de procesos de aprovechamiento de residuos plásticos para generación de combustibles frente al combustible que se genera del proceso.

De acuerdo con el estudio presentado para las alternativas de aprovechamiento se puede establecer que los dos aspectos con impactos dañinos pero corregibles pueden mitigarse mediante diferentes medidas, permitiendo la implementación de la planta de pirólisis. Existen aspectos e impactos que no fueron considerados en el estudio realizado por Choon<sup>59</sup> y que tienen una importancia considerable, como son la reducción de contaminación en ecosistemas marinos y terrestres por basura plástica, de acuerdo con Allsopp<sup>60</sup> para 1997, el 86% de todas las tortugas marinas, el 44% de las especies de aves marinas, el 43% de todas las especies

<sup>59</sup> CHOON, W. Environmental impact Assessment Report. [electrónico]. 2015. [consultado: 20, agosto, 2016] Disponible en: <http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/beem-anique/pimpmm.pdf>

<sup>60</sup> ALLSOPP, Michelle. Et al. Plastic Debris in the World's Oceans. GREENPEACE [electrónico]. 2006. [consultado en: 19. Agosto. 2016] Disponible en: [http://www.unep.org/regionalseas/marine\\_litter/publications/docs/plastic\\_ocean\\_report.pdf](http://www.unep.org/regionalseas/marine_litter/publications/docs/plastic_ocean_report.pdf)

de mamíferos marinos y numerosas especies de peces y crustáceos han sufrido de daños o muertes por enredos y/o ingesta de basura plástica.

En cuanto a los combustibles, los resultados obtenidos para las diferentes categorías en el ciclo de vida permiten desarrollar un análisis para cada etapa del ciclo de vida estudiada de la siguiente manera:

- En la categoría de agotamiento de recursos naturales (abióticos), la única etapa que tiene impactos es la de extracción debido a las implicaciones que tiene realizar perforaciones sobre yacimientos cercanos a fuentes hídricas u otros recursos.
- Para la categoría de calentamiento global la etapa de combustión (consumo) es la que aporta el 93% de los gases de efecto invernadero generados en el ciclo de vida de los combustibles.
- Desde el punto de vista de la acidificación, la combustión es la etapa que mayor aporte tiene a este impacto, representado en el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y los óxidos de nitrógeno, los cuales aportan un 76% y 24%<sup>61</sup> del total calculado de este indicador.
- La oxidación fotoquímica presenta su valor más alto en la etapa de combustión debido a la emisión de SO<sub>2</sub>, gas que aporta el 64% del total calculado para el indicador.
- En lo que concierne a la eutrofización los contaminantes con mayor contribución son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) que aportan hasta un 100%<sup>62</sup> del valor del indicador.
- El indicador de toxicidad humana presenta su valor más alto en la etapa de tratamiento, para el valor total del indicador, DINCĂ<sup>63</sup> establece que el contaminante con mayor aporte es el plomo (Pb) con un 63%.

---

<sup>61</sup> DINCĂ, Cristian. et al. Life Cycle Impact Assessment of Fossil Fuels. UPB. [electrónico]. Series C, Vol 71, 2010. ISSN 1454-234x [consultado: 01, septiembre, 2016]. Disponible en: [http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full5321.pdf](http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full5321.pdf)

<sup>62</sup> DINCĂ, Cristian. et al. Life Cycle Impact Assessment of Fossil Fuels. UPB. [electrónico]. Series C, Vol 71, 2010. ISSN 1454-234x [consultado: 01, septiembre, 2016]. Disponible en: [http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full5321.pdf](http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full5321.pdf)

<sup>63</sup> DINCĂ, Cristian. et al. Life Cycle Impact Assessment of Fossil Fuels. UPB. [electrónico]. Series C, Vol 71, 2010. ISSN 1454-234x [consultado: 01, septiembre, 2016]. Disponible en: [http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full5321.pdf](http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full5321.pdf)

- El potencial de eco toxicidad en agua dulce y el potencial de eco toxicidad en agua de mar corresponden principalmente a la contaminación con plomo y su valor más alto en el ciclo de vida se presenta en la etapa de combustión y en la de tratamiento, respectivamente. En el caso del potencial de eco toxicidad terrestre el plomo corresponde al 93% del valor del indicador.

