



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**INSTITUTO DE CIENCIAS**

**POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**



*“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”*

**IMPACTO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTAL DE LA  
CONTAMINACIÓN DERIVADA DE NEUMÁTICOS DE DESECHO EN LA  
ZONA CENTRO-SUR DE MÉXICO**

TESIS

Que para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta

**M. en A. de E. AURORA LINARES CAMPOS**

Director de tesis:

**Dr. J. Santos Hernández Zepeda**

Enero 2023



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**INSTITUTO DE CIENCIAS**

**POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

*“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”*



**IMPACTO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTAL DE LA  
CONTAMINACIÓN DERIVADA DE NEUMÁTICOS DE DESECHO EN LA  
ZONA CENTRO-SUR DE MÉXICO**

TESIS

Que para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta

**M. en A. de E. AURORA LINARES CAMPOS**

Comité tutorial:

Director	Dr. J. Santos Hernández Zepeda
Tutora	Dra. María Lilia Cedillo Ramírez
Integrante Comité Tutorial	Dra. Laura Beatriz Rivera Rodríguez
Integrante Comité Tutorial	Dra. María Teresa Flores Sotelo
Integrante Comité Tutorial	Dra. Laura Alicia Paniagua Solar
Integrante Comité Tutorial	Dra. Gladys Linares Fleites

Enero 2023



**BUAP**

**"HUP, 50 años de enseñanza y salud"**

Of. Núm. DG-ICUAP-1436/2022

**Mtro. Ricardo Valderrama Valdez**  
Director de Administración Escolar  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

En atención a:  
**Lic. Marcela Juárez Zenteno**  
Jefatura Departamento de Titulación/Ciudad Universitaria

Presente:

Por este conducto me permito comunicarle que el trabajo de tesis denominado **"IMPACTO SOCIOECONÓMICO Y AMBIENTAL DE LA CONTAMINACIÓN DERIVADA DE NEUMÁTICOS DE DESECHO EN LA ZONA CENTRO-SUR DE MÉXICO"** realizado por la **C. Aurora Linares Campos**, matrícula **218570493**, tuvo el mérito suficiente para autorizar su impresión, y para poder ser defendido en el examen de grado de Doctora en Ciencias Ambientales, tal y como ha sido considerado por los integrantes del Comité Dictaminador Integrado *ex profeso*.

Por tal motivo se le solicita tenga a bien autorizar la modalidad correspondiente para que se lleve a cabo el examen de grado a celebrarse el día **13 de enero** del presente año a las **10:00 horas**.

El jurado del examen está integrado como a continuación se detalla:

DC. Laura Morales Lara	<i>Presidente</i>
DC. Ricardo Darío Peña Moreno	<i>Secretario</i>
DC. Laura Alicia Paniagua Solar	<i>Vocal 1</i>
DC. Edith Chávez Bravo	<i>Vocal 2</i>
DC. Alia Méndez Albores	<i>Vocal 3</i>
DC Gladys Linares Fleites	<i>Suplente 1</i>
DC. María Teresa Flores Sotelo	<i>Suplente 2</i>

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**"Pensar bien, para vivir mejor"**  
H. Puebla de Z., 12 de diciembre de 2022.

  
**Dra. Blanca Susana Soto Cruz**  
Secretaria de Investigación y Estudios de Posgrado

c.c.p. Ministerio  
BSSC/cd

Instituto de  
Ciencias (ICUAP)

Edificio DC y TIC1  
Calle de la Tecnología, Ciudad Universitaria  
C.P. 72595 Puebla, Pue.  
Tel. 222 229 55 00 Ext. 7050 y 7051

## **A mi familia, Gloria, José Luis y Rodrigo**

Quienes siempre han sido un apoyo incondicional en las buenas y en las malas, gracias por sus palabras de aliento.

## **Al fiel custodio de mi felicidad y crecimiento, Rubén**

Por apoyarme en este sueño que se volvió objetivo y que hoy día lo hemos cumplido juntos, gracias por creer en mí y darme fortaleza.

## **A Ryna, Tuza †, Kyra † y Rayita †**

Por la compañía y los desvelos que vivieron a mi lado, por las caricias y cobijos que dieron a mi alma en momentos de tristeza y enojos, gracias por caminar a mi lado.

## AGRADECIMIENTOS

---

Este proyecto de investigación ha sido posible gracias a diversas instituciones que financiaron mi formación y la publicación del artículo. Así mismo, ha sido posible gracias a la contribución de muchas personas que han intervenido en diferentes etapas de este proceso.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de posgrado con No. de beca 721390.

A la Vicerrectoría de Investigación y estudios de Posgrado por el apoyo otorgado para la conclusión de esta tesis dentro del Eje IV. Modelo de Investigación abierta y compartida. Objetivo 1. Formar recursos humanos que impacten positivamente el contexto social y científico como consecuencia de su accionar en una comunidad para lograr una educación desarrolladora de la transformación. Indicador establecido en el Plan de Desarrollo Institucional 2021-2025. También agradezco al Dr. Ygnacio Martínez Laguna, a la C.P. Elba Patricia Cedillo Ramírez, a la Dra. Carolina Morán Raya, a la Dra. Rosalía del Carmen Castelán Vega, al Dr. Ricardo Dario Peña Moreno y a la C.P. María Elena López Hernández por el apoyo recibido para el pago del artículo.

Al Posgrado en Ciencias Ambientales y al Instituto de Ciencias por el apoyo administrativo, de gestión y de recursos que me brindaron.

Al jurado revisor y evaluador de este proyecto conformado por la DC. Laura Morales Lara, DC. Ricardo Dario Peña Moreno, DC. Laura Alicia Paniagua Solar, DC. Edith Chávez Bravo, DC. Alia Méndez Albores, DC. Gladys Linares Fleites y DC. María Teresa Flores Sotelo. Gracias por sus comentarios y sugerencias para la mejora del escrito, así como por su tiempo, disposición y apoyo en la conclusión de esta etapa.

Al Dr. J. Santos Hernández Zepeda, por haber aceptado dirigir este proyecto, por compartir conmigo la pasión por este tema, gracias por permitirme integrar diferentes Doctores en mi formación como investigadora.

A la Dra. María Lilia Cedillo Ramírez por su guía a lo largo de esta travesía, por sus consejos y apoyo.

A mi Comité Tutorial por ser una base y un apoyo en todo mi proceso, por alentarme a seguir avanzando como investigadora y científica.

A la Dra. Laura Morales, al Dr. Ricardo Dario Peña, a la Mtra. Sofía Angélica García y a la Mtra. Yessica Alejandra González, por todo su apoyo, su tiempo y paciencia, gracias por acogerme en su núcleo y brindarme su amistad.

A la Dra. Gloria Merino gracias porque desde el inicio sin conocerme me brindó todas las facilidades para comenzar este camino y ahora que lo he culminado tengo en ella una consejera y una voz de la experiencia.

A Andrés, Itzel, Mildred, Marco y David por apoyarme siempre que lo necesitaba, sin importar la hora o el día o el tema del que se tratará, gracias por escucharme.

## ÍNDICE

---

<b>CAPÍTULO I. GENERALIDADES .....</b>	<b>13</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.2. BIBLIOMETRÍA.....	15
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.4. COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA.....	17
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	18
1.6. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	19
1.7. OBJETIVOS.....	19
1.7.1. Objetivo General .....	19
1.7.2. Objetivos Específicos .....	19
1.8. HIPÓTESIS.....	19
1.9. TEORÍA Y LÍMITES DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
2.1. GENERALIDADES DEL NEUMÁTICO .....	21
2.2. GENERALIDADES DEL NEUMÁTICO DE DESUSO Y SU VALORIZACIÓN.....	27
2.3. GENERALIDADES DEL NEUMÁTICO DE DESECHO .....	29
2.4. RIESGOS PARA LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE .....	33
2.5. ESTUDIOS ECOTOXICOLÓGICO SOBRE NEUMÁTICOS .....	36
<b>CAPÍTULO III. MARCO JURÍDICO .....</b>	<b>38</b>
<b>CAPITULO IV. METODOLOGÍA .....</b>	<b>40</b>
4.1. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	40
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	40
4.2.1. Metodología objetivo general .....	40
4.2.2. Metodología objetivo específico uno .....	41
4.2.3. Metodología objetivo específico dos .....	44
4.2.4. Metodología objetivo específico tres .....	46
4.2.5. Metodología objetivo específico cuatro.....	47
4.3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	50

<b>CAPITULO V. RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
5.1. OBJETIVO ESPECÍFICO UNO.....	51
5.2. OBJETIVO ESPECÍFICO DOS.....	61
5.3. OBJETIVO ESPECÍFICO TRES.....	68
5.4. OBJETIVO ESPECÍFICO CUATRO.....	71
<b>CAPITULO VI. DISCUSIÓN.....</b>	<b>89</b>
<b>CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES.....</b>	<b>94</b>
<b>CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS.....</b>	<b>96</b>
<b>DEFINICIONES Y ACRÓNIMOS.....</b>	<b>101</b>

## Índice de tablas

---

Tabla 1. Clasificación de marcas de neumáticos. ....	25
Tabla 2. Valores promedio de los componentes principales, análisis químico y componentes peligrosos del neumático.....	25
Tabla 3. Efectos en los seres vivos y ecosistemas causados por los componentes de las emisiones de la quema de neumático. ....	34
Tabla 4. Cuestionario para encuesta sobre logística inversa dirigida a empresas manufactureras.	43
Tabla 5. Valores para la estimación de los niveles de contaminación por disposición final. ....	44
Tabla 6. Características de la zona geoeconómicas centro-sur de México.....	51
Tabla 7. Resultados de la encuesta telefónica realizada a los gerentes de producción o cargo similar de las empresas manufactureras de neumático ubicadas en la zona centro-sur.....	61
Tabla 8. Estimación de los niveles de contaminación por disposición final. ....	61
Tabla 9. Características de los neumáticos examinados. ....	62
Tabla 10. Resultados de la aplicación de la estadística descriptiva a los datos obtenidos durante la incineración. ....	62
Tabla 11. Concentración de metales, metaloides y compuestos contenidos en cenizas de neumáticos analizados conforme la NMX-AA-051-SCFI-2001.....	67
Tabla 12. Concentración de compuestos orgánicos volátiles en cenizas de neumático conforme la NMX-AA-103-SCFI-2006.....	67
Tabla 13. Cuento de inmovilidad o mortandad para el cálculo de la CE50 efectuado a las 48 horas. ....	69

## Índice de figuras

---

Figura 1. Documentos publicados por año en la biblioteca digital Scopus.....	15
Figura 2. Documentos publicados por país o territorio biblioteca digital Scopus.....	16
Figura 3. Documentos publicados por año biblioteca digital Web of Science.....	16
Figura 4. Sistema neumático de desecho. ....	18
Figura 5. Empresas manufactureras y centros de distribución de neumáticos en México. ....	21
Figura 6. Proceso de fabricación del neumático.....	23
Figura 7. Centro de acopio autorizado, Navojoa, Sonora.....	30
Figura 8. Centro de acopio clandestino (abandono), Novolato, Sinaloa.....	30
Figura 9. Zona de almacenamiento de neumáticos previo a su uso como combustible en la industria cementera.....	31
Figura 10. Incineración a cielo abierto de neumático de desecho, Palmillas, Sinaloa.....	31
Figura 11. Diagrama de flujo para analizar el impacto socioeconómico y ambiental de la contaminación derivada de neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México.....	41
Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología para el objetivo específico uno.....	43
Figura 13. Condiciones de la prueba.....	47
Figura 14. Diagrama de flujo de la metodología para el objetivo específico cuatro.....	48
Figura 15. Diagrama de influencias sistema neumáticos de desecho.....	49
Figura 16. Diagrama Forrester sistema neumáticos de desecho. ....	49
Figura 17. Localización y composición de la zona centro-sur. ....	50
Figura 18. Población total por estado integrante de la zona centro-sur de México. ....	52
Figura 19. Parque vehicular en circulación por estado integrante de la zona centro-sur de México. ....	53
Figura 20. ODS 1. 1.1.1.a Proporción de la población que vive por debajo del umbral internacional de la pobreza (1.90 dólares diarios). ....	54
Figura 21. ODS 2. 2.1.2.a Proporción de la población con inseguridad alimentaria moderada o severa (carencia por acceso a la alimentación). ....	55

Figura 22. ODS 4. 4.a.1.a Proporción de escuelas con acceso a electricidad por entidad federativa y nivel educativo.....	56
Figura 23. ODS 6. 6n.1.1 Porcentaje de la población que tiene acceso al agua entubada diariamente, así como al saneamiento.....	57
Figura 24. ODS 8. 8.5.5 Relación entre ocupación y población en edad de trabajar. ....	58
Figura 25. ODS 9. 9n.3.1 Porcentaje del Personal Ocupado generado por las MIPyMEs. ....	59
Figura 26. Ubicación de empresas manufactureras de neumáticos.....	60
Figura 27. Análisis de correlación de Pearson y contraste de hipótesis para las variables monóxido de carbono - peso inicial – tiempo.....	64
Figura 28. Análisis de correlación de Pearson y contraste de hipótesis para las variables peso final - peso inicial - temperatura.....	65
Figura 29. Análisis de correlación de Pearson y contraste de hipótesis para las variables peso inicial -sólidos volátiles – temperatura.....	66
Figura 30. Dinámica poblacional de D. magna en condiciones control. El monitoreo del cultivo se desarrolló durante 21 días.....	68
Figura 31. Concentración efectiva media de cenizas de neumáticos de desecho. ....	70
Figura 32. Diagrama de influencias sistema neumáticos de desecho.....	71
Figura 33. Diagrama de Forrester sistema neumáticos de desecho. ....	72
Figura 34. Contribución por estado integrante de la zona centro-sur en la generación de neumáticos de desecho. ....	75
Figura 35. Disposición final en piezas de la zona centro-sur.....	76
Figura 36. Contaminación ambiental generada por la quema a cielo abierto de neumáticos de desecho zona centro-sur.....	77
Figura 37. Neumáticos fuera de uso recolectados por aportaciones de empresas de la zona centro-sur. ....	78
Figura 38. Legislatura y su aplicación para la recolección de neumáticos fuera de uso en la zona centro-sur.....	79
Figura 39. Aplicación de la logística inversa para la recolección de neumáticos fuera de uso en la zona centro-sur. ....	80

Figura 40. Generación de neumáticos de desecho con la aplicación de la legislatura, logística inversa y las aportaciones por parte de las empresas en la zona centro-sur.....	81
Figura 41. Disposición de neumáticos de desecho de la zona centro-sur.....	82
Figura 42. Disposición de neumáticos de desecho en centros de acopio autorizado de la zona centro-sur. ....	83
Figura 43. Neumáticos de desecho enviados para la generación de energía en la zona centro-sur. ....	84
Figura 44. Neumáticos de desecho en abandono en la zona centro-sur. ....	84
Figura 45. Quema a cielo abierto de neumáticos de desecho en la zona centro-sur. ....	85
Figura 46. Contaminación del agua como consecuencia de la quema a cielo abierto del neumático de desecho en la zona centro-sur. ....	87
Figura 47. Contaminación del aire como consecuencia de la quema a cielo abierto del neumático de desecho en la zona centro-sur. ....	87
Figura 48. Contaminación del suelo como consecuencia de la quema a cielo abierto del neumático de desecho en la zona centro-sur. ....	88

# CAPÍTULO I. GENERALIDADES

---

## 1.1. INTRODUCCIÓN

El neumático de desecho es un residuo que ha incrementado año con año a nivel mundial, esto se debe a que es una consecuencia directa del crecimiento rápido de las economías y de las poblaciones, no dejando de lado que la economía lineal que impera en estos momentos da como resultado el acumulamiento de éste en la naturaleza al pasar del tiempo, lo que lleva a una contaminación acumulada de millones de toneladas de este residuo. Son cerca de 1,000 millones de neumáticos de desecho que se generan anualmente en el mundo, alrededor de 17 millones de toneladas (t), México no es la excepción, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) estimó una generación de 1,011.03 miles de t promedio anual calculado para el periodo de 2006 al 2012.

Si el incremento desmedido y la acumulación de este residuo a lo largo de los años no es suficiente para visualizar el problema, vamos a añadirle que no es biodegradable y que existen dificultades para procesarlo, es decir, que permanecerá en el mismo estado en el que se desechó.

Habitualmente son depositados en patios, tiraderos clandestinos, vía pública y en centros de acopio públicos y privados; el riesgo para la salud de los seres vivos y los ecosistemas radica en el manejo final del mismo, ya que son el albergue ideal para roedores, animales ponzoñosos y mosquitos como el *Aedes aegypti* y *A. albopictus* que transmiten el dengue y la fiebre amarilla. La eliminación inadecuada en cauces bloquea las corrientes de agua provocando erosiones e inundaciones; cuando son enterrados en vertederos dañan y rompen las capas, debido a, que tienden a volver a la superficie, lo que provoca que a largo plazo la tierra no se pueda rehabilitar; la eliminación por medio del fuego al aire libre es complicada de controlar y más de extinguir, un incendio puede durar meses ardiendo, durante la incineración se produce una gran cantidad de emisiones como son un amplio conjunto de hidrocarburos y compuestos halogenados clorados (metanos clorados, dioxinas y bifenilos policlorados formados por carbón, hidrógeno y cloro), la contaminación resultante puede extenderse por una amplia zona y afectar no solo al aire, sino también al agua y el suelo; los daños que causa no solo son en la naturaleza, los seres vivos se ven afectados al estar expuestos a los gases que se forman y son dispersados por los vientos en diversas direcciones, los efectos en el ser humano por inhalación pueden causar intoxicaciones agudas o subagudo, irritación y congestión de las vías respiratorias superiores e inferiores, sofocación por vapores ácidos (especialmente compuestos de azufre y nitrógeno), e intoxicación por monóxido de carbono,

todos estos fenómenos pueden conducir al coma o la muerte por asfixia durante intensas exposiciones.

En efecto el neumático de desecho es un problema que afecta al ambiente y a los seres vivos, es por esto, que existen convenios internacionales como el de Basilea (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2011), que establece las directrices técnicas relativas al manejo ambientalmente racional de los neumáticos usados y de desecho, con el objetivo de ayudar a las autoridades nacionales encargadas de este residuo en el territorio de los países firmantes.

En México existe un marco jurídico que protege al ambiente de este contaminante, es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y la NOM-161-SEMARNAT-2011, aun teniendo un marco jurídico, este residuo de manejo especial en México sigue aumentando; existe una regla universalmente aceptada para países industrializados, menciona que la generación es aproximadamente de un neumático de automóvil por habitante al año o su equivalente en peso 9 kg (COCEF, 2008; INECC & SEMARNAT, 2012), es decir, para el año 2020 el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) estimó una población de 125 millones de habitantes, por lo tanto, siguiendo la regla este año se desecharon 125 millones de neumáticos.

El problema es mundial, se sabe que no es un objeto aislado, sino que forma parte de un sistema, por lo que se encuentra en constante interacción con otros elementos; esto motivó a realizar esta investigación desde las ciencias ambientales con base en la triada del desarrollo sustentable, es decir, el problema será visualizado desde variables socioeconómicas y ambientales.

Para los efectos de este estudio se tomará el neumático de desecho con las características que menciona el INECC y la SEMARNAT en el 2012 y se definirá como un residuo de manejo especial cuya disposición final se encuentra en centros de acopio autorizados o clandestinos o reciben un tratamiento de incineración.

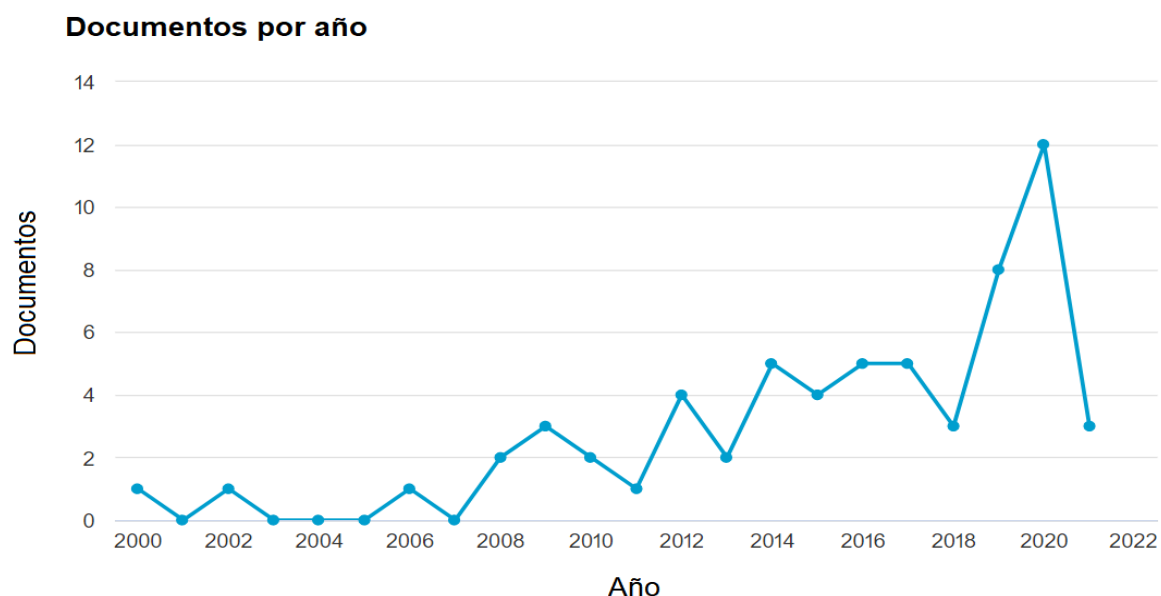
Esta investigación se abordó desde la teoría de los sistemas complejos, que tiene como base el pensamiento complejo, el paradigma sistémico u holístico y toma en cuenta las diversas dimensiones que convergen en él, que van desde aspectos físicos, sociales, biológicos, entre otros; el enfoque es transdisciplinario, es decir, el problema será estudiado a través de diferentes disciplinas sobrepasando sus límites.

