



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL: ESTUDIO DE CASO DE UN  
RESIDUO SÓLIDO EN UNA ZONA DE COYOACÁN, CIUDAD DE  
MÉXICO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA**

**MARIELLE FERNANDA BENÍTEZ MERCADO**



**CIUDAD DE MÉXICO**

**2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor: Landy Irene Ramírez Burgos**  
**VOCAL:**               **Profesor: Marisela Bernal González**  
**SECRETARIO:**       **Profesor: Rolando Salvador García Gómez**  
**1er. SUPLENTE:**     **Profesor: José Agustín García Reynoso**  
**2º SUPLENTE:**       **Profesor: María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa**

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**LABORATORIOS 301, 302 Y 303 DEL EDIFICIO E-3 ALIMENTOS Y QUÍMICA AMBIENTAL  
DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA FACULTAD DE QUÍMICA DE LA  
UNAM**

## **ASESOR DEL TEMA:**

**M. en A.I. Landy Irene Ramírez Burgos**

\_\_\_\_\_

## **SUPERVISOR TÉCNICO:**

**Dra. María del Carmen Durán Domínguez de Bazúa**

\_\_\_\_\_

## **SUSTENTANTE:**

**Marielle Fernanda Benítez Mercado**

\_\_\_\_\_



## Declaratoria

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencia a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante recursos editoriales convencionales.

---

**Marielle Fernanda Benítez Mercado**



## RECONOCIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo parcial para la adquisición de reactivos y materiales a través del Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado de la Facultad de Química, PAIP, Clave 5000-9067 y a través del Programa de Apoyo a Proyectos de Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de los proyectos PAPIME claves EN103704, PE101709 y PE100514.

A los miembros del jurado, quienes hicieron una cuidadosa revisión del manuscrito.

Al personal administrativo de los Laboratorios 301, 302, 303 del Edificio E-3 Alimentos y Química Ambiental, por su valioso apoyo.



## ÍNDICE

<b>Índice de tablas</b>	<b>7</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>8</b>
<b>Glosario de términos</b>	<b>10</b>
<b>Resumen</b>	<b>12</b>
<b>Abstract</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo 1. Problemática</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Antecedentes</b>	<b>14</b>
<b>1.2. Conformación de una llanta</b>	<b>17</b>
<b>1.3. Planteamiento del problema</b>	<b>18</b>
<b>1.4. Metodología</b>	<b>20</b>
<b>Capítulo 2. Objetivos</b>	<b>22</b>
<b>2.1. Objetivos generales</b>	<b>22</b>
<b>2.2. Objetivos específicos</b>	<b>22</b>
<b>Capítulo 3. Marco teórico</b>	<b>23</b>
<b>3.1. Valorización de residuos sólidos</b>	<b>23</b>
<b>3.2. Sistemas de valorización de residuos sólidos (Guía de valorización energética de residuos, 2010)</b>	<b>23</b>
<b>3.3. Evaluación de la situación actual en el mundo</b>	<b>27</b>
<b>3.4. Métodos de aprovechamiento en México</b>	<b>30</b>
<b>3.5. Marco legal</b>	<b>31</b>
<b>3.5.1. Internacional</b>	<b>31</b>
<b>3.5.2. Nacional</b>	<b>32</b>



<b>Capítulo 4. Caso de estudio</b>	<b>38</b>
<b>4.1. Resultados</b>	<b>42</b>
<b>4.2. Generalización de resultados</b>	<b>49</b>
<b>Capítulo 5. Propuesta de solución</b>	<b>53</b>
<b>5.1. Recolección</b>	<b>53</b>
<b>5.2. Almacenamiento</b>	<b>55</b>
<b>5.2.1. Equipo adicional en el almacén</b>	<b>56</b>
<b>5.3. Aprovechamiento</b>	<b>58</b>
<b>5.3.1. Co-procesamiento en industrias cementeras</b>	<b>58</b>
<b>5.3.2. Elaboración de impermeabilizantes</b>	<b>60</b>
<b>5.3.3. Fabricación de laminados de piso</b>	<b>62</b>
<b>5.4.1. Modelo A</b>	<b>64</b>
<b>5.4.2. Modelo B</b>	<b>66</b>
<b>5.4.3. Modelo C</b>	<b>66</b>
<b>5.4.4. Modelo D</b>	<b>68</b>
<b>5.4.5. Modelo E</b>	<b>68</b>
<b>5.4.6. Modelo F</b>	<b>70</b>
<b>5.4.7. Modelo G</b>	<b>71</b>
<b>5.5. Análisis de los modelos de aprovechamiento a partir de herramientas financieras</b>	<b>72</b>
<b>Capítulo 6. Comentarios y conclusiones</b>	<b>79</b>
<b>6.1. Comentarios</b>	<b>79</b>
<b>6.2. Conclusiones</b>	<b>80</b>
<b>Anexo I</b>	<b>81</b>
<b>A.1. Cuestionario</b>	<b>81</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>82</b>



## Índice de Tablas

	Página
Tabla 3.1. Poder calorífico de los combustibles (DOF, 2010)	29
Tabla 3.2. Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos (DOF, 2002b)	35
Tabla 3.3. Niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera (DOF, 2002a)	36
Tabla 4.1. Direcciones de vulcanizadoras	40
Tabla 4.2. Número de habitantes por delegación en la Ciudad de México (INEGI, 2015b)	50
Tabla 5.1. Modelos de manejo de llantas de desecho	64
Tabla 5.2. Modelo A	65
Tabla 5.3. Modelo B	66
Tabla 5.4. Modelo C	67
Tabla 5.5. Modelo D	68
Tabla 5.6. Modelo E	69
Tabla 5.7. Modelo F	70
Tabla 5.8. Flujos de efectivo	72
Tabla 5.9. Factibilidad económica	75





## Índice de Figuras

	Página
Figura 1.1. Diagrama de flujo de residuos sólidos en la Ciudad de México	14
Figura 1.2. Estructura química de los monómeros que conforman el copolímero <i>SBR</i>	16
Figura 1.3. Monómero que conforma la cadena del polímero <i>IR</i>	16
Figura 1.4. Estructura del 1,2-polibutadieno (vinilo) uno de los tres tipos de monómeros que conforman la cadena del polímero <i>BR</i>	16
Figura 1.5. Partes de una llanta (Euro Master, 2017)	17
Figura 1.6. Contenedor artificial de agua (El Salvador, 2014)	19
Figura 1.7. Recolección de neumáticos para reciclaje (SEDEMA, 2014)	20
Figura 3.1. Curva de combustión (Guía sobre gestión energética municipal, 2017)	24
Figura 3.2. Proceso BIOCHAR (Manahan y col, 2007)	26
Figura 3.3. Vista interior de la nave industrial de Combustibles Derivados de Residuos (CDR) (Guía de valorización energética de residuos, 2010)	27
Figura 3.4. Proceso de aprovechamiento de las llantas de desecho (Cortinas-de-Nava, C., 2017)	29
Figura 4.1. Metodología del estudio de caso	35
Figura 4.2. Ubicación geográfica del sitio de estudio	41
Figura 4.3. Separación de partes de la llanta de desecho	42
Figura 4.4. Separación de la banda de una llanta	43
Figura 4.5. Recepción de llantas en las vulcanizadoras de estudio por semana	45
Figura 4.6. Manejo de llantas en las vulcanizadoras	45
Figura 4.7. Clasificación de los accidentes por causa inicial, durante el Transporte de gas LP	46



Figura 4.8. Manejo de llantas de desecho en las plantas o locales vulcanizadores	48
Figura 4.9. Destino final de las llantas de desecho provenientes de vulcanizadoras	48
Figura 4.10. Estratos socioeconómicos en la delegación Coyoacán (INEGI, 2017)	51
Figura 5.1. Mapa de ubicación de las industrias cementeras en México (CANACEM, 2006)	56
Figura 5.2. Periodo de recuperación de la inversión	77



## Glosario de términos

<b>As</b>	Arsénico
<b>BR</b>	Polibutadieno
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Carbonato de calcio
<b>Cd</b>	Cadmio
<b>CDR</b>	Combustibles derivados de residuos
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>Co</b>	Cobalto
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Bióxido de carbono
<b>COCEF</b>	Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza
<b>COP</b>	Compuestos orgánicos persistentes
<b>COV</b>	Compuestos orgánicos volátiles
<b>Cr</b>	Cromo
<b>CSF</b>	Comisión de Salud Fronteriza
<b>Cu</b>	Cobre
<b>EPA</b>	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
<b>h</b>	Hora
<b>HCl</b>	Ácido clorhídrico
<b>Hg</b>	Mercurio
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Agua
<b>HP</b>	Caballo de fuerza
<b>IMCYC</b>	Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto
<b>INECC</b>	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
<b>INEGI</b>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía



<b>IR</b>	Poliisopropeno sintético
<b>IRC</b>	Índice de rotación del capital
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kJ</b>	Kilojoule
<b>km</b>	Kilometro
<b>kw</b>	Kilowatt
<b>L</b>	Litro
<b>LGEEPA</b>	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental
<b>LGPGIR</b>	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metros cuadrados
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>mg</b>	Miligramo
<b>mm</b>	Milímetro
<b>Mn</b>	Manganeso
<b>Ni</b>	Níquel
<b>NOM</b>	Norma Oficial Mexicana
<b>NO<sub>x</sub></b>	Óxidos de nitrógeno
<b>Pb</b>	Plomo
<b>PCDD</b>	Policorodibenzodioxinas
<b>PCDF</b>	Policlorodibenzofuranos
<b>PEA</b>	Población económicamente activa
<b>PRI</b>	Periodo interno de la inversión
<b>PVC</b>	Policloruro de vinilo
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>RSM</b>	Residuos de manejo especial
<b>RSU</b>	Residuos sólidos urbanos



<b>SBR</b>	Estireno-butadieno (Styrene-Butadiene Rubber)
<b>SCT</b>	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
<b>Se</b>	Selenio
<b>SEDEMA</b>	Secretaría de Medio Ambiente
<b>SEMARNAT</b>	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
<b>Sn</b>	Estaño
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dióxido de azufre
<b>TIR</b>	Tasa interna de retorno
<b>USD</b>	Dólares Estadounidenses
<b>VPN</b>	Valor presente neto
<b>Zn</b>	Zinc



## Resumen

En este proyecto se abordaron las distintas formas de aprovechamiento de residuos sólidos a los que se pueden someter las llantas una vez que fueron desechadas al final de su vida útil, para así minimizar su impacto negativo en el ambiente. Tomando en cuenta el marco legal internacional y nacional vigente y aplicable al manejo de las llantas como residuo.

Se desarrolló un estudio de caso que contemplaba a los sitios de recepción informal de llantas de desecho (vulcanizadoras) ubicados en la delegación Coyoacán en la Ciudad de México, obteniendo un aproximado de llantas que podrían estar sujetas a un aprovechamiento. Con dicho estimado se plantearon varios modelos de manejo del residuo para dar solución a este problema ambiental, y se evaluaron mediante una factibilidad económica para determinar el modelo que mejor se adecuara al sitio de estudio.

**Palabras clave:** aprovechamiento de residuos, llantas

## Abstract

This project addressed the different ways of solid waste management to which the tires can be subjected once they were discarded at the end of their useful life, in order to minimize their negative impact on the environment. Taking into account the international and national legal framework in force and applicable to the management of the tires as waste.

A case study that contemplated the informal reception sites of waste tires located in Coyoacán, Mexico City was developed, obtaining an approximate of tires that could be subject to management. With this estimated information, several models of waste management were proposed to solve this environmental problem, and they were evaluated through economic feasibility to determine the model that best suited the study site.

**Key words:** solid waste management, tires



# Capítulo 1

## Problemática

### 1.1. Antecedentes

Los residuos sólidos urbanos, RSU, son los materiales o productos que se generan en la actividad doméstica y comercial y pueden clasificarse como peligrosos y no peligrosos. En general, un residuo primero es recolectado, luego es llevado de la estación de transferencia a la planta de selección para finalmente depositarlo en un sitio de disposición final (SEMARNAT, 2012a). La Figura 1.1 muestra de manera condensada el tratamiento de los RSU en México.

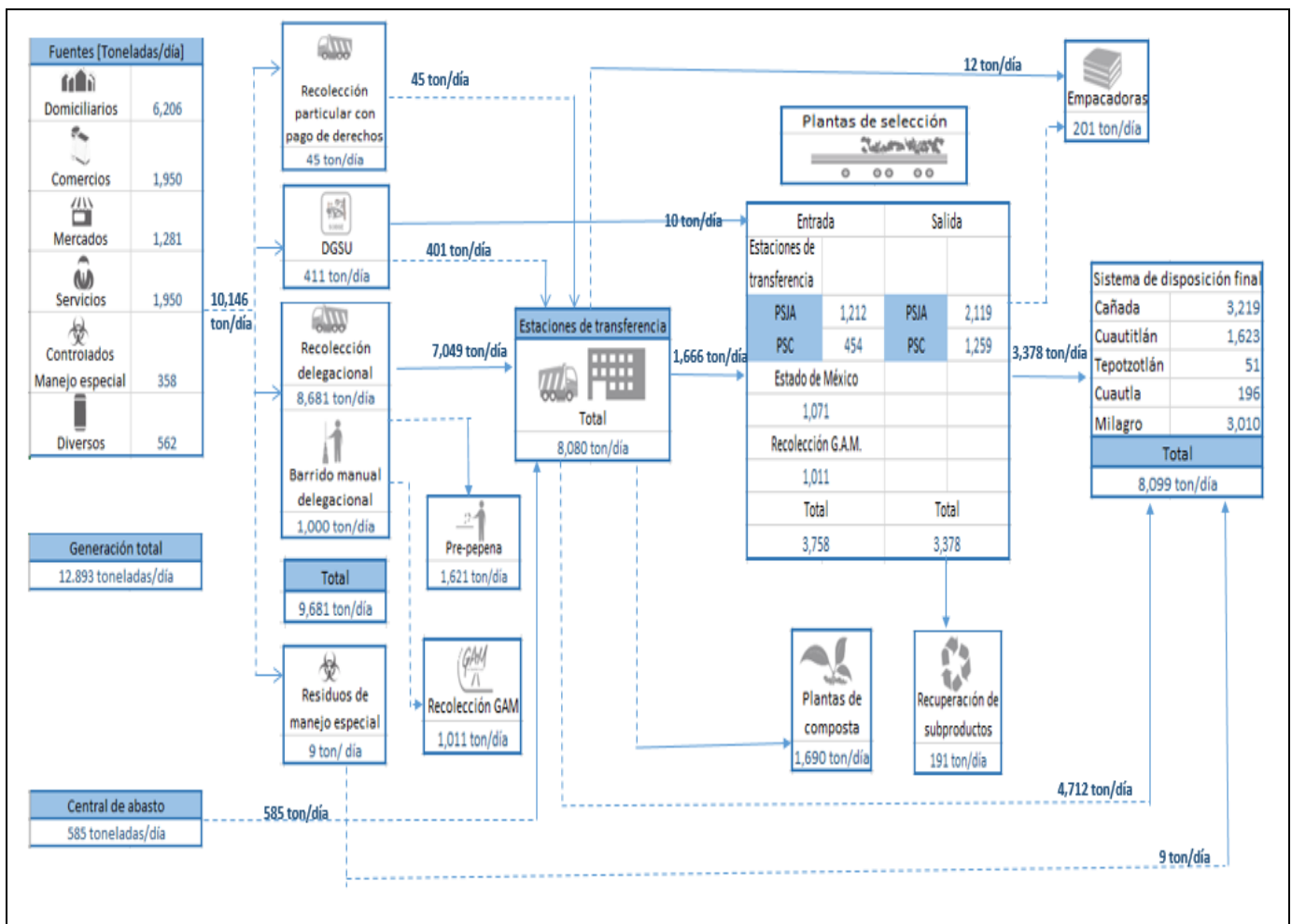


Figura 1.1. Diagrama de flujo de residuos sólidos en la Ciudad de México (elaboración propia con datos tomados de SEDEMA, 2015)



La separación de los residuos es de suma importancia para poder disponer de ellos en un sitio adecuado, fomentando su aprovechamiento y disminuyendo la cantidad de residuos que son depositados en los rellenos sanitarios. El INEGI registró que en la Ciudad de México se desecharon 17,043,000 kg/día de los cuales, 13,989,450 kg se recolectaron de manera no selectiva, y solamente 3,053,550 kg se recolectaron de manera selectiva. Es decir, que el 82% de los residuos recolectados aún deben someterse a un proceso de selección o puede ser que incluso sean enviados directamente a los rellenos sanitarios sin separar (INEGI, 2010).

Uno de los problemas de los residuos sólidos urbanos es que, conforme pasa el tiempo, aumenta la población y de la misma forma los residuos. Cuando no hay una separación y reaprovechamiento, los sitios de disposición final para ellos se llenan rápidamente, emitiendo grandes cantidades de gas metano ( $\text{CH}_4$ ) y bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ambos precursores del cambio climático, así como compuestos orgánicos volátiles (COV) (Hernández-Cano, 2004). Por ello, es muy importante encontrar la manera de disminuir estos dos fenómenos negativos, así como el aumento de la generación de RSU. De lo contrario, los residuos terminarán en tiraderos a cielo abierto que representan un mayor riesgo para el ambiente y la salud humana.

Un residuo sólido urbano también puede ser clasificado como residuo de manejo especial, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos define a los residuos de manejo especial como aquellos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos, o como residuos sólidos urbanos, o aquellos que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos (LGPGIR, 2003).

Entre dichos residuos se encuentran los neumáticos de desecho que, en México, se conocen coloquialmente como “llantas usadas”. Actualmente, según el Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos (SEMARNAT, 2012b) se desechan 1,011,033 toneladas por año de llantas usadas, de las cuales solamente se recicla el 5%. Un 2% adicional se utiliza para





generar energía mediante su combustión controlada. Otro 2% se traslada a centros de acopio autorizados y no se sabe su destino final. El 91% restante termina en tiraderos clandestinos, carreteras, ríos o desaparecen en incendios accidentales o provocados.

Los componentes principales de este material son caucho natural, caucho sintético como estireno-butadieno, poli-isopropenos sintéticos y polibutadienos, negro de humo, azufre, óxido de zinc, cadmio, aceites minerales, refuerzos de acero y textiles, siendo el caucho el componente que se encuentra mayoritariamente en las llantas (Química y algo más, 2015).

El caucho natural es un polímero que se obtiene a partir de una incisión en la corteza del árbol *Hevea brasiliensis*, aunque es originario de Mesoamérica donde se conocía con el nombre de *ulcuáhuatl* (árbol del hule en náhuatl, según Cabrera, L. 2002), de donde se extrae el látex que se somete a un proceso de calentamiento o a ciertos agentes químicos como ácidos. También se utilizan algunos compuestos poliméricos. Entre los más utilizados para la fabricación de llantas se encuentra el estireno-butadieno (*SBR*, por sus siglas en inglés), los poliisopropenos sintéticos (*IR*, por sus siglas en inglés) y los polibutadienos (*BR*, por sus siglas en inglés) (Tecnologías de los plásticos, 2011). Las Figuras 1.2 a 1.4 muestran las estructuras químicas de estos polímeros adicionados al caucho o hule considerando la palabra náhuatl de donde viene el nombre de esta planta, de *ulli*, goma del *ulcuáhuatl* (Cabrera, 2002).

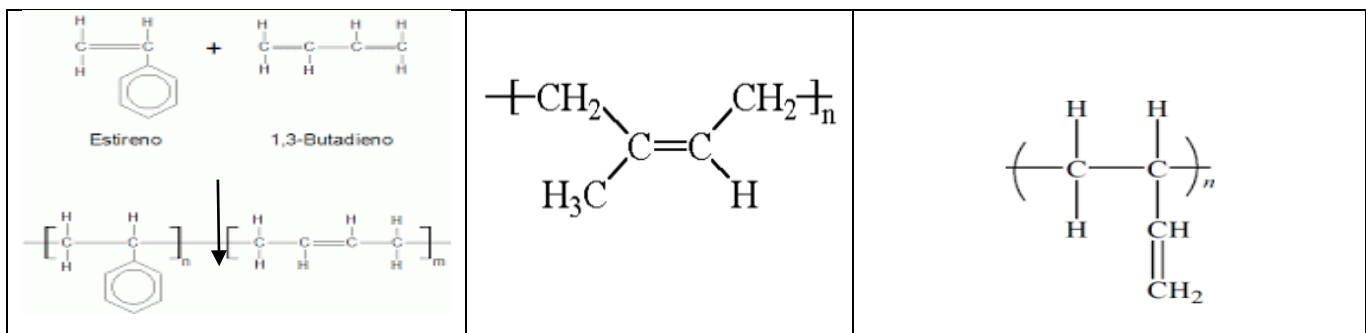


Figura 1.2. Estructura química de los monómeros repetitivos que conforman el copolímero *SBR*

Figura 1.3. Monómero que conforma la cadena del polímero *IR*

Figura 1.4. Estructura del 1,2-polibutadieno (vinilo) uno de los tres tipos de monómeros que conforman la cadena del polímero *BR*



En general, estos polímeros poseen características propias de los elastómeros, que son polímeros que muestran un comportamiento elástico. Son resistentes al impacto, tienen una alta resistencia a la deformación por tensión y son termoestables, es decir, no se funden con el calor (Química y algo más, 2015).

El comportamiento elástico del caucho natural y sintético puede mejorarse si se someten a un proceso de vulcanización que consiste en conectar las cadenas hidrocarbonadas mediante la adición de azufre mientras se le somete a un proceso de calentamiento a 120°C, formando enlaces covalentes entrecruzados que le confieren al material una mayor dureza (Tecnologías de los plásticos, 2011).

