

PROPUESTA PARA ENRIQUECER EL PROGRAMA DE LAS ASIGNATURAS DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE ESTANCIA ACADÉMICA, DE LA CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA FACULTAD DE QUÍMICA DE LA UNAM, CON LA INTEGRACIÓN DE ESTUDIOS DE CASO. APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS: PARTE 1. NEUMÁTICOS DE DESECHO EN UNA ZONA DE LA ALCALDÍA DE COYOACÁN EN LA CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO

Proposal to enrich the Program of the course on Environmental Engineering and Academic Stay of the Chemical Engineering curriculum at the UNAM Facultad de Química, using Case studies. Holistic use of urban solid residues: Part 1. Waste tires in a zone of Coyoacán, Mexico City, Mexico

Marielle Fernanda BENÍTEZ-MERCADO^{*1}, Landy Irene RAMÍREZ-BURGOS¹, Marisela BERNAL-GONZÁLEZ¹, Rolando Salvador GARCÍA-GÓMEZ¹, Beatriz ESPINOSA-AQUINO², María Irene CANO-RODRÍGUEZ³, Julio Alberto SOLÍS-FUENTES⁴, María del Carmen DURÁN-DOMÍNGUEZ-de-BAZÚA¹

¹UNAM, Universidad Autónoma de México, Facultad de Química, Departamento de Ingeniería Química. Avenida Universidad Número 3000. Ciudad Universitaria, 04510, Ciudad de México, México. Tel: (+55) 56 22 53 01 al 04. Fax: (+55) 56 22 53 00. ²BUAP, Instituto de Ciencias. ³Universidad de Guanajuato (jubilada). ⁴Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas.

Correos-e (e-mail)*: marielle.fbm@gmail.com, landy@unam.mx, marisela_bernal2000@yahoo.com.mx, rolandoga2000_a@yahoo.com, bett_espinosa@hotmail.com, irene@ugto.mx, jsolis@uv.mx, mcduran@unam.mx

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 neumáticos de desecho (conocidos como llantas en México) ubicados en la Alcaldía Coyoacán en la Ciudad de México, obteniendo información sobre su posible aprovechamiento.

Palabras clave: Aprovechamiento de residuos, neumáticos (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 study on the number of tires that could be subject to management.

Keywords: Solid waste management, tires

Introducción

En el marco de un proyecto PAPIME de la DGAPA-UNAM, se desarrolló material didáctico basado en estudios de caso realizados por los estudiantes durante el semestre que sirvió para su propia formación académica y profesional. Con los mejores estudios de caso se produjo un manual que sirviera de fundamento para que las siguientes generaciones de estudiantes elaboren propuestas de solución a problemáticas ambientales específicas para micro, mini, pequeñas y medianas empresas mexicanas (MiPyME), como mecanismo que fortalezca el desarrollo profesional de los estudiantes de la carrera de ingeniería química. Esta participación directa en estudios de caso aplicados a la solución de problemáticas ambientales estuvo dentro de dos asignaturas, Ingeniería Ambiental (clave 1742) (3 horas-semana teórica) y Estancia Académica (clave 0216) (24 horas-semana experimental). Los temas de estudios de caso propuestos por los académicos participantes se aplicaron en los grupos de las asignaturas de Ingeniería Ambiental, Clave 1742, de 6 créditos y Estancia Académica, Clave 0216, de 24 créditos, de la Facultad de Química. Los alumnos de la asignatura de Ingeniería Ambiental debieron apoyarse en los conocimientos adquiridos a lo largo del curso, pudiendo trabajar individualmente o en equipos pequeños de dos o máximo tres personas para abordar el estudio de caso seleccionado, realizando visitas a la empresa participante si la hubiere. Al término del semestre presentaron los resultados en un informe escrito y una presentación oral. Con los mejores informes finales se conformó un libro electrónico denominado Manual de Ingeniería Ambiental, que permite al siguiente semestre ilustrar a los nuevos estudiantes sobre esta modalidad del proceso enseñanza-aprendizaje y su posible aplicación al estudio de caso que ellos seleccionen. De esta asignatura obligatoria se puede derivar la asignatura terminal comprensiva Estancia Académica, Clave 0216, de 24 créditos, que culmina en el desarrollo y complementación del estudio de caso que podría plasmarse en su tema de tesis y su titulación. Un estudio de caso se da como ejemplo: **APROVECHAMIENTO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS: Neumáticos de desecho**. Se diseñó un caso de estudio para evaluar la situación en la Alcaldía de Coyoacán, Ciudad de México, México, en materia de llantas de desecho para proponer 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. La primera autora, ahora profesionalista, cursó ambas asignaturas: Ingeniería Ambiental y Estancia Académica, con el resto de los autores, que le sirvieron de base para la redacción final de la tesis profesional con la que obtuvo el título de Ingeniera Química por la Facultad de Química de la UNAM.

Problemática

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 (CH_4) y bióxido de carbono (CO_2), ambos precursores del cambio climático, así como de 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 (LPGIR, 2003).

Entre dichos residuos se encuentran los neumáticos de desecho que, en México, se conocen coloquialmente como “llantas usadas” ya que a la parte metálica no se le conoce como llanta sino con el anglicismo “rin” (por *ring* en inglés). Actualmente, según el Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos (SEMARNAT, 2012a,b) 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 o hule 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 *ulcuáhuil* (árbol del hule en náhuatl, por *ulli*=hule y *cuáhuil*=árbol, según Cabrera, 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 poli-isopropenos sintéticos (*IR*, por sus siglas en inglés) y los polibutadienos (*BR*, por sus siglas en inglés) (Tecnología de los plásticos, 2011).

Conformación de un neumático (llanta en México)

Una llanta se compone de distintas capas de materiales que se superponen entre sí para su funcionamiento (Figura 1). A continuación se mencionan las características más importantes de cada parte de la llanta (Euro Master, 2017):

- a) Flanco: Está constituido por goma o hule flexible para adaptarse a las deformaciones del neumático en fase de rodadura y protege al neumático de golpes laterales.
- b) Hombro: La goma o hule 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 o hule de las cubiertas. Permiten al neumático resistir la presión. En una lona de neumático de un vehículo tipo 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, facilitando el ajuste del neumático y las llantas (*rines* en México) evitando que patine en ella.
- f) Revestimiento de goma inferior: Es la capa de goma o hule más interna y sirve para retener el aire en el interior del neumático facilitando la estanqueidad (cualidad de estanco, según el diccionario de la RAE, impidiendo la entrada de agua o la salida del aire).