La metodología de investigación se realizó mediante un método mixto de tipo exploratorio, descriptivo e inferencial y concurrente con la única finalidad de lograr una

perspectiva más amplia y profunda del fenómeno. El objetivo fue analizar la contaminación ambiental generada por neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México y visualizar los factores sociales, económicos y ambientales que intervienen. Se contó con fuentes de información primaria y secundaria, los tipos de datos fueron cualitativos y cuantitativos, recolectados con herramientas como: encuestas cerradas y experimentos.

## 1.2. BIBLIOMETRÍA

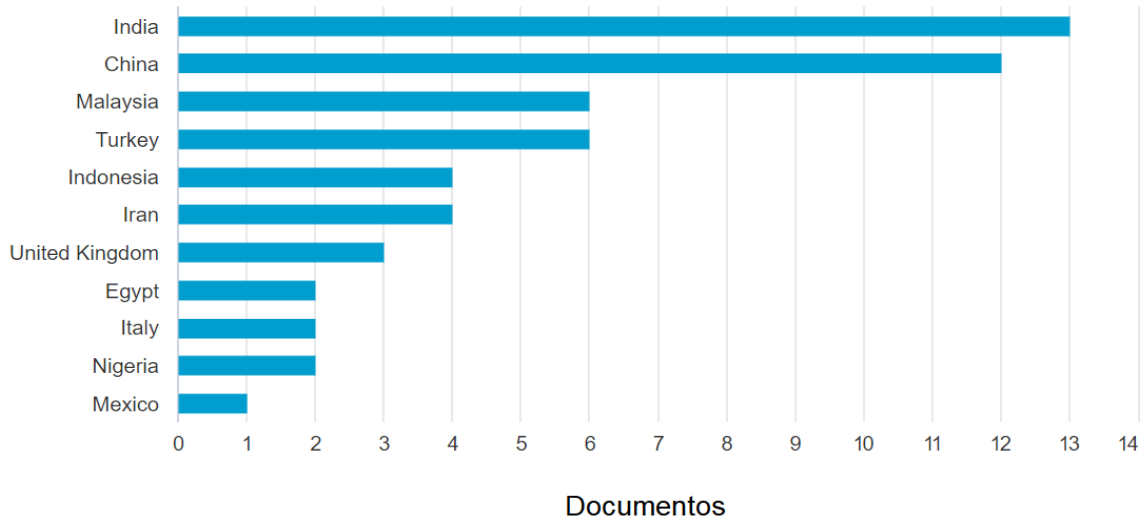
Para conocer la pertinencia de esta investigación se realizó la bibliometría del tema, en este caso es la contaminación ambiental derivada del neumático de desecho, para ello, se usaron dos bibliotecas digitales, Scopus y Web of Science, en las cuales, la búsqueda fue la siguiente: ( ( "scrap tire" OR "waste tire" ) AND ( "environmental pollution" OR "environmental contamination" ) ) ), con la finalidad de abarcar la mayor cantidad de investigaciones el intervalo de tiempo es desde el año 2000 al año 2021. La actividad científica resultante en Scopus de estas palabras claves en este lapso de tiempo fue de 62 documentos, a continuación, se presenta el análisis, en la **Figura 1** se observa el número de publicaciones por año y en la **Figura 2** los documentos publicados por país quedando México en el lugar número dieciséis de la lista, para representar la diferencia entre los primeros países y México fue necesario incluirlo dentro de los diez. Los resultados obtenidos en Web of Science fue de veintitrés y se muestran en la **Figura 3**.



**Figura 1. Documentos publicados por año en la biblioteca digital Scopus**

Nota. La figura muestra las cifras de documentos publicados por año en la biblioteca digital de Scopus, siendo el año 2019 y 2020 los más productivos. Fuente: (B.V., 2021).

### Documentos por país o territorio

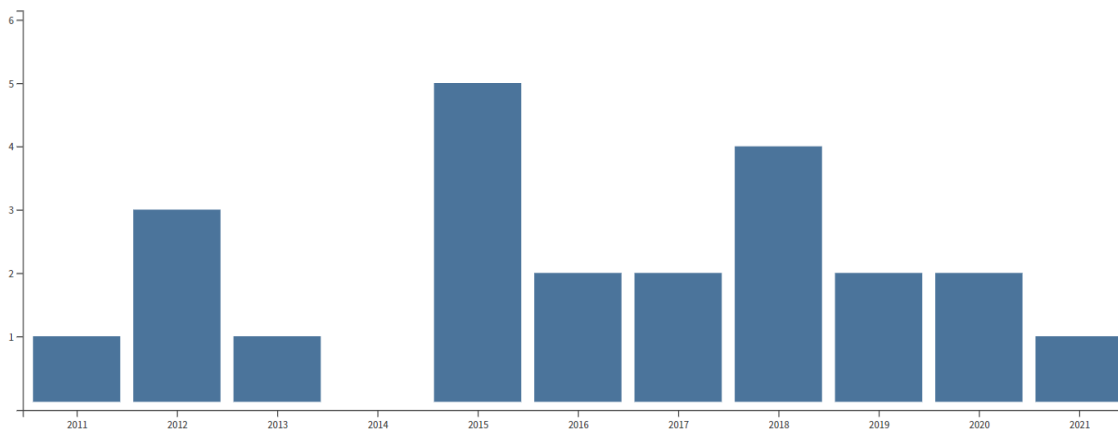


**Figura 2. Documentos publicados por país o territorio biblioteca digital Scopus.**

Nota. La figura muestra las cifras de documento publicados por país, siendo India el número uno, seguido por China y Malaysia, México se encuentra en el lugar dieciséis con un documento publicado. Fuente:(B.V., 2021).

Total de publicaciones

**23** Analizar



**Figura 3. Documentos publicados por año biblioteca digital Web of Science.**

Nota. La figura muestra las cifras de los documentos publicados en la biblioteca digital Web of Science, siendo el año 2015 y 2018 los más productivos. Fuente:(Clarivate, 2021).

Con este análisis se observó que el tema ha sido abordado poco, que los ochenta y cinco documentos son de diversos temas desde el ciclo de vida hasta procesos para la reutilización de este. Para estudiar el tema de investigación se realizó una amplia búsqueda de información, artículos científicos, tesis, capítulos de libros, documentos oficiales emitidos por el Gobierno de México, tanto en bibliotecas físicas como digitales.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El neumático de desecho constituye un problema grave en todo el mundo, debido a su masiva fabricación que es aproximadamente de 1,500 millones de unidades al año (Yadav & Tiwari, 2019) y las dificultades para procesarlos una vez terminada su vida útil (Castro, 2007). El incremento de este residuo es consecuencia directa del crecimiento rápido de las poblaciones y de la economía (Ortiz et al., 2017), aunado al modelo de producción actual definido como economía lineal (Ellen MacArthur Foundation, 2014).

Un reporte menciona que los principales impulsores para el incremento en México se deben a la falta de educación en la seguridad de los mismos, la falta de espacios para su resguardo y falta de infraestructura para su eliminación, entre otras (Centro de Estudios Transfronterizos de Norte América, 2010).

Existen pocas investigaciones sobre este residuo de manejo especial en el país; es necesario estudiarlo para poder mejorar la situación actual que incrementa con la acumulación a través del tiempo y que hasta el momento es incontrolable, ocasionando enfermedades, incendios accidentales o provocados, erosión de la tierra, bloqueo de causes, etc.

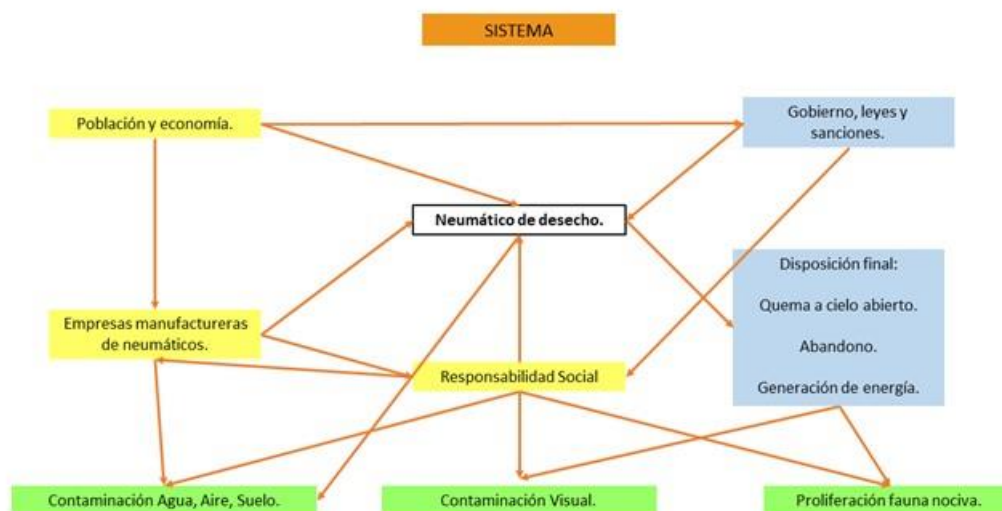
Sabiendo que el aumento del residuo es consecuencia del incremento de la población, se seleccionó la zona centro-sur de México por ser la que alberga el mayor número de individuos, esto se debe, a que desde sus inicios el crecimiento industrial tendió a concentrarse en la capital de la república, generando empleo y atrayendo por consecuente el crecimiento demográfico de la zona (Cantú, 2009).

### **1.4. COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA**

La complejidad del problema se localiza en que forma parte de un sistema mayor que lo contiene, por lo que se encuentra en constante interacción con otros elementos del sistema, así como con el sistema completo (Pereira, 2010), es decir, que no es un objeto

aislado. La complejidad se mide por el número de interrelaciones que tiene el sistema (Laguna et al., 2016).

En la **Figura 4** se puede observar el sistema neumático de desecho, en el cual, están representadas las variables que lo integran y sus interacciones que tienen entre ellas. Los colores identifican las dimensiones de la triada del Desarrollo Sustentable, el color azul representa la dimensión social, el amarillo la dimensión económica y el verde la dimensión ambiental. Las variables en el sistema son las que serán abordadas en esta investigación para la zona de estudio.



**Figura 4. Sistema neumático de desecho.**

## 1.5. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación es importante debido a que considera las diferentes problemáticas que genera el desecho y la disposición final del neumático, considerando factores socioeconómicos y ambientales; estableciendo un precedente para futuras investigaciones en otras zonas, localidades, entidades y países, que coincidan con problemáticas similares, también podrá ser la base para tomar acciones en mejora del ambiente en la zona centro-sur.

El motivo que llevo al desarrollo de la misma es que los neumáticos de desecho son considerados como un “residuo sin importancia” para la sociedad, esto es un gran error, por

su composición permanece a través del tiempo; por su volumen y peso provoca aglomeraciones considerables; la falta de infraestructura para procesarlo es mínima o nula, además, que cuando es incinerado genera daños en los ecosistemas y enfermedades en los seres vivos.

## **1.6. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cuál es la importancia socioeconómica y ambiental de los neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México?

## **1.7. OBJETIVOS**

### **1.7.1. Objetivo General**

Analizar la contaminación ambiental generada por neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México y visualizar los factores sociales, económicos y ambientales que intervienen.

### **1.7.2. Objetivos Específicos**

1. Describir la zona geoeconómica centro-sur de México y establecer las empresas manufactureras que tienen relación con los neumáticos de desecho y la logística inversa.
2. Estimar los niveles de contaminación por disposición final de los neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México.
3. Evaluar la toxicidad aguda y crónica de las cenizas de neumático de desecho, sobre el modelo ecotoxicológico D. magna.
4. Crear un modelo de simulación dinámica para analizar el sistema neumático de desecho.

## **1.8. HIPÓTESIS**

La importancia socioeconómica y ambiental está en función del número de neumáticos que se están desechando y de los elementos tóxicos que se liberan de su disposición final.

## **1.9. TEORÍA Y LÍMITES DE LA INVESTIGACIÓN**

En este estudio el problema es abordado desde la teoría de los sistemas complejos (que define al sistema como partes interrelacionadas que como conjunto exhiben propiedades y comportamientos no evidentes a partir de la suma de las partes individuales

(Barbabosa, 2022)), que tiene como base el pensamiento complejo, el paradigma sistémico u holístico (fenómeno psicológico y social, enraizado en las distintas disciplinas humanas y orientado hacia la búsqueda de una cosmovisión basada en preceptos comunes al género humano (Jesús Briceño, 2010)) y toma en cuenta las diversas dimensiones que convergen en él, que van desde aspectos físicos, culturales, sociales y biológicos; el enfoque es transdisciplinario, es decir, que intervendrán diferentes disciplinas sobrepasando sus límites (Laguna et al., 2016).

Se define al neumático de desecho como un residuo de manejo especial cuya disposición final se encuentra en centros de acopio autorizados, abandono, o son incinerados en cementeras o a cielo abierto, su peso promedio es de 9 kg y son para automóvil. Esta investigación se circunscribe al análisis de la contaminación ambiental generada por este, y se limita a estudiarlo solamente en las disposiciones mencionadas al inicio de este párrafo.

Para iniciar con esta investigación se delimito la zona geoeconómica centro-sur de México, los factores a visualizar son sociales, económicos y ambientales característicos de la zona, la finalidad es mostrar que la contaminación ambiental derivada de este residuo se encuentra en constante interacción con otros elementos del sistema (Pereira, 2010). La importancia socioeconómica y ambiental está en función del número de neumáticos que se están desechando y de los elementos tóxicos

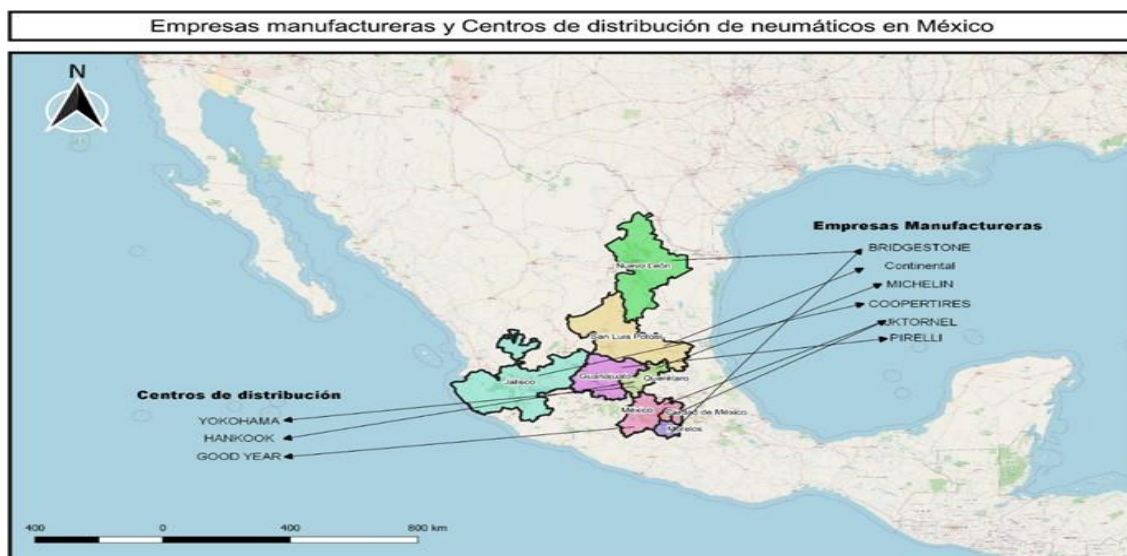
## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. GENERALIDADES DEL NEUMÁTICO

El neumático es un producto del sector manufacturero, específicamente pertenece a la industria del plástico y del hule, esta actividad económica se encuentra clasificada dentro del SCIAN (Sistema de Clasificación Industrial del Norte) con el código 326211 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2016).

Un reporte del año 2016 mostró que la fabricación de neumáticos y cámaras tiene una producción bruta del 37.8%, con solo el 3.2% de unidades económicas, generando el 16.9% de personas ocupadas, posicionándose en el segundo lugar dentro de la industria hulera. El producto más exportado e importado en el año 2015, son los neumáticos de caucho nuevo; en cuanto a la exportación son principalmente neumáticos para automóviles y autobuses con el 55.8% y en cuanto a las importaciones son neumáticos de caucho nuevo para autobuses con un porcentaje del 52.3% (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2016).

En México están establecidas las empresas más importantes del mundo, existen 8 plantas de producción y 3 centros de distribución (Manejo Responsable de Llantas Usadas, 2015), en la **Figura 5** se muestra su ubicación.



**Figura 5. Empresas manufactureras y centros de distribución de neumáticos en México.**

Nota. La empresa manufacturera JKTORNEL se ubica en el Estado de México y en la Ciudad de México, la empresa MICHELIN en el Estado de Querétaro, BRIDGESTONE en el Estado de Morelos y existe un centro de distribución de GOOD YEAR en el Estado de México. Fuente: Manejo responsable de llantas usadas A.C (2015), usando el programa (QGIS.org, 2021).

El proceso de fabricación del neumático es complejo, consta de 5 etapas, la etapa 1 comienza con la disposición de las **materias primas** y con el **mezclado** de las mismas, que es típicamente una operación por lotes, donde se fusionan caucho, negro de carbón, óxido de zinc, azufre, caucho regenerado y ablandadores a una temperatura de entre 100 – 170 °C. Una vez que ha finalizado, el lote se retira del mezclador y se envía a través de una serie de máquinas a fin de transformarlo en una lámina continua llamada "película o goma". Una vez que se tiene se divide en 4 partes y se envía a cuatro diferentes procesos para obtener las diferentes partes que conforman el neumático, estos corresponden a la etapa 2 : **conformado de cinturones** se aplica goma a una serie de cuerdas de acero que darán como resultado los cinturones; **calandrado** las telas son recubiertas de película para obtener entre otras las telas de carcasa; **extrusión** proceso en el cual se le da forma a la goma, para obtener la banda de rodamiento, laterales e innerliner; y por último el **conformado de pestaña** en el cual las cuerdas de acero son recubiertas con película para obtener el talón del neumático.

Después de que se tienen las partes se envía a la etapa 3 que es **la construcción del neumático**, donde se ensambla en dos pasos:

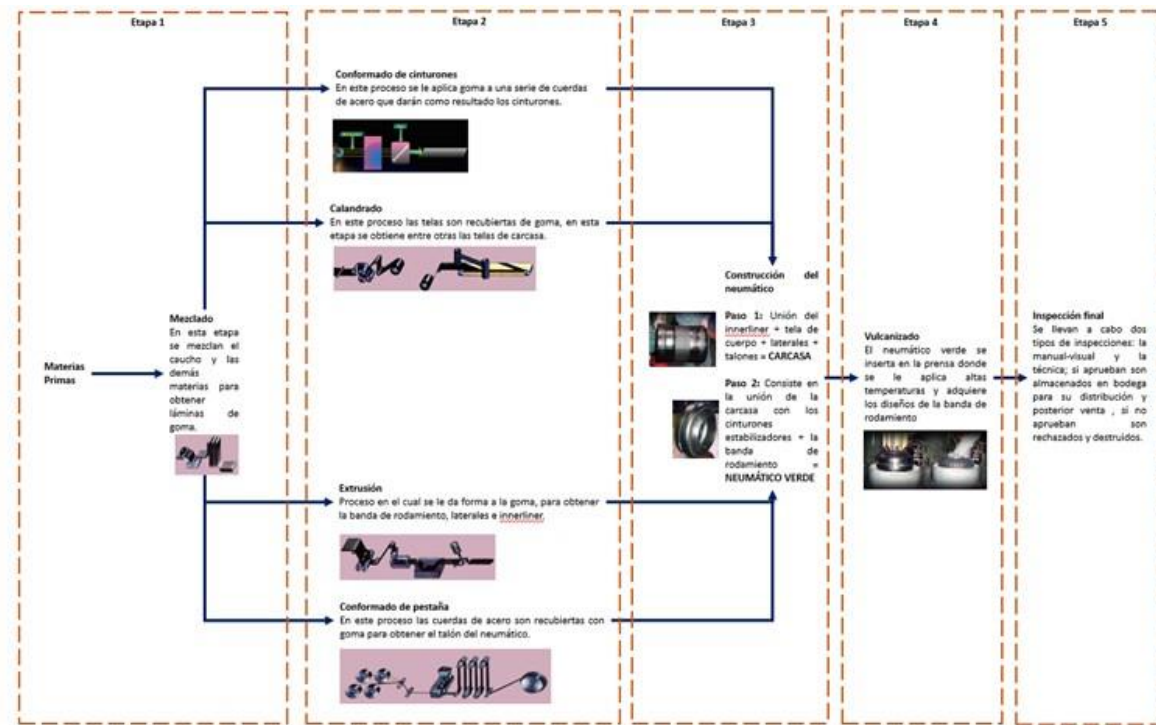
Paso 1: unión del innerliner + tela de cuerpo + laterales + talones = CARCASA y el

Paso 2: consiste en la unión de la carcasa con los cinturones estabilizadores + la banda de rodamiento = NEUMÁTICO VERDE.