La situación actual del planeta requiere de la implementación de estrategias y medidas acordes a los cambios que estamos viviendo. Las industrias deben empezar a buscar reconversiones tecnológicas guiadas por los pilares del desarrollo sostenible buscando reducir sus impactos y huellas ambientales.

Los plásticos están presentes en la vida cotidiana del ser humano debido a los múltiples beneficios que aportan al desarrollo de nuevos productos, tecnologías, entre otros, guiados principalmente por la diversidad de propiedades físicas y químicas. El consumo de estos materiales en productos de consumo masivo con una vida útil reducida ha generado un incremento en los residuos generados, lo anterior unido a las malas prácticas de disposición hace que los residuos plásticos terminen contaminando ecosistemas completos. Las técnicas de disposición convencionales (vertederos a cielo abierto e incineración) no están siendo eficientes en términos de impactos ambientales debido a la alta generación de gases y uso del suelo, es así, como una planta de aprovechamiento de residuos plásticos para la generación de combustibles surge como una opción de reciclaje químico.

El aprovechamiento de residuos plásticos para la generación de combustibles es una alternativa que ha sido ampliamente estudiada desde diversas tecnologías y procesos obteniendo resultados en cantidad y calidad de combustible generado relevantes, sin embargo, es necesario plantear el interrogante a los impactos ambientales que puede generar la operación de una planta de aprovechamiento.

La implementación de una planta de aprovechamiento de residuos plásticos podrá sustituir las etapas iniciales del ciclo de vida de los combustibles (extracción, tratamiento y transporte) minimizando los aportes negativos que tienen sobre las categorías de impacto evaluadas. Para la última etapa del ciclo de vida de los combustibles no existirá un cambio en los impactos generados, de por si estos continuarán siendo los mismos ya que el combustible líquido generado en el proceso de aprovechamiento posee características muy similares al generado de manera convencional. La planta de aprovechamiento de residuos plásticos permitirá reducir la cantidad de residuos plásticos que terminan en disposición convencional o contaminando el medio ambiente, no obstante, el consumo de productos plásticos en el mundo presenta una tendencia de crecimiento anual lo que haría necesario balancear el volumen de residuos generados con la capacidad instalada de plantas de tratamiento, haciendo de esta una tarea casi utópica. El cambio en los plásticos es indispensable si se quiere eliminar por completo la contaminación por residuos de estos materiales, no se puede cesar en

el desarrollo e introducción al mercado de bioplásticos (teniendo como premisa tiempos de biodegradabilidad menores) que permitan reemplazar los materiales convencionales.

El reciclaje químico de los residuos plásticos permitirá obtener combustible líquido con características similares al que se genera por procesos productivos convencionales lo que significa que los impactos ambientales asociados al consumo seguirán siendo los mismos, es por esta razón que las plantas de aprovechamiento deben ser soluciones transitorias mientras se logra el objetivo principal que es suplir el 100% de la demanda con energías renovables.