## 1.2. Conformación de una llanta

Una llanta se compone de distintas capas de materiales que se superponen entre sí para su funcionamiento Figura 1.5

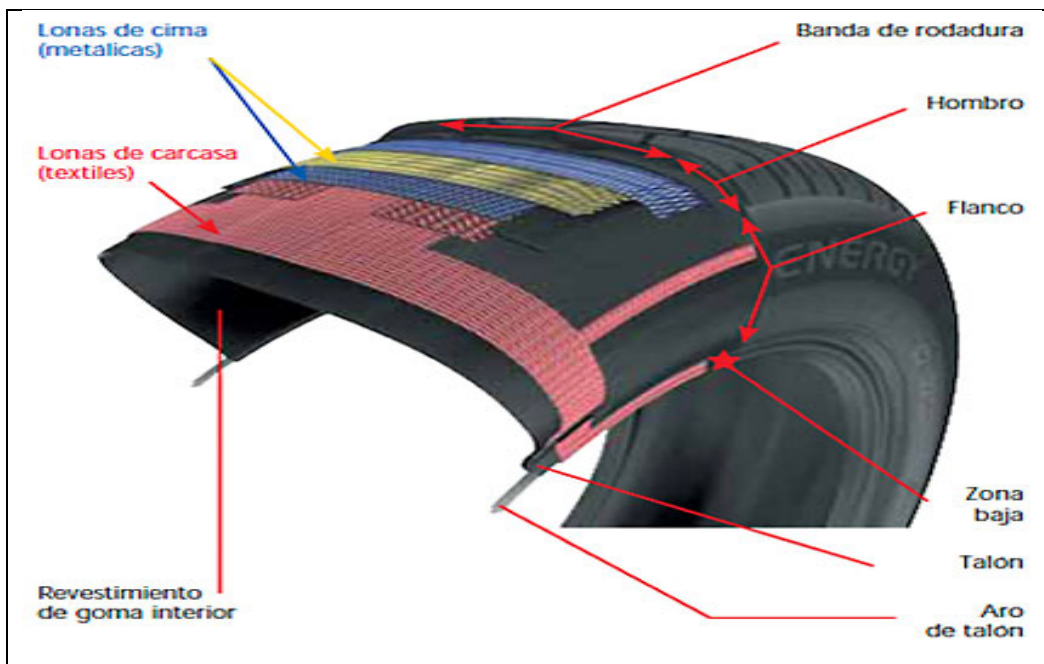


Figura 1.5. Partes de una llanta (Euro Master, 2017)



A continuación se mencionan las características más importantes de cada parte de la llanta (Euro Master, 2017):

- a) Flanco: Está constituido por goma flexible para adaptarse a las deformaciones del neumático en fase de rodadura y protege al neumático de golpes laterales.
- b) Hombro: La goma del hombro es la más gruesa debido a que es la parte más expuesta a los bordillos y otros golpes, además permite distribuir fácilmente el calor producido por el neumático durante sus movimientos sobre la carretera.
- c) Lonas de carcasa: Son cables de fibras textiles en arcos dispuestos en ángulos rectos y pegados al caucho de las cubiertas. Permiten al neumático resistir la presión. En una lona de neumático de un turismo hay aproximadamente unos 1400 cables.
- d) Lonas de cima: Son cables de acero muy finos y resistentes, cruzados oblicuamente y pegados unos a otros de manera que formen triángulos indeformables. Esta estructura garantiza al mismo tiempo robustez y flexibilidad.
- e) Talón: Parte interior del neumático que se ajusta a las llantas. Está compuesto por alambres de acero de alta tecnología formando un cable trenzado y circular, esto facilita el ajuste del neumático y las llantas evitando que patine en ella.
- f) Revestimiento de goma inferior: Es la capa de goma más interna y sirve para retener el aire en el interior del neumático facilitando la estanqueidad.

### 1.3. Planteamiento del problema

Las llantas representan un peligro ambiental.

Al quedarse abandonadas a la intemperie cuando llueve, el agua se acumula en su interior promoviendo la incubación de larvas y mosquitos que transmiten enfermedades tan graves como la malaria, el chicunguña o el zika, con la llanta como contenedor artificial de agua (Bernal-González, 2016), ejemplificado en la Figura 1.6.



**Figura 1.6. Contenedor artificial de agua  
(El Salvador, 2014)**

Además, y un punto crucial de su uso inadecuado es el de las emisiones de contaminantes debidas a su combustión no controlada. En ella se tienen los compuestos que se forman en la fase gaseosa, las dioxinas y furanos. Su tiempo de degradación es mayor a 500 años y, por ello, se requiere concientizar a la población en general y a los habitantes de la frontera común de México con Estados Unidos para no permitir su paso y disposición ilegal en las zonas fronterizas, así como educarlos sobre el manejo y aprovechamiento adecuado de las llantas para minimizar su impacto ambiental (Ramírez-Burgos, 2016).

Otro aspecto fundamental es la concientización de los legisladores sobre la falta de políticas que favorezcan la recolección y la implantación de empresas dedicadas a recuperar y aprovechar de forma limpia los neumáticos usados (Cámara de Diputados, 2013).

En la Ciudad de México existe un plan de manejo para este residuo. Cada año, el porcentaje de recolección es cada vez menor lo que implica que el plan de manejo no se está aplicando, pero sí está aumentando el número de vehículos automotores que los usan y desechan. Desde la implementación del Plan de manejo hasta la fecha, se ha visto un decremento del 99.89% en el acopio de neumáticos usados, obteniendo apenas 30 toneladas de llantas recolectadas en el año 2014. Dicha información se observa con mayor claridad en la Figura 1.7 (SEDEMA, 2014).

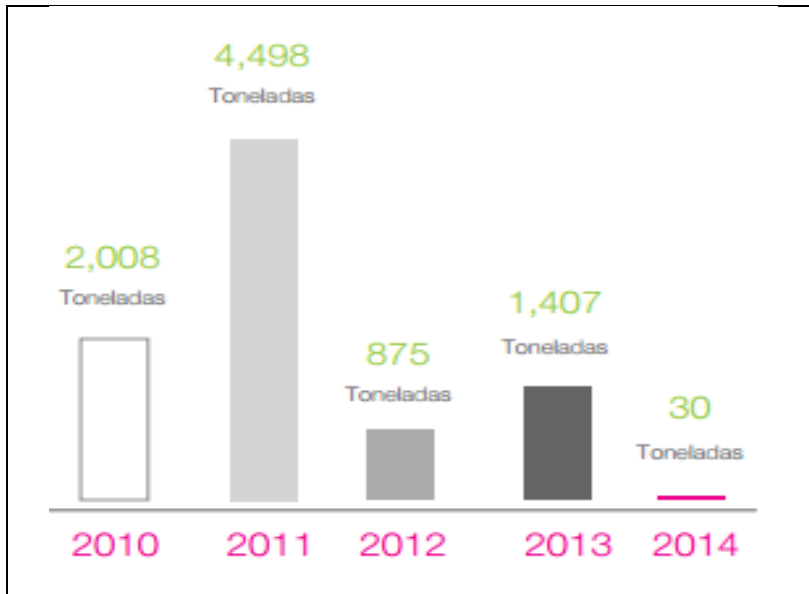


Figura 1.7. Recolección de neumáticos para reciclaje (SEDEMA, 2014)

Para el desarrollo del caso de estudio, se tomarán en cuenta, tanto la generación de llantas de desecho en sitios no controlados, como las plantas conocidas como vulcanizadoras y los mecanismos encargados de su separación y recolección al margen de la normativa vigente a nivel nacional.

#### 1.4. Metodología

El proyecto contempló realizar un estudio de caso para determinar la cantidad de llantas de desecho que se generan, y con base en las formas de aprovechamiento que existen tanto en el mundo como en México, proponer alguna solución viable para minimizar el impacto ambiental que éstas tienen cuando se disponen de manera inadecuada y sin un control.

Para ello, se realizó un estudio de campo para determinar los sitios más comunes en donde son desechadas las llantas, seleccionando una zona específica de la Ciudad de México, y aplicando cuestionarios elaborados previamente, para recabar la información real sobre el número de llantas desechadas y su forma de disposición, y así elaborar la propuesta de solución.



La propuesta consideró la normativa vigente en México, la información recabada en el estudio de campo para dar una alternativa como solución al problema ambiental generado por las llantas de desecho, y también la viabilidad económica para fundamentar su aplicación.



## Capítulo 2

### Objetivos

#### 2.1. Objetivos generales

- Evaluar la situación actual de la Ciudad de México en materia de residuos sólidos urbanos (RSU), enfocado principalmente a los residuos de manejo especial, así como las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) vigentes mediante la investigación en las bases de datos oficiales como las de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Identificar los métodos de valorización energética de los residuos sólidos señalando los procesos que actualmente se tienen a nivel mundial, y
- Proponer opciones viables de solución para un caso de estudio seleccionado.

#### 2.2. Objetivos específicos

- Señalar los problemas a los que se enfrenta México en materia del manejo y aprovechamiento de residuos de manejo especial, particularmente, los neumáticos de desecho.
- Aplicar un cuestionario para la obtención de información sobre el manejo de neumáticos en locales vulcanizadores y algunos otros posibles sitios de generación de este residuo, en una zona determinada de la Delegación Coyoacán, identificando la problemática del residuo en estudio.
- Interpretar los datos obtenidos describiendo la situación en el manejo del residuo y proponiendo opciones para un buen manejo integral.



## Capítulo 3

### Marco teórico

#### 3.1. Valorización de residuos sólidos

La valorización se entiende como la utilización de residuos como sustitutivos de otros productos o sustancias en un proceso productivo para cumplir una función en particular.

La diferencia fundamental que tiene con el reciclaje es que, en este proceso, los residuos pierden sus características por lo que no podrán ser utilizados otra vez (Guía de Buenas Prácticas Ambientales para las Empresas Náuticas, 2017).

La forma más común de valorización es la energética, por medio de una incineración controlada de residuos.

#### 3.2 Sistemas de valorización de residuos sólidos (Guía de valorización energética de residuos, 2010)

Los principales sistemas de valorización energética de los residuos sólidos se presentan a continuación:

- Incineración

Se basa en una combustión controlada y a una temperatura mínima de 850°C, donde se llevan a cabo un conjunto de reacciones de oxidación por mecanismos de radicales libres, formando principalmente moléculas de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y NO<sub>x</sub>.

Este proceso es sumamente dependiente de la cantidad de oxígeno presente y se ilustra en la Figura 3.1.



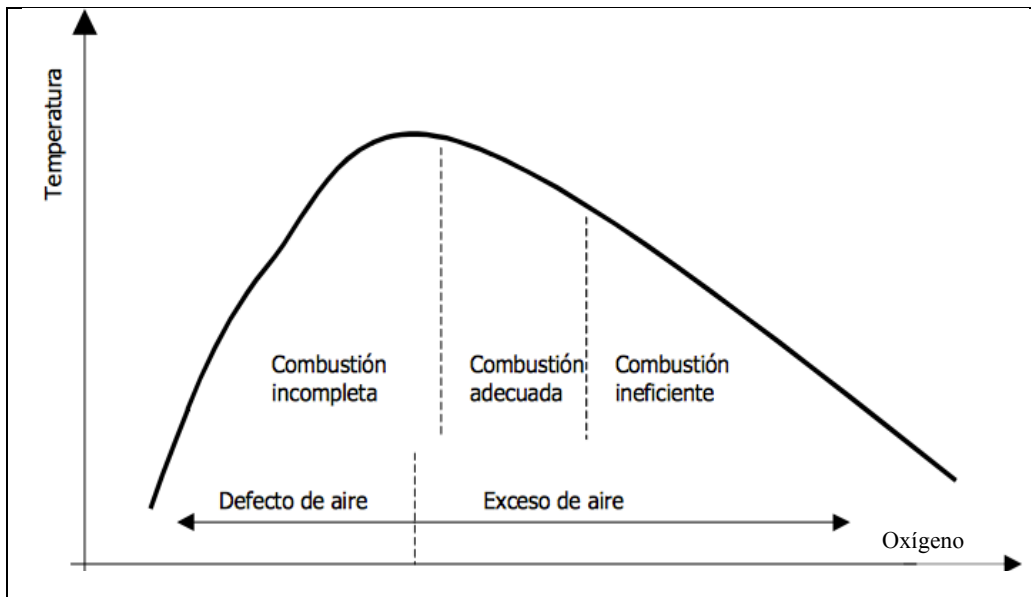


Figura 3.1. Curva de combustión (Guía sobre gestión energética municipal, 2017)

Cuando la combustión se realiza de manera adecuada, los residuos sólidos de la combustión estarán exentos de compuestos volátiles tóxicos y los metales estarán en su forma oxidada. Sin embargo, cuando la combustión es incompleta debido a la falta de oxígeno en el proceso, se producen gases parcialmente oxidados como CO y CH<sub>4</sub>, además de policlorodibenzodioxinas y policlorodibenzofuranos y vapores inorgánicos y orgánicos que se condensan en forma de mezclas de hidrocarburos pesados. Por otra parte, en presencia de un exceso considerable de oxígeno, se produce una combustión ineficiente en términos de recuperación energética.

Las policlorodibenzodioxinas y policlorodibenzofuranos (PCDD y PCDF respectivamente) son compuestos con propiedades químicas similares. Cada uno comprende dos anillos de benceno interconectados por átomos de oxígeno. En el caso de las PCDD los anillos de benceno están unidos por dos átomos de oxígeno y en el caso de los PCDF los anillos están interconectados por un átomo de carbono y uno de oxígeno. Son muy estables en condiciones ambientales y desde el momento en que son liberados en el ambiente se ven sometidos a una serie de condiciones ambientales a través de los cuales pueden experimentar una gran variedad de procesos los cuales tienen como consecuencia la



redistribución de estos compuestos en todo el ecosistema como: deposición atmosférica, volatilización, sedimentación, erosión, lixiviación, bioacumulación, fotólisis, biodegradación y degradación química. Algunos de los efectos tóxicos de estas sustancias son: pérdida de masa, incrementación en concentración de colesterol y triglicéridos, alteraciones hepáticas, pulmonares y gastrointestinales, disminución en la fertilidad y carcinogenicidad (INECC, 2004). Por ello es importante tener un control de emisión de gases contaminantes en este tipo de procesos.

El proceso de incineración comienza en la tolva donde se alimentan los residuos sólidos para ser dosificados en forma de capa sobre una parrilla dentro del horno, la que los transporta a lo largo del mismo con una velocidad que puede regularse. En la parrilla, los residuos se queman a elevada temperatura con suministro de aire de combustión, normalmente precalentado para tolerar las variaciones en el poder calorífico de los residuos (Energía a debate, 2008).

- Pirólisis

En este proceso, los residuos son sometidos a altas temperaturas (800-1100°C) en condiciones de escasez de oxígeno, para producir un gas compuesto por CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, nitrógeno, hidrógeno y un residuo inerte (Proyecto argentino en reciclado de neumático, 2007).

- Termólisis

De manera similar que en la pirólisis, los residuos son expuestos a altas temperaturas (400°C) en un reactor anaerobio, produciendo una destilación que genera un gas combustible rico en hidrógeno y un producto carbonoso (coque), que puede utilizarse como carbón activado o directamente como combustible. Este proceso fue patentado desde el siglo XX por el Prof. Stanley E. Manahan de la Universidad de Missouri y es aplicable a las agroindustrias pero también a la disposición controlada de residuos peligrosos o incluso radioactivos (Manahan, S.E. y col., 2007). La Figura 3.2 muestra el posible proceso.

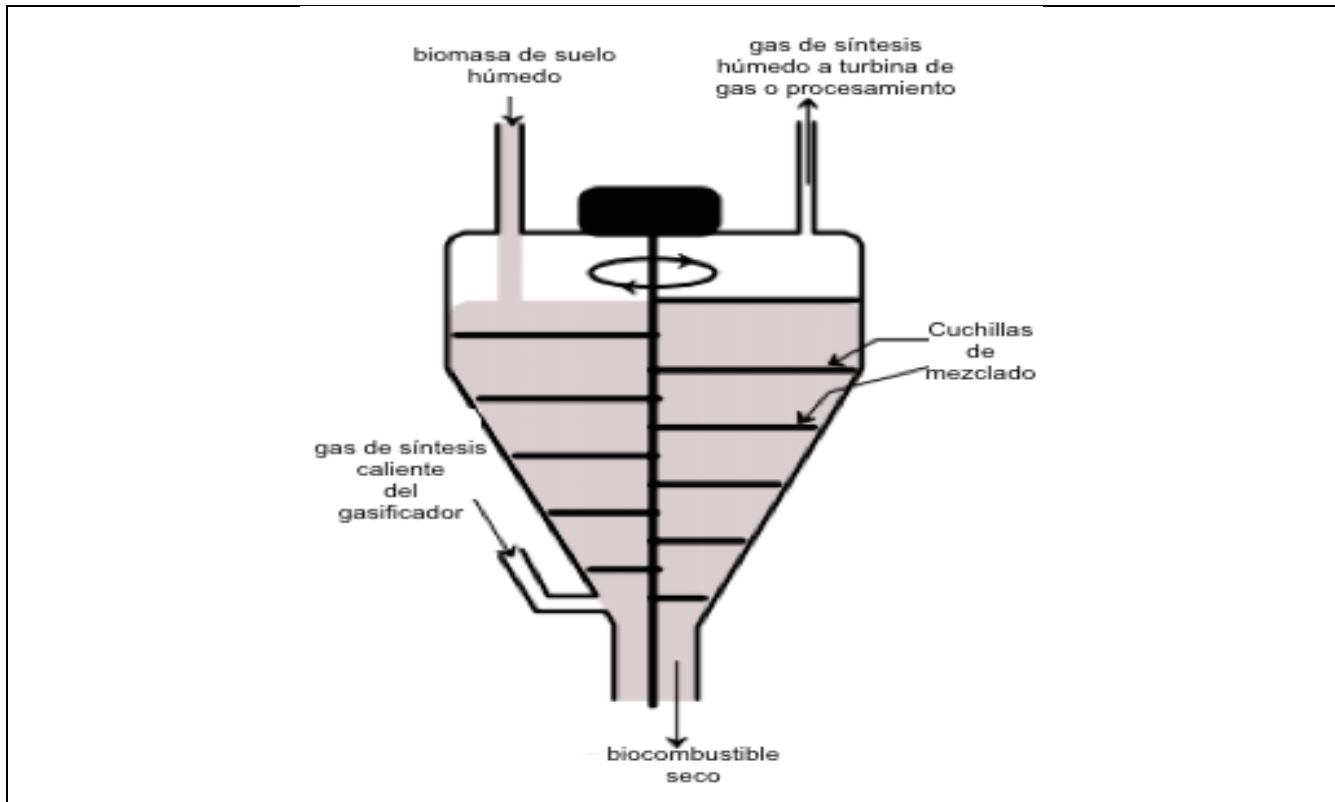


Figura 3.2. Proceso BIOCHAR (Manahan y col, 2007)

- Combustibles derivados de residuos (CDR)

Este proceso se realiza en una nave industrial sometida a des-presión (presión menor que la exterior), que evita la propagación de olores al exterior. En ella, la materia orgánica contenida en el residuo es estabilizada por medio de una biodegradación aerobia y la energía liberada se utiliza para secar e higienizar el residuo. La temperatura que alcanza el interior de la masa de los residuos oscila entre 50 y 60°C, mientras que la reducción de la masa es de entre 25 y 30%. Las fases que comprenden el proceso son:

- a) Recepción de RSU
- b) Trituración, hasta obtener partículas de 20 a 30 cm, para homogeneizar el material y mejorar las condiciones de biodegradación



- c) Estabilización y biosecado
- d) Tratamiento de gases
- e) Eliminación de metales y materiales inertes
- f) Preparación del CDR, con un poder calorífico del orden de 16000 kJ/kg. Puede ser utilizado en las centrales térmicas y cementeras

El residuo seco resultante se encuentra formado por una fracción degradable compuesta por madera, papel, cartón, tejidos de fibra natural y material orgánico; puede ser aprovechado en los biorreactores activables en donde se le adiciona agua en condiciones anaerobias para reactivar la producción de biogás. Además, se obtiene una fracción no degradable rica en poliolefinas (materiales plásticos no clorados), a la que se le pueden separar los metales e inertes, y obtener un material con poder calorífico aproximado de 20,870 kJ/kg, que puede aprovecharse en instalaciones térmicas u hornos cementeros en condiciones controladas para evitar la producción de dioxinas y furanos (Figura 3.3).



**Figura 3.3. Vista interior de la nave industrial de CDR: descarga, trituración y zona de biosecado (Guía de valorización energética de residuos, 2010)**

### **3.3. Evaluación de la situación actual en el mundo**

Alrededor del mundo la protección del ambiente ha cobrado importancia, dadas las repercusiones que ha tenido en las últimas décadas el mal uso de los recursos naturales y el



manejo inadecuado o inexistente de los residuos que se generan. En varios países se ha buscado la manera de minimizar dicho impacto ambiental mediante el reciclaje de los productos; tal es el caso de los neumáticos. Por ejemplo, en Kenia existe una industria artesanal que se dedica a confeccionar sandalias a partir de neumáticos usados de vehículos de carga para elevar su durabilidad. En Bombay, India, se transforman en mobiliario para exteriores. En Suecia se fabrican laminados para piso, etcétera (Noticias BBC, 2014).

En Colombia en el año 2010 se registró un total de 61 mil toneladas de llantas desechadas, por lo que se emitió una resolución mediante la cual los responsables se obligan a presentar e implementar los “Sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas, con el propósito de prevenir y controlar la degradación ambiental”. En ese mismo año, entró en vigor un proyecto en el cual, 52 empresas colombianas para el reciclaje de llantas se unieron para realizar una recolección masiva con el fin de triturarlas y separar los materiales que las conforman para que posteriormente pudieran ser utilizados como materia prima en otros procesos (Periódico electrónico El Tiempo, 2011).

Debido a que las llantas poseen un gran poder calorífico (cantidad de energía desprendida en la combustión), en algunos países de la Unión Europea como España, utilizan los neumáticos fuera de uso como combustible para la fabricación de cemento. En la Tabla 3.1 se muestran los poderes caloríficos de algunos combustibles para comparar dichos valores con los que aportan las llantas, mientras que en la Figura 3.4 se muestra el proceso industrial al que se someten las llantas de desecho para su aprovechamiento.

Puede observarse que la energía que proporcionan las llantas es comparable con otros combustibles, como el combustóleo y petróleo crudo, lo que sustenta su utilización en las industrias cementeras para disminuir tanto los costos de procesos como la contaminación generada por combustibles fósiles.

La cuestión trascendente desde el punto de vista operativo es su incineración controlada para garantizar que no se formen dioxinas y furanos, COV y metales en fase gaseosa. Debe



además exigirse a las empresas cementeras que cuenten con un sistema de desfogue controlado de los gases producto de la incineración que permita garantizar que si no se cumple con los criterios de seguridad ambiental establecidos a nivel mundial con los incineradores se reciclen nuevamente a los hornos “Clinker” hasta que cumplan y puedan ser emitidos a la atmósfera (Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2016).