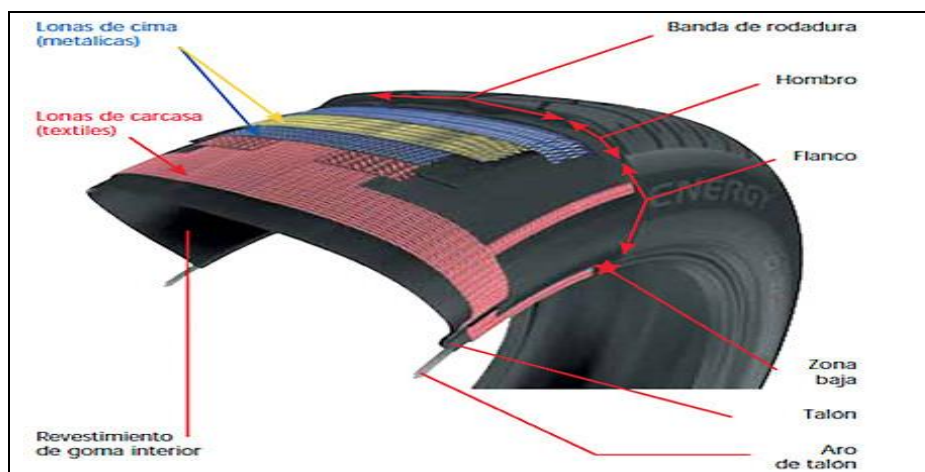


Figura 1. Partes de una llanta (Modificado de Euro Master, 2017)

Planteamiento del problema

Las llantas usadas 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 2.



Figura 2. 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 3 (SEDEMA, 2014).

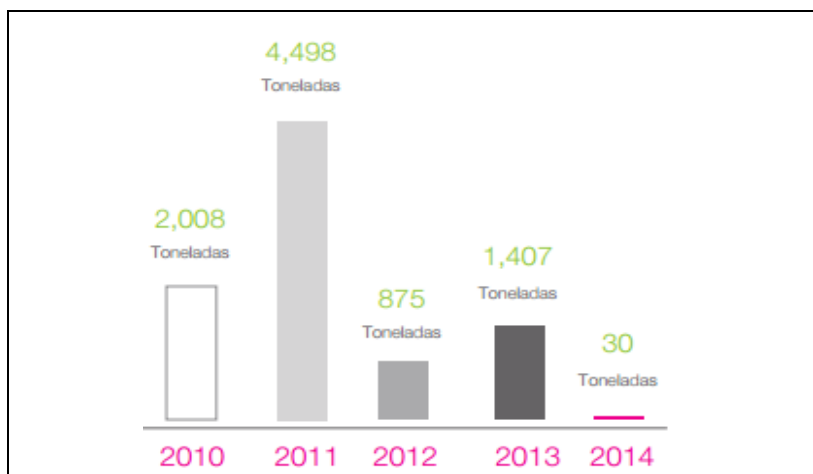


Figura 3. Recolección de neumáticos para reciclaje (SEDEMA, 2014)

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

Metodología

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. Se aplicaron cuestionarios elaborados previamente para recabar la información real sobre el número de llantas desechadas y su forma de disposición, elaborando 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 se consideró la viabilidad económica para fundamentar su aplicación.

Caso de estudio

Para el caso de estudio, se seleccionaron algunas microempresas que se encontraron cerca de la Ciudad Universitaria ya que en esta zona se ubican varias de ellas concentradas en las mismas vialidades e incluso son muy próximas unas con otras, hechos que facilitaron la recopilación de información. En la

Figura 4 se puede observar con claridad su ubicación. En México se les conoce como “vulcanizadoras”. El objetivo de obtener información de primera mano sobre la cantidad de neumáticos desechados es porque no se ha encontrado información pertinente por parte de las autoridades gubernamentales de los tres niveles (local, estatal o federal), de la disposición de estos residuos de tipo especial, así como de su destino final para determinar el impacto ambiental que tienen y que ayudaría a solucionar la problemática.