#### 4. CONCLUSIONES

- Los principales plásticos usados en el proceso de aprovechamiento son el Poliestireno, Polietileno, Polietileno de alta densidad, Polietileno de baja densidad debido a que sus propiedades físicas y químicas que permiten una conversión mayor al 90% en productos gaseosos y líquidos (combustibles).
- El ciclo de vida de los plásticos está conformado por 4 etapas, principalmente: materias primas, producción, consumo y disposición. Es en esta última etapa donde se puede desarrollar el aprovechamiento de plásticos.
- Existen numerosas alternativas de aprovechamiento de residuos plásticos para la generación de combustibles entre las que se destacan la pirólisis y la hidrogenación debido a los resultados obtenidos experimentalmente y a la corroboración de los mismos mediante implementaciones a nivel industrial (proceso BASF, BP y Veba Oil Ag).
- Las alternativas de aprovechamiento de plásticos generan también impactos ambientales negativos asociados a la contaminación del aire, del agua y afectación a la salud humana debido a las actividades de emisión de material particulado y generación de aguas residuales.
- Los impactos ambientales de los combustibles se estudian considerando la evaluación realizada por Dincă mediante el modelo CML2 Baseline 2000 para cada etapa del ciclo de vida de los combustibles (extracción, tratamiento, transporte y combustión). Los resultados evidencian un mayor impacto para cada categoría evaluada en comparación con otro combustible convencional como es el gas natural, adicionalmente se puede establecer que la etapa con mayores impactos ambientales negativos es la combustión.
- Al usar el residuo plástico para la generación de combustibles es posible eliminar los impactos ambientales negativos asociados a las etapas de extracción, tratamiento y transporte, en tanto no sucede así con la etapa de combustión. En cuanto a la etapa de combustión, el combustible generado por cualquier de los dos procesos (convencional o aprovechamiento de residuos plásticos) tiene los mismos impactos, es por esto que la sociedad debe moverse hacia las energías renovables.
- Si bien es cierto que una alternativa para el aprovechamiento de un residuo tiene una connotación positiva y generar impactos ambientales positivos, sigue generando como producto un combustible convencional con impactos negativos relevantes, por tal razón no debe verse como una solución final sino como un paso más hacia la masificación y el consumo de energías renovables

## 5. RECOMENDACIONES

- Realizar evaluaciones de impacto ambiental a plantas de aprovechamiento de plásticos que permitan ampliar la bibliografía existente y así obtener más perspectivas, factores e impactos que complementen la información disponible.
- Debido a los cambios que han tenido lugar en el sector Oil&Gas se debe considerar realizar una evaluación económica que permita establecer la viabilidad financiera de las plantas y procesos a instalar para el aprovechamiento de residuos plásticos, todo lo anterior teniendo como referencia el precio del barril de petróleo internacionalmente, debido a no será atractivo para las empresas invertir en este tipo de plantas de aprovechamiento si sigue siendo más rentable usar los métodos de producción convencionales.
- Realizar una evaluación del impacto ambiental sobre los ecosistemas marinos con respecto a la implementación de una planta de aprovechamiento de residuos plásticos, teniendo como eje central la reducción en la contaminación de las fuentes hídricas. Lo anterior se propone debido a que el único estudio disponible no tiene incorporado este factor.

## BIBLIOGRAFIA

ALLISOP, Michelle. *et al.* Plastic Debris in the World's Oceans. Greenpeace. 2006. [electrónico]. [consultado: 19, enero, 2016]. Disponible en: [http://www.unep.org/regionalseas/marinelitter/publications/docs/plastic\\_ocean\\_report.pdf](http://www.unep.org/regionalseas/marinelitter/publications/docs/plastic_ocean_report.pdf)

AL-SALEM, S.M. *et al.* Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. En: Waste Management [electrónico]. P. 2625-2643. 2009. [consultado: 20, enero, 2016]. Disponible en: <http://www.journals.elsevier.com/waste-management>

AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, Lifecycle of a plastic product [electrónico]. S.F. [consultado 23, julio, 2016]. Disponible en: <https://plastics.americanchemistry.com/Lifecycle-of-a-Plastic-Product/>

ANDRADY, Anthony L. y NEAL, Mike A. Applications and societal benefits of plastics. En: Philosophical Transactions of the Royal Society of London [electrónico]. vol 364. p. 1077-1984. 2009. [consultado: 20, enero, 2016]. Disponible en: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/royptb/364/1526/1977.full.pdf>

BELL, Kirsty y CAVE, Suzie. Comparison of Environmental Impact of Plastic, Paper and Cloth Bags. En: Research and Library Service Briefing Note. Northern Ireland Assembly [electrónico]. paper 36/11. 23, febrero, 2011. [consultado: 19, enero, 2016]. Disponible en: <http://www.niassembly.gov.uk/globalassets/documents/raise/publications/2011/environment/3611.pdf>