**Tabla 3.1. Poder calorífico de los combustibles (DOF, 2010)**

Combustible	Unidades de medida	Poder calorífico
Azufre	[kcal/kg]	2,442
Bagazo de caña	[kcal/kg]	1,859
Combustóleo	[MJ/barril]	6,429
Coque de carbón	[kcal/kg]	6,987
Coque de petróleo	[kcal/kg]	8,279
Gas licuado	[MJ/barril]	4,251
Gasolinas naturales	[MJ/barril]	4,781
Leña	[kcal/kg]	3,816
<b>Llantas</b>	<b>[kcal/kg]</b>	<b>6,000</b>
Petróleo crudo (promedio de la producción)	[MJ/barril]	6,382
Biogás	[kcal/m <sup>3</sup> ]	4,500
Gas de coque	[kcal/kg]	31,400

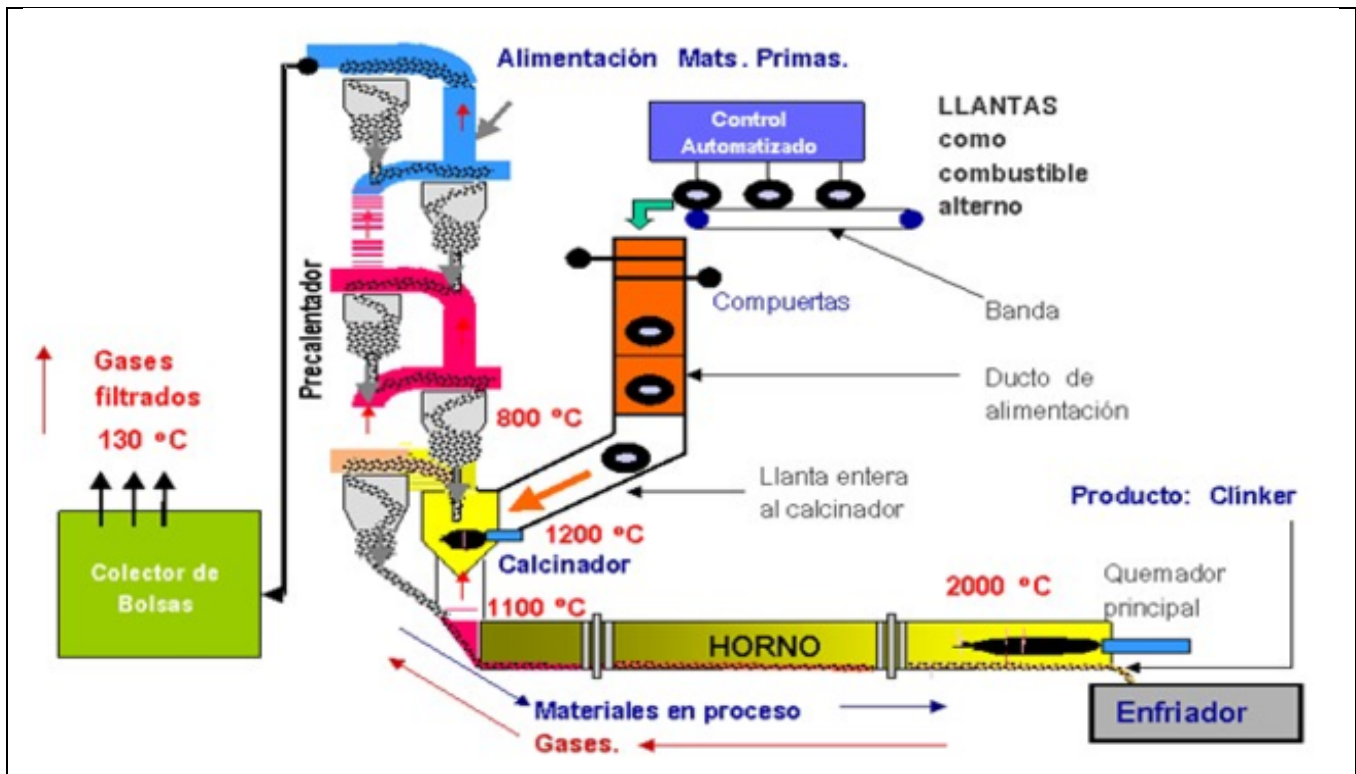




Figura 3.4. Proceso de aprovechamiento de las llantas de desecho (Cortinas-de-Nava, C., 2017)

### 3.4. Métodos de aprovechamiento en México

Existen algunas empresas dedicadas al reciclaje y aprovechamiento de neumáticos de desecho, como son: *Recubrimientos Ecológicos y Reciclados*, que fabrica impermeabilizantes y selladores a partir de las llantas, reciclando aproximadamente 500,000 unidades al semestre (Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho, 2013); *CEMEX*, que elabora un tipo de concreto ahulado llamado *llancreto*, que incluye en su formulación residuos de llanta triturada como agregado elástico que modifica la falla frágil del concreto resultante e incrementa su capacidad para absorber grandes cantidades de energía previas a la falla (CEMEX, 2017).

Ecoltec, es una empresa filial de Holcim México cuyo giro es la transformación de residuos en Combustibles y Materias Primas Alternativas (*AFR*, por sus siglas en inglés), ofreciendo servicios a nivel nacional de recolección, transferencia, manejo y, tratamiento de residuos (Holcim-Apasco, 2017).

Otra empresa comprometida con el reciclaje es Ecomulch. En esta industria se trituran las llantas de desecho y posteriormente lo empaqueta para su venta. Se utiliza principalmente en las canchas de fútbol con pasto artificial, en zonas de juegos para niños para amortiguar las caídas y evitar accidentes de gravedad, pisos deportivos y piedras decorativas (Ecomulch, 2012).

También se han creado algunos parques recreativos en la Ciudad de México, cuya atracción principal es la ambientación con juegos infantiles hechos a partir de llantas. Por ejemplo, en 2013 en el Parque del Pueblo de Nezahualcóyotl se construyó un espacio recreativo y ecológico con más de 150 llantas y 300 cámaras de hule que funcionan como columpios, resbaladillas y sillones de reposo, entre otros. Otro caso de éxito es el parque de diversiones en Bacalar, Quintana Roo, que también utiliza llantas para crear juegos infantiles (Sipse noticias, 2015).



Además de estos proyectos, en la UNAM en el año 2007, un grupo de investigación a cargo del académico de la Facultad de Química, Juventino García, desarrolló un modelo innovador de reciclaje con el que a través de la degradación catalítica del hule a base de níquel en ausencia de disolventes separa el azufre del caucho de las llantas de desecho, obteniendo caucho como materia prima para fabricar llantas nuevas (Facultad de Química, 2007).

### **3.5. Marco legal**

#### **3.5.1. Internacional**

México y Estados Unidos firmaron en el año 1983 el Convenio de La Paz sobre cooperación para la protección y mejoramiento del ambiente mediante la prevención, reducción y eliminación de fuentes de contaminación en la zona fronteriza (Convenio de La Paz, 2017).

El Convenio de Basilea que entró en vigor en 1992 regula los movimientos transfronterizos de desechos principalmente peligrosos, asegurando que se manejen y eliminen de manera ambientalmente racional (Convenio de Basilea, 2017). Es decir, debe minimizarse la generación en fuente y tratar los residuos lo más cerca posible del sitio de generación.

En 2004 entró en vigor el Convenio de Estocolmo que regula el tratamiento de las sustancias tóxicas, sobre todo los contaminantes orgánicos persistentes (COP) que son compuestos químicos que resisten en grado variable la degradación fotoquímica, química y bioquímica; lo que causa que su “vida” media sea elevada en el ambiente. Entre ellos se encuentran los bifenilos policlorados, plaguicidas, dioxinas y furanos (Convenio de Estocolmo, 2017).

La Comisión de Salud Fronteriza (CSF) México-Estados Unidos, en colaboración con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, desarrolló el Programa Fronterizo 2010/2020 para la protección del ambiente y la salud pública en la región fronteriza. Sus metas, de manera general son: la





reducción de contaminación al aire, el mejoramiento del acceso a agua limpia y segura, la promoción del manejo integral de los materiales y los residuos y de sitios limpios, el mejoramiento de la preparación conjunta de la respuesta ambiental y el fortalecimiento del cumplimiento de la ley y la promoción de una gestión ambiental responsable (CSF, 2017).

Todas están muy bien en papel, pero en la realidad, como se verá después, no se aplican.

### **3.5.2. Nacional**

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en el Artículo 4º señala que “...toda persona tiene derecho a la protección de la salud y a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar...” (DOF, 2017).

Por otra parte, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental (LGEEPA, 2003) que es de carácter reglamentario, de orden público e interés social, se refiere a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional teniendo por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para el cumplimiento del Artículo 4º constitucional, definir los principios de la política ambiental, la preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente y el aprovechamiento sustentable, entre otros.

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR, 2003), también tiene por objeto el cumplimiento del Artículo 4º constitucional, además de propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación. En el año 2012, al Artículo 92 de esta Ley, que estipula las acciones que deben llevar a cabo las entidades federativas y los municipios para proteger la salud y controlar la contaminación ambiental producida por los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, se le adicionó la fracción XIII para promover la atracción de inversiones para infraestructura, equipo y



diversificación de soluciones para el manejo integral de los residuos, especialmente en los municipios con rezagos en la materia; así como la fracción XIV para promover el establecimiento de organismos operadores del manejo de residuos.

La Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza, COCEF, fomenta planes para el manejo adecuado de los residuos de manejo especial. En el año 2001 se aprobó el proyecto de manejo y disposición final de llantas usadas en Ciudad Juárez, Chihuahua, que contemplaba la recolección, trituración, y disposición final de llantas de desecho en el relleno sanitario de dicha ciudad (COCEF, 2017). En los años 2014 y 2015 se aportaron \$65 millones de dólares por la Comisión, con lo que se logró la limpieza del dren internacional de Mexicali en donde se encontraban varios residuos como muebles, refrigeradores vehículos chatarra y llantas. Actualmente, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas inglés) financiará el seguimiento del proyecto de limpieza de los drenes en Mexicali, además de la recolección de llantas en Tijuana (COCEF, 2007), ya que todos estos residuos provienen de los EE.UU. (COCEF, 2017). El problema es que no son devueltos al país de origen para que ellos se hagan cargo de sus propios residuos, sino que se quedan en México.

Por otra parte, como parte del Programa Frontera 2012 de la COCEF, se implementó la operación de la infraestructura necesaria para efectuar la correcta disposición de las llantas de desecho en la ciudad de Nuevo Laredo, Tamaulipas (COCEF-BECC, 2008). La COCEF-BECC (siglas en inglés para *Border Environment Cooperation Commission*) publicó en el año 2008 una Propuesta de Estrategia y Política para el manejo integral de llantas de desecho en la región fronteriza.

Entre las problemáticas que desea solucionar se encuentran minimizar la carencia de leyes y reglamentos de uso, recolección y almacenamiento, la falta de sistemas de recolección eficaces de llantas usadas y de recursos y la falta de una estrategia para la disposición final. También, menciona como una problemática la falta de estudios diagnósticos para realizar investigaciones en zonas habitacionales y públicas para determinar el número de llantas que



podrían encontrarse en zonas no controladas (Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF-BECC, 2008).

Para la Ciudad de México, también se aplican otras leyes, como la Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal, cuyos objetivos principales son formular, conducir y evaluar la política en materia de conservación del ambiente, protección ecológica y restauración del equilibrio ecológico en la Ciudad de México, así como los instrumentos y procedimientos para su protección, vigilancia y aplicación; y la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, que tiene por objeto regular la gestión integral de los residuos sólidos considerados como no peligrosos, así como la prestación del servicio público de limpia (GDF, 2012, 2015). A continuación, se mencionan algunas NOM relacionadas.

En la NOM-083-SEMARNAT-2003 sobre especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, “monitoreo”, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, se regula y contempla disposiciones generales para residuos sólidos. Dado que los neumáticos están considerados como residuos de manejo especial, esta norma es aplicable para ellos (DOF, 2003).

La NOM-161-SEMARNAT-2011 establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial (RME) y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; definiendo a un RME como los residuos que se generan en los procesos industriales, y actividades comerciales y de servicios, como subproductos no deseados o como productos fuera de especificación, así como los derivados del consumo, operación y mantenimiento de las demás áreas que forman parte de las instalaciones industriales, comerciales y de servicios, los cuales, por sus características, se consideran como Residuos Sólidos Urbanos, pero sus volúmenes de generación son superiores a 10 toneladas por año o su equivalente en otras unidades (DOF, 2011a).



También menciona que los residuos de manejo especial pueden recuperarse como materia prima para procesos de manufactura o para su aprovechamiento energético, sin embargo, el mayor porcentaje de ellos no es valorizado por lo que éstos se envían a los sitios de disposición final de Residuos Sólidos Urbanos, reduciendo su vida útil y aumentando la necesidad de abrir nuevos sitios para la disposición final de los residuos.

El propósito de esta norma es incrementar el aprovechamiento de los Residuos de Manejo Especial y tener los beneficios ambientales, económicos y sociales correspondientes, a través de un Plan de Manejo, que es un instrumento mediante el cual se busca minimizar la generación y maximizar el aprovechamiento de los residuos en los que se aplica (DOF, 2011a). En la sección VIII del Capítulo 7, inciso c) se clasifica a los neumáticos de desecho como residuos de manejo especial por lo que deben estar sujetos a un plan de manejo (DOF, 2011a).

La NOM-098-SEMARNAT-2002 señala las especificaciones de operación y los límites de emisión de contaminantes en la incineración de residuos, mostrándose en la Tabla 3.2 (DOF, 2002b).

<b>Tabla 3.2. Límites máximos permisibles de emisiones para instalaciones de incineración de residuos (DOF, 2002b)</b>		
<b>Contaminante</b>	<b>Límite de emisión [mg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Frecuencia de medición</b>
<b>CO</b>	63	Continuo
<b>HCl</b>	15	Trimestral
<b>NOx</b>	300	Semestral
<b>SO<sub>2</sub></b>	80	Semestral
<b>Partículas</b>	50	Semestral
<b>As, Co, Se, Ni, Mn, Sn</b>	0.7 <sup>(1)</sup>	Semestral
<b>Cadmio</b>	0.7	Semestral
<b>Pb, Cr, Zn, Cu</b>	0.7 <sup>(1)</sup>	Semestral
<b>Mercurio</b>	0.7	Semestral
<b>Dioxinas y furanos en instalaciones posteriores a la NOM</b>	0.2	Anual
<b>Dioxinas y furanos en instalaciones previas a la NOM</b>	0.5	Anual

Todos los valores están referidos a condiciones estándar: 1 atmósfera de presión, base seca y 25°C

<sup>(1)</sup> Suma total de metales pesados



La NOM anterior está relacionada con la NOM-085-SEMARNAT-2011 sobre la contaminación atmosférica, y que especifica los niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición (DOF, 2011b).

Debido al poder calorífico que poseen las llantas, se pueden utilizar en una fracción minoritaria para la fabricación de cemento. Por lo tanto, la NOM-040-SEMARNAT-2002 establece los niveles máximos permisibles de emisiones a la atmósfera de partículas óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono, metales pesados, dioxinas y furanos, hidrocarburos totales y ácido clorhídrico provenientes de fuentes fijas dedicadas a la fabricación de cemento hidráulico, que utilicen combustibles convencionales o sus mezclas con materiales o residuos que son combustibles (DOF, 2002a). A continuación, se muestran dichos límites en la Tabla 3.3.

Parámetro	Límites de emisión [mg/m <sup>3</sup> ]	Frecuencia de medición
		Nivel 2 <sup>(2)</sup>
CO <sub>2</sub>	400 <sup>(1)</sup>	Anual
HCl	70	Semestral
HCl como CH <sub>4</sub>	70	Semestral
Óxidos de nitrógeno	800 <sup>(1)</sup>	Anual
CO	3000 <sup>(1)</sup>	Anual
Sb, As, Se, Ni, Mn	0.7	Anual
Cd	0.07	Anual
Hg	0.07	Anual
Pb, Cr, Zn	0.7	Anual
Dioxinas y furanos	0.2	Bienal

<sup>(1)</sup> Referido a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México para cemento gris

<sup>(2)</sup> Correspondiente a una sustitución del combustible convencional mayor al 30% con llantas y del 5 al 15% con un combustible de recuperación <sup>(3)</sup>

<sup>(3)</sup> Se considera a un combustible de recuperación a aquellos materiales o residuos con un poder calorífico superior a los 15 MJ/kg

Finalmente, la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-024-AMBT-2013 que fue publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 128 en julio de 2015 (GDF, 2015), establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del Distrito Federal, hoy Ciudad de México.



Determina que las llantas deben depositarse en contenedores de color marrón para su recolección, especificando que su forma de aprovechamiento será su reutilización y extracción de materiales reciclables. Pueden ser entregados por los generadores en establecimientos que funjan como centros de retorno de bienes a final de su vida útil, productos o residuos de acuerdo a lo establecido en los Planes de Manejo correspondientes, o bien en Centros de Acopio debidamente autorizados o conforme a los programas que la Secretaría de Medio Ambiente, la Secretaría de Obras y Servicios o las Delegaciones políticas implementen al menos una vez al mes para su recolecta (GDF, 2015).



## Capítulo 4

### Caso de estudio

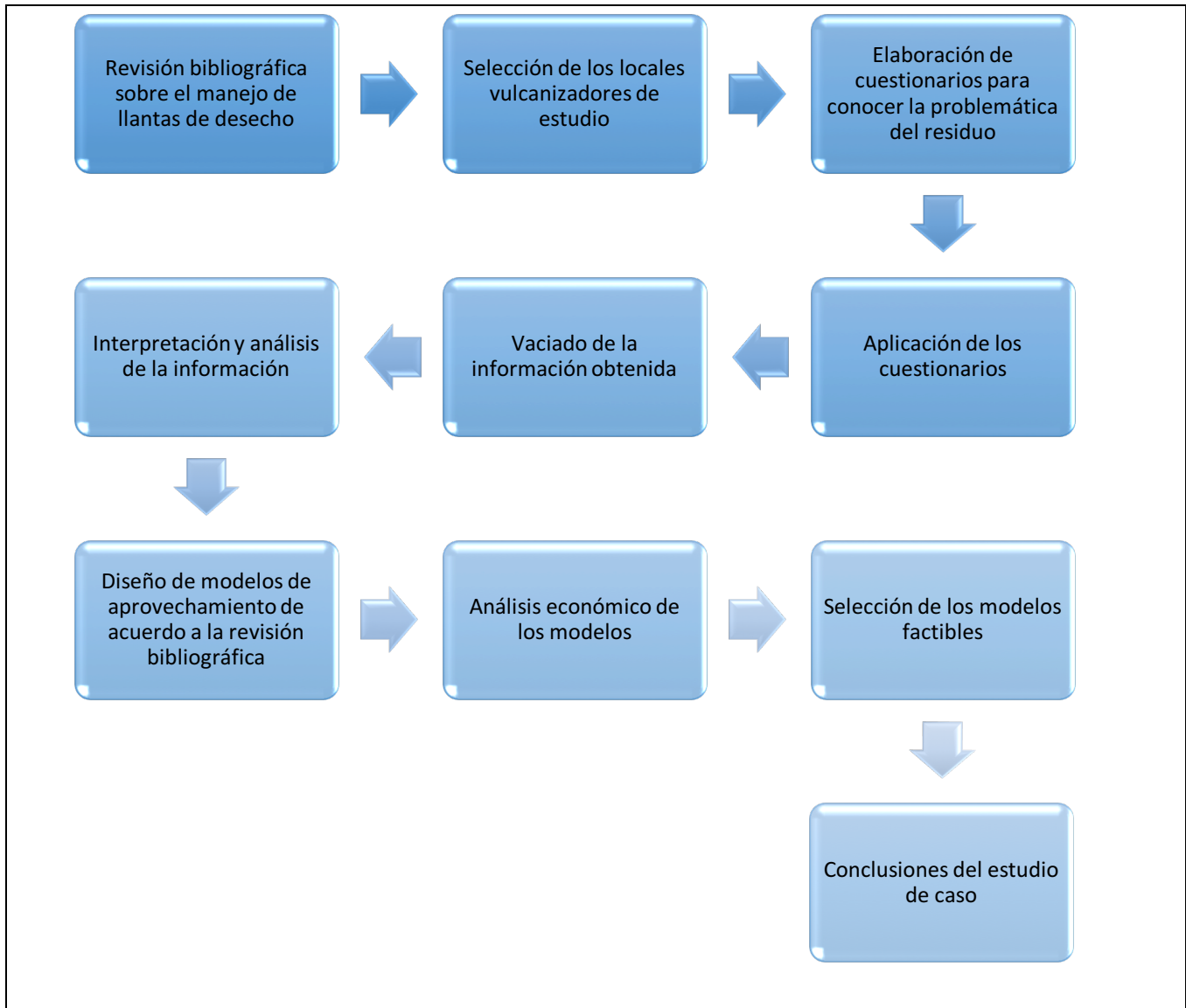
Para el caso de estudio, se seleccionaron algunos locales vulcanizadores que se encontraron cerca de la Ciudad Universitaria ya que en esta zona se ubican varias concentradas en las mismas vialidades e incluso son muy próximas unas con otras, hechos que facilitaron la recopilación de información. En la Figura 4.1 se puede observar con claridad su ubicación.

El motivo de realizar el estudio en vulcanizadoras es el complejo seguimiento de generación de residuos y el poco control sobre el número de establecimientos en operación.

El objetivo de obtener esta información de primera mano sobre la cantidad de neumáticos desechados es porque no se ha encontrado información pertinente sobre la existencia de un control estricto, por parte de las autoridades gubernamentales de los tres niveles, de la disposición de estos residuos de tipo especial, así como de su destino final para determinar el impacto ambiental que tienen ayudaría a solucionar la problemática.

Por otra parte, el objetivo del estudio de caso fue determinar el número de llantas de desecho que podrían ser susceptibles a un aprovechamiento así como los sitios de donde provienen para desarrollar propuestas de aprovechamiento de acuerdo a la información obtenida en la literatura (Capítulos 3.3 y 3.4 del presente trabajo). Cabe mencionar que en buena parte la implementación de un plan de aprovechamiento también incumbe a los encargados de los locales vulcanizadores ya que ellos son los poseedores de los neumáticos de desecho, por lo que es importante concientizarlos sobre las alternativas de los sitios donde podrían disponer de las llantas, además de los camiones de recolección de basura que las trasladan a los rellenos sanitarios contribuyendo al deterioro del ambiente.

Para ello, se desarrolló la metodología mostrada en la figura 4.1 a manera de diagrama de flujo.



**Figura 4.1. Metodología del estudio de caso (Elaboración propia)**

De las 20 vulcanizadoras que se reportan en la sección de mapas en el buscador electrónico google (Vulcanizadoras en Coyoacán/ Google maps, 2017), fueron seleccionadas 11 de acuerdo a su localización geográfica y cercanía entre ellas para realizar el desarrollo del estudio de caso de este proyecto. Es importante mencionar la irregularidad del registro de los locales vulcanizadores ya que no se encontró ningún registro ni aproximado oficial de la existencia de dichos locales. Aunado a este problema, los locales vulcanizadores por lo general no buscan promocionar sus servicios mediante anuncios ya que su modelo de





negocio se enfoca en los clientes que residen cerca de sus locales o bien, de los vehículos automotores que transitan por las vialidades cercanas, por todo esto tener una aproximación fidedigna del número de locales vulcanizadores en la delegación de acuerdo a la información electrónica sería muy inexacta, a menos que se realizara un recorrido por todas las vialidades comprendidas en la zona de estudio.

En la Tabla 4.1 se encuentran los domicilios de cada una de las vulcanizadoras de la zona cercana a la Ciudad Universitaria ubicada en la parte sur de la Ciudad de México en la Delegación de Coyoacán, en la Ciudad de México, en donde se llevo a cabo el estudio de caso (Figura 4.2).

Se realizó una inspección visual de los posibles sitios de trabajo en una primera visita a los locales y se evaluó la disposición de los responsables para participar en el proyecto en una segunda visita. De manera general se puede mencionar que en todos los casos los espacios de trabajo eran muy reducidos y ocupados casi en su totalidad por pilas de llantas y equipos que utilizan para laborar. El personal de trabajo en promedio era de dos personas por local y no tenían horarios fijos de trabajo debido a la irregularidad de carga de trabajo. Aunque los responsables de los establecimientos seleccionados mostraron buena disposición para contestar las encuestas, no permitieron que se tomarán fotografías de los locales dado que trabajan con irregularidades administrativas de licencias de trabajo.