Una vez que se tiene se procede a la etapa 4 que es el **vulcanizado** donde se inserta en la prensa, se le aplica altas temperaturas y adquiere los diseños de la banda de rodamiento, una vez terminado esta etapa se pasa a la etapa 5 que es la **inspección final**, en la cual se llevan a cabo dos tipos de inspecciones:

- i) la manual-visual,
- ii) técnica

Si el neumático pasa la inspección final son almacenados en bodega para su distribución y posterior venta, si no aprueban son rechazados y destruidos, todo el proceso de fabricación se puede observar en la **Figura 6** (Castro, 2008; Matute et al., 2011).



**Figura 6. Proceso de fabricación del neumático.**

Nota. La figura muestra el proceso de fabricación de neumáticos, elaborado con datos de Castro (2008) (Castro, 2008; Matute et al., 2011).

Cada elemento del neumático, está diseñado para resistir las presiones extremas que soporta y el desgaste al que se le somete, cuenta con 6 partes, que son la banda de rodadura, el cinturón, la carcasa, el talón, el revestimiento interior, y el flanco (TNU (Tratamiento neumáticos usados), 2017). Existen variantes en el proceso de producción según la construcción, tamaño de neumático y tipo de vehículo en que se usará el neumático (Groover, 2014).

Los neumáticos varían en tamaño y diseño según su uso y fabricante, en la actualidad existen diferentes tipos, todos son creados con el objetivo de cubrir los requerimientos básicos de calidad, seguridad y durabilidad (Castro, 2008).

A continuación, se describen de manera general sus características (Secretaría de Energía, 2017):

- **Para autopistas:** también llamados “neumáticos para verano”, están diseñados para proporcionar la tracción adecuada al vehículo en caminos tanto lluviosos como secos.
- **Para nieve:** proveen máxima tracción en condiciones donde el camino está cubierto por una capa de hielo. La banda rodante está diseñada para

proporcionar el máximo agarre bajo estas condiciones, además está construida de un material especial que le permite trabajar en climas helados.

- **Para toda temporada:** están diseñados para ser operados tanto en condiciones lluviosas como nevadas. Proporcionan una buena manejabilidad y ofrecen los beneficios de los neumáticos para autopistas.
- **De alto desempeño:** ofrecen un alto grado de manejabilidad, agarre y desempeño, además de soportar altas temperaturas y velocidades.
- **Toda temporada/alto desempeño:** ofrecen todas las características de los neumáticos anteriores, tanto en caminos secos como lluviosos.

Para conocer el tipo de neumático es necesario leer la inscripción, que es la información grabada en el flanco del neumático. Además del nombre de la marca y de la gama, se puede observar la dimensión y las características como: anchura, altura del flanco, diámetro, estructura, índice de carga e índice de velocidad.

En el mercado existen más de 85 marcas de neumáticos que son clasificados por su reputación, calidad, precio y consideración en general; las marcas y fabricantes de neumáticos se clasifican en premium, quality y budget (DeDavid.com, 2019).

- **Primeras marcas o marcas premium:** son aquellos fabricantes que son referentes en el sector del neumático y que, por ello, la calidad que ofrecen es superior.
- **Neumáticos quality:** son aquellas marcas que todavía no han alcanzado el nivel de calidad suficiente para considerarse referentes del sector.
- **Neumáticos budget:** son aquellas marcas que fabrican neumáticos en Europa del Este o Asia y están en la categoría de “ruedas baratas”. No obstante, aunque los precios de este tipo de neumático son bastante bajos, hay fabricantes que ofrecen muy buena calidad.

En la **Tabla 1** se muestra la clasificación de 85 marcas de neumáticos que existen en el mercado, agrupados por su calidad, identificados por color siendo el verde para la calidad Premium, el amarillo para las de calidad media y rojo para los que son de calidad baja (DeDavid.com, 2019):

**Tabla 1. Clasificación de marcas de neumáticos.**

Marcas de neumáticos				
Premium	Quality	Budget		
Neumáticos Michelin	Neumáticos Fulda	Neumáticos Aurora	Neumáticos Minerva	Neumáticos Nokian
Neumáticos Bridgestone	Neumáticos Sava	Neumáticos Backlion	Neumáticos Nankang	Neumáticos Metzeler
Neumáticos Continental	Neumáticos Barum	Neumáticos Event	Neumáticos Ovation	Neumáticos Triangle
Neumáticos Goodyear	Neumáticos General	Neumáticos Federal	Neumáticos Pace	Neumáticos Accelera
Neumáticos Dunlop	Neumáticos Maxxis	Neumáticos Fedima	Neumáticos Powertrac	Neumáticos Aeolus
Neumáticos Pirelli	Neumáticos Mabor	Neumáticos Firemax	Neumáticos Primewell	Neumáticos Alliance
Neumáticos Kumho	Neumáticos Dayton	Neumáticos Fortuna	Neumáticos Rapid	Neumáticos Apollo
Neumáticos Hankook	Neumáticos Firestone	Neumáticos Fullway	Neumáticos Roadstone	Neumáticos Aplus
	Neumáticos Toyo	Neumáticos Gislaved	Neumáticos Rotala	Neumáticos Aptary
	Neumáticos Kleber	Neumáticos Goodride	Neumáticos Seiberling	Neumáticos Kapsen
	Neumáticos BFGoodrich	Neumáticos Gremax	Neumáticos Semperit	Neumáticos Kenda
	Neumáticos Falken	Neumáticos GT Radial	Neumáticos Silverstone	Neumáticos Landsail
	Neumáticos Nexen	Neumáticos Infinity	Neumáticos Sportiva	Neumáticos Linglong
	Neumáticos Avon	Neumáticos Hifly	Neumáticos Starfire	Neumáticos Matador
	Neumáticos Cooper	Neumáticos Insa Turbo	Neumáticos Sunny	Neumáticos Maxtrek
	Neumáticos Marshall	Neumáticos Jinyu	Neumáticos Tracmax	Neumáticos Viking
		Neumáticos Zenises	Neumáticos Zeta	Neumáticos Tigar
		Neumáticos Kelly	Neumáticos Yokohama	Neumáticos Taurus
		Neumáticos Kormoran	Neumáticos Vredestein	Neumáticos Achilles
		Neumáticos Lassa	Neumáticos Debica	Neumáticos Wanli
		Neumáticos Riken		

Así pues a pesar de tener una gran diversidad de marcas, la composición es muy similar, en la **Tabla 2** se muestran los valores promedio de los componentes principales y características del neumático, así como, su análisis químico y la identificación de componentes peligrosos; se observa que el componente básico es el caucho con un porcentaje de 45 a 47 % y que el poder calorífico oscila de 32 a 34 MJ/Kg, el porcentaje de carbón es del 70%, pero existe la presencia del metal pesado plomo de 60 a 760 ppm.

**Tabla 2. Valores promedio de los componentes principales, análisis químico y componentes peligrosos del neumático.**

		Función
<b>Composición</b>	Caucho sintético y natural 45 – 47 %	Tensión estructural
	Negro de carbón 21.5 – 22 %	Propiedades físicas mejoradas
	Acero 16.5 – 25 %	Esqueleto estructural
	Textil 5.5 % (Vehículo de pasajeros)	Esqueleto estructural
	Óxido de zinc 1 – 2 %	
	Azufre 1%	Catalizador
	Aditivos 5 - 7.5 %	Agente vulcanizante
<b>Metales Pesados</b>	Contenido de trazas de cobre, cadmio y plomo	
<b>Alto poder calorífico</b>	32-34 MJ /Kg – 1 (1 tonelada	

es equivalente a 0,7 toneladas

petróleo)

<b>Temperatura de auto ignición</b>	400 ° C
<b>Peso</b>	6.5 - 11 Kg (Automóvil) 50 - 80 Kg (Camiones)

<b>Elemento químico</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
<b>Carbono (C)</b>	70
<b>Hidrógeno (H)</b>	7
<b>Azufre (S)</b>	1..3
<b>Cloro (Cl)</b>	0,2...0,6
<b>Fierro (Fe)</b>	15
<b>Óxido de Zinc (ZnO)</b>	2
<b>Dióxido de Silicio (SiO<sub>2</sub>)</b>	5
<b>Cromo (Cr)</b>	97-ppm
<b>Níquel (Ni)</b>	77-ppm
<b>Plomo (Pb)</b>	60-760ppm
<b>Cadmio (Cd)</b>	5-10ppm
<b>Talio</b>	0,2-0,3ppm

<b>Contenido del componente</b>	<b>(% en peso)</b>	<b>Contenido (g)</b>
<b>Compuestos de cobre</b>	Aprox. 0.02	Aprox. 1.4
<b>Compuestos de cadmio</b>	Max. 0.001	Max. 0.07
<b>Compuestos de zinc</b>	Aprox. 1	Aprox. 70
<b>Compuestos de plomo</b>	Max. 0.005	Max. 0.35
<b>Soluciones ácidas o ácidos en forma sólida.</b>	Aprox. 0.3	Aprox. 21
	Contenido de halógenos	Contenido de halógenos
<b>Compuestos organohalogenados</b>	Max. 0.10	Max. 7.7
<b>Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)</b>	0	0

Nota. Datos tomados de (Castro, 2007; Ramos et al., 2011; Sharma et al., 2000).

Es importante reconocer que la contaminación al ambiente empieza desde la manufactura de los mismos, la industria de los neumáticos presenta altos grados de

contaminación y un elevado consumo de energía, su principal contaminante es el carbono que afecta seriamente al entorno (Tsai, 2018), en su fabricación se emplean más de 200 componentes diferentes, con el objetivo especial de otorgarle una cualidad de alta resistencia haciéndolos prácticamente indestructibles, además, se consumen alrededor de 7,800 litros de agua para fabricar solo 4 neumáticos nuevos (TNU(Tratamiento neumáticos usados), 2017); la contaminación continua aun cuando va rodando (Tsai, 2018), estudios han revelado el desprendimiento de partículas ultra finas de la banda de rodadura generadas a una velocidad de 80km/h y han demostrado su incremento al exponer el neumático a una fricción severa (Park et al., 2018), existen elementos en la banda de rodadura que al desgastarse contaminan el ambiente, estos son metales pesados como: Níquel (Ni), Zinc (Zn), Cadmio (Cd), Plomo (Pb), entre otros (Adachi & Tainosho, 2004). Estudios sobre el ciclo de vida del neumático han concluido que la mayor contaminación al ambiente se genera durante su uso y el mayor impacto sobre la salud humana se genera durante su producción (Piotrowska et al., 2019).

## **2.2. GENERALIDADES DEL NEUMÁTICO DE DESUSO Y SU VALORIZACIÓN**

Generalmente los neumáticos tienen una vida útil de 50,000 Km (lo que equivale a unos 5 años) aunque depende del mantenimiento del vehículo y del estado de las rutas por las que transita (Sánchez, 2012), una vez que el indicador de desgaste de la banda de rodamiento muestra 1.6 mm de profundidad deberá cambiarse pues se considera el valor mínimo de seguridad (Manejo Responsable de Llantas Usadas, 2015). Un neumático de desuso es aquel que ha cumplido con el propósito para el cual ha sido creado y ha culminado su vida útil, ya sea por desgaste de la banda, por los kilómetros recorridos o por alguna falla.

La valorización del neumático de desuso está en la recuperación de sus materiales o bien aprovechando su poder calorífico. Los materiales que se pueden separar son el caucho, metal y la fibra. La valorización está en función de las propiedades que tiene el neumático, tales como: capacidad de absorción de vibraciones, gran capacidad de drenaje, peso reducido, elevada resistencia al corte, alta resistencia a agentes climatológicos, flexibilidad, alto poder calorífico, se puede determinar para que proceso de valorización es destinado (Cano et al., 2007; Sánchez, 2012).

Existen diversas técnicas que permiten llevar a cabo la valorización material y/o energética (Cano et al., 2007):

- Tecnologías fuera de los sistemas de reciclado del material,
- Tratamientos mecánicos,
- Tecnologías de reducción de tamaño,
- Tecnologías de regeneración,
- Otras tecnologías, como pirólisis e incineración.

## **Técnicas de valorización material**

**Reutilización:** los neumáticos desgastados enteros son utilizados para otros fines como rompeolas, barreras, taludes, juegos infantiles, etc. (Cano et al., 2007; Rodríguez, 2017).

**Reencauchado:** permite reutilizar la carcasa del neumático, al colocar una nueva banda de rodadura (Cano et al., 2007; Rodríguez, 2017).

**Molienda a temperatura ambiente:** consiste en la separación del metal, de la fibra y de la goma, reduciendo esta última a un polvo grueso o ultra fino (Cano et al., 2007; Rodríguez, 2017).

**Molienda criogénica:** es un proceso en el cual el caucho se enfría a muy bajas temperaturas (-200°C), usando nitrógeno líquido, lo que lo hace frágil y permite obtener partículas muy finas con molino de discos o martillos (Sharma et al., 2000).

**Molienda húmeda:** consiste en una serie de ruedas de molienda con agua pulverizada inyectada continuamente para asegurar el enfriamiento del polvo, una vez terminado el proceso se separa el agua del polvo y se seca (Cano et al., 2007).

**Desvulcanización:** los procesos son físicos y químicos; el primero se produce con la ayuda de una fuente de energía externa que pueden ser mecánicos, termo-mecánicos, crio-mecánicos, etc; en el segundo se emplean agentes químicos como los disulfuros (Cano et al., 2007).

## **Técnicas de valorización energética**

El proceso de valorización energética en general se subdivide en combustión (incineración) y pirólisis:

**Pirólisis:** en este proceso se calientan los trozos de neumático (1-3 cm) a temperatura moderada (400-800°C) en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo. La degradación térmica del material produce una descomposición del neumático donde los elementos orgánicos volatilizables (principalmente cadenas de caucho) se descomponen en gases y líquidos, y los elementos inorgánicos (principalmente acero y negro de carbono no volátil) permanecen como residuo sólido (Cano et al., 2007).

**Incineración:** el proceso de combustión es espontáneo por encima de 400°C, altamente exotérmico y una vez encendido se vuelve autosuficiente, presenta el inconveniente de la diferente velocidad de combustión de los diferentes componentes y la necesidad de depuración de los residuos por lo que no resulta fácil de controlar y además es contaminante (Rodríguez, 2017).

### **Aplicación de los materiales obtenidos en los procesos de valorización**

Al ser valorizado el neumático de desuso se obtienen diferentes materiales como neumático entero, en trozos, en tiras, en astillas, granulado de neumático, polvo de neumático, polvo fino de neumático, etc. Las aplicaciones de estos materiales son muy variadas desde aplicación en Ingeniería civil hasta productos industriales (Cano et al., 2007).

### **2.3. GENERALIDADES DEL NEUMÁTICO DE DESECHO**

En México, la Cámara Nacional de la Industria Hulera (CNIH) estima que el 91% de todos los neumáticos de desuso procede de coches, camionetas y camiones pesados, mientras que el 9% restante son de motocicletas, aviones, equipo de construcción y otros; La Asociación de Distribuidores de Llantas y Plantas Renovadoras A.C. (ANDELLAC), estimó que del total de neumáticos de desuso en la República Mexicana (Gobierno del Distrito Federal, 2002):

- El 5% es renovado,
- el 2% se utiliza en generación de energía,
- el 2% se deposita en centros de acopio autorizado
- y el 91% están en abandono o se utilizan sin control.

En esta investigación se definirá al neumático de desecho como un residuo de manejo especial cuya disposición final se encuentra en centros de acopio autorizados como se observa en la **Figura 7**, clandestinos (abandono) como se observa en la **Figura 8**, o son enviados a incineración en cementeras como se observa en la **Figura 9** o son incinerados a cielo abierto **Figura 10**.



**Figura 7. Centro de acopio autorizado, Navojoa, Sonora.**

Nota. Figura tomada de IESA (2017).



**Figura 8. Centro de acopio clandestino (abandono), Novolato, Sinaloa.**

Nota. Figura tomada de IESA (2017).



**Figura 9. Zona de almacenamiento de neumáticos previo a su uso como combustible en la industria cementera.**

Nota. Figura tomada de Periódico “El Observador”, (2018).



**Figura 10. Incineración a cielo abierto de neumático de desecho, Palmillas, Sinaloa.**

Nota. Figura tomada de IESA (2017).

Son cerca de 1,000 millones de neumáticos de desecho que se generan anualmente en el mundo, alrededor de 17 millones de toneladas (t) (López et al., 2012; Yadav & Tiwari, 2019), en los países desarrollados existe una tasa de generación para este residuo que es un neumático de desecho por habitante (peso promedio de 9kg) (COCEF, 2008; INECC & SEMARNAT, 2012; Yadav & Tiwari, 2019); se estima que se producen anualmente alrededor de 3.4 millones de t en Europa, 4.6 millones de t en Estados Unidos (Hooshmand

Ahour & Zandi-Atashbar, 2014), 1 millón de t en Japón (M. F. Laresgoiti et al., 2004), en México estiman una generación de 1,011.03 miles de t promedio anual calculado para el periodo de 2006 al 2012 (INECC & SEMARNAT, 2012).

Aplicando la tasa de generación a México y considerando la población total reportada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para 2018 que estima una población de 124, 737, 789 habitantes, se puede estimar que en ese año se desecharon más de 124 millones de neumáticos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018). El crecimiento rápido de las poblaciones y de las economías han traído como consecuencia un aumento en la generación de residuos (Ortiz et al., 2017), el crecimiento en México tomando desde el año 2015 hasta el 2018, fue de 119,530,753 millones (INEGI, 2015) a 124, 737, 789 millones de habitantes; solo en tres años la población aumento unos 5,207,036 millones.

Considerando los porcentajes estimados proporcionados por la ANDELLAC para el año 2018 se obtienen los siguientes datos:

- Se tienen 124, 737, 789 neumáticos en desuso,
- el 5% es renovado lo que corresponde a 6, 236, 889,
- el 2% se utiliza en generación de energía corresponde a 2, 494, 756,
- el 2% se deposita en centros de acopio autorizado corresponde a 2, 494, 756,
- y el 91% están en abandono o se utilizan sin control y corresponde a 113, 511, 388 que se convierten en neumáticos de desecho.

La información presentada en el párrafo anterior solo corresponde a lo desechado en un año, no se han realizado estimaciones en un periodo de tiempo ni se han contabilizado por año los neumáticos de desuso que son importados desde Estados Unidos Americanos (E.U.A.) legalmente y son desechados dentro del país, mucho menos se tienen datos puntuales de los neumáticos de desuso que entran a México como “gallitos” (se les denomina así a los neumáticos que son desechados en Estados Unidos Americanos y entran a México porque todavía tienen dibujo en la banda de rodamiento y son vendidos a menor precio), ni se tiene registro de las importaciones ilegales o traslados hormiga que suceden en la frontera con E.U.A.

## 2.4. RIESGOS PARA LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE

Los neumáticos no son biodegradables, esto se debe a que durante el proceso de fabricación existe la etapa de vulcanización, en la cual, el neumático recibe un tratamiento con azufre a altas temperaturas para endurecerlo, esto evita el ataque bacteriano y propicia que permanezca en el medio ambiente permanentemente hasta que se quemen (Matute et al., 2011; Murray, 2003). Por eso una vez que termina su vida útil, son depositados en patios, tiraderos clandestinos, vía pública y en centros de acopio públicos y privados, si no se manejan en la debida forma constituyen un riesgo para el entorno y la salud humana, ya que son el albergue ideal para roedores y criaderos de mosquitos como el *Aedes aegypti* y *A. albopictus* que transmiten el dengue y la fiebre amarilla (Higa et al., 2010; Honório et al., 2006), también crean problemas de contaminación visual y usurpan el espacio vital de la naturaleza (COCEF, 2008), la eliminación inadecuada puede bloquear los cauces de agua, los arroyos y los canales de descarga del agua de lluvia, con los cambios del flujo, las corrientes pueden causar erosión e inundaciones (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2011).