BAILEY, Ronald. *et al.* Solid waste disposal and recycling. En: Chemistry of the Environment. [electrónico]. p. 772-775. 2002 [consultado:25, julio, 2016]

BREMS, Anke. *et al.* Recycling and recovery of post-consumer plastic solid waste in a European context. En: Thermal Science [electrónico]. vol 16. no 3. p 669-685. 2012. [consultado: 20, enero, 2016]. Disponible en: <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2012/0354-98361200121B.pdf>

BUEKENS, A. Introduction to Feedstock Recycling of Plastics. Vrije Universiteit Brussel (V.U.B). [electrónico]. 2006. [consultado en: 10. Agosto. 2016]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Alfons\\_Buekens/publication/228054449\\_Introduction\\_to\\_Feedstock\\_Recycling\\_of\\_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Alfons_Buekens/publication/228054449_Introduction_to_Feedstock_Recycling_of_Plastics/links/00b495292de0c345ab000000.pdf?origin=publication_detail)

BUONOCORE, Elvira. *Et al.* Project title : Synergies in Multi-scale Inter-Linkages of Eco-social systems. [electrónico]. 2009. [consultado en: 08, septiembre, 2016]. Disponible en: <http://www.smile-fp7.eu/deliverables/SMILE%20D14%20Energy>

%20and%20LCA%20evaluation.pdf

CHOON, W. Environmental impact Assessment Report. [electrónico]. 2015. [consultado: 20, agosto, 2016] Disponible en: [http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/res\\_kwongpl\\_15/cha p4.pdf](http://environment.govmu.org/English/eia/Documents/Reports/res_kwongpl_15/cha p4.pdf)

CHURKUNTI, Preetham R. et al. Combustion analysis of pyrolysis end of life plastic fuel blended with ultra low sulfur diesel. En: Fuel Processing Technology 142 [electrónico]. P 212-218. 2016 [consultado: 15, abril, 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03783820>

DIFFERENT TYPES OF PLASTICS AND THEIR CLASSIFICATION. SPI. Disponible en: [http://www.ryedale.gov.uk/attachments/article/690/Different\\_plastic\\_polymer\\_types.pdf](http://www.ryedale.gov.uk/attachments/article/690/Different_plastic_polymer_types.pdf)

DINCĂ, Cristian. et al. Life Cycle Impact Assessment of Fossil Fuels. UPB. [electrónico]. Series C, Vol 71, 2010. ISSN 1454-234x [consultado: 01, septiembre, 2016]. Disponible en: [http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full53 21.pdf](http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full53 21.pdf)

EUROPEAN COMMISSION, Plastic waste [electrónico]. 08. junio. 2016. [consultado 24, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/use-of-plastics/building-construction.aspx>

GAO, F. Pyrolysis of Waste Plastics into Fuels [electrónico]. Tesis Doctor en Filosofía en Química e Ingeniería de Proceso. Universidad de Canterbury. P 196. 2010. [consultado: 20, enero, 2016]. Disponible en: [http://www.ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/4303/Thesis\\_fulltext.pdf;jsessionid=E5AE66BC3C23365C4DB4DD247B523C28?sequence=1](http://www.ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/4303/Thesis_fulltext.pdf;jsessionid=E5AE66BC3C23365C4DB4DD247B523C28?sequence=1)

GARAY, Carlos A. et al. Guías Ambientales – Sector Plástico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [electrónico]. julio. ISBN 958 – 97393 - 4 - 2. 2004. [consultado: 16, enero, 2016] Disponible en: [http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias\\_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf](http://www.siame.gov.co/siame/documentos/Guias_Ambientales/Gu%C3%ADas%20Resoluci%C3%B3n%201023%20del%2028%20de%20julio%20de%202005/INDUSTRIAL%20Y%20MANUFACTURERO/Guias%20ambientales%20sector%20pl%C3%A1sticos.pdf)

IDEAM. Informe de Industria. [electrónico]. Marzo. 2015. [consultado: 19, agosto, 2016] Disponible en: [www.mincit.gov.co/descargar.php?id=74482](http://www.mincit.gov.co/descargar.php?id=74482). Modificado por el autor