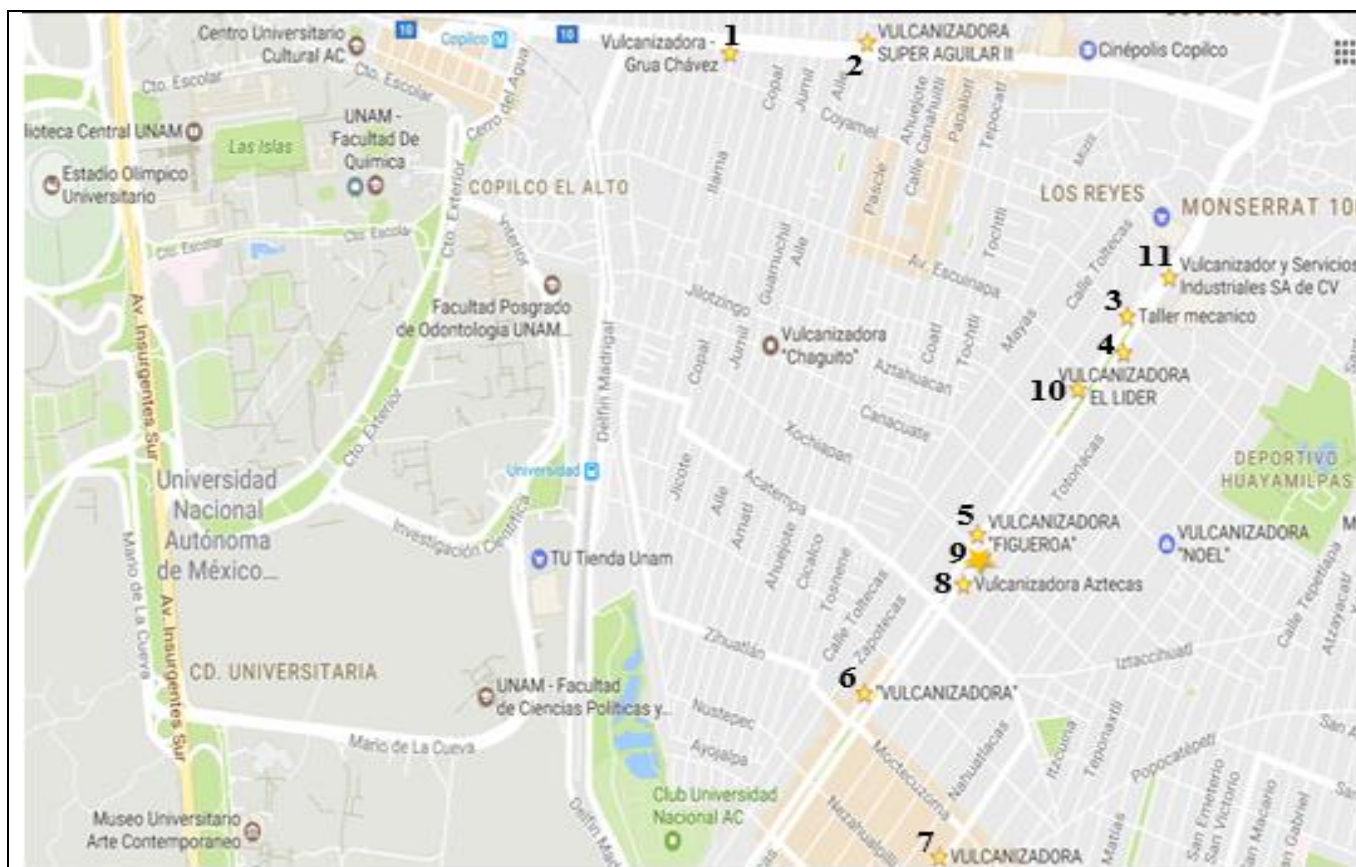


Figura 4. Ubicación geográfica del sitio de estudio (Elaboración propia a partir de google maps: <https://www.google.com.mx/maps/search/vulcanizadoras+cerca+de+Ciudad+Universitaria,+Ciudad+de+M%C3%A9xico,+CDMX/@19.3236648,-99.1883956,14z>)

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 con la información obtenida en la literatura (Benítez-Mercado, 2018; CEMEX, 2017; COCEF, 2007, 2017; COCEF-BECC, 2008; Cortinas-de-Nava, 2017; DOF, 2010; Durán-Domínguez-de-Bazúa, 2016; Ecomulch, 2012; Energía a debate, 2008; Facultad de Química, 2007; GDF, 2012, 2015; Guía de valorización energética de residuos, 2010; Holcim-Aspasco, 2017; Manahan et al., 2007; Noticias BBC, 2014; Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho, 2013; Periódico electrónico El Tiempo, 2011; Quiminet. 2017a,b; Sipse noticias Quintana Roo, 2015). 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 5 a manera de diagrama de bloques.

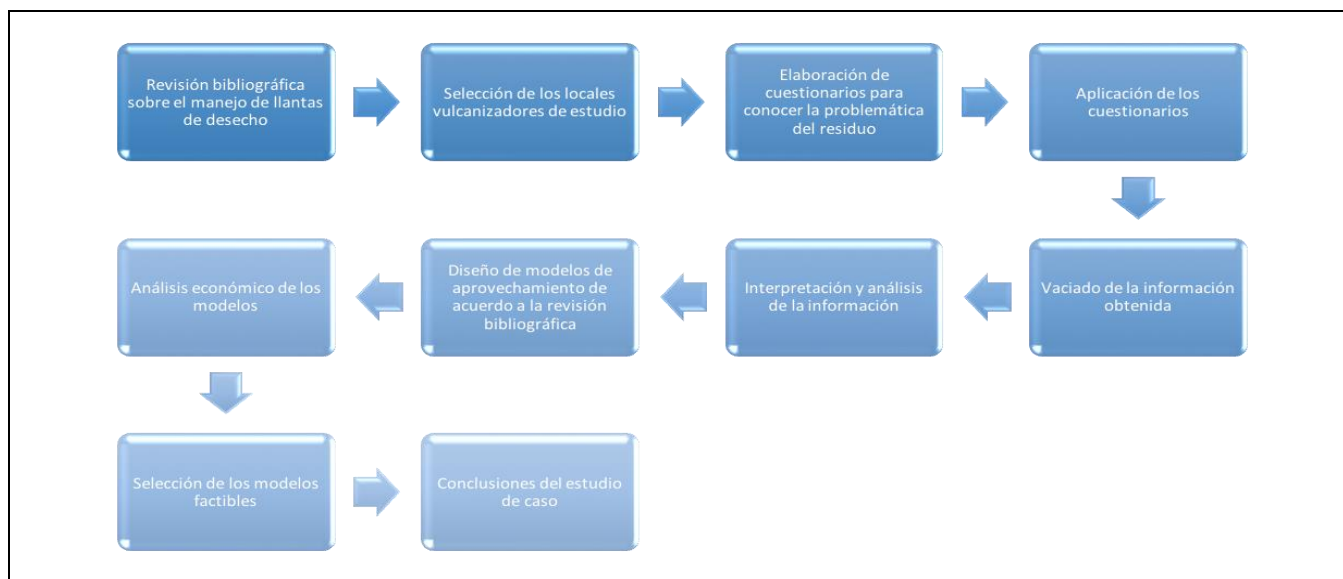


Figura 5. Metodología del estudio de caso

De las 20 microempresas 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 con su localización geográfica y cercanía entre ellas para realizar el 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 zona de acuerdo con la información electrónica sería muy inexacta, a menos que se realizara un recorrido por todas las vialidades comprendidas en el área de estudio. En la Tabla 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 Alcaldía de Coyoacán, en la Ciudad de México, en donde se llevó a cabo el estudio.

Tabla 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
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

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 tomaran fotografías de los locales dado que trabajan con irregularidades administrativas de licencias de trabajo. En el Anexo 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.

Resultados y discusión

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 6 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. 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 7.