Por su composición es difícil de encender, pero una vez que lo hace es complicado de controlar y más de extinguir, un incendio puede durar meses ardiendo (Agency, 2010). Algunos estudios indican que la contaminación del agua causada por la escorrentía derivada de los incendios puede durar hasta 100 años y que la eliminación de estos en vertederos es perjudicial, ya que tienden a volver a la superficie y romper las capas, dañando el asentamiento de la tierra a largo plazo y su rehabilitación (Machin et al., 2017).

La incineración produce una gran cantidad de emisiones, incluido un amplio conjunto de hidrocarburos y compuestos halogenados clorados (metanos clorados, dioxinas y bifenilos policlorados formados por carbón, hidrogeno y cloro) (Downard et al., 2015). La contaminación resultante puede extenderse por una amplia zona y afectar no solo al aire, sino también al agua y el suelo (Agency, 2010).

La exposición humana a las emisiones de quema de neumáticos ocurre principalmente por inhalación del aire contaminado y depende de la proximidad a la fuente, la fuerza y la dispersión del humo (Downard et al., 2015). Los efectos del humo por inhalación pueden causar intoxicaciones agudas o subagudas, irritación y congestión de las vías respiratorias superiores e inferiores por partículas de hollín, sofocación por vapores ácidos (especialmente compuestos de azufre y nitrógeno), e intoxicación por monóxido de

carbono. Todos estos fenómenos pueden conducir al coma o la muerte por asfixia durante intensas exposiciones (Centre Français du Caoutchouc et des Polymères industriels, 2007).

En la **Tabla 3** se muestran los efectos en seres vivos y ecosistemas a la exposición a los componentes de las emisiones producto de la quema, algunos son el monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, dioxinas y furanos, entre otros.

**Tabla 3. Efectos en los seres vivos y ecosistemas causados por los componentes de las emisiones de la quema de neumático.**

<b>Contaminantes</b>	<b>Efectos</b>
<b>Monóxido de carbono</b>	En el organismo provoca una disminución de la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre, disfunciones cardiacas, daños en el sistema nervioso, dolor de cabeza, mareos y fatiga. Contribuye a la formación de gases de efecto invernadero: su vida media en la atmósfera es de tres meses.
<b>Hidrocarburos aromáticos policíclicos</b>	Provocan cáncer, defectos, alteraciones funcionales y malformaciones genéticas. Sobre el medio ambiente son persistentes y de difícil degradación, por lo que su permanencia en el ambiente puede durar años, afectando seriamente al medio acuático y terrestre.
<b>Dioxinas y Furanos</b>	La exposición afecta a órganos importantes como el corazón, sistema inmune, hígado, piel y la glándula de tiroides, llegando incluso a provocar cáncer reproductivo.  En el medio ambiente se degradan muy lentamente, y persisten durante muchos años, llegando a acumularse en los organismos y entrar en la cadena alimenticia.
<b>Ácido clorhídrico</b>	La inhalación puede causar neumonitis y edema pulmonar, dando lugar al Síndrome de Disfunción Reactiva de Vías Respiratorias, un tipo de asma inducido por la acción de químicos o de agentes irritantes. Es extremadamente irritante para las membranas mucosas de la nariz, garganta y tracto respiratorio.
<b>Benceno</b>	Es un reconocido carcinógeno, la inhalación de esta sustancia puede causar somnolencia, mareo, aceleración del latido del corazón, dolores de cabeza, temblores, confusión y pérdida del conocimiento. Por ingestión, provoca vómitos e irritación estomacal, mareos y convulsiones con rápidos latidos cardíacos. Es una sustancia que actúa en la sangre, provocando alteraciones en la médula de los huesos, y una disminución en el número de glóbulos rojos. Sobre el medio ambiente, es una sustancia cancerígena y muy tóxica para los animales provocando alteraciones y malformaciones en sus organismos.
<b>Bifenilos policlorados</b>	Son sustancias químicas que poseen una capacidad de biodegradación muy baja, lo que las hace muy persistentes en el medio ambiente; presentan propiedades de bioacumulación en los seres vivos, lo cual, hace que puedan concentrarse a medida que los organismos se consumen unos a otros a lo largo de la cadena alimentaria, pudiendo alcanzar en los grandes depredadores concentraciones muy superiores respecto a las que tendrían en los organismos inferiores, dando lugar a su vez a procesos de biomagnificación.  Algunos de los efectos pueden incluir daños en el sistema nervioso central, endocrino o reproductivo, así como malformaciones fetales, trastornos del comportamiento, diabetes, reducción del período de lactancia y carcinogénesis.
<b>Arsénico</b>	La exposición causa irritación del estómago e intestino, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel e irritación de los pulmones. La ingestión intensifica la posibilidad de desarrollar cáncer de piel, pulmón, hígado y linfa. A exposiciones muy altas puede causar infertilidad y abortos en mujeres, perturbación de

la piel, pérdida de la resistencia a infecciones, problemas de corazón, daño del cerebro tanto en hombres como en mujeres y provocar daños en el ADN.

Con respecto a su afección al medio ambiente, la presencia de arsénico inorgánico en el suelo y en las aguas superficiales, aumenta la posibilidad de alterar el material genético de los peces.

**Cadmio** Es irritante para los ojos y el tracto respiratorio, su inhalación puede originar edema pulmonar y fiebre de los humos metálicos, diarreas, dolor de estómago y vómitos severo, fractura de huesos, fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad, daño al sistema nervioso central, etc.

Con respecto a su incidencia en el medio ambiente las concentraciones de este elemento en el suelo son altas, existe una alteración en los procesos microbiológicos del suelo que pueden amenazar al buen funcionamiento del medio. En el medio marino puede bioacumularse en mejillones, ostras, gambas, langostas y peces.

**Metano** Por inhalación puede originar asfixia por la disminución del contenido de oxígeno en el aire, conllevando una pérdida de conocimiento e incluso la muerte. A efectos de una exposición cutánea puede causar efectos de congelación grave. Sobre el medio ambiente, se trata del segundo compuesto que más contribuye al calentamiento global de la tierra (efecto invernadero) con un 15 %, sólo superado por el dióxido de carbono con un 76%.

**Cromo** Su inhalación puede provocar problemas de salud bastante graves como malestar de estómago y úlcera, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmunitario, daño en los riñones e hígado, alteración del material genético, cáncer de pulmón. En el medio ambiente, las plantas absorben el cromo, pero un incremento de la sustancia en el suelo puede generar efectos adversos en su desarrollo.

**Vanadio** Su inhalación puede causar bronquitis y neumonía. Los efectos graves son irritación de pulmones, garganta, ojos y cavidades nasales, daño cardíaco y vascular, inflamación del estómago e intestinos, daño en el sistema nervioso, sangrado del hígado y riñones, irritación de la piel, temblores severos y parálisis, sangrado de la nariz y dolor de cabeza, mareos, cambios de comportamiento.

Las pruebas de laboratorio en pruebas con animales han mostrado, que el Vanadio puede causar daño en el sistema reproductivo de animales machos, y el Vanadio puede causar alteraciones del ADN en algunos casos, pero no puede causar cáncer en animales.

**Zinc** Por contacto es una sustancia que irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio, pudiendo causar efectos en la sangre (metahemoglobinemia), el riñón, provocar vómitos, náuseas, y anemias si se produce una ingestión de elevadas cantidades.

En el medio acuático provoca la acidificación de las aguas superficiales; en el suelo, el zinc tiene un efecto tóxico sobre las plantas, impidiendo su crecimiento y desarrollo, y limitando sus condiciones de supervivencia.

**Níquel** La inhalación puede provocar inflamaciones y ulceraciones de la cavidad nasal, fallos respiratorios, desordenes del corazón y en contacto con la piel puede provocar dermatitis, entre otras complicaciones.

Para los animales es un elemento cancerígeno.

---

Nota. Elaborado con datos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2011), Gobierno de España (s/f).

## 2.5. ESTUDIOS ECOTOXICOLÓGICO SOBRE NEUMÁTICOS

Existen estudios del impacto ecotoxicológico del neumático, la mayoría se han enfocado en lixiviados formados con ralladura obtenida de la banda de rodamiento, sometidos a diferentes temperaturas y han sido evaluados bajo diferentes condiciones, con o sin presencia de radiación ultravioleta para identificar posibles efectos a corto plazo; los organismos acuáticos de referencia han sido de diferentes órdenes taxonómicos, por ejemplo, peces, crustáceos y algas (Marwood et al., 2011; Wik et al., 2009; Wik & Dave, 2006, 2005). Uno de los crustáceos modelo más empleados en estos estudios ecotoxicológicos ha sido el bioindicador *Daphnia magna*, ya que es un representante importante de las comunidades dulceacuícolas por su amplia distribución geográfica. Presenta ventajas como: su reproducción partenogenética, corto ciclo de vida, producción de un alto número de crías, sensibilidad a una amplia gama de compuestos tóxicos y su relativa facilidad de cultivo en el laboratorio, conforme a la NMX-AA-087-SCFI-2010 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010).

En 1995, el Instituto Pasteur de Lille (Francia) llevó a cabo dos estudios para conocer la toxicidad del polvo de caucho extraído de carcassas de neumáticos en organismos como algas *S. Capricornutum*, crustáceos *Daphnia magna* y peces *Brachydanio rerio*, en ninguna de las pruebas reportaron toxicidad (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2011).

En 2005, Wik y Dave llevaron a cabo un estudio para investigar si podían emplearse las pruebas de toxicidad con *Daphnia magna* como prueba de selección para el etiquetado ambiental de los neumáticos de automóvil. En este estudio se midió la toxicidad este organismo de 12 neumáticos de automóvil elegidos al azar, rallaron la banda de rodadura en pequeños trozos, para simular el material del desgaste y la equilibraron con agua de dilución durante 72 h antes de la adición de los organismos. Las CE50 de 24 h oscilaron entre 0.29g y 32 g/L y las CE50 a las 48 h variaron de 0.0625g a 2.41 g/L. Obtuvieron que los neumáticos de verano eran más tóxicos que los de invierno. Este estudio demostró que el método podría utilizarse como base para el etiquetado medioambiental de los neumáticos de automóviles (Wik & Dave, 2005); En el 2006, llevaron a cabo una investigación sobre los efectos tóxicos de 25 neumáticos diferentes. En este estudio rallaron la banda de rodadura, para simular el material del desgaste y la equilibraron con agua de dilución a 44 °C durante 72 h, luego filtraron el caucho de los lixiviados y agregaron los organismos de prueba. La CE50 a las 48 h fue de 0.5g/L a > 10.0 g/L (Wik & Dave, 2006); En el 2009, investigaron la

toxicidad de tres neumáticos diferentes utilizando una batería de organismos de prueba que fueron algas verdes *Pseudokirchneriella subcapitata* (inhibición del crecimiento 72 h), crustáceos *Daphnia magna* (inmovilidad 24 y 48 h) y *Ceriodaphnia Dubia* (48 h de supervivencia y 9 días de reproducción y supervivencia) y huevos de pez cebra *Danio rerio* (48 h letalidad). Para realizar el lixiviado rasparon el caucho y añadieron agua desionizada. El polvo del caucho lo lixiviaron seis veces secuencialmente. Los resultados que obtuvieron fue que la reproducción de *C. dubia* era el criterio más sensible, con una CE<sub>50</sub> de 0.013 g/L. Encontraron que la toxicidad de todos los neumáticos se redujo mediante las lixivitaciones secuenciales y después de la sexta lixiviación las CE<sub>50</sub> fueron > 0.1 g/L para todos los criterios de valoración. Realizaron evaluaciones de identificación de toxicidad para caracterizar los compuestos y concluyeron que la toxicidad para la mayor extensión fue causada por zinc y compuestos orgánicos lipofílicos (Wik et al., 2009).

En el 2011, Marwood y colaboradores, realizaron un estudio con elutriados de sedimentos de partículas de desgaste de la banda de rodamiento, los sedimentos fueron obtenidos de un laboratorio de simuladores de carreteras del Instituto Federal de Investigación de Carreteras de Alemania, se rodaron tres diferentes neumáticos, los sedimentos se combinaron para formar un solo compuesto y lo tamizaron a 150 µm, luego añadieron agua dura y realizaron cuatro concentraciones de 100, 500, 1000 y 10000 mg/L. El contenido lo mezclaron usando rotores de acero inoxidable durante 24 h a 22 ± 2 °C. Posteriormente realizaron las evaluaciones de toxicidad aguda en tres organismos diferentes de prueba, uno de ellos el pez *Pimephales promelas*, en el crustáceo *Daphnia magna* y en el alga *Pseudokirchneriella subcapitata*. Como conclusión expresan que las partículas de desgaste no fueron agudamente tóxicas para ninguna especie, debido a que todos los valores que obtuvieron de las CE<sub>50</sub> superaron los 10,000 mg/L. También por medio de un análisis de componentes identificaron que el zinc y la anilina son los tóxicos más probables (Marwood et al., 2011).

## CAPÍTULO III. MARCO JURÍDICO

---

En México existe un marco jurídico que protege al ambiente de este contaminante, definiendo las responsabilidades de cada ente participativo, explica los instrumentos de la política de prevención y gestión integral de los residuos, así como, las sanciones por daño al ambiente.

En la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2018), en su Título Primero Disposiciones Generales, en el Artículo 1, sección VI, expresa que es su competencia definir las responsabilidades de los productores, importadores, exportadores, comerciantes, consumidores y autoridades de los diferentes niveles de gobierno, así como de los prestadores de servicios en el manejo integral de los residuos. Es en su Título Tercero Clasificación de los Residuos, Artículo 19, sección X, clasifica a los neumáticos usados como residuos de manejo especial. En el Título Cuarto Instrumentos de la Política de Prevención y Gestión Integral de los Residuos, Capítulo II, Planes de Manejo, Artículo 28, sección III, expresa que estarán obligados a la formulación y ejecución de los planes de manejo los grandes generadores y los productores, importadores, exportadores y distribuidores de los productos que al desecharse se convierten en residuos sólidos urbanos o de manejo especial, que se incluyan en los listados de residuos de las normas oficiales mexicanas correspondientes; los residuos de envases plásticos, incluyendo los de poliestireno expandido; así como los importadores y distribuidores de neumáticos usados, bajo los principios de valorización y responsabilidad compartida.

Existe la NOM-161-SEMARNAT-2011, que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo, en el Anexo Normativo se presenta, el Listado, es en el número IV donde aparece el neumático de desecho como un residuo de las actividades del transporte federal, que incluye servicios en los puertos, aeropuertos, centrales camioneras y estaciones de autotransporte y los del transporte público, deben presentar Plan de Manejo todo generador de una cantidad mayor a 10 toneladas al año o su equivalente. En esta misma Norma, en el número VIII, en el apartado "c", los neumáticos de desecho están expresados como productos que al transcurrir su vida útil se desechan en una cantidad mayor a 10 toneladas por residuo al año y requieren de un manejo especial. Esta norma menciona que son las entidades federativas quienes establecerán las obligaciones de los generadores, distinguiendo grandes y pequeños, y las de los prestadores de servicios de residuos de manejo especial,

y formularán los criterios y lineamientos para su manejo integral, asimismo, prohíbe la disposición final en predios baldíos, barrancas, cañadas, ductos de drenaje y alcantarillado, en cuerpos de agua y cavidades subterráneas. Bajo esta norma los fabricantes, importadores, distribuidores, gestores y generadores quedan obligados a hacerse cargo de la gestión de los neumáticos usados y a garantizar su recolección de acuerdo con lo determinado por la norma oficial mexicana correspondiente y sus planes de manejo (NOM-161-SEMARNAT-2011, 2013).

### 4.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

Esta investigación es abordada desde las tres dimensiones del Desarrollo Sustentable (Ambiental, Social y Económico); el enfoque es transdisciplinario, con el propósito de vislumbrar las variables que integran al sistema (Laguna et al., 2016; Mellado & Carracedo, 1993).

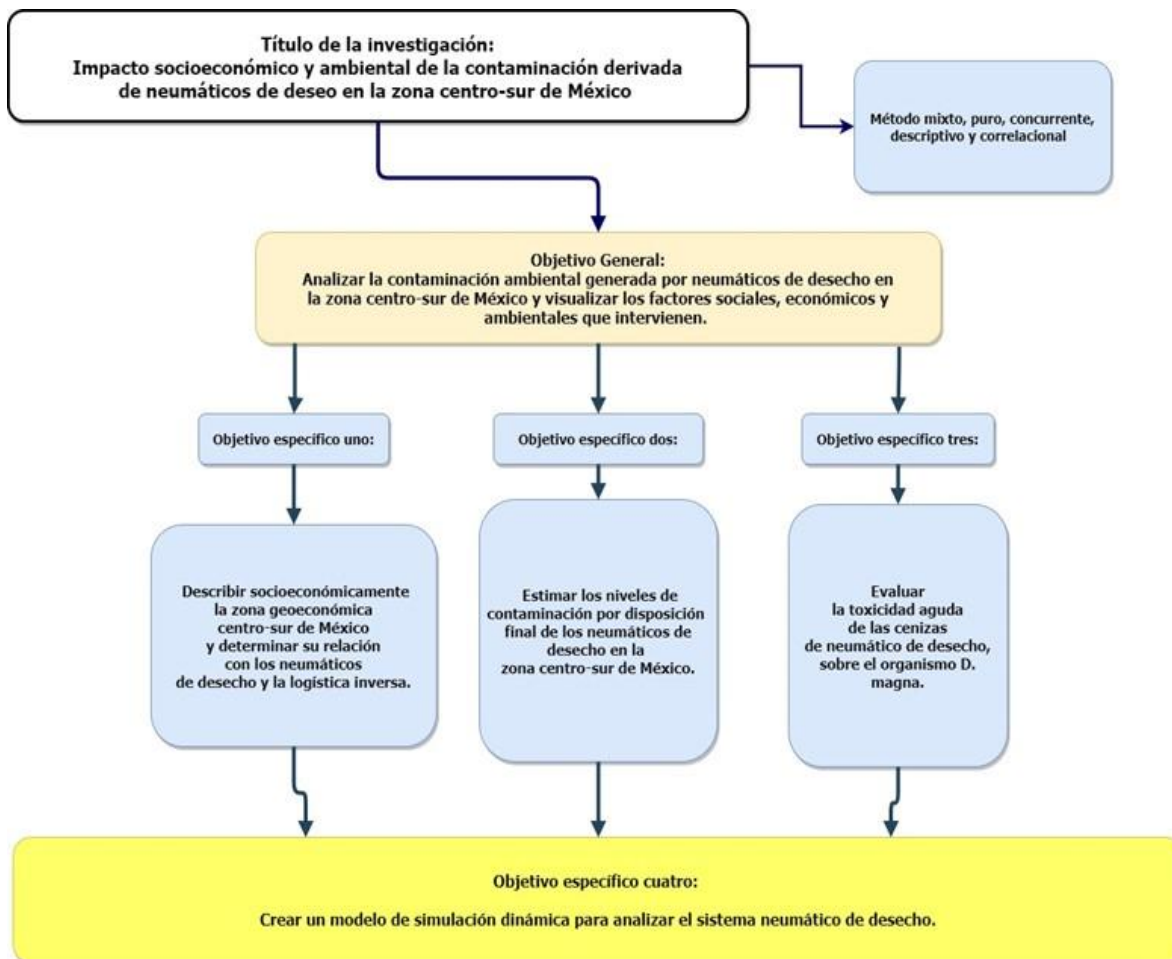
El método utilizado fue mixto de tipo exploratorio, descriptivo, inferencial y concurrente, con la única finalidad de lograr una mayor amplitud y profundidad. El objetivo fue analizar la contaminación ambiental generada por neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México y visualizar los factores sociales, económicos y ambientales que intervienen. Se contó con fuentes de información primaria y secundaria, los tipos de datos fueron cualitativos y cuantitativos, recolectados con herramientas como: encuesta cerrada, experimentos en laboratorio y la utilización de softwares para el análisis de datos y su representación (Sampieri et al., 2014; Sampieri & Torres, 2018). Para el cumplimiento, se plantearon cuatro objetivos específicos.

### 4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 4.2.1. Metodología objetivo general

Para el cumplimiento del objetivo general que fue “Analizar la contaminación ambiental generada por neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México y visualizar los factores sociales, económicos y ambientales que intervienen”, se redactaron cuatro objetivos específicos, los primeros tres ayudaron a recolectar la información y el cuarto permitió modelar a través de una simulación dinámica al sistema neumático de desecho con la información obtenida (**Figura 11**).