En el Anexo 1 se muestra un ejemplo del cuestionario que se aplicó en cada uno de estos sitios, para obtener información relevante y puntual sobre lo que las personas a cargo de los establecimientos conocen sobre el tema.

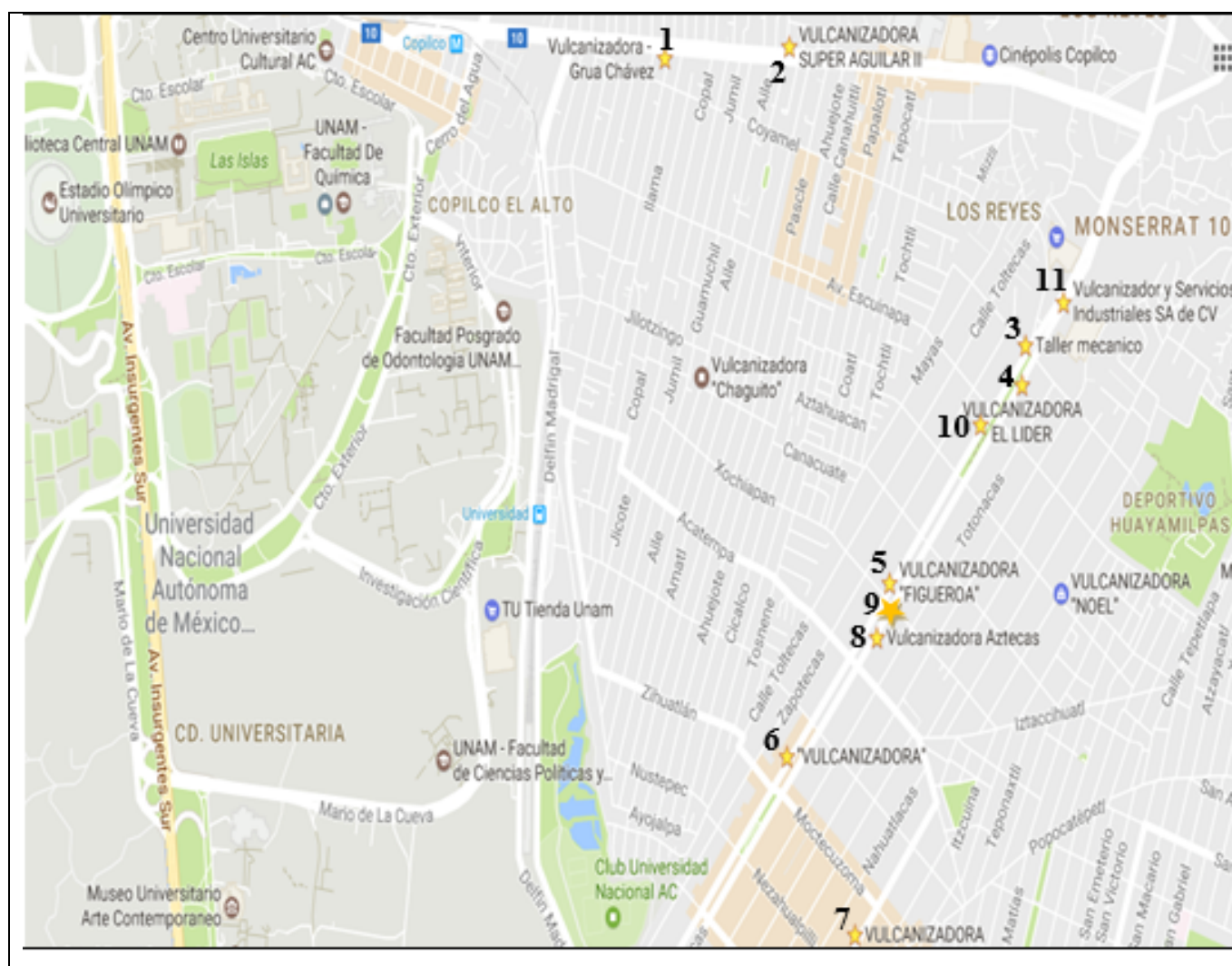
**Tabla 4.1. Direcciones de vulcanizadoras**

No. sitio	Dirección
1	Mz. 1 Lote 4, Eje 10 Sur Avenida Pedro Henríquez Ureña, Pedregal de Santo Domingo, 04369 Ciudad de México
2	Av. Pedro Henríquez Ureña 358, Pedregal de Santo Domingo, 04369 Ciudad de México
3	Rey Moctezuma, Ajusco, 04330 Ciudad de México
4	Av. Aztecas 305, Ajusco 04330 Ciudad de México



**Tabla 4.1. Direcciones de vulcanizadoras (Continúa)**

No. sitio	Dirección
5	Av. Aztecas 451, Ajusco, 04300 Ciudad de México
6	Av. Aztecas 611, Ajusco, 04300 Ciudad de México
7	Coras 363, Ajusco, 04300 Ciudad de México
8	Lote 4, Av. Aztecas 496, Ajusco, 04300 Ciudad de México
9	Av. Aztecas 506, Ajusco, 04300 Ciudad de México
10	Av. Aztecas 256, Ajusco, 04300 Ciudad de México
11	Av. Aztecas 222, Los Reyes, 04330 Ciudad de México



**Figura 4.2. Ubicación geográfica del sitio de estudio (Elaboración propia en google**

**maps:**<https://www.google.com.mx/maps/search/vulcanizadoras+cerca+de+Ciudad+Universitaria,+Ciudad+de+M%C3%A9xico,+CDMX/@19.3236648,-99.1883956,14z>



Los hallazgos de esta etapa de campo se presentan en el siguiente punto: resultados.

#### 4.1. Resultados

Se realizaron algunas gráficas para facilitar la interpretación de los datos obtenidos de las encuestas aplicadas a las vulcanizadoras que se visitaron.

En la Figura 4.3 se observa que la mayor parte de las vulcanizadoras no separa las partes de las llantas que van a desechar. Es decir, se reduce su posibilidad de aprovechamiento ya que ni siquiera es separado el cinturón de acero que conforma la llanta.

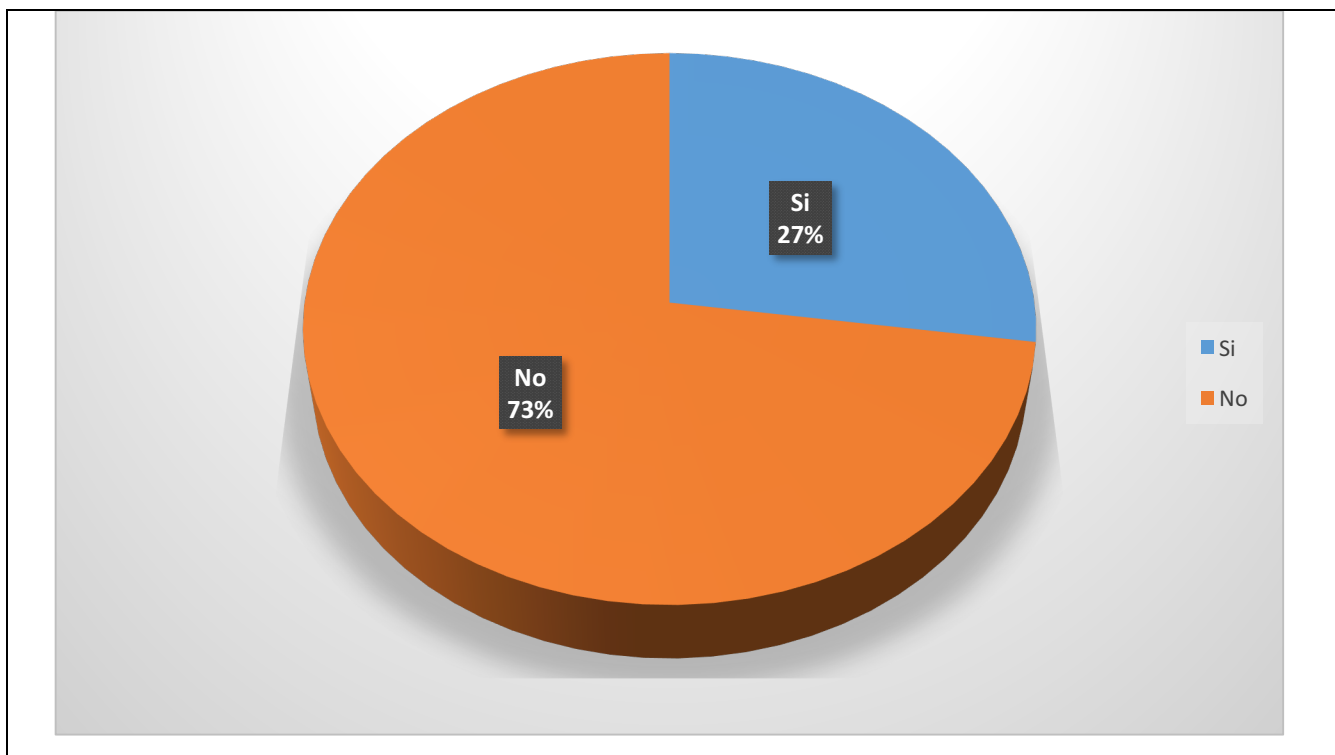


Figura 4.3. Separación de partes de la llanta de desecho (Elaboración propia)

Por otra parte, del 27% de los lugares que separan las partes del neumático, uno de ellos incluso separa la banda del resto del caucho de la llanta como se muestra en la Figura 4.3.



**Figura 4.4.**  
**Separación de la**  
**banda de una llanta**  
**(Elaboración propia)**

Respecto del manejo de las llantas dentro de las vulcanizadoras se plantearon dos categorías: las llantas de desecho y las llantas reforzadas. Las llantas reforzadas son aquellas que mediante algún parche prolongan su “vida” útil, aunque son mucho más sensibles al rodarse de causar algún accidente. A estas llantas se les denomina llantas de media “vida”.

El número de llantas que se manejan cada semana en las vulcanizadoras fue muy variable, incluso cuando se concentraron en la misma zona (como pudo apreciarse en el mapa mostrado en la Figura 4.2).

En la Figura 4.5 se muestran estos resultados. Mientras que en un sitio se recibían de dos a tres llantas, en otros sitios se tenía un registro de hasta 150 llantas.

Esto puede deberse principalmente a dos factores:

El primero es la capacidad de trabajo, que se define como la posibilidad máxima que tiene el organismo o uno de sus sistemas de realizar una determinada actividad en un tiempo determinado y con la calidad requerida (Elejalde-Villalón, Á., 2014).



El segundo es la proximidad entre establecimientos.

Para una mejor interpretación de datos, se abordó directamente el estudio del número y porcentaje de llantas que se desechan y las que se refuerzan cada semana en cada local encuestado.

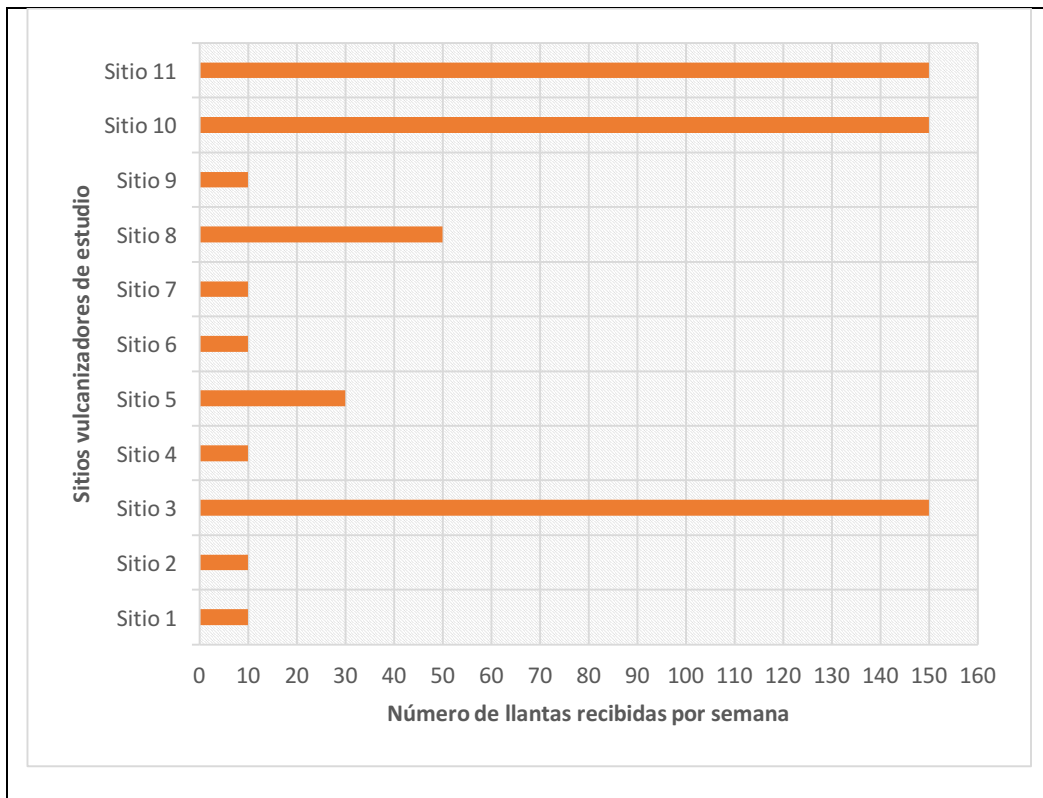
Se observa de la Figura 4.6 que un mayor porcentaje de llantas son desechadas con respecto al de las de media “vida”.

En varias vulcanizadoras los encuestados mencionaron que son muy pocas las llantas que se pueden reparar para seguir las usando y, por lo general, solamente lo hacen con las llantas destinadas al transporte público, como los camiones de carga y los de pasajeros tipo “pesera”, como coloquialmente se les conoce a los transportes de propiedad privada que ofrecen su servicio al público.

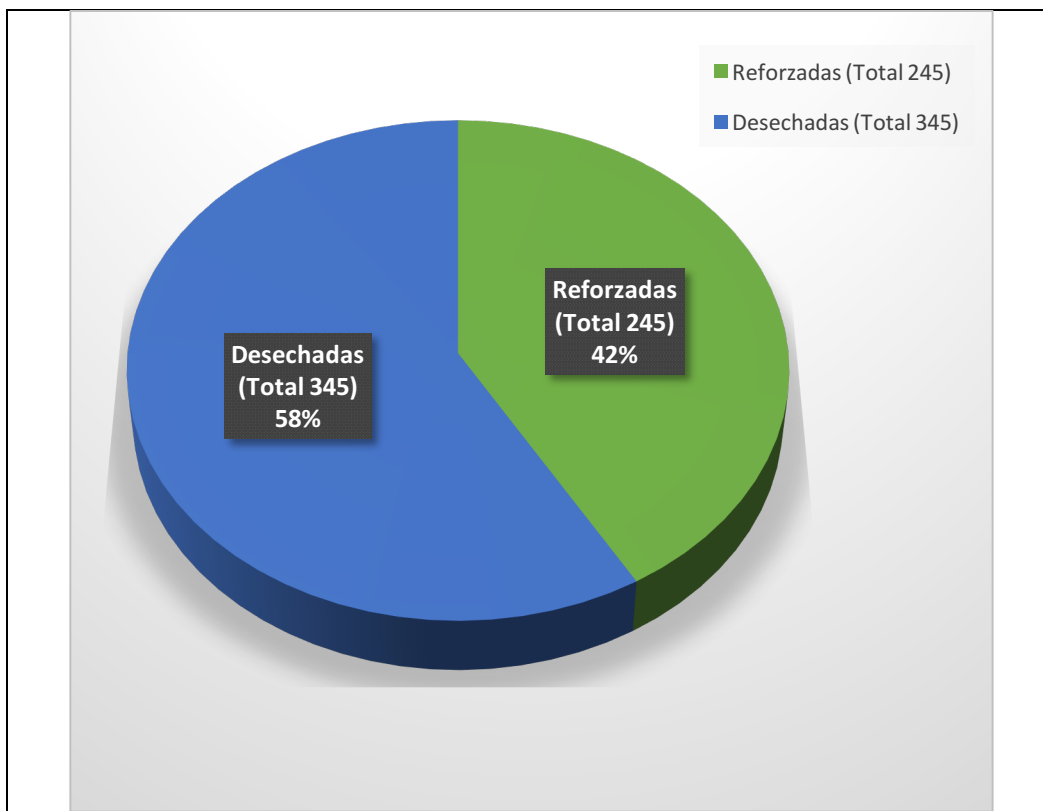
De hecho, son los que causan la mayor parte de los accidentes viales (SCT, 2014). El INEGI registró para el año 2015 un total de accidentes viales en México de 2,738, teniendo como causa principal fallas en el vehículo (INEGI, 2015a).

En otra clasificación perteneciente a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), se determinó que de todos los accidentes viales de la Ciudad de México ocurridos en el año 2014, en el 37.5% estuvieron involucrados camiones y furgonetas, que son los principales vehículos utilizados para el transporte público (SCT, 2014).

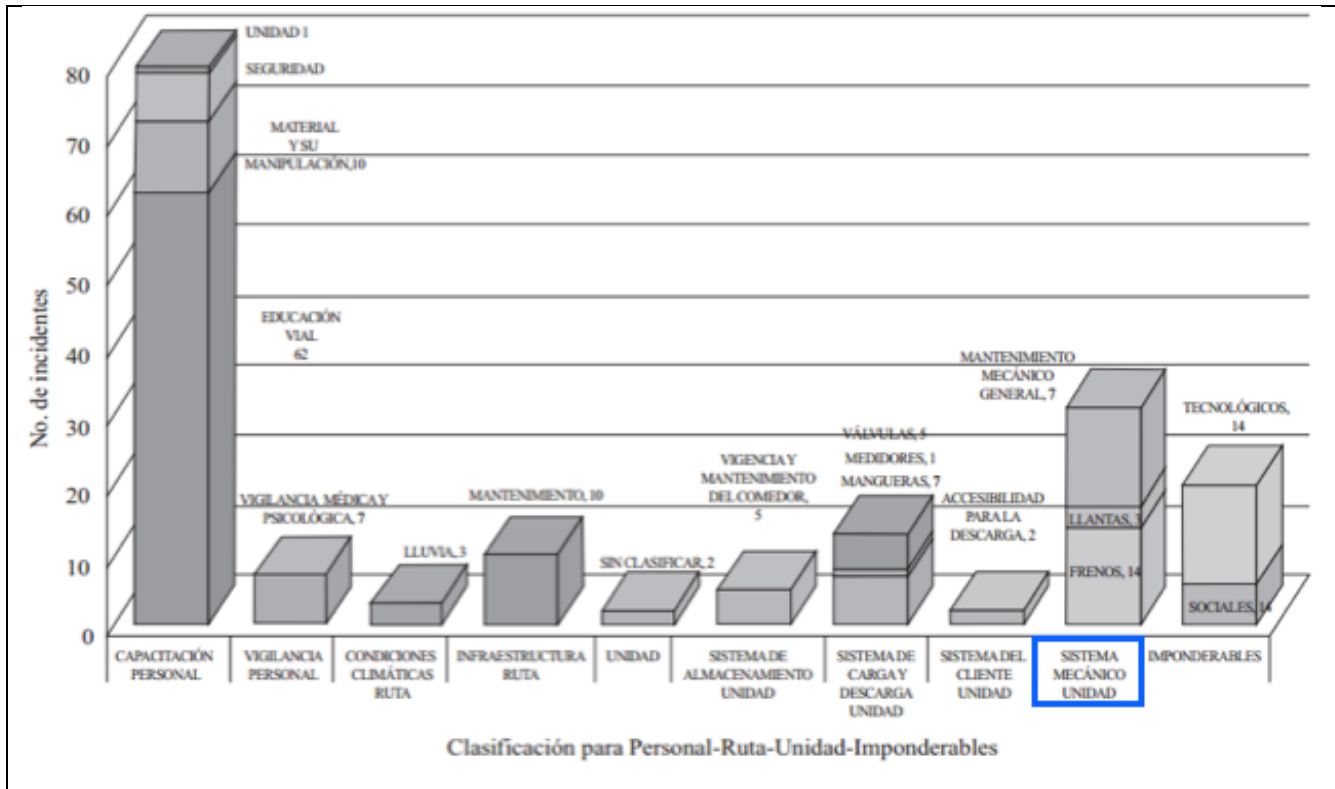
Incluso para el transporte de gas licuado de petróleo (LP) en México, las fallas mecánicas que involucran a las llantas como causa principal de accidentes viales, se encuentran en el segundo lugar de incidencias como se muestra marcado en rectángulo en la Figura 4.7 (López-Atamoros, *et al.*, 2010).



**Figura 4.5. Recepción de llantas en las vulcanizadoras de estudio por semana (Elaboración propia)**



**Figura 4.6. Manejo de llantas en las vulcanizadoras (Elaboración propia)**



**Figura 4.7. Clasificación de los accidentes por causa inicial, Base Nacional de Datos de Accidentes durante el Transporte de gas LP (BNDAT@GLP) (López-Atamoros et al., 2010)**

Una vez determinado el número de llantas que se desechan en las vulcanizadoras en estudio en una semana, se buscó conocer cuál era el destino de éstas. Con ayuda de las preguntas 5 y 6 de los cuestionarios aplicados se preguntó directamente si disponían de algún lugar para almacenar las llantas y si existía algún responsable del manejo de llantas. Es en este punto donde se determinó el problema de los neumáticos y un comportamiento general para los sitios de estudio.

En los lugares más cercanos a Ciudad Universitaria, los trabajadores comentaron que existía un intermediario que acudía a las vulcanizadoras aproximadamente una vez a la semana y se llevaba los neumáticos completos.

Aunque todos conocían las maneras de reciclar los neumáticos, como se ha mencionado en los apartados 3.4 y 3.3 del presente trabajo; así como las razones por las que los neumáticos



tienen un impacto ambiental negativo, como las emisiones de contaminantes en la incineración no controlada, casi todos desconocían el proceso exacto al que eran sometidos después por parte de este intermediario.

A medida que el establecimiento se alejaba de Ciudad Universitaria, se determinó que el manejo de llantas era cada vez menos controlado.