Figura 6. Separación de partes de la llanta de desecho

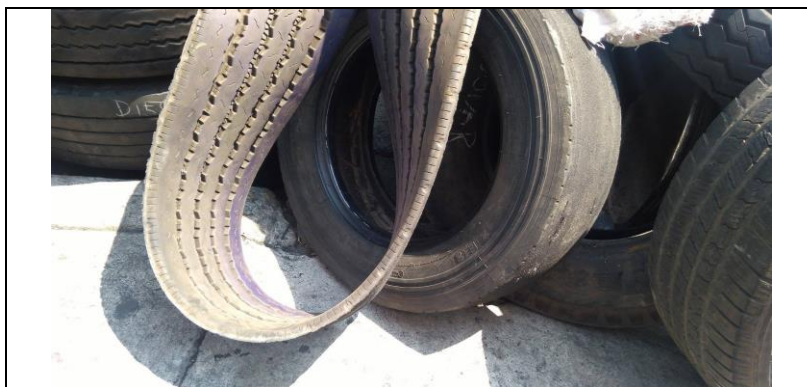


Figura 7. Separación de la banda de una llanta

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 microempresas vulcanizadoras fue muy variable, incluso cuando se concentraron en la misma zona (como pudo apreciarse en el mapa mostrado en la Figura 1).

En la Figura 8 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, 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 9 que un mayor porcentaje de llantas son desechadas con respecto al de las de media “vida”.

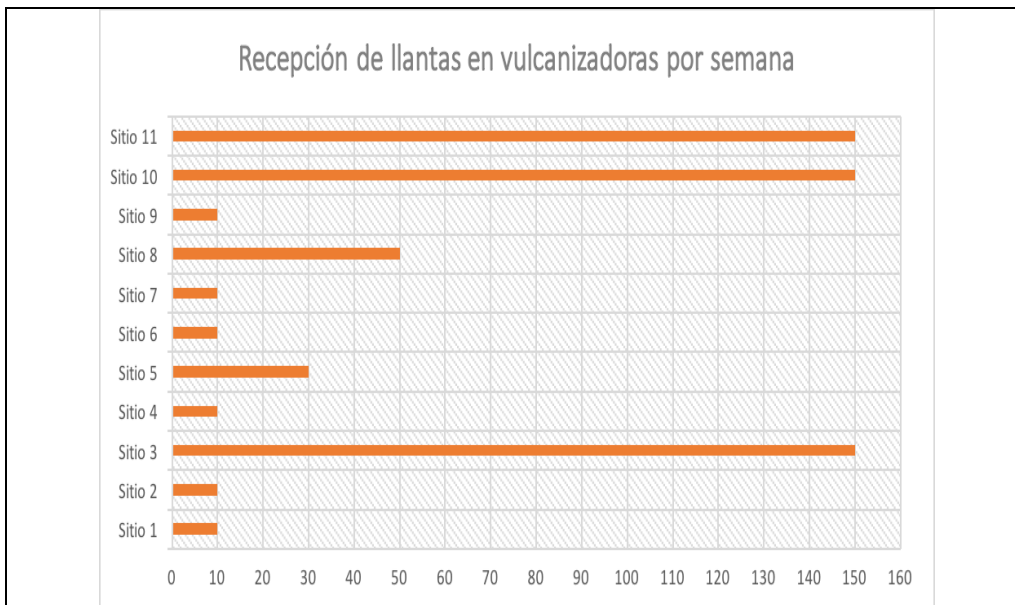


Figura 8. Recepción de llantas en las vulcanizadoras de estudio por semana

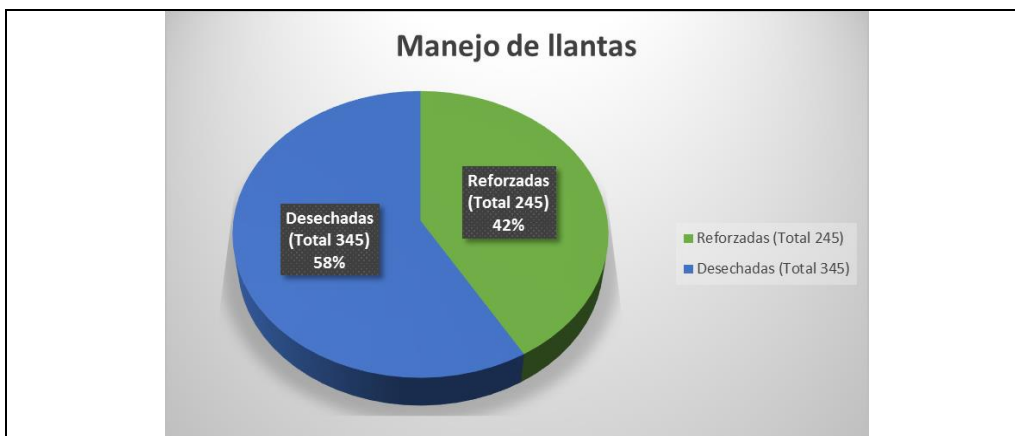


Figura 9. Manejo de llantas en las vulcanizadoras

En varias microempresas vulcanizadoras los encuestados mencionaron que son muy pocas las llantas que se pueden reparar para seguirlas usando y, por lo general, solamente lo hacen con las llantas destinadas al transporte público, como los vehículos 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 y que son de tamaño mediano. 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 en la Figura 10 (López-Atamoros *et al.*, 2010).