Cada uno de los objetivos específicos fue diseñado para cumplir con ciertas variables del sistema, el primero sirvió para obtener información de la dimensión económica; el segundo y el tercero para la dimensión ambiental y el cuarto permitirá visualizar estas dimensiones dentro del sistema en una simulación dinámica de las variables.



**Figura 11. Diagrama de flujo para analizar el impacto socioeconómico y ambiental de la contaminación derivada de neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México.**

#### 4.2.2. Metodología objetivo específico uno

Describir socioeconómicamente la zona centro-sur de México, y establecer si las empresas manufactureras tienen una relación con los neumáticos de desecho y el proceso de la logística inversa.

Para describir socioeconómicamente la zona geoeconómica se utilizaron las bases de datos oficiales del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018) y la información obtenida de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020b), la búsqueda se realizó por estados y posteriormente se analizó para representar la zona centro-sur.

La información fue Actividades económicas, número de empresas manufactureras de neumáticos, recursos naturales, población (habitantes), parque vehicular en circulación, índice de marginación, ODS 1-1.1.1.a Proporción de la población que vive por debajo del umbral internacional de la pobreza (1.90 dólares diarios), ODS 2 -2.1.2.a Proporción de la población con inseguridad alimentaria moderada o severa, ODS 4 -4.a.1.a Proporción de escuelas con acceso a electricidad, ODS 6 -6n.1.1 Porcentaje de la población que tiene acceso al agua entubada diariamente así como al saneamiento, ODS 8 -8.5.5 Relación entre ocupación y población en edad de trabajar y ODS 9 -9n.3.1 Porcentaje del Personal Ocupado generado por las MIPyMEs. Posteriormente se elaboraron los mapas con la finalidad de tener una representación gráfica y poder diferenciar la información de la zona por estado que la integra, para esto se usó el software (QGIS.org, 2021), esta información se muestra en la **Figura 12**.

Para determinar la relación con los neumáticos de desecho y la logística inversa se tomó como base la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE, 2019), para localizar las empresas manufactureras de neumáticos en la zona. Se elaboró un cuestionario estructurado de diez preguntas enfocadas en las actividades que integran a la logística inversa dentro de la manufactura de neumático, el cual, fue validado por parte de los investigadores **Tabla 4**; se aplicó la encuesta estructurada vía telefónica al gerente de producción o similar de cada empresa y para la realización del mapa Empresas manufactureras de llantas y cámaras, se utilizó como herramienta el software de Qgis 3.16. (QGIS.org, 2021) (**Figura 12**).

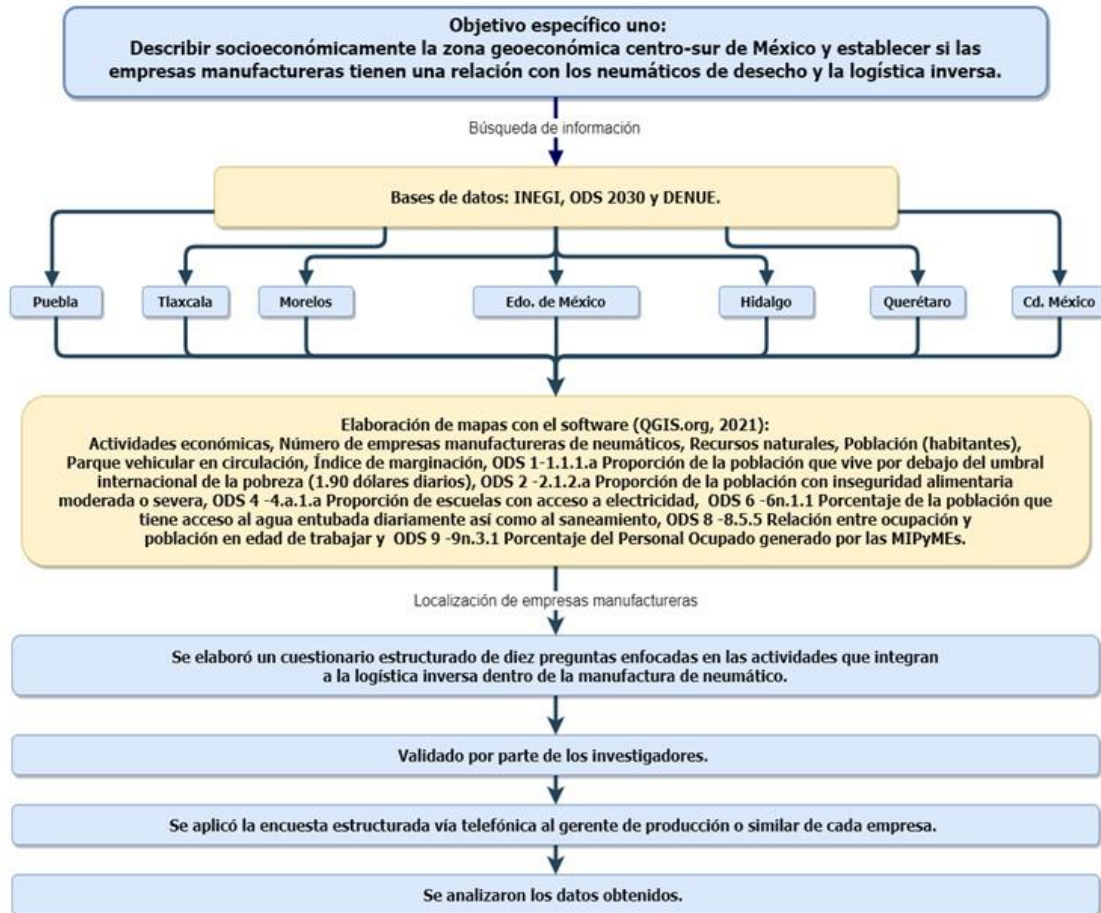


Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología para el objetivo específico uno.

Tabla 4. Cuestionario para encuesta sobre logística inversa dirigida a empresas manufactureras.

- 1.- ¿Conoce el termino de logística inversa?
- 2.- ¿Conoce las etapas del proceso de manufactura del neumático?
- 3.- ¿En la etapa del diseño se realizan modificaciones con la finalidad de ayudar a disminuir el uso de materias primas?
- 4.- ¿En alguna de las etapas del proceso de fabricación se introduce materia prima reciclada?
- 5.- ¿La empresa practica el reencauchamiento de neumáticos?
- 6.- ¿La empresa recupera los neumáticos después de su vida útil?
- 7.- ¿La empresa tiene una política de reducción de emisiones contaminantes?

8.- ¿La empresa tiene como objetivo dentro de alguna de las etapas del proceso de manufactura la minimización de residuos generados?

9.- ¿Considera que implementar alguna de las acciones mencionadas en las preguntas anteriores podría mejorar los ingresos económicos de la empresa?

10.- ¿Considera que es posible ayudar al medio ambiente y al mismo tiempo aumentar las ganancias de la empresa a través del mejoramiento e implementación en alguna de las etapas del proceso de manufactura?

---

#### 4.2.3. Metodología objetivo específico dos

Estimar los niveles de contaminación por disposición final de los neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México.

Para estimar los niveles de contaminación por disposición final, se tomó la información mencionada sobre los porcentajes de los tres tipos de disposición final que recibe este residuo (abandono, generación de energía durante la incineración en los hornos de cemento, centros de acopio autorizados) emitidos por la ANDELLAC (Gobierno del Distrito Federal, 2002), se multiplicaron por la regla universalmente aceptada (COCEF, 2008). Se debe tener presente que el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático formula la generación de este residuo en un neumático de desecho por habitante con un peso promedio de 9kg y son para automóvil. En la **Tabla 5** se muestran estos valores mencionados:

**Tabla 5. Valores para la estimación de los niveles de contaminación por disposición final.**

Tasa de generación	Porcentaje generación de energía	Porcentaje depósito en centros de acopio autorizados	Porcentaje centros de acopio clandestinos (abandono)
1 x habitante	2%	2%	91%

Nota. Datos obtenidos de (COCEF, 2008; Gobierno del Distrito Federal, 2002; INECC & SEMARNAT, 2012).

Para la estimación de la contaminación generada por la disposición final correspondiente a la incineración a cielo abierto, se realizó un experimento para estudiar el comportamiento del neumático de desecho; se seleccionaron cinco neumáticos de desecho que se encontraban en abandono en un terreno baldío ubicado en la colonia La pedrera, Puebla, Pue.; de cada uno se tomaron tres fragmentos de distinta parte de su banda de rodamiento, las muestras fueron pesadas en una báscula gramera , (Pocket modelo M-HSeries Scale para un peso máximo de 500g ± 0.01g.), los pesos van de entre 9.10 - 11.47g.

La incineración de cada muestra se realizó por separado sobre una placa de acero 10\*10cm y fueron expuestas a una flama directa, está se mantuvo hasta la presencia de humo negro (indicador para realizar las primeras tomas de lecturas de las diferentes variables) y de una llama sostenible; se registró tiempo de ignición, se realizaron 3 tomas de temperatura con un termómetro infrarrojo con imagen (FLIR modelo TG165) (al inicio, después de 3 min. y al final cuando ya no había presencia de llama), se cuantificó por triplicado la emisión de monóxido de carbono (CO) mediante un monitor portátil marca RKL instruments modelo GX-2012 (ppm partes por millón) (al inicio, después de 3 min. y al final cuando ya no había llama) y sobre las cenizas restantes, para obtener el porcentaje de sólidos volátiles al peso inicial se le restó el peso final.

Para la estimación de quema a cielo abierto se realizó un diseño cuantitativo – no experimental – transversal – exploratorio, descriptivo y correlacional. Los datos obtenidos se analizaron con un paquete estadístico llamado R commander, primero con un test de ShapiroWilk para conocer si siguieron o no una distribución normal, posteriormente un test de Bartlett para probar la homogeneidad de varianzas; al tener una distribución normal se realizó una serie de análisis paramétricos, el primero un análisis de varianzas para comparar múltiples medias (ANOVA de una vía), una vez que se aceptó o rechazó la hipótesis nula se realizó un *post hoc*, que fue la prueba de Tukey que es una comparación múltiple entre los grupos para establecer las diferencias significativas, también se realizó un análisis de correlación de Pearson y un contraste de hipótesis, las variables analizadas fueron: monóxido de carbono - peso inicial - tiempo, peso final - peso inicial - temperatura, peso inicial -sólidos volátiles – temperatura.

Una vez obtenidos los datos de la incineración a cielo abierto se procedió a juntar las cenizas de las diferentes muestras, con la finalidad, de imitar lo que queda en el suelo después de un incendio de neumáticos de desecho, pues se conoce que en estos incidentes los residuos consumidos son de diferentes tipos. Las cenizas se analizaron bajo la Norma Mexicana para el Análisis de Agua, Determinación de Metales por Absorción Atómica en Aguas Naturales, Naturales Tratadas, Potables, Residuales y Residuales Tratadas (NMX-AA-051-SCFI-2001) y la Norma Mexicana Residuos – Determinación de Compuestos Orgánicos Volátiles por Cromatografía de Gases Acoplado a un Espectrómetro de Masas de Productos de Extracción de Constituyentes Tóxicos (PECT), Método de Prueba (NMX-AA-103-SCFI-2006), así también se midió el tamaño de partícula.

#### 4.2.4. Metodología objetivo específico tres

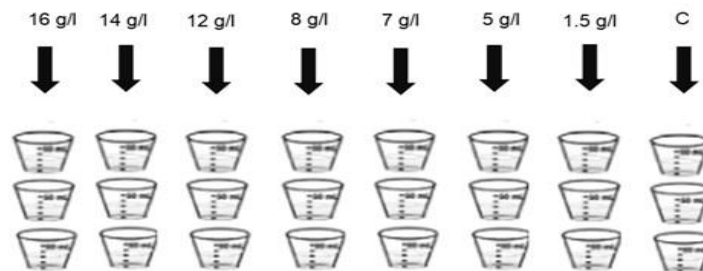
Evaluar la toxicidad aguda y crónica de las cenizas de neumático de desecho, sobre el modelo ecotoxicológico *D. magna*.

El organismo *D. magna* presenta gran sensibilidad a una amplia gama de compuestos tóxicos, siendo esta una de las características principales para que sea usado internacionalmente en pruebas de toxicidad (Linares et al., 2020).

Inicialmente se desarrolló el método de cultivo de *D. magna* indicado en la NMX-AA-087-SCFI-2010 en donde se señalan las condiciones ambientales para el mantenimiento y cultivo óptimo de los organismos, los cuales fueron previamente obtenidos y caracterizados en el Laboratorio de Ecología y Restauración de Sistemas Acuáticos de la Facultad de Ciencias Biológicas de la BUAP. Se mantuvieron grupos de 20 daphnidios en 1 L de agua dura reconstituida (dureza total= 250 mg/L de CaCO<sub>3</sub>, pH=7.5), el medio fue renovado tres veces por semana. Los cultivos se mantuvieron a temperatura ambiente, con un fotoperiodo de 16:8 (luz: oscuridad) y una alimentación a base Spirulina y una mezcla de levadura, TetraVeggieTM en una concentración de 250,000 células/mL, cada tercer día. Se implementaron 20 de estas unidades que serán empleadas en pruebas subsecuentes.

Se obtuvo un desarrollo normal en la dinámica poblacional durante el monitoreo de 21 días de estos 20 organismos iniciales, en donde el número de neonatos superó al número de adultos y jóvenes, al final de este tiempo se tuvo una población de 342 individuos, esto garantizó la calidad de la población para la posterior evaluación de toxicidad aguda.

Para la prueba de toxicidad aguda la metodología seguida fue la descrita en la NMX-AA-087-SCFI-2010; las características del organismo empleado para este estudio fueron: neonatos con menos de 24 horas de nacidos de *D. magna*, obtenidos de la 3ª generación de una sola madre joven con crecimiento y reproducción adecuados. Se realizaron elutriados con diferentes concentraciones de cenizas de neumático de desecho (obtenidas del experimento realizado en el objetivo específico número dos) en agua dura reconstituida (las diluciones las seleccionamos con base a la literatura citada (Marwood et al., 2011; Wik et al., 2009; Wik & Dave, 2006, 2005)), fueron agitados durante 10 minutos continuos y reposaron 24 horas. Se realizaron tres replicas para cada dilución, cada recipiente con 30ml y 10 neonatos **Figura 13**.



**Figura 13. Condiciones de la prueba.**

Nota. La Figura 13 muestra la prueba definitiva, con siete diluciones. Estas se elaboraron a partir de 1.5 g/L hasta los 16 g/L. El conteo de inmovilidad o mortandad para el cálculo de la  $CE_{50}$  se efectuó a las 48 horas.

Los datos obtenidos del conteo de organismos inmóviles o muertos de cada dilución después de 48 h de estar expuestos al tóxico, se analizaron con el método Probit con un paquete estadístico llamado R commander (The R Foundation, 2021) con la finalidad de obtener la concentración efectiva media ( $CE_{50}$ ).

Para la prueba de toxicidad crónica se seleccionaron tres concentraciones subletales (1.5 g/L, 3 g/L, 4.5 g/L) y se realizaron los elutriados correspondientes, fueron agitados durante 10 minutos continuos y reposaron 24 horas; se conformaron 4 grupos de estudios con tres replicas cada uno, 1) Grupo Control en medio de cultivo solamente, 2) Grupo con medio de cultivo en presencia de la concentración subletal de cenizas de 1.5 g/L (A), 3) Grupo con medio de cultivo en presencia de la concentración subletal de cenizas de 3 g/L (B), 4) Grupo con medio de cultivo en presencia de la concentración subletal de cenizas de 4.5 g/L (C). Los grupos de estudio estuvieron conformados por 20 neonatos del cultivo original menores a 24 horas, dispuestos en recipientes cilíndricos con capacidad de 150 mL conteniendo 120 mL de medio de cultivo, el cual, se cambió cada tercer día para garantizar que la concentración de cenizas fuera constante. Cada tratamiento se realizó por triplicado y se monitoreo en los días 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 19, registrando los cambios en el desarrollo poblacional para evaluar tasa finita de crecimiento poblacional, porcentaje de supervivencia, registro de su primera reproducción (días), reproducción total, neonatos por hembra rendimiento (daphnidos/días).

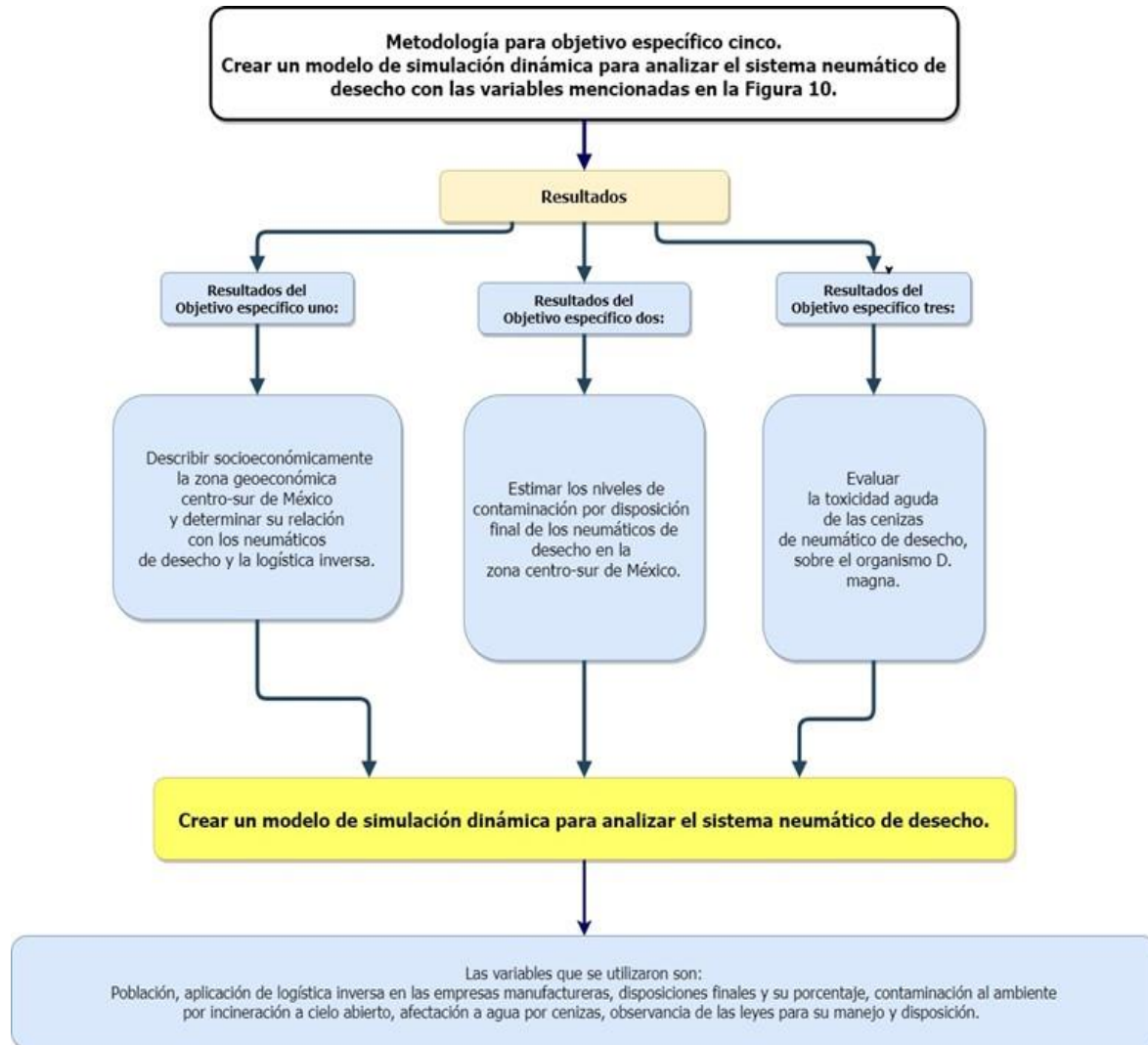
#### 4.2.5. Metodología objetivo específico cuatro

Crear un modelo de simulación dinámica para analizar el sistema neumático de desecho con la información obtenida de los objetivos específicos.

Para el cumplimiento de este objetivo, se realizó un modelo que permitió visualizar las dimensiones de la triada de desarrollo sustentable, así como, la información obtenida de

los objetivos específicos anteriores, la cual, fue de suma importancia para la elaboración de esta simulación dinámica **Figura 14**.

El software utilizado para su elaboración es Vensim, es gratuito y de libre acceso, se eligió porque permite construir de forma flexible diagramas de influencias y diagramas de Forrester.