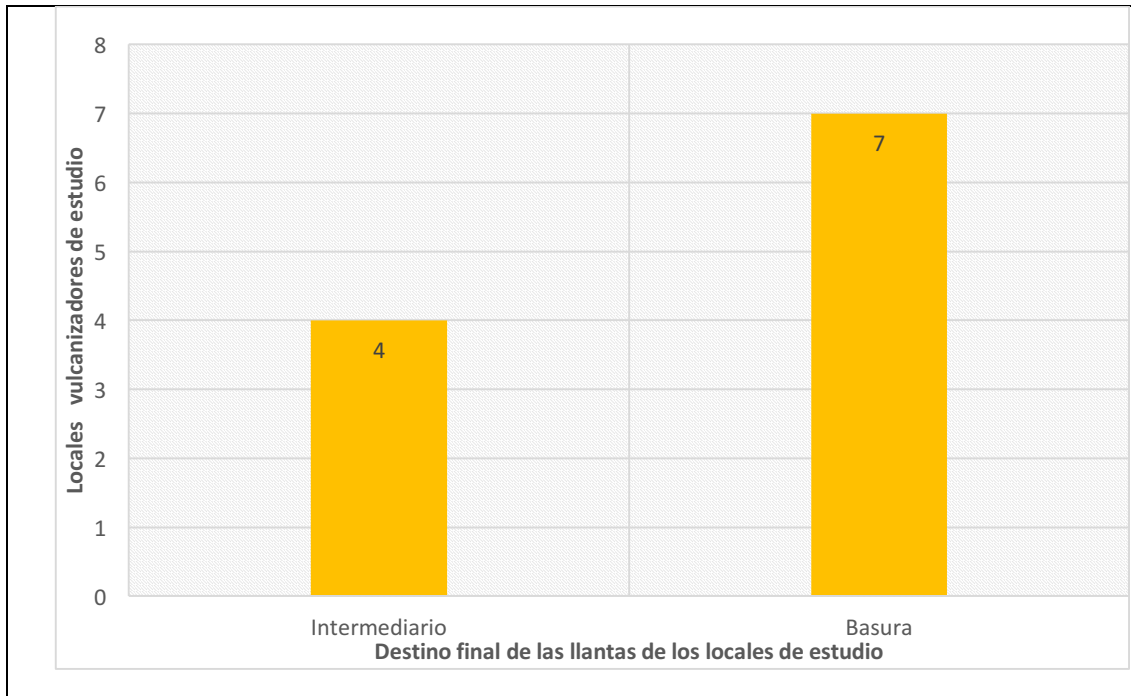
A partir del sitio de estudio 5 y en adelante, se encontró que los neumáticos eran entregados al camión de la basura a cambio de dinero. El costo de desecharlos fue muy variado en cada vulcanizadora. Sin embargo, oscilaba entre \$5.00 y \$20.00 por cada neumático. Además, mencionaron que cada vez era más complicado lograr que el camionero accediera a llevarse las llantas, por lo que no las desechaban continuamente, a veces tardaban más de una semana en deshacerse de ellas.

Tomando en cuenta que la mayoría de las vulcanizadoras que se visitaron tienen una generación de neumáticos de desecho promedio, que es de 5 a 10 llantas por semana, podría pensarse que no es un problema de gravedad. Sin embargo, es necesario considerar el número de vulcanizadoras que existen no solamente en toda la Delegación Coyoacán, sino en la Ciudad de México e inclusive en todo el país.

De manera resumida, la Figura 4.8 muestra que de los once establecimientos que se estudiaron, sólo cuatro poseen un convenio con un intermediario, mientras que los siete sitios restantes dependen de los camiones de basura para deshacerse de un residuo tan ambientalmente problemático, así como la capacidad de almacenamiento de su establecimiento para guardarlos, ya que ninguno posee un sitio específico y únicamente destinado al almacenamiento de los neumáticos.

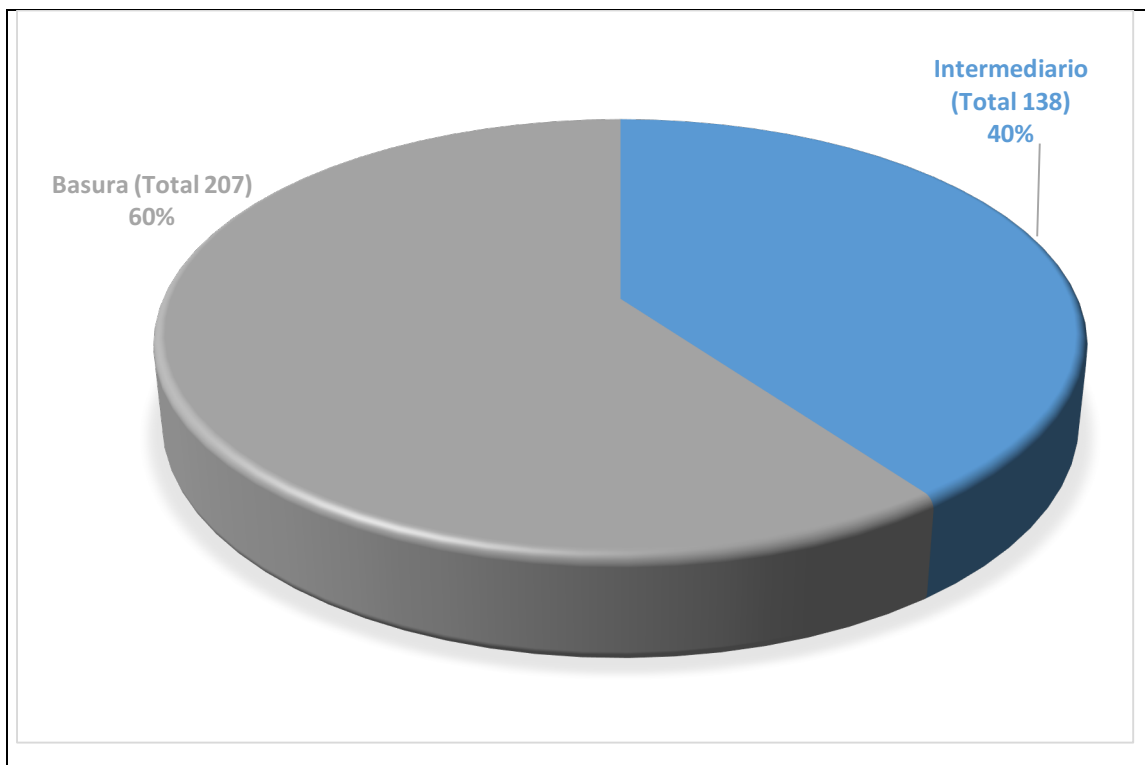
Cabe destacar que varios encuestados mostraron su inconformidad respecto de la falta de aplicación de planes de manejo para llantas, así como de la falta de infraestructura para su aprovechamiento y de organismos encargados de la recolección de neumáticos.





**Figura 4.8.**  
**Manejo de llantas de desecho en las vulcanizadoras (Elaboración propia)**

De acuerdo con todos los datos recopilados, la Figura 4.9 muestra una aproximación del destino final que tienen las llantas fuera de uso.



**Figura 4.9**  
**Destino final de las llantas de desecho provenientes de las vulcanizadoras de estudio (Elaboración propia)**



El estimado del caso de estudio muestra que aproximadamente se tiran a la basura 207 llantas a la semana en solo una pequeña parte de la zona sur de la Ciudad de México, suponiendo que todos los residuos recolectados por los camiones de basura siguen el diagrama de flujo de residuos sólidos presentado en la Figura 1.1 y que no son separados en las estaciones de transferencia ni en las plantas de selección, teniendo como destino final los rellenos sanitarios.

Las restantes 138 llantas que se desechan, son recolectadas en las vulcanizadoras por un intermediario sin garantizarse que estas últimas serán sometidas a un proceso de aprovechamiento ya que se desconoce su destino.

Considerando que una llanta con diámetro de rin de 0.33 m (13 pulgadas), que es el tamaño habitual para autos de uso urbano, tiene una masa entre 7 y 7.2 kg (Oponeo, 2015), la masa de este tipo de residuo que se supone llegaría a los rellenos sanitarios es de 966 kg cada semana.

#### **4.2. Generalización de resultados**

El tiempo de vida útil de una llanta depende de varios factores como la calidad de la llanta, la forma de conducción, el tipo de terreno donde se rueda la llanta, el clima, el tiempo de almacenamiento y el cilindraje del auto. De los factores que más contribuyen a un prematuro desgaste de la llanta se encuentra el clima, ya que a temperaturas altas se promueve la producción de ozono troposférico, que rompe las dobles ligaduras de sus componentes poliméricos haciendo que envejeczan más rápido, formándose grietas tanto al interior como el exterior del neumático y propiciando que la banda de rodadura se desprenda del neumático (Carros y mecánica, 2012). En general, se estima que una llanta dura en promedio de 45,000 a 60,000 km o hasta seis años (Neumarket México, 2015). Por ello, es necesario determinar el número aproximado de neumáticos de desecho que se tendrán en



Coyoacán y serán susceptibles de someterse a un proceso de aprovechamiento para minimizar la contaminación del ambiente con dicho residuo.

Debido a la poca información sobre la cantidad de vulcanizadoras que se encuentran en Coyoacán, resulta complejo evaluar la distribución que tendrían las llantas de desecho alrededor de toda la delegación. Por ello, se evaluará de manera conjunta la generación del residuo de acuerdo a la población que se concentra en la zona.

De acuerdo con la base de datos del Índice Nacional de Estadística y Geografía, en la Ciudad de México se concentran 8,918,653 habitantes en el año 2015, distribuidos en cada delegación como se muestra en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2. Número de habitantes por delegación en la Ciudad de México (INEGI, 2015b)**

Clave delegación	Delegación	Habitantes
002	Azcapotzalco	400,161
003	Coyoacán	608,479
004	Cuajimalpa de Morelos	199,224
005	Gustavo A. Madero	1,164,477
006	Iztacalco	390,348
007	Iztapalapa	1,827,868
008	Magdalena Contreras	243,886
009	Milpa Alta	137,927
010	Álvaro Obregón	749,982
011	Tláhuac	361,593
012	Tlalpan	677,104
013	Xochimilco	415,933
014	Benito Juárez	417,416
015	Cuauhtémoc	532,553
016	Miguel Hidalgo	364,439
017	Venustiano Carranza	427,263

La población también se puede dividir de acuerdo con los estratos socioeconómicos a los que pertenecen. Para la delegación Coyoacán, la cual cuenta con 608,479 habitantes en los 54.4 km<sup>2</sup> que abarca, dicha distribución se puede apreciar en la Figura 4.10. En color verde oscuro se encuentra lo que el INEGI denomina como estratos altos, es decir, que tienen un mayor nivel de bienestar y concentra al 60.41% de la población en la delegación. En color verde claro se encuentra un estrato con un menor nivel de bienestar en comparación con el



anterior, aquí se encuentra el 38.96% de habitantes. Finalmente, el color amarillo representa un estrato socioeconómico medio, que corresponde al 0.63%.

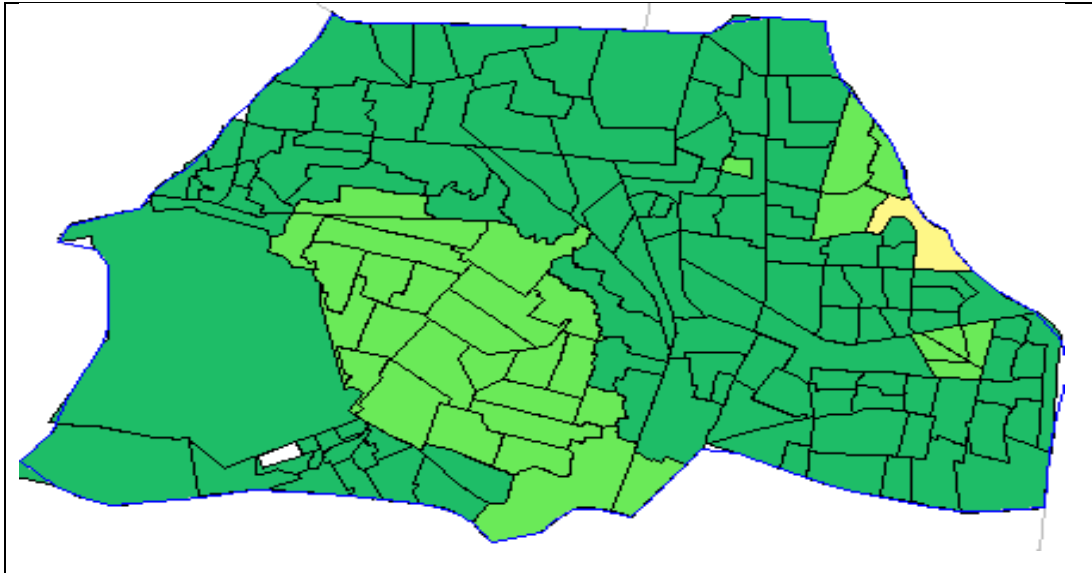


Figura 4.10. Estratos socioeconómicos en la delegación Coyoacán (INEGI,2017)

Los indicadores de niveles de bienestar social que se tomaron en cuenta para clasificar cada uno de los estratos se dividieron en categorías como infraestructura de la vivienda, calidad de la vivienda, hacinamiento, equipamiento de la vivienda, salud, educación y empleo, específicamente son (INEGI,2017):

- a) Tasa de Población Económicamente Activa (PEA) que recibe ingresos menores a \$3,611.0
- b) Tasa de PEA que no recibe ingresos
- c) Tasa de analfabetismo de la población de 10 años y más
- d) Tasa de población de 15 años y más sin instrucción
- e) Tasa de población de 15 años y más con primaria incompleta
- f) Tasa de población de 18 años y más sin enseñanza media
- g) Tasa de población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela
- h) Tasa de viviendas con piso de tierra
- i) Tasa de viviendas sin agua entubada
- j) Tasa de viviendas sin tubería de drenaje
- k) Tasa de viviendas sin energía eléctrica



- l) Tasa de viviendas de un solo cuarto
- m) Tasa bruta de mortalidad (por cada mil habitantes)
- n) Habitantes por unidad médica
- o) Tasa de PEA que labora desde menos de una hora hasta 32 horas por semana.

Tomando en cuenta que la población que se encuentra en un estrato socioeconómico alto, no acude generalmente a las vulcanizadoras debido a que llevan sus automóviles a las agencias vehiculares o empresas más reconocidas para reparar sus neumáticos, el estudio debe centrarse en el sector de la población que no se encuentra en el estrato socioeconómico más alto, sino del estrato medio y medio alto, que corresponde al 39.59% de los habitantes en la delegación, equivalente a 240,897 personas.

Para relacionar estos datos con el número de autos particulares que transitan regularmente por la delegación Coyoacán, es necesario considerar el parque vehicular de la Ciudad de México. En el Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015, se determinó que por cada habitante de la Ciudad de México hay 0.3 autos particulares, por lo que, haciendo una aproximación relacionada con el número de habitantes considerados para el caso de estudio (240,897), el número de autos que se concentran en Coyoacán es 72,270 (ONU-Hábitat, 2015). Esto significa que el número de neumáticos que se convertirán en residuos provenientes solamente de autos particulares será de 289,080 (sin considerar las llantas de repuesto que usualmente se colocan en las cajuelas de los autos), o 2,023,560 kg de residuos.

Con la información obtenida en el estudio y según los objetivos planteados para este trabajo a continuación se presentan algunas alternativas de solución a la problemática estudiada.



## Capítulo 5

### Propuesta de solución

De acuerdo con toda la información recopilada, así como con los métodos que existen actualmente para aprovechar las llantas de desecho para minimizar el volumen de las mismas en los rellenos sanitarios, la propuesta de solución incluye estrategias para su recolección y transporte a los sitios de aprovechamiento.

#### 5.1. Recolección

Para el año 1996 se determinaron algunos de los costos para México relacionados con los residuos, para el barrido manual de calles se estiman de \$0.8 a \$1.5 USD/km de calle, para el barrido mecánico \$0.25-\$0.5 USD/km de calle, para la recolección \$8.00-\$12.00 USD/tonelada y, para la disposición en un relleno sanitario \$4.00-\$8.00 USD/tonelada (Banco Interamericano de Desarrollo y la Organización Panamericana, 1997). Tomando en consideración las tasas de interés y el tipo de cambio de la moneda mexicana, los costos de los residuos son de \$20.01-\$37.53 pesos/km de calle, \$6.25-\$12.51 pesos/km para el barrido mecánico, \$200.14-\$300.21 pesos/tonelada para la recolección y de \$100.07-\$200.14 pesos/tonelada para la disposición en un relleno sanitario. Esta información confirma que desde hace 20 años el proceso de recolección, por lo general es al que se destina la mayor parte del costo total del manejo de residuos, por lo que es necesario encontrar un modelo que logre disminuir estos costos al máximo y así facilitar su adopción basada en la sustentabilidad.

Debido al tipo de residuo, el vehículo encargado de este proceso no necesita disponer de un compactador ni otro tipo de herramienta mecánica, incluso se podría utilizar un camión de carga para maximizar el área del vehículo, reduciendo la frecuencia de recolección, al igual que los costos de mantenimiento y el combustible. El vehículo propuesto es un camión de tolva debido a su gran capacidad de almacenamiento y su facilidad de descarga, que influirá



en los costos de operación ya que los tiempos “muertos” del proceso se minimizarían (Davis & Cornwell, 1998).

Con un camión tipo “torton” de volteo de 14 m<sup>3</sup> de capacidad, se pueden transportar hasta 16,500 kg (Express Global, 20117). De acuerdo con la sección 4.2, una llanta promedio pesa aproximadamente 7kg, por lo que con este tipo de camión se podrían transportar hasta 2,357 llantas en un solo viaje. De la Figura 4.8 se determinó que en total se desechan 207 llantas a la semana en la zona de Coyoacán que comprende a tres colonias de las 14 que se tomarán en cuenta en el estudio. Sin embargo, es necesario ajustar esta cifra ya que de los 7 locales vulcanizadores evaluados que disponían de sus residuos de llanta en los camiones de basura, solamente uno registró un número de 100 llantas cuando el promedio en los demás locales fue de 18 llantas. Por estos motivos se excluirá esta cifra del promedio.

Realizando una aproximación por promedios, en total son desechadas 36 llantas en cada colonia de la delegación cada semana, por lo que en las 14 colonias consideradas el número de llantas que se desechan sería de 500 por semana, y el camión torton satisfaría la recolección en la zona de estudio.

Para determinar el costo aproximado de todo el proceso, primero se debe precisar la forma de la recolección y la ruta.

La mayor generación de llantas de desecho ocurre en las vulcanizadoras dado que es el mercado natural, toda vez que los usuarios de los automóviles acuden a estos sitios para deshacerse de ellas, razón por la cual, la ruta de recolección solamente debería considerar aquellas zonas donde se concentre la mayor parte de vulcanizadoras, es decir, la recepción de llantas sería en cada establecimiento para evitar la adquisición de bodegas y/o construcción de almacenes innecesarios para resguardarlos.

De acuerdo con la Figura 4.8 y las consideraciones posteriores que se hicieron para limitar el área de estudio, en total se tomará en cuenta una región de la delegación Coyoacán que



comprende 14 colonias del estrato socioeconómico medio, las cuales son: Pedregal de Santo Domingo, Copilco el Alto, Ajusco, Pedregal de Santa Úrsula, Pueblo de Santa Úrsula Coapa, Bosques de Tetlamaya, Viejo Ejido de Santa Úrsula Coapa, El Reloj, Adolfo Ruiz Cortines, Nueva Díaz Ordaz, Huayamilpas, Pueblo de los Reyes, Pedregal de San Francisco y Pueblo la Candelaria. Dicha información será de gran utilidad para determinar la ruta del camión recolector y los costos asociados a ella. El tiempo y las distancias entre los puntos de recolección también tienen un papel importante. Lo más conveniente para garantizar el cumplimiento de la recolección sería realizarla en distintos días.

Después de la recolección, se deberá disponer de un almacén para resguardarlas o de un convenio con alguna empresa que se dedique a su aprovechamiento para trasladar todas las llantas que se junten en el día. Esta segunda opción optimizaría el proceso al disminuir notablemente los costos y el tiempo, ya que un almacén implicaría la renta de un terreno amplio que albergue todos los neumáticos, al personal que los resguarde y acomode y un sitio seguro donde pueda estacionarse el camión y que, además, se encuentre en alguna zona cercana al sitio de recolección. Estas consideraciones serán abordadas con más detalle en la siguiente sección.

## **5.2. Almacenamiento**

El sitio donde se almacenarían las llantas debería ser una bodega situada en un punto medio de la zona de recolección o cercano al lugar donde serán aprovechadas, tomando en cuenta que el tamaño del mismo tendría que ser amplio. Como objetivo de la propuesta de aprovechamiento de llantas se contempla su adopción a largo plazo, puede ser conveniente la compra de la bodega en lugar de la renta, teniendo esta decisión un impacto relevante en el capital destinado a la inversión.

En caso de que el sitio de aprovechamiento de las llantas sea en alguna de las industrias cementeras, se debe evaluar a cuáles plantas sería más conveniente trasladarlas, y para ello





se muestra en la Figura 5.1 la localización geográfica de las industrias cementeras en México, así como la ubicación de la Ciudad de México (marcada en rojo).

Se observa que las industrias más cercanas a la Ciudad de México, particularmente, a la delegación Coyoacán son Cemento Moctezuma y CEMEX México, siendo esta última una industria que no sólo utiliza el co-procesamiento de energía, sino que también fabrica concreto a base llantas lo que podría aumentar su porcentaje de aprovechamiento.

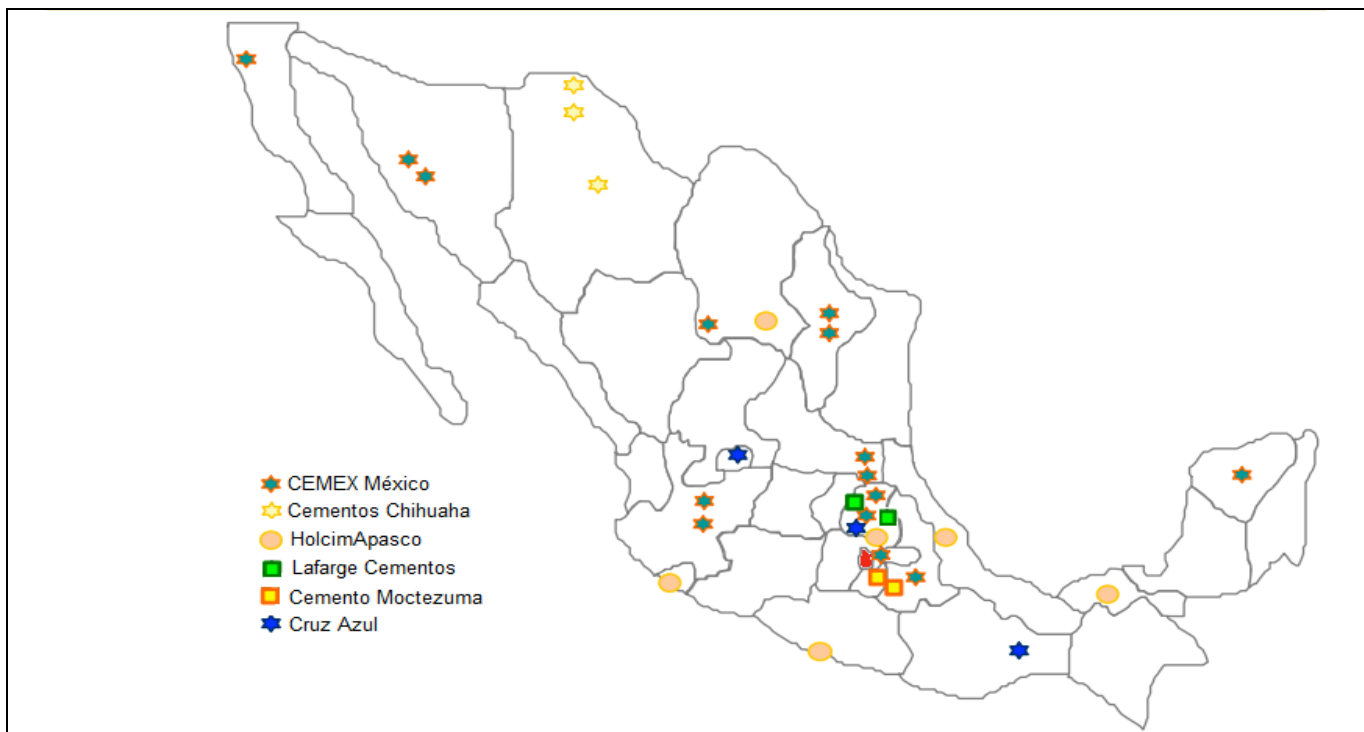


Figura 5.1. Mapa de ubicación de las industrias cementeras en México (CANACEM, 2006)

### 5.2.1. Equipo adicional en el almacén

Para facilitar el traslado de las llantas de desecho al sitio de aprovechamiento, se podría evaluar la factibilidad de adquirir equipos para triturarlas y embalarlas, minimizando el volumen del residuo y facilitando su transporte.