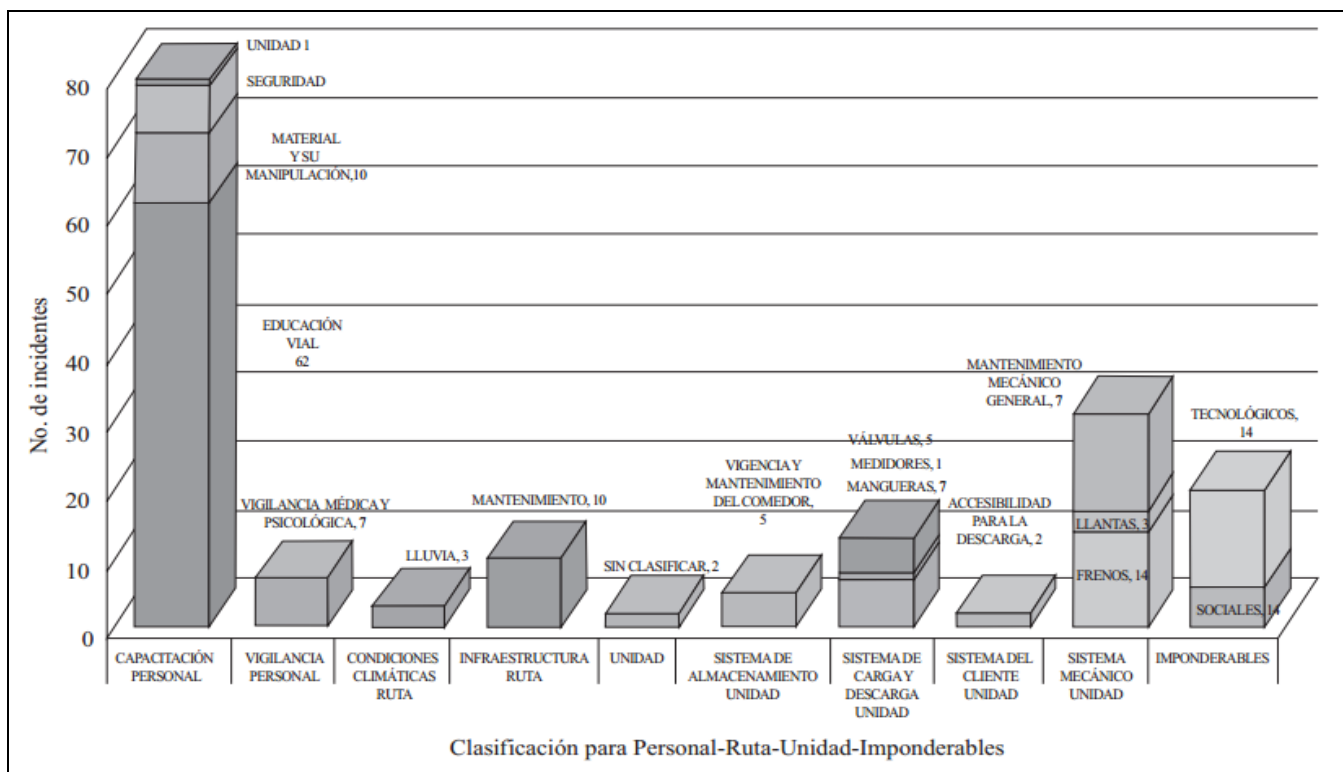


Figura 10. Clasificación de los accidentes por causa inicial, Base Nacional de Datos de Accidentes durante el Transporte de gas LP (BNDAT@GLP) (López-Atamoros et al., 2010)

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, 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 variaba para cada microempresa vulcanizadora. Oscilaba entre \$5.00 y \$20.00 pesos mexicanos (0.25 a 1 USD al tipo de cambio de junio de 2018) 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 Alcaldía Coyoacán, sino en la Ciudad de México e inclusive en todo el país.

De manera resumida, la Figura 11 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 que es ambientalmente problemático, así como la capacidad de almacenamiento de su establecimiento para guardarlos, ya que ninguno posee de 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.

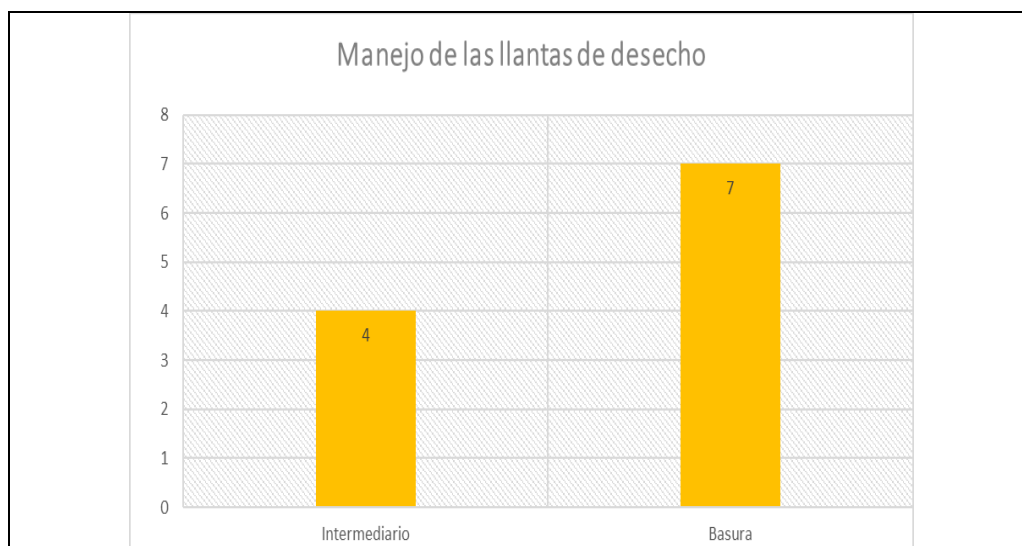


Figura 11. Manejo de llantas de desecho en las vulcanizadoras

De acuerdo con todos los datos recopilados, la Figura 12 muestra una aproximación del destino final que tienen las llantas fuera de uso. 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 13 y que no son separados en las estaciones de transferencia ni en las plantas de selección, teniendo como destino final los rellenos sanitarios.