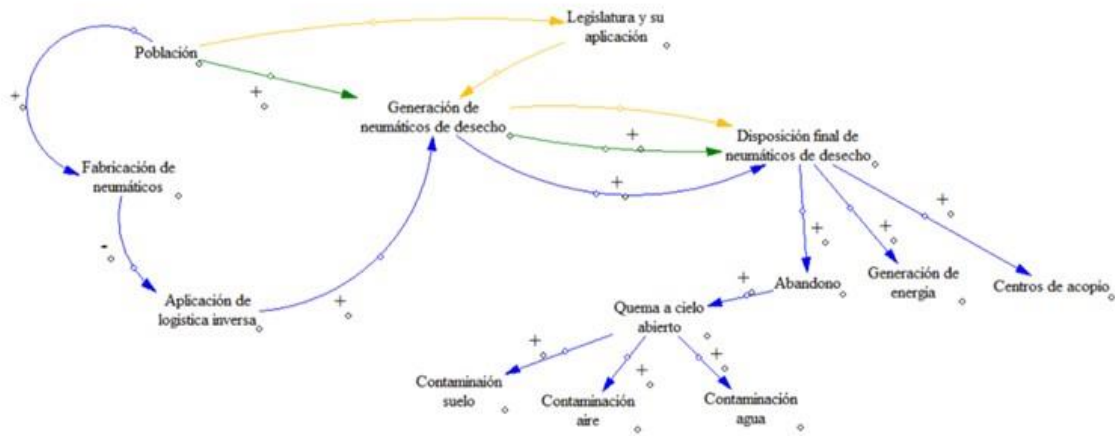


**Figura 14. Diagrama de flujo de la metodología para el objetivo específico cuatro.**

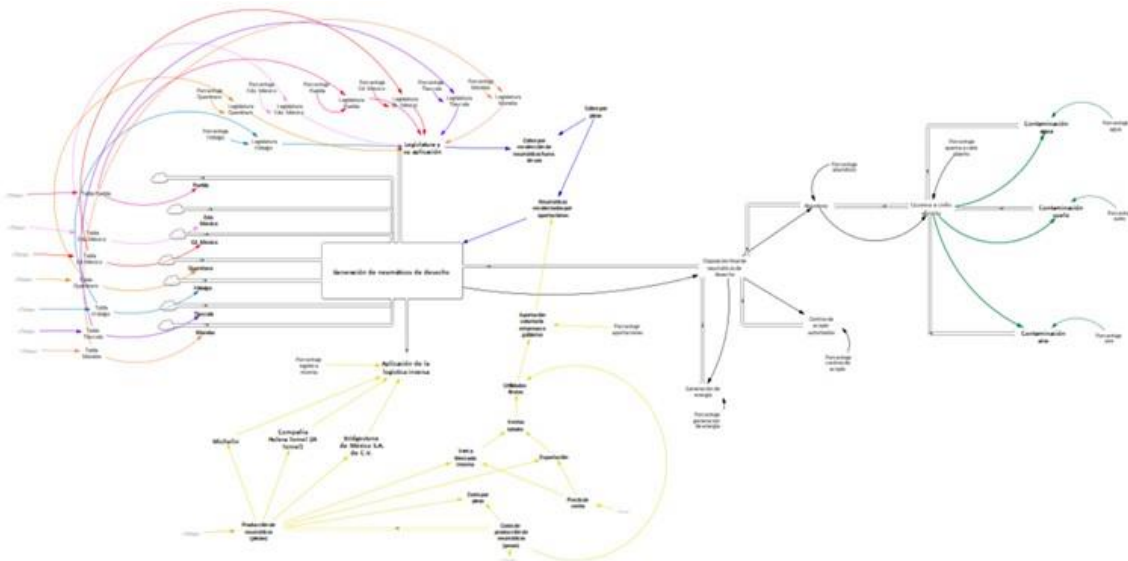
Lo primero que se elaboró fue el diagrama de influencias sistema neumático de desecho **Figura 15**, con la intención de visualizar las relaciones existentes entre las variables que lo integran, posteriormente se realizó el diagrama de Forrester **Figura 16**, el cual, permitió la simulación del sistema con los datos obtenidos de esta investigación (Ventana Systems, 2015). Se realizaron cinco simulaciones con el objetivo de observar la diferencia entre la

situación real y los panoramas en los cuales se involucran las empresas manufactureras y la aplicación de la legislación.

Las simulaciones fueron con la aplicación de la logística inversa y de la legislatura a un 1%, 2%, 3% y 4%, así como, la simulación actual, en la cual, el porcentaje es el obtenido de los resultados del objetivo 2.



**Figura 15. Diagrama de influencias sistema neumáticos de desecho.**



**Figura 16. Diagrama Forrester sistema neumáticos de desecho.**

### 4.3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En esta investigación se consideró la selección de la zona de estudio centro-sur de México debido, a que alberga empresas manufactureras y centros de distribución, además, cuenta con el mayor número de individuos en el país; tiene un parque vehicular en circulación de 18,925,673 y existe el problema de la acumulación de neumáticos de desecho.

La zona está integrada por los estados de Puebla, México, Morelos, Hidalgo, Tlaxcala, Querétaro y la Ciudad de México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020a) (**Figura 17**); esto conforme a la división que realizó Bassols y Cantú, quienes tomaron en cuenta cuatro condiciones básicas: la primera condición es la existencia de importantes recursos naturales, que permiten el crecimiento económico de una o varias actividades productivas; la segunda la necesidad de que las diversas partes de la región se complementen entre sí, estableciendo relaciones internas; la tercera condición es la existencia de cierta homogeneidad en el grado de desarrollo de las fuerzas de producción, que puede ser diferente de la que corresponde a regiones vecinas, con las cuales establece ligas de carácter económico inevitables; la cuarta son las diversas actividades productivas que se desarrollan (Bassols, 1992; Cantú, 2009).



**Figura 17. Localización y composición de la zona centro-sur.**

## CAPITULO V. RESULTADOS

Para el cumplimiento del objetivo general “Analizar la contaminación ambiental generada por neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México y visualizar los factores sociales, económicos y ambientales que intervienen”, se redactaron cuatro objetivos específicos, cada uno de ellos tuvo una metodología y sus propios resultados.

Los resultados obtenidos se muestran por objetivo específico, cabe mencionar que el número cuatro fue alimentado con los resultados de los objetivos específicos anteriores.

### 5.1. OBJETIVO ESPECÍFICO UNO

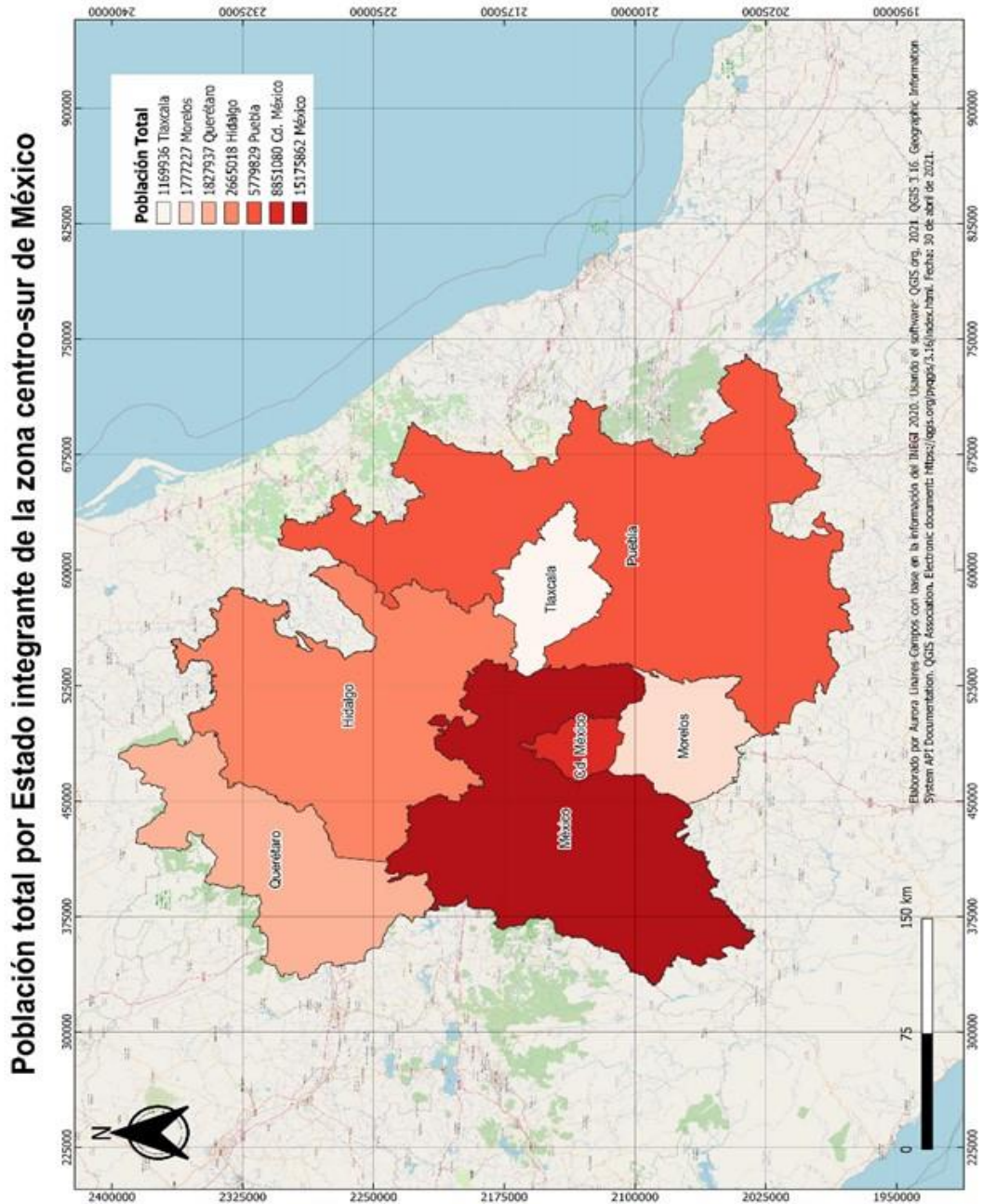
Como resultados se presenta la **Tabla 6** con la descripción de la zona geoeconómica de este estudio, recordemos los Estados que la integran: Puebla, México, Ciudad de México, Morelos, Hidalgo, Tlaxcala y Querétaro.

**Tabla 6. Características de la zona geoeconómicas centro-sur de México.**

<b>Actividades Económicas</b>	Concentración Industrial, Comercio, Instituciones financieras, Telecomunicaciones, Servicios públicos, Actividades políticas y culturales.	<b>ODS 1 -1.1.1.a Proporción de la población que vive por debajo del umbral internacional de la pobreza (1.90 dólares diarios)</b>	5%
<b>Número de empresas manufactureras de neumáticos</b>	3 Brigestone Michellin JK Tornel	<b>ODS 2-2.1.2.a Proporción de la población con inseguridad alimentaria moderada o severa</b>	19%
<b>Recursos Naturales</b>	Terrenos de alturas medias, tierras bajas, volcanes, bosques de coníferas, bosques mixtos, ríos (Panuco, Atoyac, Puebla).	<b>ODS 4-4.a.1.a Proporción de escuelas con acceso a electricidad</b>	92%
<b>Población (habitantes)</b>	37,246,889	<b>ODS 6 -6n.1.1 Porcentaje de la población que tiene acceso al agua entubada diariamente, así como al saneamiento</b>	44%
<b>Parque vehicular en circulación</b>	18,925,673	<b>ODS 8-8.5.5 Relación entre ocupación y población en edad de trabajar</b>	56%
<b>Índice de marginación</b>	Promedio -0.246 Medio	<b>ODS 9-9n.3.1 Porcentaje del Personal Ocupado generado por las MIPyMEs</b>	74%

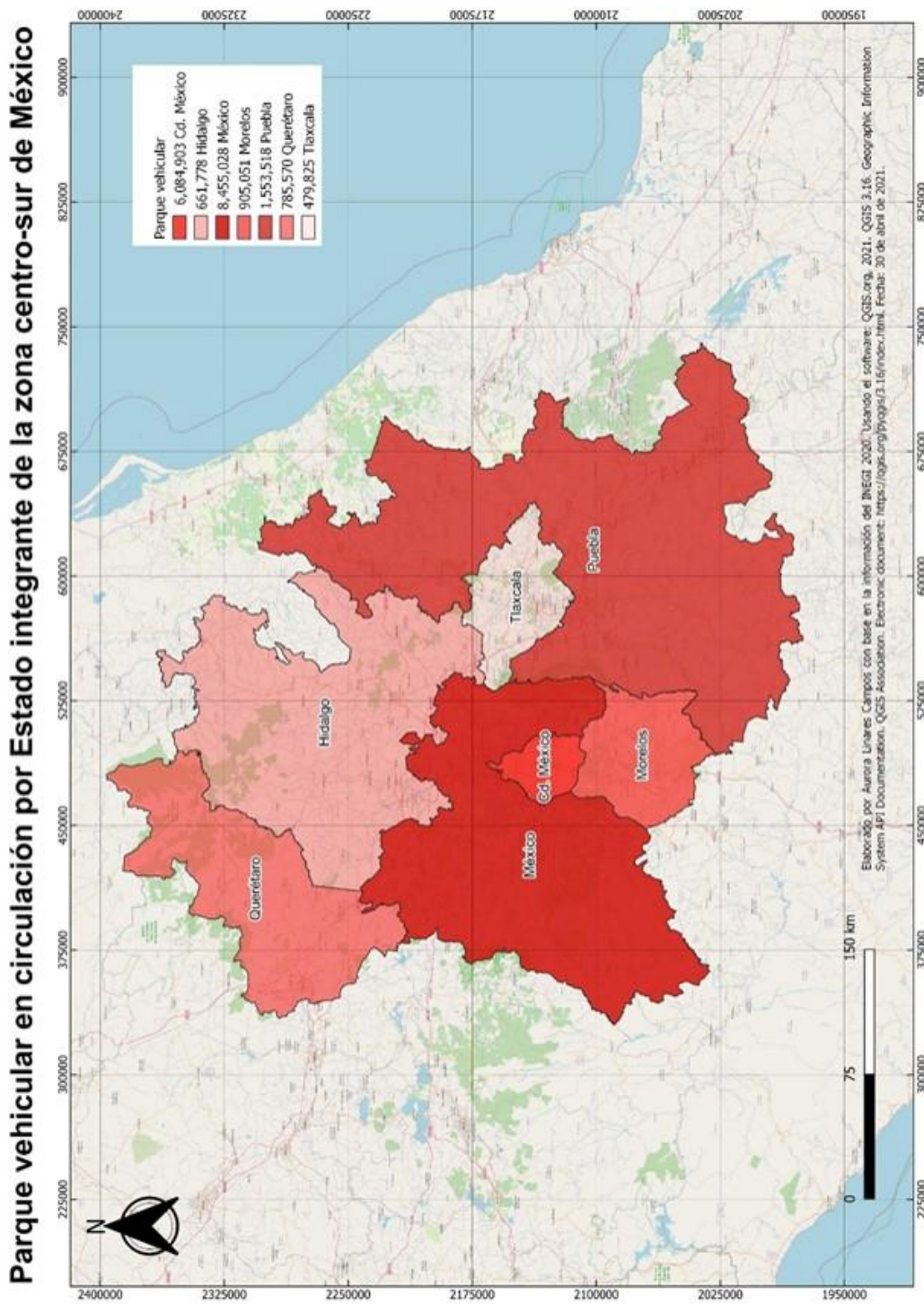
Nota. Los datos de la tabla fueron tomados de INEGI, CONEVAL, DENUE, ODS (2019). Elaboración propia.

En las siguientes las **Figuras de la 18 a la 25** se representan los datos por Estado, mostrados con una degradación de color para diferenciar de mayor a menor los Estados dependiendo el indicador ya sea por el porcentaje o número:



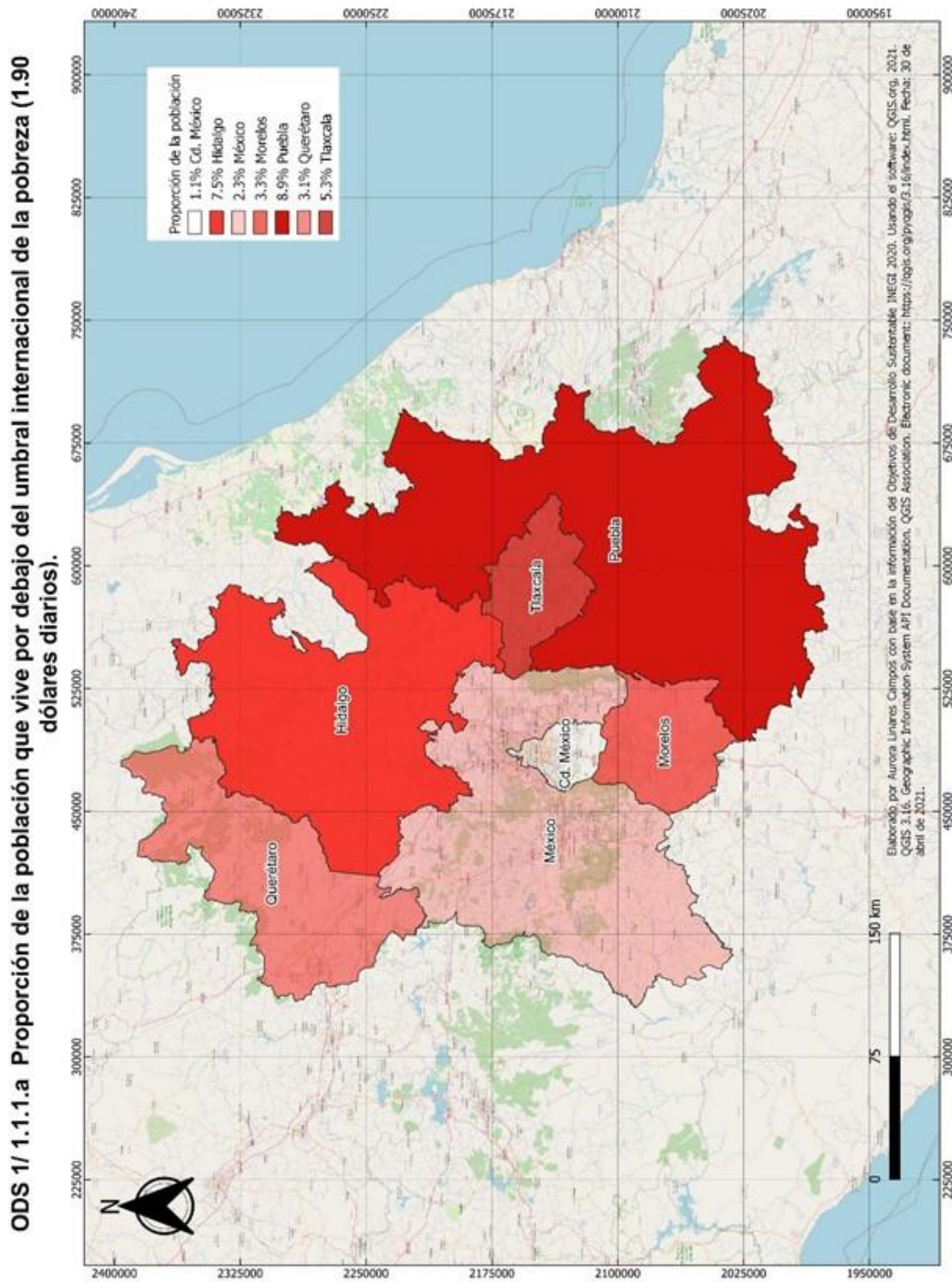
**Figura 18. Población total por estado integrante de la zona centro-sur de México.**

Nota. La figura muestra la población total de cada Estado integrante de la zona centro-sur, destacando por intensidad de color que los tres primeros Estados con mayor población es primer lugar México, segundo CD. DE México y en tercer lugar se encuentra Puebla. Elaboración propia con datos de INEGI (2019), usando el programa (QGIS.org, 2021).