Dependiendo del tamaño final que se requiera del material, los equipos requeridos serán distintos. Por ejemplo, existen las cortadoras simples en las cuales, el material es introducido a la tolva de entrada mediante una pinza y cae hacia una serie de cuchillas que giran hasta triturar el material. Finalmente, éste sale del equipo a la estructura base para poder ser transportado en una banda hacia otra máquina, como una prensa para su embalaje o a un contenedor. Una máquina trituradora promedio tiene una capacidad para tratar de 12 a 13 toneladas de llanta por hora (Uno reciclaje, 2017).

Un sistema de trituración más especializado se describe a continuación (Vivo en Italia, 2009):

- a) Destalonadora: utilizada para extraer los dos anillos de alambres de acero que se encuentran en el interior de la llanta
- b) Cortadora: encargada de la primera trituración de la llanta y su preparación para la fase subsiguiente
- c) Trituradora: reduce los trozos de llantas provenientes de la primera fase, en pedazos aún más pequeños, motivo por el cual este tipo de máquina debe contar con una parrilla o red metálica para la calibración del tamaño del material en la salida
- d) Granulador: su función es moler los pedazos de llantas provenientes del triturador secundario, obteniendo partículas de aproximadamente 16mm
- e) Separador magnético: remueve las partículas ferromagnéticas, el cual cuenta con una banda transportadora que se ocupa de conducir el metal hacia un punto de recolección (cajón/contenedor)
- f) Cernidor: encargado de la refinación y la selección del grano. El material es conducido por medio de una banda transportadora a un cernidor rotativo el cual se encarga de seleccionar los granos en 3 diferentes tamaños que van de 1 a 7mm



- g) Pulverizador: esta etapa solamente se aplica cuando se desea reducir el tamaño de los granos obtenidos en el proceso anterior. Entre más pequeño y puro se logre obtener el grano, mayor será su valor en el mercado

El proceso de trituración necesario deberá adecuarse al método de aprovechamiento seleccionado.

### **5.3. Aprovechamiento**

#### **5.3.1. Co-procesamiento en industrias cementeras**

En el Capítulo 3 se presentaron las formas más comunes de aprovechamiento que se desarrollan en México y, de acuerdo con el volumen del residuo que se maneja en el caso de estudio, el co-procesamiento en las industrias cementeras se plantea como la mejor opción de manejo debido a la minimización en los costos relacionados al proceso de elaboración de cemento y a su capacidad de tratar grandes cantidades de residuos en general (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC, 2017), tomando algunas referencias de la industria Ecoltec pero diseñado exclusivamente para aprovechamiento de llantas y a una escala mucho menor.

El proceso de fabricación de cemento se conforma por varias etapas, que son: extracción de materias primas (voladura o excavación, carga y transporte), preparación de las materias primas (machacado, almacenamiento, mezclado y molido), transformación mineralógica u operaciones de horno (operaciones y preparación del combustible y cocción del clínker, enfriamiento y almacenamiento, y preparación del cemento (mezclado, molido, almacenamiento, envasado y expedición). La transformación mineralógica o proceso de producción de clínker en hornos rotatorios, es la etapa que consume la mayor parte de la energía utilizada; comienza con la descomposición térmica del carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) a



unos 900° C y libera dióxido de carbono. En la fase de *clinkerización* a alta temperatura (típicamente 1400 - 1500°C), el óxido de calcio reacciona con el sílice, la alúmina y el hierro para formar silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que están presentes en los minerales clinkerizados (Lorea y Van-Loo, 2005).

Los principales combustibles fósiles utilizados en la cocción en el horno de cemento son carbón pulverizado (hulla y lignito), *petcoque*, gasóleo y gas natural, no obstante, los neumáticos por su homogeneidad, alto valor calórico y relativamente poco contenido de azufre y cloro, son buenos combustibles alternativos para la producción de clínker (Lorea y Van-Loo, 2005).

Un horno de tamaño medio para producción de cemento puede utilizar llantas para suplir el 5% del combustible total necesario para su funcionamiento, es decir, se pueden aprovechar hasta 375,000 llantas para producir hasta 2,000 ton de clínker/día (CANACEM, 2006).

No obstante, para implementar dicho tratamiento en la industria cementera, es necesario tomar en cuenta varias consideraciones como son: el cumplimiento de la normativa vigente para límites máximos de emisión de contaminantes a la atmósfera para elaboración de clínker y cemento NOM-040-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002a), la vigilancia y control del co-procesamiento por medio de auditorías ambientales, la frecuencia de abastecimiento del residuo a la planta cementera, la disponibilidad de equipo y personal para el co-procesamiento, los acuerdos de cooperación entre la parte encargada de custodiar el residuo desde su recolección y la industria cementera que se hará cargo del mismo una vez que se le haya entregado y la evaluación de la rentabilidad del proceso (GZC-Holcim, 2006a).

En el co-procesamiento, los residuos que serán utilizados deben ser previamente tratados para garantizar que la alimentación de los mismos será constante y homogénea. Consiste principalmente en la trituración de los sólidos pero dependiendo de las características de éstos pueden ser mezclados con aserrín (GZC-Holcim, 2006b). Para el caso de llantas de desecho, simplemente deben ser trituradas para minimizar el riesgo de aglomeración y



asegurar una buena combustión. Pueden ser alimentadas directamente a zonas donde las temperaturas del proceso sean muy elevadas como en el calcinador o el quemador principal, favoreciendo el consumo total del caucho como combustible y la incorporación a la estructura de los minerales del clínker del resto de los elementos químicos que constituyen el refuerzo de acero, como hierro y zinc (Lorea y Van-Loo, 2005).

El control del todo el proceso (tritución del material, alimentación al calcinador o al quemador principal, incineración y emisión de gases de combustión), deberá ser vigilado periódicamente por medio de una auditoría ambiental, la cual se define en el reglamento de la LGEEPA como un examen metodológico de los procesos de una empresa con respecto de la contaminación y el riesgo ambiental, el cumplimiento de la normatividad aplicable, de los parámetros internacionales y de las buenas prácticas de operación e ingeniería. Incluye, inclusive, procesos de autorregulación para determinar su desempeño ambiental con base en los requerimientos establecidos en los términos de referencia que proporcionan la metodología, requisitos y parámetros para la realización y, en su caso, las medidas preventivas y correctivas necesarias para proteger al ambiente. Los procesos de autorregulación son voluntarios y, de acuerdo con la legislación y normatividad vigente que le aplique, la empresa establece un conjunto de actividades que se adopten a normas complementarias o más estrictas, a través de las cuales se mejore el desempeño ambiental y se obtengan mayores logros en materia de protección ambiental. Todo esto podrá efectuarse a través de la Auditoría Ambiental (Reglamento LGEEPA, 2010).

Finalmente, los acuerdos de cooperación que podrían existir entre el organismo encargado de la recolección, transporte y posible trituración del residuo y la cementera serían del tipo vertical, que son aquellos celebrados entre operadores que están en diferentes fases de la producción o comercialización y, por lo tanto, no son competidores entre sí. En este caso podría ser un acuerdo entre fabricante (cementera)-minorista (proveedor de las llantas usadas) (Maillo-González-Orus, 2017).



### 5.3.2. Elaboración de impermeabilizantes

En el caso de la elaboración de impermeabilizantes, se requiere de llantas trituradas para mezclarlas con disolventes no orgánicos a base de agua, cemento, aglutinantes, arena, roca, y otros agregados. Para preparar el compuesto impermeabilizante, se puede utilizar cualquier dispersión de polímero acrílico, como acrílico estireno, vinyl acrílico, emulsiones o dispersiones de poliuretano o mezclas de hidruro de silicio (IV) con acrílicos, que son por naturaleza impermeabilizantes y también son vehículos para el transporte o soporte de las “cargas” (tizas, caolines, talcos, caucho en polvo). Para hacer que estas resinas sean mucho más resistentes al agua se agregan compuestos hidrófugos como siliconas o se formulan emulsiones utilizando el caucho disuelto emulsionado o las resinas de butadieno estireno (caucho sintético) (Calderón-R., 2013).

Para acondicionar el terreno adquirido como una planta de elaboración de impermeabilizantes se necesitaría una planeación y diseño más especializados, no obstante, en esta sección se hará una descripción general del proceso.

Las llantas serían recibidas por el personal administrativo y llevadas a la zona donde se encontraría la destalonadora, en donde el trabajador encargado operaría el equipo de manera manual para depositarlo después en la banda alimentadora que llevaría las llantas a la cortadora rotativa que sería supervisada por otro miembro del personal.

Una banda transportadora llevaría las llantas a la fase de trituración, cortándolas en pedazos aún más pequeños, motivo por el cual este tipo de máquina debe contar con una parrilla o red metálica para la calibración del tamaño del material en la salida. Los trozos superiores a 150x150mm son retenidos y retornados de nuevo a la cortadora rotativa; los trozos más pequeños son conducidos a un vaciadero por otra cinta transportadora para la última fase de cortado, conformada por el granulador, que se encarga de reducir el tamaño de los pedazos de llantas provenientes del triturador a 16 mm, y el cernidor, donde se obtienen partículas de aproximadamente 7mm.



Para la protección del medio ambiente, el granulador y el cernidor de corte están dotados de sistemas de extracción con una capacidad de aspirado de 5000 m<sup>3</sup>/h. Con ello se garantiza un entorno casi exento de polvo y, al mismo tiempo, se refrigeran los componentes de la instalación. El sistema de filtrado se suministra en forma de cápsula a presión.

Después, una banda magnética removerá las partículas ferromagnéticas, el cual contará con una banda transportadora que se ocupará de conducir el metal hacia un punto de recolección (cajón/contenedor), y después, las partículas de llanta serán transportados hasta el tanque con agitación continua y calentamiento a 170°C durante 4 horas a 200rpm, en donde será mezclado junto con las otras materias primas provenientes cada una de su respectivo tanque de almacenamiento para elaborar el impermeabilizante que será empaquetado para su venta en la unidad de envasado industrial, en botes de plástico de 15 litros para su venta.

El producto final es un impermeabilizante líquido viscoso y resistente al agua y de alto desempeño en los techos de construcciones. Es elastomérico, es decir, se expande y se contrae junto con la construcción, resistiendo el movimiento natural de las construcciones. Al basar su composición en caucho vulcanizado tiene gran resistencia a cambios bruscos de temperatura, ambientes salinos y lluvia ácida. El rendimiento por cada llanta reciclada es de 7 litros de impermeabilizante (Grupo Pasa Bajío, 2009).

La capacidad de la planta sería de 329,280 litros de impermeabilizante al año, distribuidos en 21,952 cubetas de 15 litros.

### **5.3.3. Fabricación de laminados de piso**

En caso de que se deseara optar por esta forma de aprovechamiento se debería realizar una inversión mucho mayor para adaptar una planta que sea capaz de tratar todos los neumáticos de desecho involucrados en el caso de estudio. Además, el almacén planteado



en el punto 5.2 debería contar con el espacio suficiente para colocar los equipos necesarios para la trituración especializada de llantas y la fabricación del piso.

Primero, los gránulos de caucho previamente triturados se vierten en moldes, dependiendo del grosor seleccionado será la cantidad de material que se debe adicionar. Después, el molde con el material se lleva a una prensa de calor con una temperatura aproximada de 400°C, para compactar los gránulos y formar una superficie uniforme. Posteriormente, se puede adicionar alguna lámina decorativa de policloruro de vinilo (PVC). Finalmente se desmolda el material y se corta de acuerdo con el tamaño y forma deseada (Cardona-Gómez y Sánchez-Montoya, 2011).

En comparación con la elaboración de impermeabilizantes del punto anterior, este método es más sencillo de aplicar para el caso de estudio, debido a que no necesita tantos equipos para el proceso, pero también se puede evaluar la posibilidad de proveer al fabricante con las llantas para que sean utilizadas como materia prima. Solamente existe una empresa que fabrica este tipo de piso en la Ciudad de México, de acuerdo con las bases de datos electrónicas:

- a) Química ALM. Xola No. 87 Col. Álamos, Delegación Benito Juárez, Ciudad de México C.P. 03400 (Cosmos, 2017).

Para solucionar el problema planteado, es necesario un análisis de factibilidad económica para determinar la mejor opción de aprovechamiento.

#### **5.4. Factibilidad económica**

En esta sección se abordarán los aspectos económicos relacionados con el Capítulo 6, donde se describen los modelos de solución para el caso de estudio, para determinar todas las ventajas y desventajas de cada modelo y, así, contribuir a la toma de decisión del modelo apropiado.





La Tabla 5.1 resume los distintos modelos que se abordarán en las siguientes secciones. En todos los modelos de manejo solamente se considera una forma de transporte del residuo. Por este motivo, no es un factor importante para la determinación del mejor modelo de manejo y no se describirá en esta sección.

Modelo	Transporte	Almacén	Industria Cementera
<b>Modelo A</b>	Transporte	Almacén	Industria Cementera
<b>Modelo B</b>	Transporte	Almacén	Proveedor
<b>Modelo C</b>	Transporte	Trituración simple	Industria Cementera
<b>Modelo D</b>	Transporte	Trituración simple	Proveedor
<b>Modelo E</b>	Transporte	Trituración especializada	Proveedor
<b>Modelo F</b>	Transporte	Trituración especializada	Fabricación de impermeabilizante
<b>Modelo G</b>	Transporte	Trituración especializada	Fabricación de pisos

#### 5.4.1. Modelo A

Para el almacén, se propuso en el Capítulo 4 la adquisición del terreno. Esto aumenta el monto de la inversión, pero minimiza los costos de operación. Los costos de compra de almacenes en la delegación Coyoacán son de aproximadamente 10 millones de pesos (superficie, 1,800 m<sup>2</sup>), mientras que los costos de renta en esta zona son de 110 mil pesos (1,000 m<sup>2</sup>) (Viva anuncios, 2017).

El traslado a la industria cementera sería la siguiente etapa después del almacenamiento. Las llantas de desecho serían previamente contabilizadas en el almacén y después se formarían lotes con el número de llantas que determine la industria cementera para su co-procesamiento. El flujo de efectivo en esta etapa sería únicamente el combustible del camión tipo “torton” de 14 m<sup>3</sup> de capacidad, el cual por lo general tiene de uno a dos depósitos de diésel de 500 litros cada uno (cuyo precio al 25/10/17 es de 17.54 pesos según Milenio, 2017), y el rendimiento promedio es de 40 litros por cada 100 km recorridos. Las plantas cementeras de CEMEX más cercanas a la zona de estudio son las plantas de Huixquilucan en el Estado de México (a 44 km) y la de Cerro Jardín en Atotonilco de Tula, Hidalgo (a 100km).



Como parte de los costos fijos se encuentran los sueldos del personal encargado del transporte y del control de las llantas de desecho dentro del almacén, así como el uso de agua dentro del almacén para la limpieza de las llantas (SACMEX, 2016). La Tabla 5.2 muestra los montos monetarios de inversión, costos de operación fijos y variables y algunas consideraciones adicionales para determinar el monto total, como el tamaño del almacén, número de empleados, y los litros de diésel necesarios para el transporte de las llantas.

El objetivo principal de todos los modelos de aprovechamiento es recolectar todos los neumáticos de desecho en la delegación Coyoacán para su aprovechamiento.

Por ello, las ventas esperadas anuales se encuentran en función de la masa del residuo que se desea tratar. Tomando como ejemplo el municipio de Nuevo Laredo en Tamaulipas, México, en donde cada año se recolectan 200 mil neumáticos al año para transportarlos a la industria cementera Apasco en el estado de Coahuila y se venden a la cementera a 8 pesos por unidad (Garc, 2006), se utilizará este valor para aproximar el ingreso en el flujo de efectivo. En la Tabla 5.2 se muestra el flujo de efectivo de este modelo.

<b>Tabla 5.2. Modelo A</b>			
<b>Inversión</b>			
<b>Artículo</b>	<b>Característica</b>		<b>Monto [MXN]</b>
Almacén	Compra de 1800 m2		\$10,000,000.00
Camión	Torton de volteo 14 m3		\$635,000.00
<b>Suma</b>			<b>\$10,635,000.00</b>
<b>Costos de operación</b>			
<b>Artículo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Monto (1 mes) [MXN]</b>	<b>Monto anual [MXN]</b>
Agua [m3]	30	\$597.33	\$7,167.96
Combustible	500 litros	\$8,770.00	\$105,240.00
Personal	1 choferes	\$6,000.00	\$72,000.00
	2 en almacén	\$16,000.00	\$192,000.00
<b>Suma</b>			<b>\$369,240.00</b>
<b>Ingresos</b>			
<b>Ventas anuales [unidades]</b>	<b>Precio unitario [MXN]</b>		<b>Monto anual [MXN]</b>
24000	\$8.00		\$192,000.00



### 5.4.2. Modelo B

En este modelo, la etapa que sigue a la recolección y del almacenamiento, es el traslado a una industria de impermeabilizantes o de fabricación de pisos que usen como materia prima las llantas de desecho y que se encuentren ubicadas dentro de la Ciudad de México. En este caso, solamente se vería afectado el costo variable de operación de acuerdo al rendimiento de combustible proporcionado por el camión, fijando el precio del Modelo de aprovechamiento A. La Tabla 5.3 muestra el flujo de efectivo correspondiente

Tabla 5.3. Modelo B			
Inversión			
Artículo	Característica		Monto [MXN]
Almacén	Compra de 1800 m2		\$10,000,000.00
Camión	Torton de volteo 14 m3		\$635,000.00
<b>Suma</b>			<b>\$10,635,000.00</b>
Costos de operación			
Artículo	Cantidad	Monto (1 mes) [MXN]	Monto anual [MXN]
Agua [m3]	30	\$597.33	\$7,167.96
Combustible	250 litros	\$4,385.00	\$52,620.00
Personal	1 chofer	\$6,000.00	\$72,000.00
	2 en almacén	\$16,000.00	\$192,000.00
<b>Suma</b>			<b>\$316,620.00</b>
Ingresos			
Ventas anuales [unidades]		Precio unitario [MXN]	Monto anual [MXN]
24000		\$8.00	\$192,000.00

### 5.4.3. Modelo C

Otra opción de manejo del residuo, contempla la trituración simple de las llantas dentro del almacén y, posteriormente, transportar el residuo a la industria cementera para ser procesado directamente. La adquisición del equipo tendrá un impacto directo en la inversión, así como el incremento de empleados que operarán los equipos de trituración y la energía



que será requerida para la operación de los equipos lo tendrán en los costos fijos de operación. De acuerdo a las características de cada equipo se determinó que el consumo de energía por mes es de 2000kW y con datos reportados en la Comisión Federal de Electricidad se calculó la tarifa que deberá pagar la planta (CFE, 2017).

En el sitio electrónico Entrepreneur se reporta que una llanta triturada con un tamaño de 2.5 pulgadas, tiene un valor de 8 pesos mexicanos por kg (Garc, 2006); así como, el valor de una trituradora industrial de 20HP (Mercado Libre México, 2017a) pero es importante tomar en cuenta que se necesitará un empaque para esos trozos de llanta de desecho. Comúnmente, se utilizan costales de rafia de 50 kg de capacidad. El número de costales reportado está en función de las llantas de desecho que se contempló tratar en el Capítulo 4.2 (3,920 llantas/mes, o 27,440 kg), y el precio promedio es de 3.10 pesos por cada costal (Mercado Libre México, 2017b). Los montos de capitales relacionados en este modelo se observan en la Tabla 5.4.

<b>Tabla 5.4. Modelo C</b>			
<b>Inversión</b>			
<b>Artículo</b>	<b>Característica</b>		<b>Monto [MXN]</b>
Almacén	Compra de 1800 m2		\$10,000,000.00
Camión	Torton de volteo 14 m3		\$635,000.00
Trituradora	marca Shreeder 20Hp		\$350,000.00
<b>Suma</b>	<b>\$11,627,611.20</b>		
<b>Costos de operación</b>			
<b>Artículo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Monto (1 mes) [MXN]</b>	<b>Monto anual [MXN]</b>
Agua [m3]	30	\$597.33	\$7,167.96
Electricidad [kWmes]	2000	\$4,482.32	\$53,787.88
Combustible	500 litros	\$8,770.00	\$105,240.00
Personal	1 chofer	\$6,000.00	\$72,000.00
	2 en almacén	\$16,000.00	\$192,000.00
	2 empleados	\$16,000.00	\$192,000.00
Costales	6586 costales de 50 kg c/u		\$20,415.36
<b>Suma</b>	<b>\$581,655.36</b>		
<b>Ingresos</b>			
<b>Ventas anuales [kg]</b>	<b>Precio [MXN/kg]</b>		<b>Monto anual [MXN]</b>
168000	\$8.00		\$1,344,000.00



#### 5.4.4. Modelo D

Este modelo de aprovechamiento es similar al anterior, pero en este caso, los costos variables de operación disminuirán ya que el destino final del residuo es una industria de fabricación de impermeabilizantes o de pisos, ubicada dentro de la Ciudad de México. En la Tabla 5.5 se muestra el flujo de efectivo para este modelo.

<b>Tabla 5.5. Modelo D</b>			
<b>Inversión</b>			
<b>Artículo</b>	<b>Característica</b>		<b>Monto [MXN]</b>
Almacén	Compra de 1800 m2		\$10,000,000.00
Camión	Torton de volteo 14 m3		\$635,000.00
Trituradora	marca Shreeder 20Hp		\$350,000.00
<b>Suma</b>	<b>\$10,985,000.00</b>		
<b>Tabla 5.5. Modelo D (Continúa)</b>			
<b>Costos de operación</b>			
<b>Artículo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Monto (1 mes) [MXN]</b>	<b>Monto anual [MXN]</b>
Agua [m3]	30	\$597.33	\$7,167.96
Electricidad [kWmes]	2000	\$4,482.32	\$53,787.88
Combustible	250 litros	\$4,215.00	\$50,580.00
Personal	1 chofer	\$6,000.00	\$72,000.00
	2 en almacén	\$16,000.00	\$192,000.00
	2 empleados	\$16,000.00	\$192,000.00
Costales	3360 costales de 50 kg c/u		\$10,415.00
<b>Suma</b>	<b>\$515,996.00</b>		
<b>Ingresos</b>			
<b>Ventas anuales [kg]</b>		<b>Precio [MXN/kg]</b>	<b>Monto anual [MXN]</b>
168000		\$8.00	\$1,344,000.00

#### 5.4.5. Modelo E

En algunos casos, la trituración especializada eleva el valor de los residuos de llanta. Por ello, este modelo plantea la adquisición de una línea de reciclaje. Actualmente se encuentra en el mercado como un paquete compuesto por cinco máquinas, las cuales, cortan ambas



caras de la llanta, después la cortan en cuerdas, luego trituran en pedazos la llanta, sacan el cinturón de acero de la llanta y separan los remanentes del caucho mediante un molino.