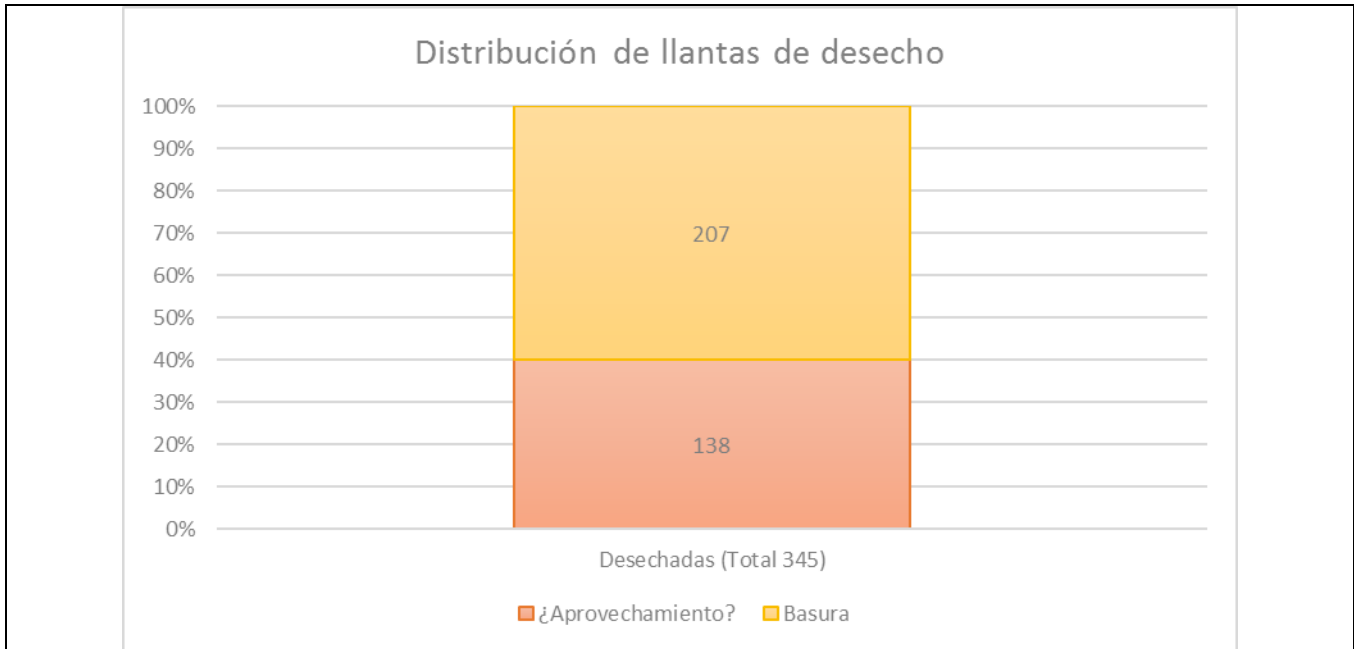


Figura 12. Destino final de las llantas de desecho provenientes de las vulcanizadoras de estudio

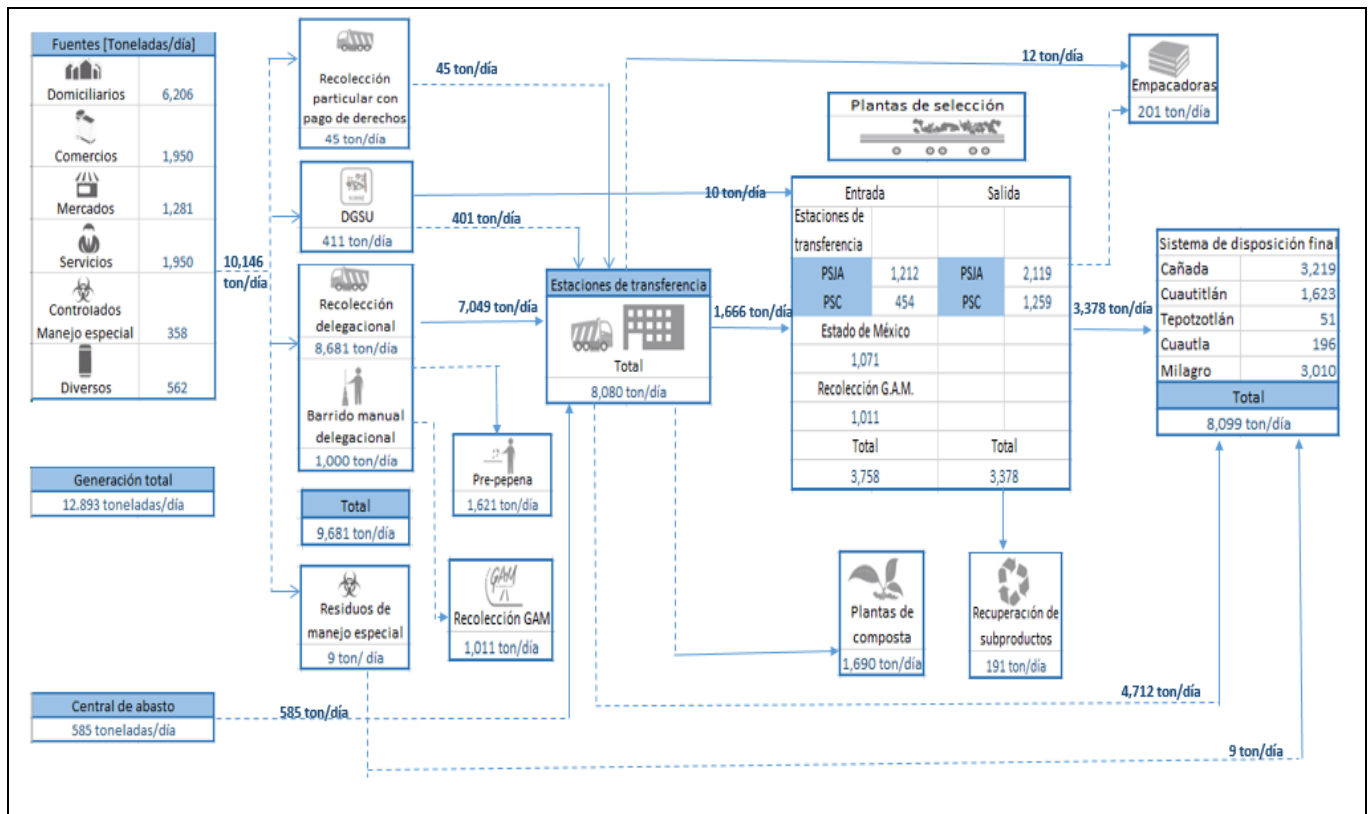


Figura 13. Diagrama de flujo de residuos sólidos en la Ciudad de México (elaboración propia con datos tomados de SEDEMA, 2015)

Las restantes 138 llantas que se desechan son recolectadas en las microempresas 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 automóviles 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.