JAMBECK, Jenna. *et al.* Plastic waste input from land into the ocean. En: Sciencemag [electrónico]. 13, Febrero, vol 347. p 768-771 [consultado: 19, enero, 2016]. Disponible en: [http://www.iswa.org/fileadmin/user\\_upload/Calendar\\_2011\\_03\\_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71\\_\\_2\\_.pdf](http://www.iswa.org/fileadmin/user_upload/Calendar_2011_03_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71__2_.pdf)

KUNWAR, Bidhya. *et al.* Plastics to fuel: a review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews [electrónico]. p 421-428 [consultado: 21, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115010941>

MARTINEZ, Javier. *Et al.* Fundamentos I, Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe [electrónico]. Septiembre. 2005. [consultado: 08, julio, 2016] Disponible en: [http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/gestion\\_r01\\_fundamentos.pdf](http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/gestion_r01_fundamentos.pdf)

MCDUGALL Forber. Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory. [electrónico]. ISBN 0-632-05889-7. 2001. [consultado: 09, junio, 2016] Disponible en: <https://thecitywasteproject.files.wordpress.com/2013/03/integrated-solid-waste-managemen-a-life-cycle-inventory.pdf>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Tesoro Ambiental para Colombia [electrónico]. S.F. [consultado 31, mayo, 2016]. Disponible en: <http://biblovirtual.minambiente.gov.co:3000/>

O'Neil T.J. Life Cycle Assessment and environmental impact of polymeric products. Rapra Review Report 156. [electrónico] ISSN 0889-3144. Vol 13. Numero 12.2003 [consultado: 26, agosto, 2016] Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=PKmmhcl2QFIC&pg=PP1&hl=es&source=gb\\_s\\_selected\\_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=PKmmhcl2QFIC&pg=PP1&hl=es&source=gb_s_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false)

PALMISANO, Anna y PETTIGREW, Charles. Biodegradability of Plastics. En: BioScience [electrónico]. octubre. vol 42. no.9. 1992. [consultado: 18, enero, 2016]. Disponible en: <http://content.ebscohost.com/ContentServer.asp?T=P&P=AN&K=9210190553&S=R&D=a9h&EbscoContent=dGJyMNxb4kSeqK44yNfsOLCmr06ep7ZSrq%2B4S7SWxWXS&ContentCustomer=dGJyMPGttUqzrbFQuePfgex44Dt6flA>

PILZ. Harald. *et al.* The contribution of plastic products to resource efficiency. Gesellschaft für umfassende Analysen. [electrónico]. enero. 2005. [consultado: 21, julio, 2016] Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/document/gua---the-contribution-of-plastic-products-to-resource-efficiency-full-report---january-2005.aspx>

PIRINGER, Otto G, BANER, Albert L. Plastic Packaging Interactions with food and pharmaceuticals [electrónico] ISBN 978-3-527-31455-3. [consultado: 17, julio, 2016] Disponible en: [http://vchsc.ajums.ac.ir/\\_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf](http://vchsc.ajums.ac.ir/_vchfm/documents/lab/ebook/Plastic%20Packaging%20Interactions%20With%20Food%20and%20Pharmaceuticals.pdf)

PLASTICSEUROPE, Building & Construction [electrónico]. S.F. [consultado 24, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/use-of-plastics/building-construction.aspx>

PLASTICSEUROPE, Packaging [electrónico]. S.F. [consultado 24, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/use-of-plastics/packaging.aspx>

PLASTIC INDUSTRY TRADE ASSOCIATION, SPI Resin Identification Code - Guide to Correct Use [electrónico]. S.F. [consultado 26, enero, 2016]. Disponible en: <https://www.plasticsindustry.org/AboutPlastics/content.cfm?ItemNumber=823&navItemNumber=2144>

PLASTIC INDUSTRY TRADE ASSOCIATION, about plastics [electrónico]. S.F. [consultado 21, enero, 2016]. Disponible en: <https://www.plasticsindustry.org/aboutplastics/?navItemNumber=1008>