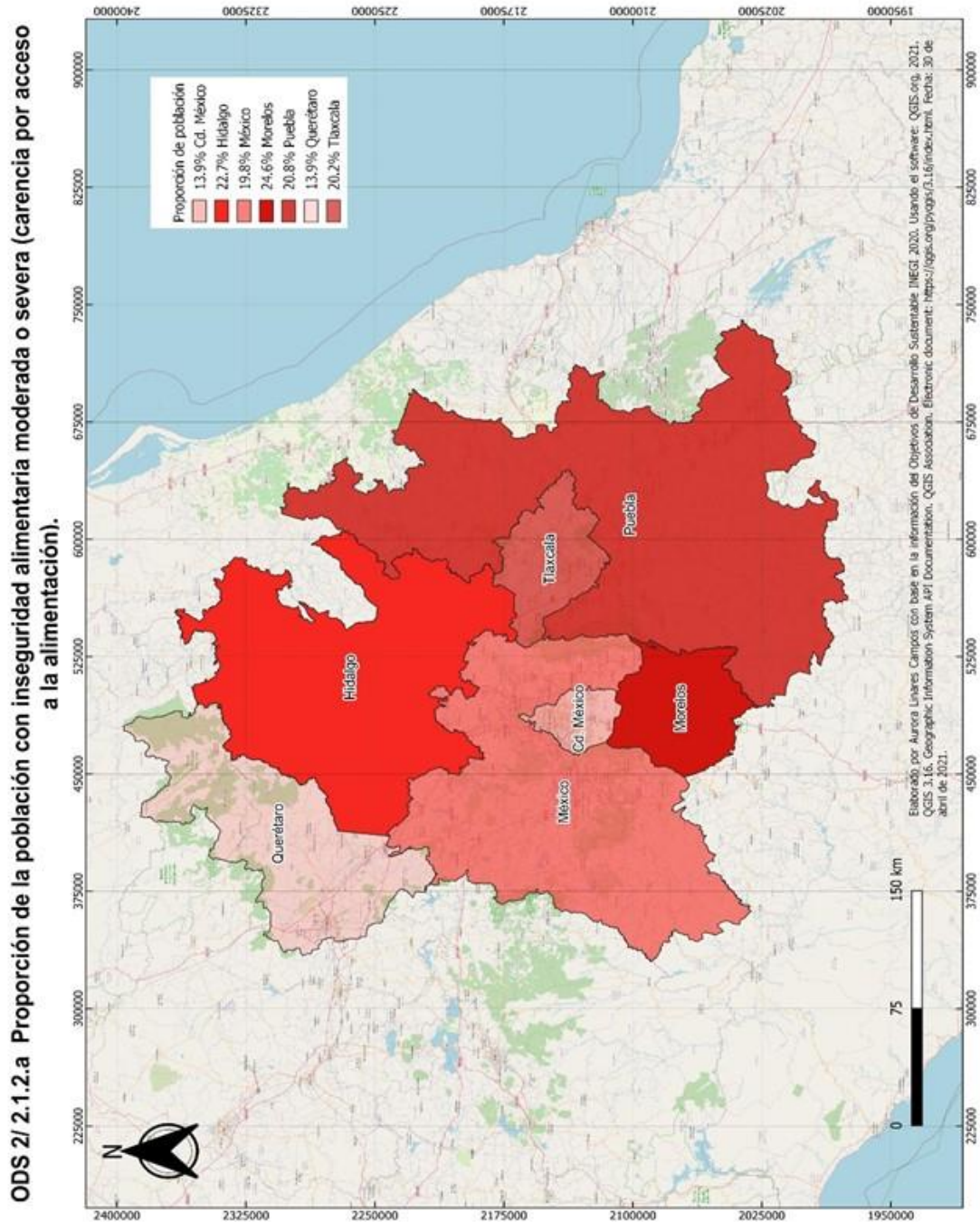
**Figura 19. Parque vehicular en circulación por estado integrante de la zona centro-sur de México.**

Nota. La figura muestra el parque vehicular de cada Estado integrante de la zona centro-sur, destacando por intensidad de color que los tres primeros estados son México, CD. de México y Puebla. Elaboración propia con datos de INEGI (2019), usando el programa (QGIS.org, 2021).



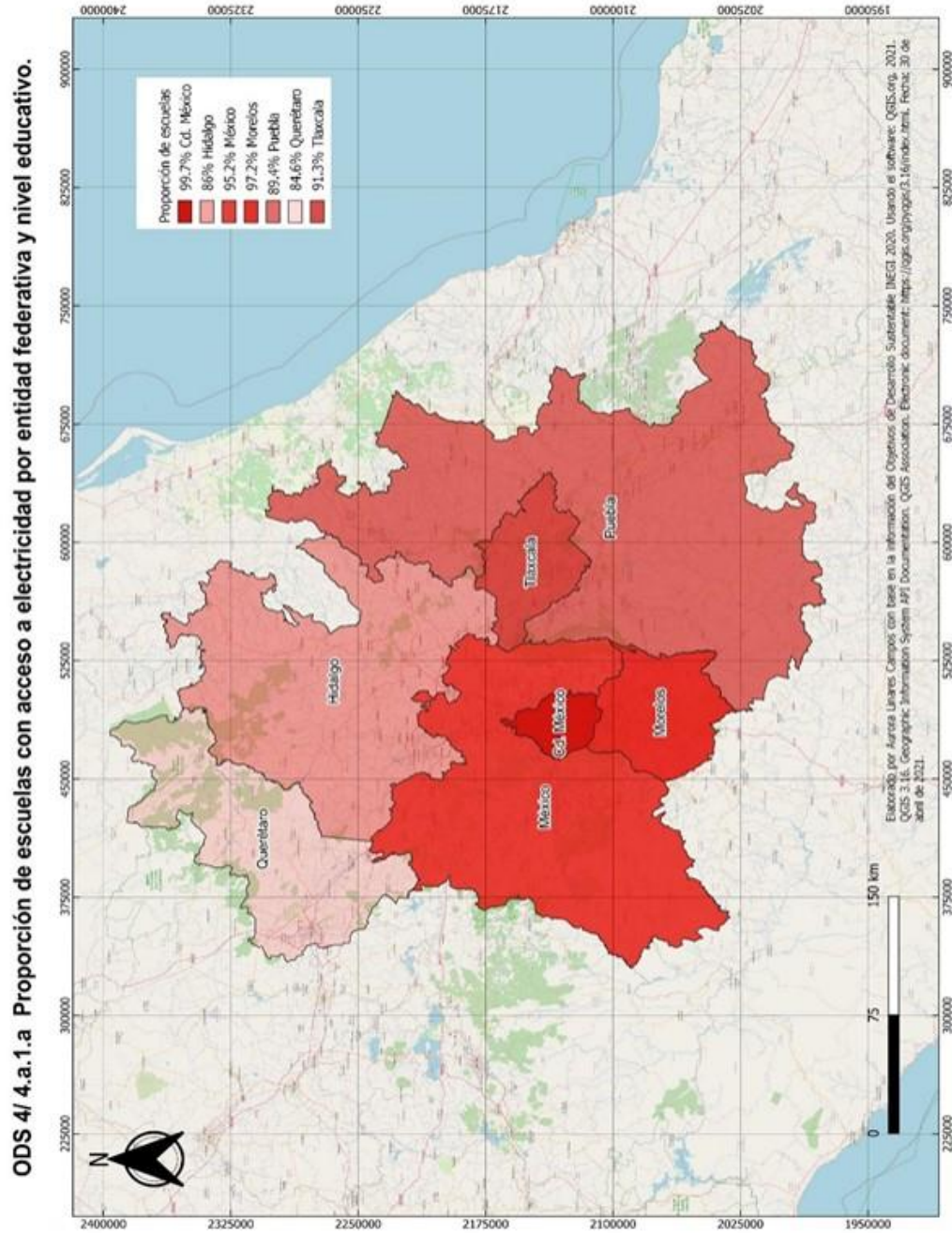
**Figura 20. ODS 1. 1.1.1.a Proporción de la población que vive por debajo del umbral internacional de la pobreza (1.90 dólares diarios).**

Nota. La figura muestra el porcentaje de la población que vive con menos de 1.90 dólares al día, su equivalente en pesos mexicanos al día 18 de mayo del 2021 es de 37.67, destacando por intensidad de color que los tres primeros Estados son Puebla, Hidalgo y Tlaxcala. Elaboración propia con datos de ODS del INEGI (2019), usando el programa (QGIS.org, 2021).



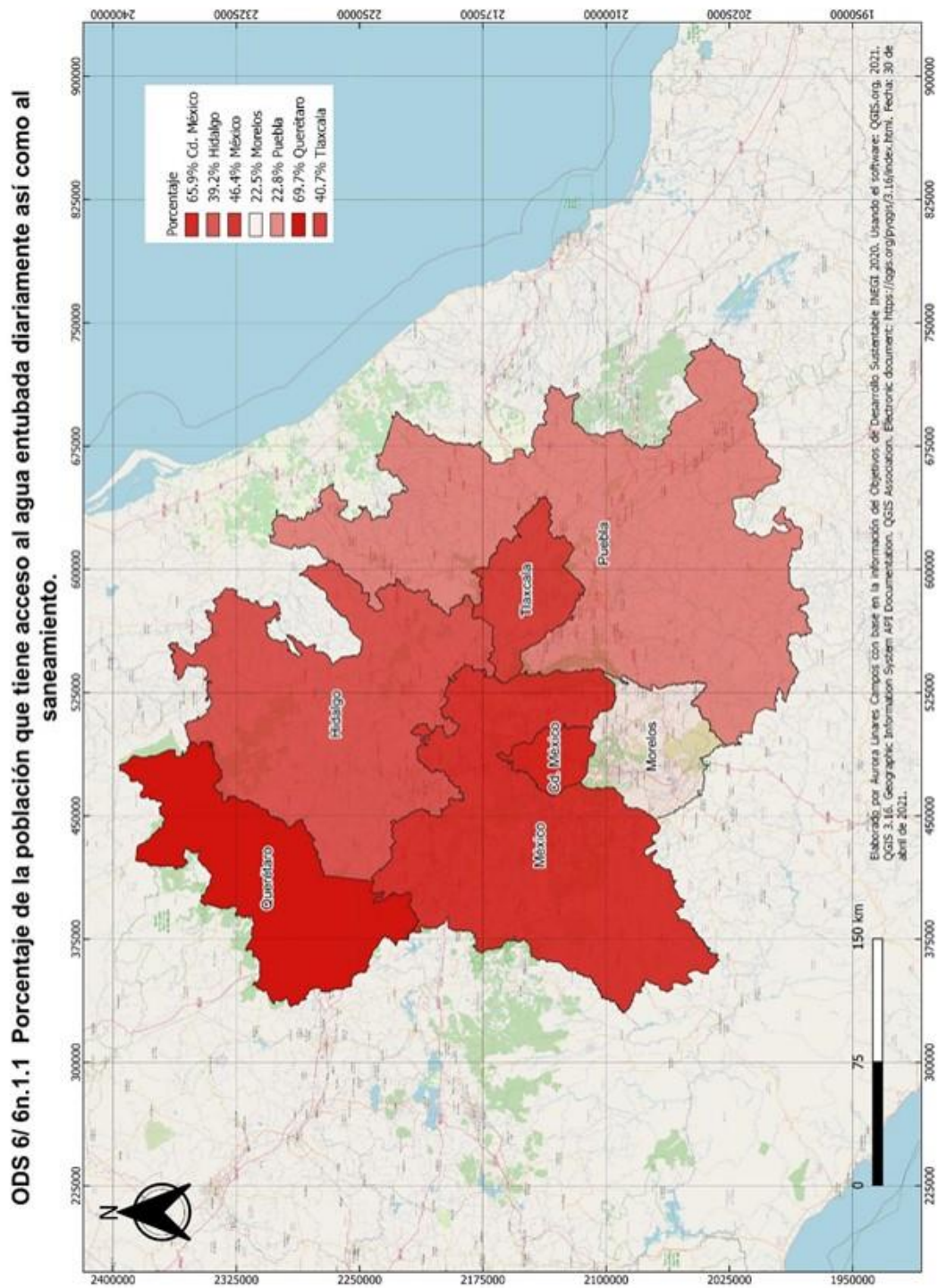
**Figura 21. ODS 2. 2.1.2.a Proporción de la población con inseguridad alimentaria moderada o severa (carencia por acceso a la alimentación).**

Nota. La figura muestra el porcentaje de la población que vive con inseguridad alimentaria moderada o severa, destacando los tres primeros Estados son Morelos, Hidalgo y Puebla. Elaboración propia con datos de ODS del INEGI (2019), usando el programa (QGIS.org, 2021).



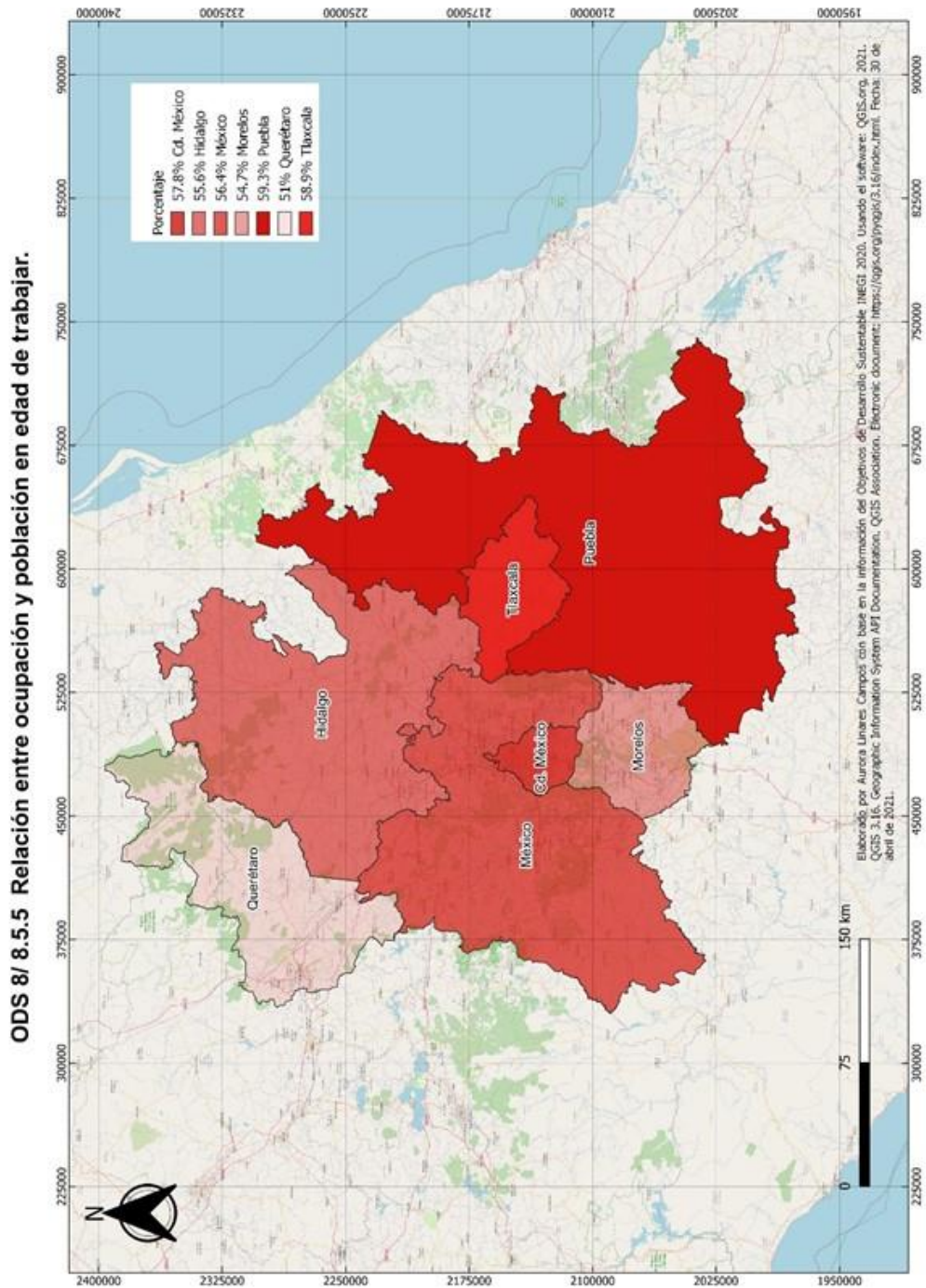
**Figura 22. ODS 4. 4.a.1.a Proporción de escuelas con acceso a electricidad por entidad federativa y nivel educativo.**

Nota. La figura muestra el porcentaje de escuelas que cuentan con electricidad, destacando que el porcentaje máximo en la zona lo tiene la Cd. De México con un 99.7% y el mínimo lo obtuvo Querétaro con un 88.6%. Elaboración propia con datos de ODS del INEGI (2019), usando el programa (QGIS.org, 2021).



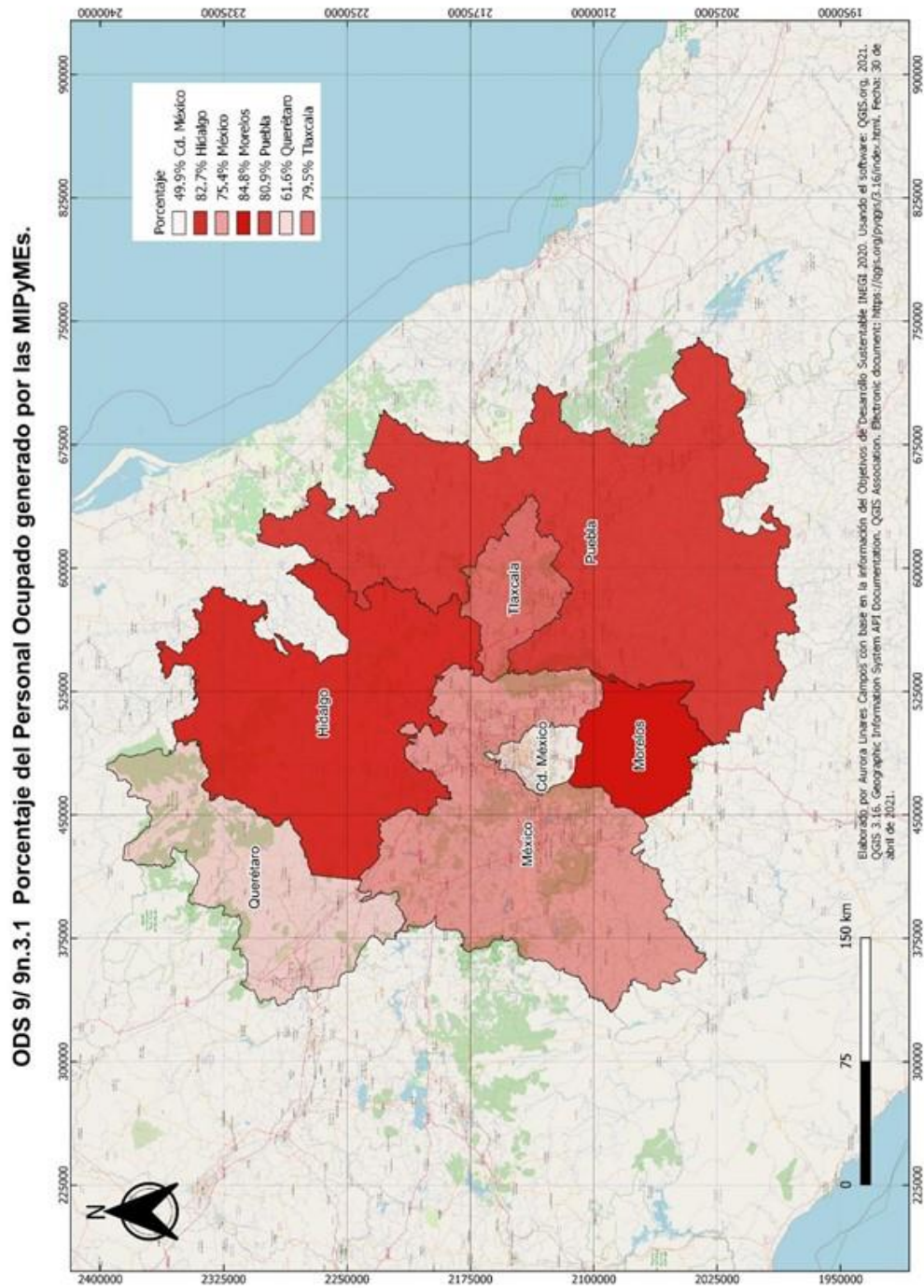
**Figura 23. ODS 6. 6n.1.1 Porcentaje de la población que tiene acceso al agua entubada diariamente, así como al saneamiento.**

Nota. La figura muestra el porcentaje de la población que cuenta con agua entubada y saneamiento, el porcentaje más alto lo tiene Querétaro, después la Cd. de México y en tercer lugar México. Elaboración propia con datos de ODS del INEGI (2019), usando el programa (QGIS.org, 2021).