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 la cilindrada del automóvil (capacidad del cilindro o de los cilindros de un motor, correspondiente al volumen desplazado por los pistones). 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 envejezcan 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 Alcaldía. Por ello, se evaluará de manera conjunta la generación del residuo de acuerdo con 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 concentraron 8,918,653 habitantes en el año 2015, distribuidos en cada alcaldía como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Número de habitantes por Alcaldía en la Ciudad de México (INEGI, 2015b)

Clave Alcaldía	Alcaldía	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 Alcaldía Coyoacán, la cual cuenta con 608,479 habitantes en los 54.4 km² que abarca, dicha distribución se puede apreciar en la Figura 14. 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 Alcaldía. 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%.

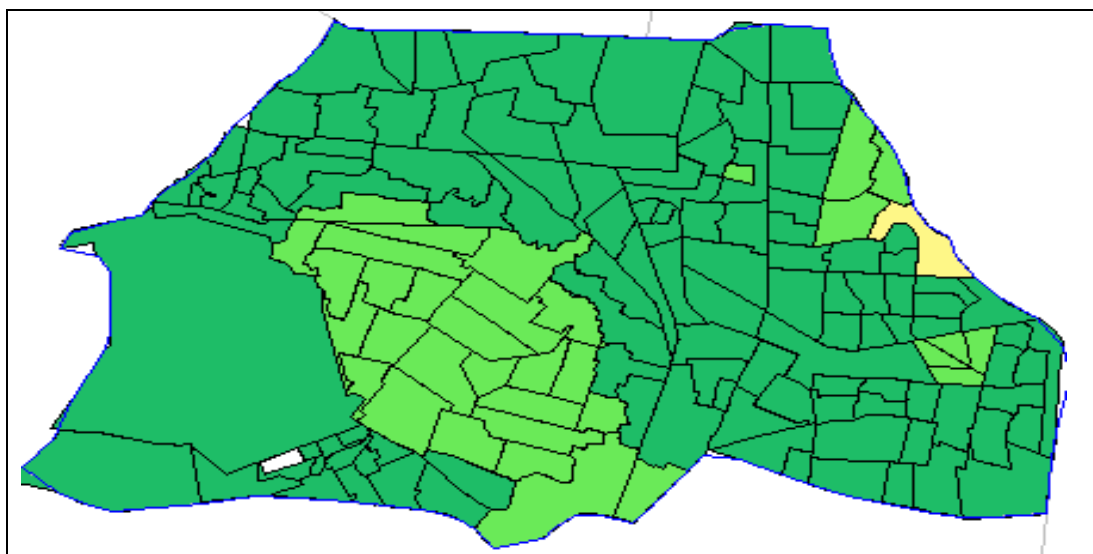


Figura 14. Estratos socioeconómicos en la Alcaldía Coyoacán (INEGI, 2017)

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 Alcaldía, equivalente a 240,897 personas.

Para relacionar estos datos con el número de autos particulares que transitan regularmente por la Alcaldía 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.

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.

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). 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 (todo esto sin tomar en cuenta las variaciones de los tipos de cambio en la moneda y las inflaciones y depreciaciones que ha sufrido el peso mexicano respecto al dólar). 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 y Cornwell, 1998).

Con un camión tipo “torton” de volteo de 14 m³ de capacidad, se pueden transportar hasta 16,500 kg (Express Global, 2017). De acuerdo con lo señalado arriba, una llanta promedio pesa aproximadamente 7 kg, por lo que con este tipo de camión se podrían transportar hasta 2,357 llantas en un solo viaje. De la Figura 11 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 se desechan 36 llantas en cada colonia de la Alcaldía 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 microempresas 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 11 y las consideraciones posteriores que se hicieron para limitar el área de estudio, en total se tomará en cuenta una región de la Alcaldía 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.

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 15 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 Alcaldía 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.

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).