SATO, Hideki. Review on Development of Polypropylene Manufacturing Process. En: Sumitomo Chemical Co., Ltd. [electrónico]. S.F [consultado: 17, julio, 2016]. Disponible en: [http://www.sumitomo-chem.co.jp/english/rd/report/theses/docs/20090201\\_6jw.pdf](http://www.sumitomo-chem.co.jp/english/rd/report/theses/docs/20090201_6jw.pdf)

SARKER, Moinuddin y RASHID Mohammad M. Mixture of LPDE, PP and PS Waste Plastics into Fuel by Thermolysis Process. En: International Journal of Engineering and Technology Research [electrónico]. Febrero. vol 1. no 1. p 1-16. 2013. [consultado: 19, enero, 2013]. Disponible en: <http://www.ijeatr.org/IJEATR.org/Vol.%201,%20No.%201,%20February%202013/Mixture%20of%20LDPE,%20PP%20and%20PS%20Waste%20%20Plastics%20into%20Fuel%20by%20Thermolysis%20Process.pdf> . ISSN 2327-0349

SENÉCAL, Pierre. International Association for Impact Assessment. Principles Of Environmental Impact Assessment Best Practice. [electrónico]. enero. 1999. [consultado: 31, mayo, 2016] Disponible en: [http://www.iaia.org/uploads/pdf/principlesEA\\_1.pdf](http://www.iaia.org/uploads/pdf/principlesEA_1.pdf)

SOCIETY OF THE PLASTIC INDUSTRY, about plastics [electrónico]. S.F. [consultado 26, enero, 2016]. Disponible en: <https://www.plasticsindustry.org/aboutplastics/?navItemNumber=1008>

THE EUROPEAN COUNCIL OF VINYL MANUFACTURERS, PVC's Physical Properties [electrónico]. S.F. [consultado 23, julio, 2016]. Disponible en: <http://www.pvc.org/en/p/pvcs-physical-properties>

TUKKER, A. et al. Chemical Recycling of Plastics Waste (PVC and other resins). TNO Institute of Strategy, Technology and Policy [electrónico]. Diciembre. 1999. [consultado: 09, agosto, 2016]. Disponible en: [http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pvc/chem\\_recycle.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pvc/chem_recycle.pdf)

UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION, Environment Glossary [electrónico]. S.F. [consultado 31, mayo, 2016]. Disponible en: <http://unstats.un.org/unsd/environment/gl/gesform.asp?getitem=1182>

UNITED STATES PATENT. Process for producing light-weight oil from waste plastics containing phthalic polyester and/or polyvinyl chloride. Inventor: HASHIMOTO et al. 5,841,011. 24, noviembre, 1998.

UNITED STATES PATENT APPLICATION PUBLICATION. Apparatus for restoring waste plastic to oil. Inventor: JEON, Ki J. US 2011/0120851 A1. 26, mayo, 2011.

UNITED STATES PATENT APPLICATION PUBLICATION. Liquefying apparatus. Inventor: SHIMO, Yoshiko. et al. US 2009/0117015 A1. 07, mayo, 2009.

UNITED STATES PATENT APPLICATION PUBLICATION. Oil reconversion device for waste plastics. Inventor: YOSHIMURA, Takeki. US 2007/0187224 A1. 16, agosto, 2007.

WEBB, Hayden K. *et al.* Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly (ethylene terephthalate). En: Polymers [electrónico]. vol 5. p 1-18. 2012. [consultado: 20, enero, 2016]. Disponible en: [http://marinedebris.info/sites/default/files/literature/Plastic%20Degradation%20and%20Its%20Environmental%20Implications%20with%20Special%20Reference%20to%20Poly\(ethylene%20terephthalate\).pdf](http://marinedebris.info/sites/default/files/literature/Plastic%20Degradation%20and%20Its%20Environmental%20Implications%20with%20Special%20Reference%20to%20Poly(ethylene%20terephthalate).pdf) . ISSN 2073-4360