El costo aproximado de la unidad de reciclaje de llantas es de 2.5 millones de pesos (Mercado Libre México, 2017c) y su adquisición también aumentará los costos fijos de operación al necesitar más empleados que se hagan cargo de cada uno de los equipos de trituración. Por otra parte, se consultó el precio al que se vende una tonelada de llanta de desecho molida dependiendo del tamaño final del gránulo (Mercado Libre México, 2017d). Dichos datos pueden observarse en la Tabla 5.6.

<b>Tabla 5.6. Modelo E</b>			
<b>Inversión</b>			
<b>Artículo</b>	<b>Característica</b>		<b>Monto [MXN]</b>
Almacén	Compra de 1800 m2		\$10,000,000.00
Camión	Torton de volteo 14 m3		\$635,000.00
Banda alimentadora	Línea de reciclaje con bandas de 2m x 1m; pistones hidráulicos; cortadora de 1Hp; trituradora de 20Hp		\$2,745,000.00
Destalonadora			
Cortadora			
Trituradora			
Granulador			
Banda magnética			
Banda transportadora			
<b>Suma</b>			<b>\$13,380,000.00</b>
<b>Costos de operación</b>			
<b>Artículo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Monto (1 mes) [MXN]</b>	<b>Monto anual [MXN]</b>
Agua [m3]	30	\$597.33	\$7,167.96
Electricidad [kWmes]	2000	\$4,482.32	\$53,787.88
Combustible	250 litros	\$4,215.00	\$50,580.00
Personal	1 chofer	\$6,000.00	\$72,000.00
	2 en almacén	\$16,000.00	\$192,000.00
	8 empleados	\$80,000.00	\$960,000.00
Costales	3360 costales de 50 kg c/u		\$10,416.00
<b>Suma</b>			<b>\$1,284,996.00</b>



<b>Tabla 5.6. Modelo E (continuación)</b>			
Ingresos			
Ventas anuales [ton]	Tamaño	Precio [MXN/ton]	Monto anual [MXN]
42	3 a 6 mm	\$3500,00	\$147,000.00
42	1 a 3 mm	\$9000,00	\$378,000.00
42	<1mm	\$10000,00	\$420,000.00
42	polvo	\$11000,00	\$462,000.00
<b>Suma</b>		<b>\$1,407,000.00</b>	

#### 5.4.6. Modelo F

El Modelo F se refiere a la fabricación de impermeabilizante a partir de trozos de llanta que serán triturados y mezclados con estireno acrílico en emulsión y resina de silicona líquida hasta obtener el producto impermeabilizante que será envasado en cubetas de 15 litros. Al igual que el Modelo anterior, es importante realizar el estudio de mercado para determinar la demanda del producto y el precio de venta, sin embargo se utilizó un precio promedio a partir de otros impermeabilizantes con llantas recicladas, fijándolo en \$800.00 por cubeta. En cuanto a las materias primas, el estireno acrílico en emulsión tiene un precio promedio en el mercado de \$5,040.00 por cada bote con 200 kg, utilizando 14,634 kg al mes; y la resina de silicona líquida tiene un precio de \$45.00 por litro, utilizando 6,272 litros al mes. En la Tabla 5.7 se muestra el flujo de efectivo correspondiente.

<b>Tabla 5.7. Modelo F</b>		
Inversión		
Artículo	Característica	Monto [MXN]
Almacén	Compra de 1800 m <sup>2</sup>	\$10,000,000.00
Banda alimentadora	Línea de reciclaje con bandas de 2m x 1m; pistones hidráulicos; cortadora de 1Hp; trituradora de 20Hp	\$2,745,000.00
Destalonadora		
Cortadora		
Trituradora		
Granulador		
Banda magnética		
Banda transportadora		
Mezclador	De 1600Lts con serpentín y	\$100,000.00



<b>Tabla 5.7. Modelo F</b>			
<b>Inversión</b>			
<b>Artículo</b>	<b>Característica</b>		<b>Monto [MXN]</b>
	enchaquetado		
Envasadora	Opera a 120v		\$37,000.00
Tanques de almacenamiento	1 de 1000Lts		\$75,000.00
Tanques de almacenamiento	2 de 3500Lts		\$52,000.00
<b>Suma</b>	<b>\$13,009,000.00</b>		
<b>Costos de operación</b>			
<b>Artículo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Monto (1 mes) [MXN]</b>	<b>Monto anual [MXN]</b>
Agua [m3]	30	\$597.33	\$7,167.96
Electricidad [kWmes]	2000	\$4,482.32	\$53,787.88
Cubetas 15Lts	1820	\$72,800.00	\$873,600.00
Estireno acrílico en emulsión [kg]	14634.66667	\$368,793.60	\$4,425,523.20
Resina de silicona líquida [L]	6272	\$276,958.32	\$3,323,499.79
Personal	9 operadores	\$54,000.00	\$648,000.00
	supervisor	\$20,000.00	\$240,000.00
	contador	\$15,000.00	\$180,000.00
	soporte técnico	\$10,000.00	\$120,000.00
	ventas	\$8,000.00	\$96,000.00
	auxiliar limpieza	\$3,000.00	\$36,000.00
<b>Suma</b>	<b>\$10,003,578.83</b>		
<b>Ventas anuales</b>			
<b>Cantidad anual [cubetas/año]</b>	<b>Precio unitario [MXN]</b>		<b>Total [MXN]</b>
21952	\$800.00		\$17,561,600.00

#### 5.4.7. Modelo G

Este modelo, propone la elaboración de piso de caucho dentro del almacén, es decir, el equipamiento de una fábrica de pisos a pequeña escala y, para ello, es necesario disponer de una línea de trituración especializada, prensas de calor, moldes, láminas decorativas, cajas para empaquetar el producto terminado, un punto de venta del piso fabricado y más operadores. Un aspecto fundamental para la aplicación de este modelo es la elaboración de un estudio de mercado para conocer el precio del producto, determinar el sitio óptimo pero, sobre todo, la demanda y oferta del mismo para garantizar que el proyecto sea viable. Por





tanto, este modelo requiere de un análisis más detallado y en la presente investigación solamente permanecerá como una propuesta de estudio.

### 5.5. Análisis de los modelos de aprovechamiento a partir de herramientas financieras

Una vez que se han determinado los egresos e ingresos de cada modelo, se pueden establecer los flujos de efectivo anuales. Para este caso de estudio se considerará que no hay fluctuaciones en el mercado, por lo que los flujos de efectivo serán constantes con la finalidad de disminuir la complejidad del análisis. En la Tabla 5.8 se muestran los flujos de efectivo para cada modelo.

Tabla 5.8 Flujos de efectivo				
	Inversión	Ingresos	Egresos	Flujo
<b>Modelo A</b>	\$10,635,000.00	\$192,000.00	\$369,240.00	-\$177,240.00
<b>Modelo B</b>	\$10,635,000.00	\$192,000.00	\$316,620.00	-\$124,620.00
<b>Modelo C</b>	\$11,617,611.84	\$1,344,000.00	\$571,656.00	\$772,344.00
<b>Modelo D</b>	\$10,985,000.00	\$1,344,000.00	\$516,996.00	\$827,004.00
<b>Modelo E</b>	\$13,380,000.00	\$1,407,000.00	\$1,284,996.00	\$122,004.00
<b>Modelo F</b>	\$13,009,000.00	\$17,561,600.00	\$10,003,578.83	\$7,558,021.17

Algunos conceptos financieros serán abordados a continuación para utilizarlos en la elección del mejor modelo de aprovechamiento.

#### a) Tasa Interna de Retorno (TIR)

Es una relación de rendimiento de ganancia anual para los inversionistas (rentabilidad). En otros términos, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto y se expresa en porcentaje (Economipedia, 2017). Para calcularlo se emplea el modelo siguiente:

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{Fn}{(1+i)^n} - I_0 = \frac{S_1}{(1+i)^1} + \frac{S_2}{(1+i)^2} + \frac{S_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{S_n}{(1+i)^n} - I_0 = 0$$



donde  $F_n = s =$  flujo de efectivo, e  $i =$  tasa de descuento

b) Tasa de descuento

Refleja el costo que involucra tomar una decisión y no otra; es la oportunidad perdida de gastar o invertir en el presente, por lo que también se le conoce como costo o tasa de oportunidad (Pymes futuro, 2013). Por lo general, el costo de oportunidad se expresa en porcentaje y varía entre el 10 al 20%. Para la evaluación de los modelos de aprovechamiento se fijará un valor promedio de 15%.

c) Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)

Es un instrumento que permite medir el plazo de tiempo que se requiere para que los flujos netos de efectivo de una inversión recuperen su costo o inversión inicial.

Para ello, primero se debe construir los diagramas de flujo y después se observa cual es el último saldo negativo. También se puede calcular al dividir el monto de la inversión entre cada flujo de efectivo acumulado, es decir, el flujo de efectivo inicial junto con el flujo de efectivo correspondiente al año en el que se está calculando la proyección. Cuando esta relación sea igual a uno, entonces será el año de recuperación de la inversión (Pymes futuro, 2010).

d) Valor presente neto (VPN)

Permite determinar si una inversión cumple con el objetivo básico financiero de maximizar la inversión. Si es positivo significará que el valor de la empresa tendrá un incremento equivalente al monto del Valor Presente Neto. Si es negativo quiere decir que la empresa reducirá su riqueza en el valor que arroje el VPN. Si el resultado del VPN es cero, la empresa no modificará el monto de su valor. Es importante tener en cuenta que el valor del Valor



Presente Neto depende de: la inversión inicial previa, las inversiones durante la operación, los flujos netos de efectivo, la tasa de descuento y el número de periodos que dure el proyecto (Pymes futuro, 2013).

e) Índice de rotación de capital (IRC)

$$IRC = \frac{Ventas}{Inversión\ total}$$

f) Capital semilla

Es una inyección de fondos, conocimiento y experiencia por parte de uno o varios inversores hacia una empresa, por lo general de baja escala. A cambio del capital semilla, los inversores adquieren una parte del negocio, normalmente para venderlo cuando haya crecido y obtener plusvalías. Uno de los grandes inversionistas de México es la Secretaría de Economía (SE) que invierte en pequeños empresarios y puede aportar hasta 1.5 millones de pesos según el programa (Revista pyme, 2017). Para la evaluación de los modelos se fijó un capital semilla aproximado de un millón de pesos.

La Tabla 5.9 muestra los resultados de la evaluación financiera que se realizó, de acuerdo con los conceptos planteados con anterioridad. La Figura 5.2 presenta el periodo de recuperación de la inversión

Se observa que de los 5 modelos de aprovechamiento abordados en esta sección dos de ellos no son viables para su aplicación, ya que a 10 años de operación no se obtiene ninguna remuneración de la inversión (no se obtiene el PRI y el VPN y la TIR continúa siendo negativos), los flujos de efectivo proyectados no satisfacen la rentabilidad del proyecto A ni B.



**Tabla 5.9 Factibilidad económica**

Modelo	A			B			C		
<b>Inversión</b>	\$10,635,000.00			\$10,635,000.00			\$11,604,656.00		
<b>Capital semilla</b>	1,000,000			1,000,000			1,000,000		
<b>Tasa de descuento</b>	10%			10%			10%		
Año	Flujos de efectivo								
	Flujo neto	Flujo acumulado	I/F	Flujo neto	Flujo acumulado	I/F	Flujo neto	Flujo acumulado	I/F
0	-\$10,635,000.00			-\$10,635,000.00			-\$11,604,656.00		
1	\$786,840.00	\$786,840.00	13.52	\$837,420.00	\$837,420.00	12.70	\$7,444,344.00	\$7,444,344.00	1.56
2	\$786,840.00	\$1,573,680.00	6.76	\$837,420.00	\$1,674,840.00	6.35	\$7,444,344.00	\$14,888,688.00	0.78
3	\$786,840.00	\$2,360,520.00	4.51	\$837,420.00	\$2,512,260.00	4.23	\$7,444,344.00	\$22,333,032.00	0.52
4	\$786,840.00	\$3,147,360.00	3.38	\$837,420.00	\$3,349,680.00	3.17	\$7,444,344.00	\$29,777,376.00	0.39
5	\$786,840.00	\$3,934,200.00	2.70	\$837,420.00	\$4,187,100.00	2.54	\$7,444,344.00	\$37,221,720.00	0.31
6	\$786,840.00	\$4,721,040.00	2.25	\$837,420.00	\$5,024,520.00	2.12	\$7,444,344.00	\$44,666,064.00	0.26
7	\$786,840.00	\$5,507,880.00	1.93	\$837,420.00	\$5,861,940.00	1.81	\$7,444,344.00	\$52,110,408.00	0.22
8	\$786,840.00	\$6,294,720.00	1.69	\$837,420.00	\$6,699,360.00	1.59	\$7,444,344.00	\$59,554,752.00	0.19
9	\$786,840.00	\$7,081,560.00	1.50	\$837,420.00	\$7,536,780.00	1.41	\$7,444,344.00	\$66,999,096.00	0.17
10	\$786,840.00	\$7,868,400.00	1.35	\$837,420.00	\$8,374,200.00	1.27	\$7,444,344.00	\$74,443,440.00	0.16
<b>Flujo anual neto</b>	-\$276,660.00			-\$226,080.00			\$6,283,878.40		
<b>TIR</b>	-5%			-4%			64%		
<b>VPN</b>	-\$5,800,208.82			-\$5,489,416.61			\$34,137,615.27		
<b>PRI [año]</b>	-			-			2		



**Tabla 5.9 Factibilidad económica (Continúa)**

<b>Modelo</b>	<b>D</b>			<b>E</b>			<b>F</b>		
<b>Inversión</b>	\$10,985,000.00			\$13,135,000.00			\$13,009,000.00		
<b>Capital semilla</b>	1,000,000			1,000,000			1,000,000		
<b>Tasa de descuento</b>	10%			10%			10%		
<b>Año</b>	<b>Flujos de efectivo</b>								
	<b>Flujo neto</b>	<b>Flujo acumulado</b>	<b>I/F</b>	<b>Flujo neto</b>	<b>Flujo acumulado</b>	<b>I/F</b>	<b>Flujo neto</b>	<b>Flujo acumulado</b>	<b>I/F</b>
0	-\$10,985,000.00			-\$13,135,000.00			-\$13,009,000.00		
1	\$7,494,924.00	\$7,494,924.00	1.47	\$7,104,924.00	\$7,104,924.00	1.85	\$7,558,021.17	\$7,558,021.17	1.72
2	\$7,494,924.00	\$14,989,848.00	0.73	\$7,104,924.00	\$14,209,848.00	0.92	\$7,558,021.17	\$15,116,042.34	0.86
3	\$7,494,924.00	\$22,484,772.00	0.49	\$7,104,924.00	\$21,314,772.00	0.62	\$7,558,021.17	\$22,674,063.51	0.57
4	\$7,494,924.00	\$29,979,696.00	0.37	\$7,104,924.00	\$28,419,696.00	0.46	\$7,558,021.17	\$30,232,084.68	0.43
5	\$7,494,924.00	\$37,474,620.00	0.29	\$7,104,924.00	\$35,524,620.00	0.37	\$7,558,021.17	\$37,790,105.85	0.34
6	\$7,494,924.00	\$44,969,544.00	0.24	\$7,104,924.00	\$42,629,544.00	0.31	\$7,558,021.17	\$45,348,127.02	0.29
7	\$7,494,924.00	\$52,464,468.00	0.21	\$7,104,924.00	\$49,734,468.00	0.26	\$7,558,021.17	\$52,906,148.19	0.25
8	\$7,494,924.00	\$59,959,392.00	0.18	\$7,104,924.00	\$56,839,392.00	0.23	\$7,558,021.17	\$60,464,169.36	0.22
9	\$7,494,924.00	\$67,454,316.00	0.16	\$7,104,924.00	\$63,944,316.00	0.21	\$7,558,021.17	\$68,022,190.53	0.19
10	\$7,494,924.00	\$74,949,240.00	0.15	\$7,104,924.00	\$71,049,240.00	0.18	\$7,558,021.17	\$75,580,211.71	0.17
<b>Flujo anual neto</b>	\$6,396,424.00			\$5,791,424.00			\$426,915,317.54		
<b>TIR</b>	68%			53%			57%		
<b>VPN</b>	\$35,068,063.47			\$30,521,682.30			\$33,431,768.27		
<b>PRI [año]</b>	2			2			2		

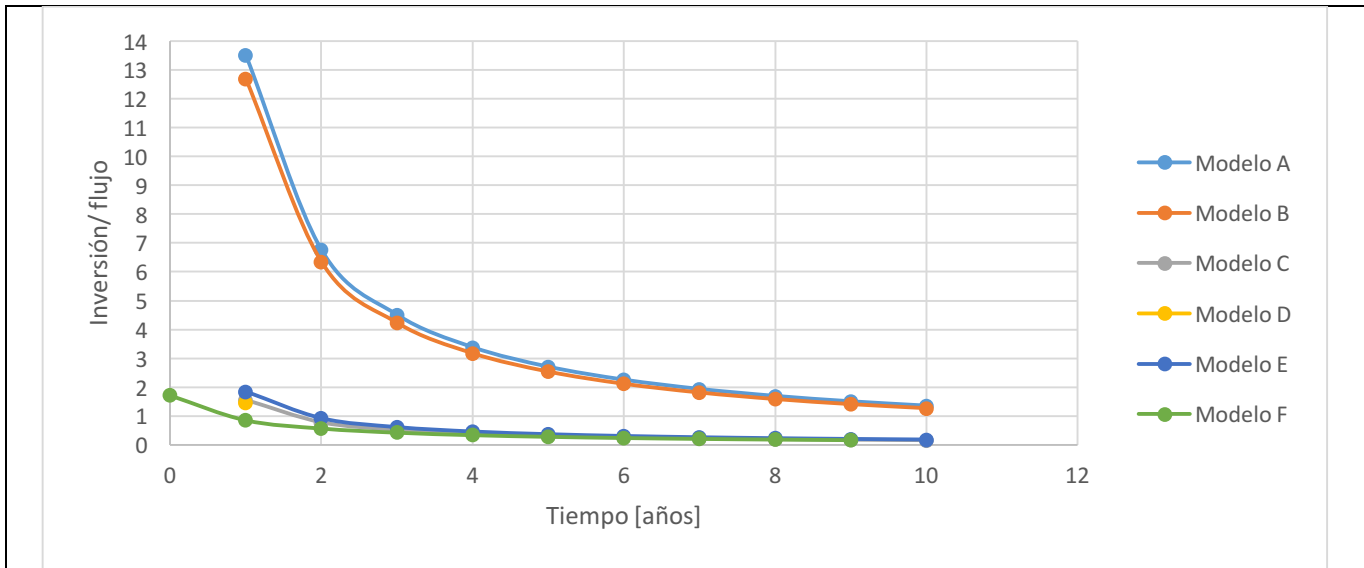


Figura 5.2 Periodo de recuperación de la inversión (Elaboración propia con datos de la Tabla 5.9)

Los modelos C, D, E y F, presentaron un mejor comportamiento en el mercado.

Para los tres, el PRI es en el segundo año de operación.

La TIR y el VPN tuvieron valores similares entre sí, debido a esto, cualquier modelo de éstos puede ser aplicable.

En relación con el monto de la inversión, el modelo de aprovechamiento que tiene una mayor rentabilidad es el D, ya que el flujo de efectivo resultó mayor que en los otros dos modelos y requiere de una menor inversión.

Aunque todos los modelos de solución se plantearon con base en el cuidado del ambiente, aquellos que involucran la incineración, requieren de un seguimiento periódico para garantizar que las emisiones de contaminantes cumplan con la normativa correspondiente, la NOM-040-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002a) y así evitar que se genere un problema ambiental adicional, sobre todo en el modelo C que es el que involucra una incineración en la industria cementera (Modelos A y C).



Para los modelos de aprovechamiento que presentaron un mejor comportamiento en el ámbito financiero se requeriría de una trituración previa al transporte hacia el sitio de aprovechamiento.

En el modelo D, en el que se proyectó una ganancia mayor que en los otros, también se promueve el cuidado del ambiente debido a que su aprovechamiento sería en una industria de fabricación de impermeabilizantes y/o de pisos, por lo que no habría contaminación hacia la atmosfera o atmósfera por parte de las sustancias potencialmente tóxicas que se presentan por la combustión inadecuada del residuo.

De acuerdo a los rendimientos financieros de estos cuatro modelos aplicables, en segundo lugar estaría el modelo F que involucra una trituración especializada seguida por un proceso de fabricación de impermeabilizante.



## Capítulo 6

### Comentarios y conclusiones

#### 6.1. Comentarios

Para la realización del caso de estudio únicamente se seleccionó una delegación para facilitar la recopilación de información. No obstante, podría ampliarse la investigación para determinar si los modelos de aprovechamiento planteados son más rentables y si se puede tener un mayor control de las llantas como residuo.

En el análisis de factibilidad económica se hicieron algunas consideraciones, las cuales a continuación se mencionan:

La primera, fue que los flujos de efectivo para todos los modelos permanecieron constantes para tener una aproximación, pero es importante tomar en cuenta otras variables económicas como la inflación y la depreciación de la moneda, que pueden tener implicaciones directas en los costos de producción y los precios de los productos.

La segunda consideración fue que se estableció que todas las llantas recolectadas, se someterían al tipo de aprovechamiento seleccionado, es decir, no se realizó la estimación precisa de la demanda de los productos.

Finalmente, la última consideración es que no se definió la ruta exacta del servicio de recolección debido a la complejidad de localizar todas aquellas vulcanizadoras susceptibles de entrar en los modelos de aprovechamiento.

Adicionalmente a lo expuesto anteriormente, se podría cotizar algún servicio de recolección externo para evitar adquirir el camión y solicitar los permisos correspondientes para su operación, así como disminuir el personal requerido para cada modelo de aprovechamiento.





Para garantizar que el objetivo principal del caso de estudio que es minimizar el impacto ambiental de las llantas de desecho, es muy importante tener un control estricto del número de llantas que se recolectan, su procedencia y, su destino.