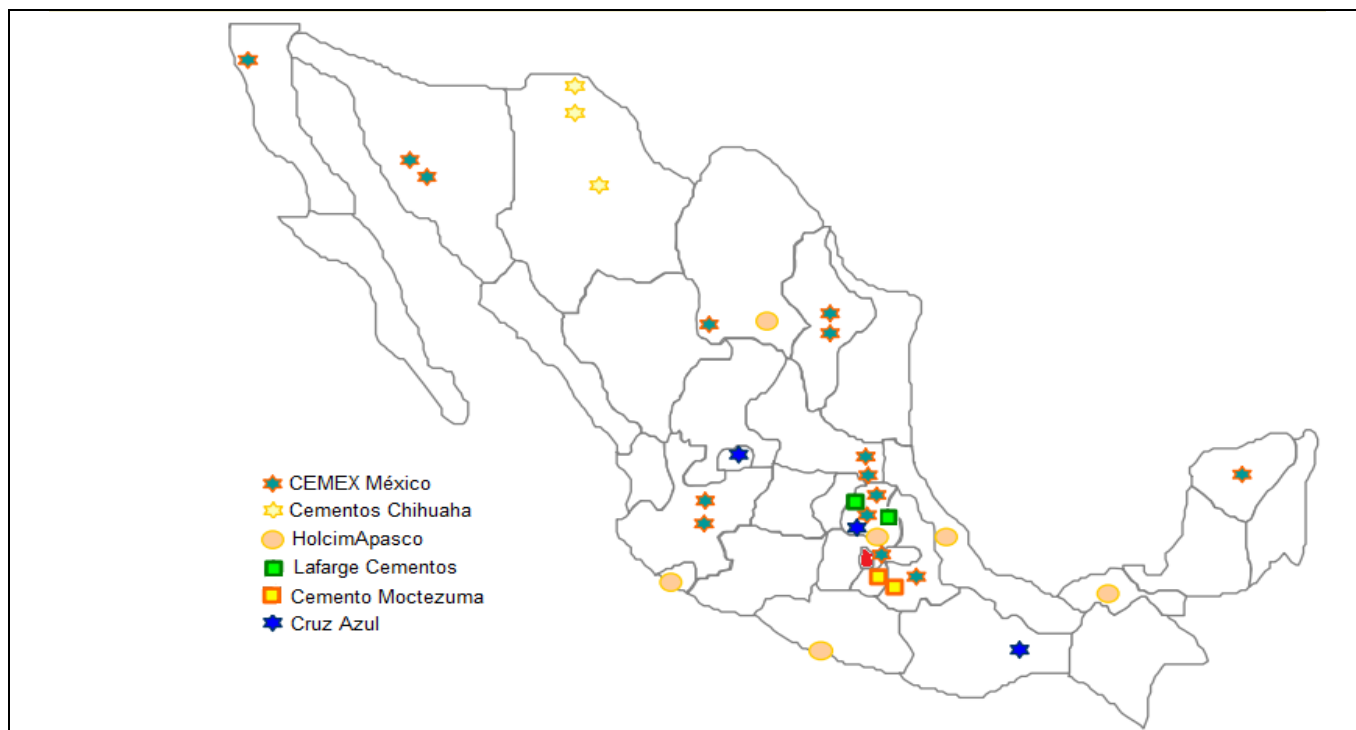


Figura 15. Mapa de ubicación de las industrias cementeras en México (CANACEM, 2006)

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.

Aprovechamiento

Co-procesamiento en industrias cementeras

En la bibliografía citada se presentaron las formas más comunes de aprovechamiento que se desarrollan en México (Benítez-Mercado, 2018) 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 según el 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*¹ 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 (CaCO_3) a unos 900°C y libera dióxido de carbono. En la fase de *clinkerización* a alta temperatura (típicamente $1400\text{-}1500^\circ\text{C}$), 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). 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, 2002), 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).

¹ Clinker, palabra anglosajona que significa “the ash and partially fused residues from a coal-fired furnace or fire”, las cenizas y residuos parcialmente fundidos de un horno de carbón o fuego. En México se da el nombre de *clínker* a los hornos para fabricar cemento tipo Portland: “made by heating a homogeneous mixture of raw materials in a rotary kiln at high temperature. The products of the chemical reaction aggregate together at their sintering temperature, about $1,450^\circ\text{C}$ ($2,640^\circ\text{F}$)”, hecho por calentamiento de una mezcla homogénea de materias primas en un horno rotatorio a temperatura muy alta. Los productos de la reacción química se pegan formando nódulos a su temperatura de sinterización, alrededor de $1,450^\circ\text{C}$ ($2,640^\circ\text{F}$) ([https://en.wikipedia.org/wiki/Clinker_\(cement\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Clinker_(cement))) y se han “creado” palabras alrededor de este sustantivo

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 (trituración 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).

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, vinil-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 o hule 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 150x150 mm 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 7 mm. 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 m³/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 transportadas hasta el tanque con agitación continua y calentamiento a 170°C por 4 horas a 200 rpm, en donde todo será mezclado junto con las otras materias primas provenientes cada una de su respectivo tanque de almacenamiento para elaborar el impermeabilizante que será empacutado 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 del 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.

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 o hule 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:

Química ALM. Xola No. 87 Col. Álamos, Alcaldía Benito Juárez, 03400 Ciudad de México (Cosmos, 2017).

Conclusiones

De acuerdo con esta investigación es posible lograr una reutilización adecuada de este residuo de manejo especial.

Resta realizar un estudio de prefactibilidad económica para definir la mejor opción.

Reconocimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo parcial para la adquisición de insumos y materiales a través del Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado de la Facultad de Química, PAIP, Clave 50009067 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.

Anexo

I. Cuestionario

Fecha de aplicación: _____ Sitio de aplicación: _____

Nombre 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]
- Benítez-Mercado**, M.F. 2018. Manejo y aprovechamiento de residuos de manejo especial: Estudio de caso de un residuo en la Delegación de Coyoacán. Tesis profesional de Ingeniera Química. Facultad de Química, UNAM. Defensa: Marzo 22. Ciudad de México, México.
- 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. [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 [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]
- 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 [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 [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_desecho_en_la_frontera.pdf [23/02/17]
- 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>
- Davis, M.L., Cornwell, D.A.** 1998. Introduction to Environmental Engineering. Cap. 8. Pp. 630-701. McGraw-Hill. Nueva York, EE.UU.
- 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. [10/02/17].
- DOF.** 2002. Normas Oficiales Mexicanas NOM-040-SEMARNAT-2002, NOM-098-SEMARNAT-2002. Dirección electrónica: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1236/1/nom-040-semarnat-2002.pdf> [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]
- 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: <http://www.energiaa debate.com/Articulos/enero2008/Sarmientoene2008.htm>. [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 [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 [08/02/17]
- 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/Estatad/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]
- 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]
- 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], [13/03/17]
- 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 Albos, 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-Asasco.** 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 [03/04/17]
- INEGI.** 2017. Regiones socioeconómicas en México. Dirección electrónica: <http://sc.inegi.gob.mx/niveles/index.jsp?me=na&ly=09.09a.00&la=09003&t=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 [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=0ahUKEwje85kzpbSahXFr1QKHUe4Du8QFggjMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.inegi.org.mx%2Fest%2Fcontenidos%2Fproyectos%2Fmodulosamb%2Fdoc%2Frsu.zip%3F%3Dest%26c&usq=AFQjCNFIVecc3O5izttzmmLiRs0eDceSEA&sig2=6WToVXRHcl-hsp7G3fej6g&bvm=bv.149397726,d.amc> [14/03/17]
- LGPGIR.** 2003. Dirección electrónica: 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 [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/portfollio-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.
- 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 [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]
- Química y algo más.** 2015. Dirección electrónica: <http://www.quimicayalgomas.com/quimica-organica/hidrocarburos/propiedades-del-caucho-vulcanizacion/> [08/02/17]
- Quiminet.** 2017a. Fabricante de impermeabilizantes Eco Llanta Imper. Dirección electrónica: <http://www.quiminet.com/shr/es/eco-llanta-imper-7268356281.htm>
- Quiminet.** 2017b. Fabricante de impermeabilizantes Compañía Minera el Realito. Dirección electrónica: <http://www.quiminet.com/shr/es/compania-minera-el-realito-1457023224/productos.htm?pp=40068065711>
- 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]
- 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 [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 [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-recicladas-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]
- 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]