## 6.2. Conclusiones

- Se cumplieron con todos los objetivos tanto generales como específicos del caso de estudio.
- Se determinó la cantidad de RSU que actualmente se tienen en la Ciudad de México, así como de las llantas de desecho como residuo de manejo especial, y las NOM relacionadas con este tipo de residuo.
- De acuerdo con los métodos de valorización energética de los residuos sólidos que se practican tanto a nivel mundial como nacional, se plantearon algunos modelos de aprovechamiento para disminuir la contaminación provocada por el mal manejo de las llantas fuera de uso.
- Se diseñó un caso de estudio para evaluar la situación en la zona Coyoacán, de la Ciudad de México en materia de llantas de desecho y a partir de la información obtenida de los cuestionarios que se aplicaron en los locales vulcanizadores y la interpretación de la misma, se propusieron soluciones prácticas para un aprovechamiento integral del residuo, y sujeto a los métodos de valorización energética de residuos, al marco legal aplicable en México y a un estudio de factibilidad económica.
- Conforme a toda la información obtenida en la investigación, se determinó que un proceso de trituración de las llantas de desecho es el ideal para un aprovechamiento integral del residuo además de que se presenta como una buena oportunidad de negocio, mientras que la implementación de un servicio de recolección y distribución a los sitios donde estarían sujetas a ser aprovechadas, sin realizar ningún proceso de trituración previo a la distribución, no presenta ningún beneficio económico.



## Anexo I

### A.1. Cuestionario

Fecha de aplicación: \_\_\_\_\_

Sitio de aplicación: \_\_\_\_\_

Género del encuestado: \_\_\_\_\_

1. ¿Los residuos que se generan dentro de la vulcanizadora son separados antes de desecharlos?

\_\_\_\_\_

2. ¿Cuántas llantas reciben a la semana?

\_\_\_\_\_

3. ¿Cuántas son reforzadas?

\_\_\_\_\_

4. ¿Cuántas son desechadas?

\_\_\_\_\_

5. Después de ser recolectadas, ¿disponen de algún sitio para almacenarlas/depositarlas?

\_\_\_\_\_

6. ¿Hay alguien encargado del manejo de las llantas?

\_\_\_\_\_

7. ¿Conoce alguna forma de aprovechar las llantas desechadas? ¿Cuál?

\_\_\_\_\_

8. ¿Considera que desechar llantas tiene un impacto en el ambiente?

\_\_\_\_\_



## Bibliografía

Banco Interamericano de Desarrollo y la Organización Panamericana. 1997. Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe.

Dirección electrónica:

<https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/4768/Diagn%C3%B3stico%20de%20la%20situaci%C3%B3n%20del%20manejo%20de%20residuos%20s%C3%B3lidos%20municipales%20en%20Am%C3%A9rica%20Latina%20y%20el%20Caribe.pdf?sequence=1> [22/03/17]

Bernal-González, M. 2016. Material audiovisual de la asignatura Ingeniería Ambiental. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Cabrera, L. 2002. Diccionario de aztequismos. Revisión y puesta en orden: J. Ignacio Dávila-Garibi. Términos nahuas: Luis Reyes-García. Términos latinos (clasificaciones botánicas y zoológicas): Esteban Inciarte. Ed. Colofón S.A. 5ª edición. ISBN 968-867-038-3. México D.F. México.

Calderón-R., F. 2013. Polímeros: macromoléculas, su fabricación y aplicaciones. Dirección electrónica: <https://polimers.wordpress.com/2013/03/21/usando-polvo-de-neumaticos/> [18/04/17]

Cámara de Diputados. 2013. Boletín #1964. Dirección electrónica: [http://www3.diputados.gob.mx/camara/005\\_comunicacion/a\\_boletines/2013\\_2013/septiembre\\_septiembre/03\\_03/1964\\_se\\_aprueba\\_manejo\\_especial\\_e\\_integral\\_de\\_residuos\\_de\\_neumaticos](http://www3.diputados.gob.mx/camara/005_comunicacion/a_boletines/2013_2013/septiembre_septiembre/03_03/1964_se_aprueba_manejo_especial_e_integral_de_residuos_de_neumaticos). [01/02/17]

CANACEM. 2006. Co-procesamiento en México, CANACEM, Iniciativa GEMI: Experiencia de la industria cementera mexicana en prácticas de co-procesamiento (Tratamiento térmico y recuperación energética). Dirección electrónica: [http://www.gemi.org.mx/files/01\\_deguevara.pdf](http://www.gemi.org.mx/files/01_deguevara.pdf) [30/03/17]



Cardona-Gómez L., Sánchez-Montoya, L.M. 2011. Aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de pisos decorativos, Universidad de Medellín. Dirección electrónica: <http://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/375/Aprovechamiento%20de%20llantas%20usadas%20para%20la%20fabricaci%C3%B3n%20de%20pisos%20decorativos.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [18/04/17]

Carros y mecánica. 2012. Dirección electrónica: <http://carrosymecanica.blogspot.mx/2012/11/cuantos-anos-dura-una-llanta-o-neumatico.html> [15/03/17]

CEMEX. 2017. Ficha técnica de llancreto. Dirección electrónica: <http://www.cemexmexico.com/productos/concreto/eco-llancreto>. [08/02/17]

CFE. 2017. Comisión Federal de Electricidad. Dirección electrónica: [http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas\\_industria.asp?Tarifa=CMAS&Anio=2017](http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_industria.asp?Tarifa=CMAS&Anio=2017) [25/10/17]

COCEF. 2017. Proyecto de Manejo y Disposición Final de Llantas Usadas en Ciudad Juárez, Chihuahua. 2001. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza. Dirección electrónica: [http://server.cocef.org/aproyectos/ExcomCdJuarez2001\\_07.htm](http://server.cocef.org/aproyectos/ExcomCdJuarez2001_07.htm) [23/02/17]

COCEF. 2007. Proyecto ejecutivo del sistema de recolección de residuos sólidos en Mexicali, Baja California. Dirección electrónica: [http://server.cocef.org/Final\\_Reports\\_B2012/20007/20007\\_Final\\_Report\\_EN.pdf](http://server.cocef.org/Final_Reports_B2012/20007/20007_Final_Report_EN.pdf) [16/05/17]

COCEF-BECC. 2008. Política pública para el manejo integral de llantas de desecho en la frontera. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza. Dirección electrónica:



[http://www.cocef.org/uploads/files/politica\\_publica\\_para\\_manejo\\_integral\\_de\\_llantas\\_de\\_des\\_echo\\_en\\_la\\_frontera.pdf](http://www.cocef.org/uploads/files/politica_publica_para_manejo_integral_de_llantas_de_des_echo_en_la_frontera.pdf) [23/02/17]

Convenio de Basilea. 2017. Dirección electrónica:

[http://proteo2.sre.gob.mx/tratados/muestratratado\\_nva.sre?id\\_tratado=472&depositario=](http://proteo2.sre.gob.mx/tratados/muestratratado_nva.sre?id_tratado=472&depositario=)  
[13/03/17]

Convenio de Estocolmo. 2017. Centro Nacional de Referencia sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. Dirección electrónica:

<http://www.cnrco.es/gc/informate/convenio-de-estocolmo/> [13/03/17]

Convenio de La Paz. 2017. Dirección electrónica:

<http://proteo2.sre.gob.mx/tratados/ARCHIVOS/EUA-MEDIO%20AMBIENTE.pdf> [24/02/17]

Cortinas-de-Nava, C. 2017. Manejo de Residuos Sólidos. Dirección electrónica:

<http://slideplayer.es/slide/93652/> [16/05/17]

Cosmos. 2017. Fabricante de pisos con caucho reciclado. Dirección electrónica:

<https://www.cosmos.com.mx/empresa/quimica-alm-fq3y.html> [04/12/17]

CSF. 2017. Comisión de Salud Fronteriza México-Estados Unidos. Programa Frontera 2010/2020. Dirección electrónica:

<https://www.epa.gov/sites/production/files/documents/frontera2020.pdf> [24/02/17]

Davis, M.L., Cornwell, D.A. 1998. Introduction to Environmental Engineering. Cap. 8. Pp. 630-701. McGraw-Hill. Nueva York, EE.UU.

DOF. 2017. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Dirección electrónica:

<http://www.ordenjuridico.gob.mx/constitucion.php> [10/03/17]



DOF. 2011a. Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011. Dirección electrónica: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6633/1/nom-161-semarnat-2011.pdf> [01/02/17]

DOF. 2011b. Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011. Dirección electrónica: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5232012&fecha=02/02/2012](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5232012&fecha=02/02/2012) [13/03/17]

DOF. 2010. Lista de combustibles que se considerarán para identificar a los usuarios con un patrón de alto consumo, así como factores para determinar las equivalencias en términos de barriles equivalentes de petróleo. Dirección electrónica: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5128000&fecha=14/01/2010](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5128000&fecha=14/01/2010) . [10/02/17].

DOF. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Dirección electrónica: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1306/1/nom-083-semarnat-2003.pdf> [23/02/17].

DOF. 2002a. Normas Oficiales Mexicanas NOM-040-SEMARNAT-2002. Dirección electrónica: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1236/1/nom-040-semarnat-2002.pdf> [07/02/17]

DOF. 2002b. Normas Oficiales Mexicanas NOM-098-SEMARNAT-2002. Dirección electrónica: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=664977&fecha=01/10/2004](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=664977&fecha=01/10/2004) [07/02/17]

Durán-Domínguez-de-Bazúa, M.C. 2016. Material audiovisual de la asignatura Ingeniería Ambiental. Facultad de Química, UNAM. México D.F. México.

Ecomulch. 2012. Dirección electrónica: <http://www.ecomulch.com.mx/productos.html> [05/04/17]

Economipedia. 2017. Tasa Interna de Retorno (TIR). Dirección electrónica: <http://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html> [08/05/17]



Elejalde-Villalón, Á. 2014. Cuba Educa. Dirección electrónica:  
[http://www.cubaeduca.cu/medias/h\\_escolar/cap\\_trab\\_fat.html](http://www.cubaeduca.cu/medias/h_escolar/cap_trab_fat.html) [23/03/17]

El Salvador. 2014. Periódico electrónico. Dirección electrónica:  
<http://www.elsalvador.com/noticias/nacional/131432/incidencia-del-dengue-aun-se-mantiene-alta-en-el-pais/> [06/06/17]

Energía a debate. 2008. Dirección electrónica:  
<https://www.energiaadebate.com/blog/2144/> . [21/02/16]

Euro Master. 2017. Partes de un neumático. Dirección electrónica: <https://www.euromaster-neumaticos.es/neumaticos/informacion/partes-de-un-neumatico> [05/06/17]

Express Global. 2017. DB SCHENKER: Descripción de capacidad y pesos brutos máximos por camión. Dirección electrónica:  
[http://www.expressglobal.com.bo/anexos/Anexo\\_4\\_Descripcion\\_de\\_Camiones.pdf](http://www.expressglobal.com.bo/anexos/Anexo_4_Descripcion_de_Camiones.pdf) [30/03/17]

Facultad de Química. 2007. Área de investigación. Dirección electrónica:  
[http://www.quimica.unam.mx/cont\\_espe2.php?id\\_rubrique=11&color=992113&id\\_article=3928](http://www.quimica.unam.mx/cont_espe2.php?id_rubrique=11&color=992113&id_article=3928) [08/02/17]

Garc, N. 2006. Entrepreneur: ¿Llantas para reciclaje? Dirección electrónica:  
<https://www.entrepreneur.com/article/256121> [03/05/17]

GDF. 2015. Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-024-AMBT-2013. Pub. Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 128. Julio de 2015. Dirección electrónica:  
<http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Estatal/Distrito%20Federal/wo104201.pdf>  
[07/02/17]



GDF. 2012. SEMARNAT: Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal y Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal. Dirección electrónica:

<http://www.semarnat.gob.mx/temas/residuos-solidos-urbanos/programas-de-gestion>.  
[21/09/16]

Guía de Buenas Prácticas Ambientales para las Empresas Náuticas. 2017. Dirección electrónica:

[http://www.cprac.org/various/cprac\\_manual\\_nautic/es/content.php-id=159.htm](http://www.cprac.org/various/cprac_manual_nautic/es/content.php-id=159.htm) [08/02/17]

Guía de valorización energética de residuos, 2010. Dirección electrónica:

<https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-valorizacion-energetica-de-residuos-fenercom-2010.pdf> [13/02/17]

Guía sobre gestión energética municipal, 2017. Dirección electrónica:

[http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-  
Disposition&blobheadervalue1=filename%3DCapitulo07.pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1119149982605&ssbinary=true](http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadervalue1=filename%3DCapitulo07.pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1119149982605&ssbinary=true) [13/03/17]

Grupo Pasa Bajío. 2009. Impermeabilizante acrílico fabricado con llantas recicladas. Dirección electrónica: <http://grupopasabajio.com.mx/wp-content/uploads/2015/06/PASALLANTA.pdf> [25/10/17]

GZC-Holcim. 2006a. Guía para el co-procesamiento de residuos en la producción de cemento. Dirección electrónica: <https://www.google.com.mx/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#> [03/04/17]

GZC-Holcim. 2006b. Guía para el co-procesamiento de residuos en la producción de cemento. Estudio de caso: Pre-procesamiento de residuos. El ejemplo de Energis, Grupo Holcim, en Albox, España. Dirección electrónica:





<https://www.google.com.mx/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#>  
[03/04/17]

Hernández-Cano, G. 2004. Seguimiento de la producción de biogás en un relleno sanitario clausurado. Tesis profesional para obtener el título de Ingeniera Química. Facultad de Química, UNAM. Mayo 11. México D.F. [21/02/16]

Holcim-Aspasco. 2017. Dirección electrónica: <http://www.holcimapasco.com.mx/productos-y-servicios/ecoltec.html> [05/04/17]

IMCYC. 2017. Un combustible de primera- Sustentabilidad. Dirección electrónica: [www.imcyc.com/ct2007/oct07/sustentabilidad.htm](http://www.imcyc.com/ct2007/oct07/sustentabilidad.htm) [03/04/17]

INECC, 2004. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.  
Dirección electrónica: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/447/cap3.html>.  
[07/05/16]

INEGI. 2017. Regiones socioeconómicas en México. Dirección electrónica: <http://sc.inegi.gob.mx/niveles/index.jsp?me=na&ly=09,09a,00&la=09003&t2=COYOACAN,%20DISTRITO%20FEDERAL&at=&ne=ag&nt=83> [16/05/17]

INEGI. 2015a. Accidentes viales en México. Dirección electrónica: [http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general\\_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=13159](http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=13159) [14/03/17]

INEGI. 2015b. Número de habitantes por delegación en la Ciudad de México. Dirección electrónica: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/> [16/05/17]

INEGI. 2010. Dirección electrónica:



<https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwje85zkipdbSAhXFr1QKHUe4Du8QFggjMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.inegi.org.mx%2Fest%2Fcontenidos%2FProyectos%2Fmodulosamb%2Fdoc%2Frsu.zip%3Fs%3Dest%26c&usq=AFQjCNFIVEcc3O5izttzmnLiRs0eDceSEA&sig2=6WToVXRHcl-hsp7G3fej6g&bvm=bv.149397726,d.amc> [14/03/17]

LGEEPA. 2003. Dirección electrónica:

<http://conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/protocolo/LGEEPA.pdf> [07/02/17]

LGPGIR. 2003. Dirección electrónica:

[http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263\\_220515.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_220515.pdf) [07/02/17]

López-Atamoros, L.G., Fernández-Villagómez, G., Cruz-Gómez, M.J., Durán-de-Bazúa, C. 2010. Integración de una Base Nacional de Datos de Accidentes durante el Transporte de Gas LP (BNDAT@GLP) 1998-2009: Sustento para un estudio de evaluación de riesgo. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)*. 25(2):99-112. ISSN 0186-6036. Dirección electrónica: [http://web.imiq.org/attachments/353\\_99-112%20BNDAT.pdf](http://web.imiq.org/attachments/353_99-112%20BNDAT.pdf) [23/03/17]

Lorea, C., Van-Loo, W. 2005. Aprovechamiento Energético de Neumáticos Usados en la Industria Cementera Europea. Dirección electrónica:

<http://www.recuperaresiduosencementeras.org/portfolio-items/aprovechamiento-energetico-de-neumaticos-usados-en-la-industria-cementera-europea/> [04/12/17]

Maillo-González-Orus, J. 2017. Expansión: Acuerdos de cooperación entre empresas.

Dirección electrónica: <http://www.expansion.com/diccionario-economico/acuerdos-de-cooperacion-entre-empresas.html> [06/04/17]

Manahan, S.E., Enríquez-Poy, M., Molina, L.T., Durán-de-Bazúa, C. 2007. Energy and activated carbon production from crop biomass byproducts. En *Towards a cleaner planet. Energy for the future*. Eds. Jaime Klapp, Jorge L. Cervantes-Cota, José Federico Chávez-



Alcalá. Pp. 365-387. Springer Verlag. ISBN 10 3-540-71344-1, 13 978-3-540-71344-9. ISSN 1863-5520. Berlín, Heidelberg, Nueva York.

Mercado Libre México. 2017a. Trituradora de llantas. Dirección electrónica: <http://listado.mercadolibre.com.mx/industrias-manufacturera-maquinas/trituradora-de-llantas> [06/05/17]

Mercado Libre México. 2017b. Costal de rafia. Dirección electrónica: [http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-568229580-costal-de-rafia-para-50-kg-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-568229580-costal-de-rafia-para-50-kg-_JM) [06/05/17]

Mercado Libre México. 2017c. Trituradora especializada/ Línea de reciclaje para llantas. Dirección electrónica: [http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-550263471-linea-de-reciclaje-de-llantas-en-mex-df-caucho-acero-nailon-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-550263471-linea-de-reciclaje-de-llantas-en-mex-df-caucho-acero-nailon-_JM) [06/05/17]

Mercado Libre México. 2017d. Precios de llanta molida. Dirección electrónica: <http://listado.mercadolibre.com.mx/venta-de-caucho-molido-de-llanta> [06/05/17]

Milenio. 2017. Dirección electrónica: [http://www.milenio.com/negocios/precio\\_gasolina-lunes-23\\_octubre-magna-premium-diesel-milenio\\_0\\_1051695162.html](http://www.milenio.com/negocios/precio_gasolina-lunes-23_octubre-magna-premium-diesel-milenio_0_1051695162.html) [25/10/17]

Neumarket México. 2015. Dirección electrónica: <http://www.neumarket.com.mx/blog/duracion-de-las-llantas/> [15/09/17]

Noticias BBC. 2014. Dirección electrónica: [http://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/08/140806\\_vert\\_aut\\_usar\\_cauchos\\_reciclados\\_yv](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/08/140806_vert_aut_usar_cauchos_reciclados_yv) [09/03/17]

ONU-Hábitat. 2015. Reporte Nacional de Movilidad Urbana 2014-2015. Dirección electrónica:



<http://www.onuhabitat.org/Reporte%20Nacional%20de%20Movilidad%20Urbana%20en%20Mexico%202014-2015%20-%20Final.pdf> [15/03/17]

Oponeo. 2015. Dirección electrónica:

<http://www.oponeo.es/articulo/cuanto-pesa-un-neumatico> [16/03/17]

Periódico electrónico El Tiempo. 2011. Dirección electrónica:

<http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-9343605> [07/02/17]

Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho. 2013. Dirección electrónica:

<http://www.cnih.org.mx/Plan%20de%20Manejo%20de%20Neumaticos%20Usados%20de%20Desecho.pdf> [21/02/17]

Proyecto argentino en reciclado de neumáticos. 2007. Dirección electrónica:

[http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material\\_Complementario/Reutilizacion\\_Reciclado\\_y\\_Disposicion\\_final\\_de\\_Neumatico.pdf](http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Reutilizacion_Reciclado_y_Disposicion_final_de_Neumatico.pdf) [08/02/17]

Pymes futuro. 2013. Valor presente neto (VPN). Dirección electrónica:

<http://www.pymesfuturo.com/vpneto.htm> [09/05/17]

Pymes futuro. 2010. Periodo de recuperación de la inversión (PRI). Dirección electrónica:

<http://www.pymesfuturo.com/pri.htm> [09/05/17]

Química y algo más. 2015. Dirección electrónica:

<http://www.quimicayalgomas.com/quimica-organica/hidrocarburos/propiedades-del-caucho-vulcanizacion/> [08/02/17]



Ramírez-Burgos, L.I. 2016. Notas de la asignatura Temas selectos: Manejo de sustancias y residuos peligrosos. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM. México D.F. México.

Reglamento LGEEPA. 2010. Dirección electrónica:

<http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/703/1/Reglamento%20Ley%20GEEPA%20en%20MAAA.pdf> [06/04/17]

Revista pyme. 2017. Capital Semilla. Dirección electrónica:

<http://www.revistapyme.com/index.php/finanzas/60-mathematics/36-capital-semilla> [09/05/17]

SACMEX. 2016. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Dirección electrónica:

[http://www.sacmex.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/6\\_tarifas172.pdf](http://www.sacmex.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/6_tarifas172.pdf)  
[25/10/17]

SCT. 2014. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Estadística de accidentes vehiculares por año en el Distrito Federal. Dirección electrónica:

[http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Estadistica\\_de\\_accidentes/A%C3%B1o\\_2014/09\\_DF\\_2014.pdf](http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Estadistica_de_accidentes/A%C3%B1o_2014/09_DF_2014.pdf) [14/03/17]

SEDEMA. 2015. Inventario de residuos sólidos, Ciudad de México. Dirección electrónica:

<http://www.cms.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/IRS-2015-14-dic-2016.compressed.pdf> [27/02/17]

SEDEMA. 2014. Inventarios de residuos sólidos. Dirección electrónica:

<http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sedema/images/archivos/temas-ambientales/programas-generales/residuos-solidos/inventario-residuos-solidos-2014/IRS-2014.pdf> [16/13/17]

SEMARNAT. 2012a. Informe de la situación del medio ambiente en México, Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave y de desempeño ambiental, Capítulo 7: Residuos. Dirección electrónica:



[http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/pdf/Cap7\\_residuos.pdf](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf) [22/02/17]

SEMARNAT. 2012b. Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos, Dirección electrónica:

<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/CD001408.pdf> [23/02/17]

Sipse noticias, Quintana Roo. 2015. Dirección electrónica:

<http://sipse.com/novedades/hacen-con-llantas-recicladadas-un-parque-de-diversiones-137550.html>  
[09/03/17]

Tecnología de los plásticos. 2011. Dirección electrónica:

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2011/07/poliisopreno-caucho-natural-y-sintetico.html> [09/02/17]

Uno reciclaje. 2017. Técnicas de gestión y maquinaria medioambiental. Dirección electrónica:

<http://www.unoreciclaje.com/productos/bomatic/b1600/> [30/03/17]

Viva anuncios. 2017. Bodega en venta. Dirección electrónica: <https://www.vivanuncios.com.mx/a-bodegas/pedregal-de-santa-ursula/excelente-bodega-en-renta-o-venta/1001254961770910723123609> [06/05/17]

Vivo en Italia. 2009. Dirección electrónica: <http://www.vivoenitalia.com/linea-de-reciclaje-de-llantas-usadas/> [18/04/17]

Vulcanizadoras en Coyoacán/ Google maps. 2017. Dirección electrónica:

<https://www.google.com/maps/search/vulcanizadora/@19.3284355,-99.187434,13z/data=!3m1!4b1!4m8!2m7!3m6!1svulcanizadora!2sCoyoacán,+Ciudad+de+México,+CDMX!3s0x85ce002e11342fc3:0x9a2667d831d4e080!4m2!1d-99.1561883!2d19.3437444?hl=es-ES> [04/12/17]