**Figura 24. ODS 8. 8.5.5 Relación entre ocupación y población en edad de trabajar.**

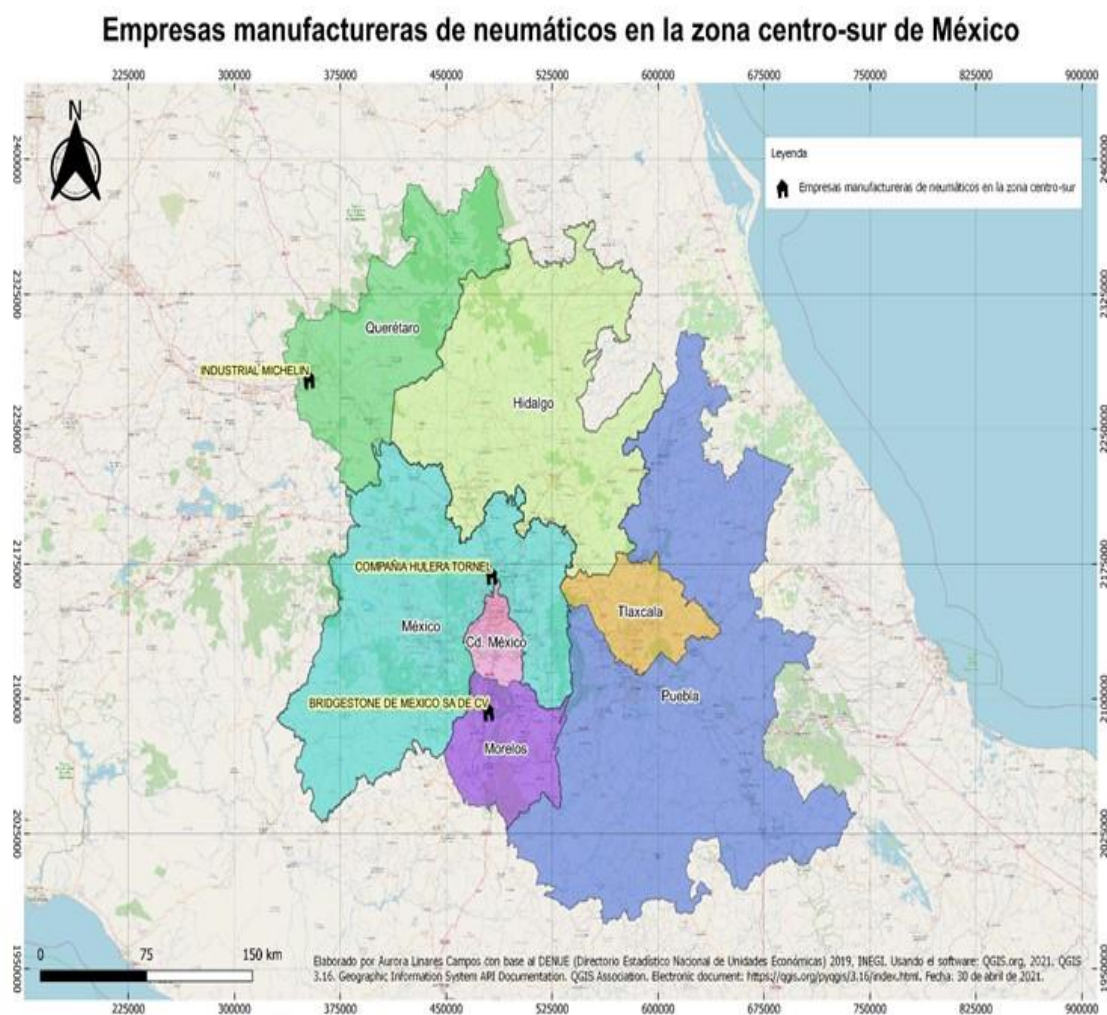
Nota. La figura muestra el porcentaje de la relación entre ocupación y población en edad de trabajar, teniendo en primer lugar al Estado de Puebla con un porcentaje de 59.3, el segundo es Tlaxcala con el 58.9 y el tercero es Cd. de México con el 57.8%, cabe mencionar que en la zona más de la mitad de la población en edad de trabajar tiene una ocupación. Elaboración propia con datos de ODS del INEGI (2019), usando el programa (QGIS.org, 2021).



**Figura 25. ODS 9. 9n.3.1 Porcentaje del Personal Ocupado generado por las MIPyMEs.**

Nota. La figura muestra el porcentaje del personal ocupado generado por las MIPyMEs (Micro Pequeña y Mediana empresas), el Estado de Morelos es el primer lugar en la zona con un porcentaje de 84.8 y es Cd. de México el que menor porcentaje tiene 49.9%. Elaboración propia con datos de ODS del INEGI (2019), usando el programa (QGIS.org, 2021).

Para determinar la relación con los neumáticos de desecho y la logística inversa se detectaron 24 empresas clasificadas en esta clase 326211 fabricantes de llantas y cámaras en la zona centro-sur, de las cuales 15 realmente son empresas, de estas 15 solo 3 son manufactureras de neumáticos (Bridgestone, Michellin y JK Tornel) y las otras 12 manejan y/o distribuyen productos del hule. Los resultados obtenidos de la encuesta aplicada a estas 3 empresas fue 34% contestó, 33% con intención de responder y 33% se negó a responder. En la **Figura 26** se muestra la ubicación de las empresas manufactureras de neumáticos en la zona centro-sur y en la **Tabla 7** muestra los datos obtenidos de la encuesta telefónica que se realizó a los gerentes de producción o similares de las empresas manufactureras de la zona centro-sur.



**Figura 26. Ubicación de empresas manufactureras de neumáticos.**

Nota. La figura muestra la ubicación de las empresas manufactureras de neumáticos, Industrial Michelin se encuentra ubicada en latitud 20.59938461999999859 y longitud -100.41352541999998493, Compañía Hulera Tornel (JK Tornel) se ubica en latitud 19.62007837999999893 y longitud -99.17125350000000594, por último, Bridgestone de México S.A. de C.V. se ubica en latitud 18.93389919999999904 y longitud -99.19239270999997871. Elaboración propia con información del DENUE, 2019.

**Tabla 7. Resultados de la encuesta telefónica realizada a los gerentes de producción o cargo similar de las empresas manufactureras de neumático ubicadas en la zona centro-sur.**

ITEM	CONTESTÓ	NO CONTESTÓ / EN ESPERA
1.- ¿Conoce el termino de logística inversa?	SI, 34%	66%
2.- ¿Conoce las etapas del proceso de manufactura del neumático?	SI, 34%	66%
3.- ¿En la etapa del diseño se realizan modificaciones con la finalidad de ayudar a disminuir el uso de materias primas?	SI, 34%	66%
4.- ¿En alguna de las etapas del proceso de fabricación se introduce materia prima reciclada?	NO, 34%	66%
5.- ¿La empresa practica el reencauchamiento de neumáticos?	SI, 34%	66%
6.- ¿La empresa recupera los neumáticos después de su vida útil?	NO, 34%	66%
7.- ¿La empresa tiene una política de reducción de emisiones contaminantes?	SI, 34%	66%
8.- ¿La empresa tiene como objetivo dentro de alguna de las etapas del proceso de manufactura la minimización de residuos generados?	SI, 34%	66%
9.- ¿Considera que implementar alguna de las acciones mencionadas en las preguntas anteriores podría mejorar los ingresos económicos de la empresa?	SI, 34%	66%
10.- ¿Considera que es posible ayudar al medio ambiente y al mismo tiempo aumentar las ganancias de la empresa a través del mejoramiento e implementación en alguna de las etapas del proceso de manufactura?	SI, 34%	66%

## 5.2. OBJETIVO ESPECÍFICO DOS

Los resultados obtenidos de la implementación de la metodología para el objetivo específico dos que es "Estimar los niveles de contaminación por disposición final de los neumáticos de desecho en la zona centro-sur de México" se muestran en la **Tabla 8**:

**Tabla 8. Estimación de los niveles de contaminación por disposición final.**

Zona geoeconómica	Población	Tasa de generación de neumático de desecho	Porcentaje centros de acopio	Porcentaje generación de energía	Porcentaje centros de acopio clandestinos (abandono)
		1 x habitante	2%	2%	91%
<b>Centro-sur</b>	37,246,889	37,246,889	744,938	744,938	33,894,669

Nota. Estas estimaciones se formularon con la regla universalmente aceptada y los porcentajes que proporcionó la ANDELLAC.

En la **Tabla 9** se muestran las características de los neumáticos examinados durante el experimento para la estimación de la contaminación por disposición final quema a cielo abierto.

**Tabla 9. Características de los neumáticos examinados.**

<b>Marca del neumático</b>	V Steel Bridgestone	Michelin	Premiere	Multi Hawk Firestone	Scorpion ATR Pirelli
<b>Año de manufactura</b>	2015	2019	2014	/	2018
<b>Rin</b>	16	16	14	15	15
<b>Velocidad máxima certificada</b>	Z (240 km/h)	W (270 km/h)	H (210 km/h)	T (190 km/h)	H (210 km/h)
<b>Letra para clasificación</b>	A	B	C	D	E

Nota. La tabla muestra la inscripción que tienen los neumáticos. Elaboración propia.

Los datos obtenidos de la incineración de cada muestra se registraron en una tabla, las variables fueron peso inicial, tiempo de ignición, temperatura, tiempo de incineración, partes por millón (ppm) de monóxido de carbono (CO) y peso final (cenizas), **Tabla 10**:

**Tabla 10. Resultados de la aplicación de la estadística descriptiva a los datos obtenidos durante la incineración.**

	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Máximo</b>
<b>Peso inicial (g)</b>	10.36	±0.72	9.09	10.60	11.47
<b>Tiempo de ignición (s)</b>	29.53	±4.49	20	30	35
<b>Tiempo de incineración (min.)</b>	8.33	±2.38	5	8.30	15
<b>Temperatura (°C)</b>	333.6	±84.2	133	380	380
<b>Partes por millón de monóxido de carbono (ppm)</b>	55.64	±36.37	9	47	138
<b>Peso final (g)</b>	3.79	±0.80	2.73	3.79	5.39

Los datos de cada una de las variables fueron analizados siguiendo la metodología anteriormente mencionada, los análisis ANOVA tienen un  $\alpha = 0.05$  y las pruebas de Tukey tienen un nivel de confianza del 95%; para la variable “peso inicial”, los datos siguen una distribución normal, además, existe una homogeneidad de varianzas, con el ANOVA se obtuvo un valor  $p$  0.496, lo que determina, que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los pesos iniciales de las muestras, esto se respaldó con la prueba de Tukey donde se observó que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los pesos de las muestras por grupos, esto quiere decir, que la diversidad del peso inicial no afecta el resultado del experimento.

Los resultados para la variable “partes por millón monóxido de carbono”, los datos siguen una distribución normal, existe una homogeneidad de varianzas, con el ANOVA se obtuvo que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias, pues el valor  $p$  0.28, esto se respaldó con la prueba de Tukey donde se observó que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias por grupos de las emisiones de monóxido de carbono registradas durante la incineración.

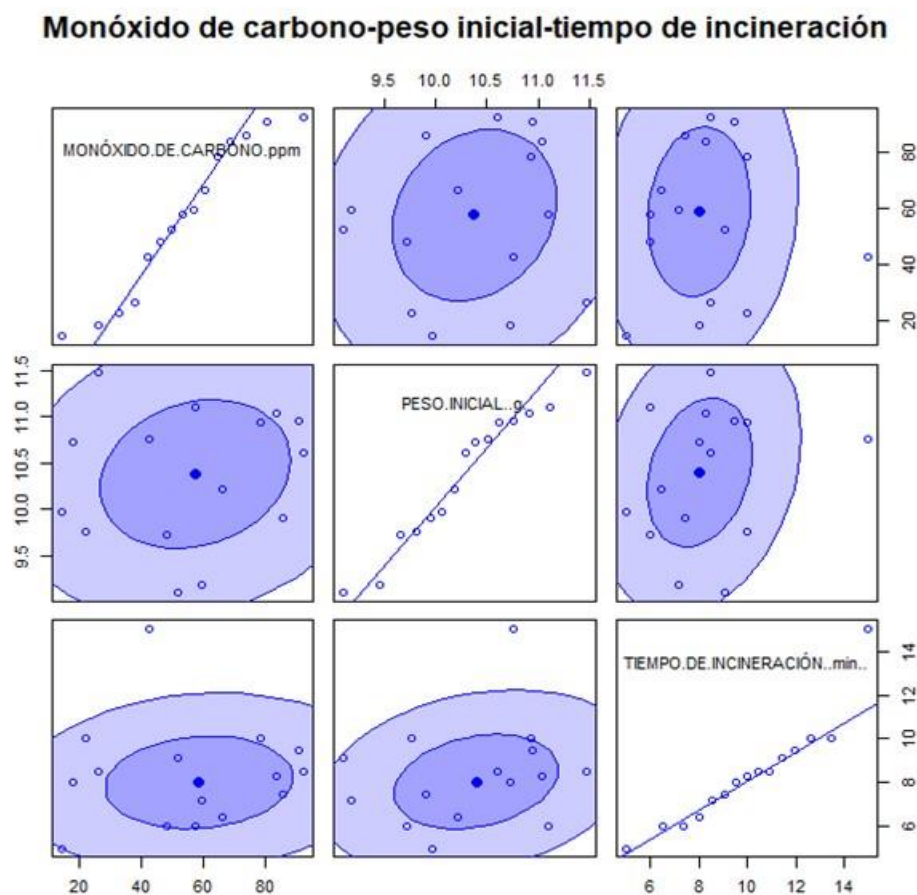
Los resultados para la variable “peso final (cenizas)”, los datos siguen una distribución normal, tienen una homogeneidad de varianzas, en el ANOVA se obtuvo el valor  $p$  0.781, lo que indica que se acepta la hipótesis nula, esto se respaldó con la prueba de Tukey donde se observó que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los pesos finales de las muestras por grupos; en promedio el peso de la materia que quedó en la placa de acero después de la incineración fue de 3.79 g.

Los resultados para la variable “sólidos volátiles”, los datos siguen una distribución normal, tienen una homogeneidad de varianzas, en el ANOVA se obtuvo que no existe diferencia estadísticamente significativa, pues  $p$  0.655, esto se respaldó con la prueba de Tukey donde se observó que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los grupos, por lo tanto en promedio 6.57 g. o alrededor de un 63.54% del total del fragmento fue liberado al ambiente durante el experimento en forma de sólidos volátiles.

Los resultados para la variable “tiempo de incineración”, los datos siguen una distribución normal, existe una homogeneidad de varianzas, en el ANOVA se obtuvo el valor  $p$  0.535, lo que indica que se acepta la hipótesis nula, esto se respaldó con la prueba de Tukey donde se observó que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las

medias de los grupos, por lo tanto, en promedio el tiempo de incineración de las muestras fue de 8.33 minutos.

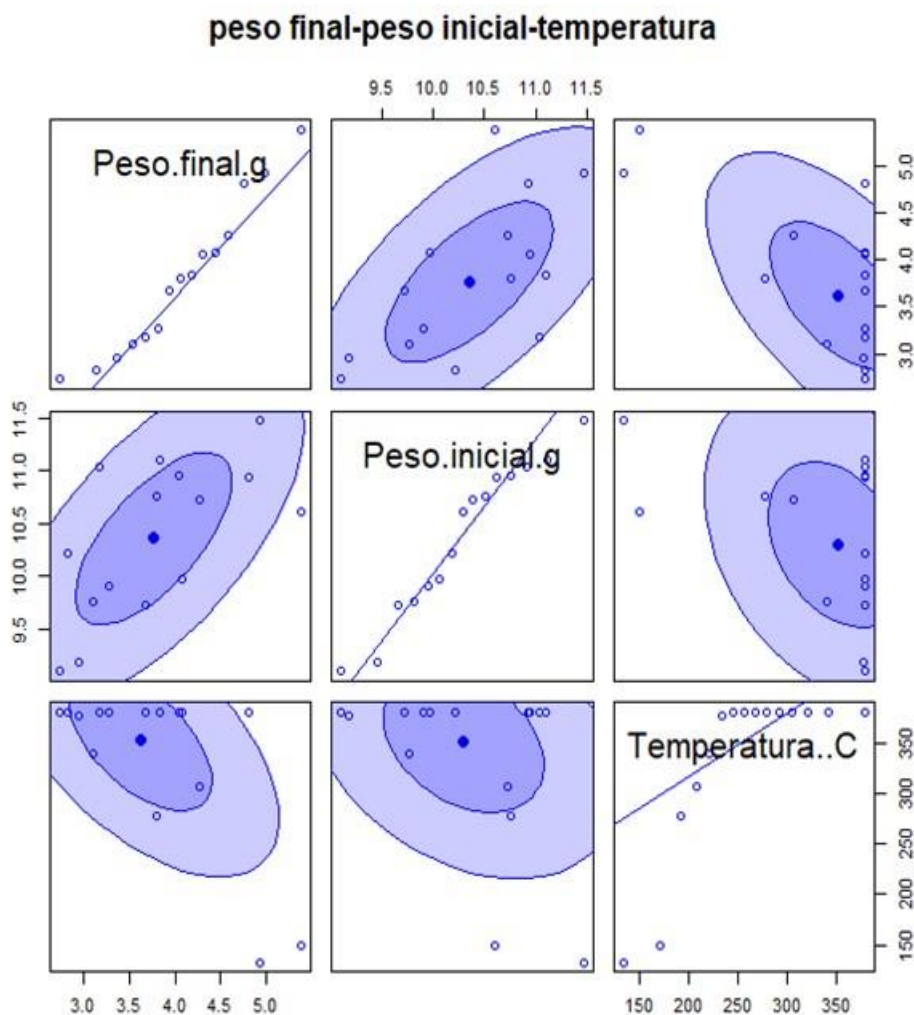
En los resultados de los análisis para las variables monóxido de carbono - peso inicial - tiempo de incineración, se encontraron tres correlaciones, dos de ellas positivas y una negativa; la negativa es monóxido de carbono - peso inicial, el coeficiente obtenido fue de -0.2027, por lo tanto, es una correlación negativa débil que al contrastar con el valor de  $p$  (0.4872) resulta ser no significativa; las dos correlaciones positivas fueron la de monóxido de carbono- tiempo de incineración y peso inicial-tiempo de incineración, ambas son correlación positiva débil no significativa, la primera con un coeficiente de 0.0139 y un valor  $p$  0.9624, mientras que la segunda tuvo un coeficiente de 0.2249 y un valor  $p$  0.4394, esto se muestra en la **Figura 27**.



**Figura 27. Análisis de correlación de Pearson y contraste de hipótesis para las variables monóxido de carbono - peso inicial – tiempo.**

Nota. Pese a tener valores de correlación, al realizar el contraste con el valor de  $p$ , nos indica que este no es significativo ( $P > 0.05$ ), en la gráfica se observa la dispersión que existe entre los datos. Elaboración propia con el Programa R Commander.

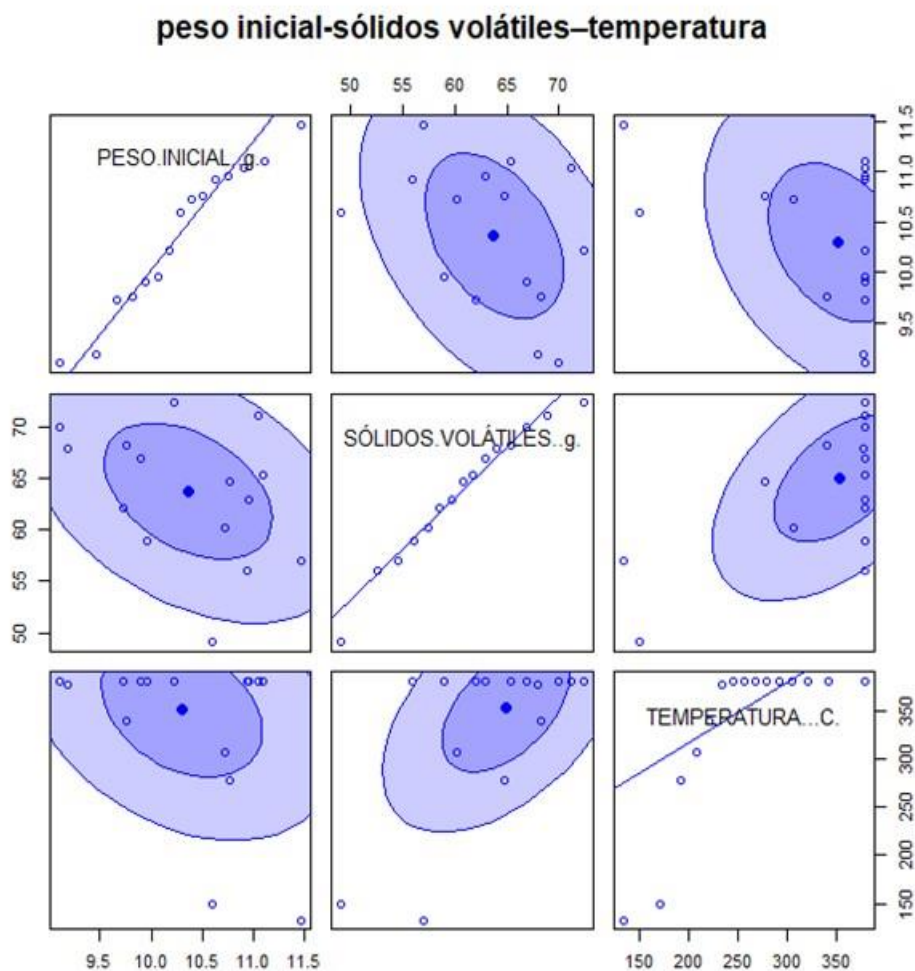
En los resultados de los análisis para las variables peso final - peso inicial - temperatura, se encontraron tres correlaciones, dos de ellas negativas y una positiva; la positiva es peso final-peso inicial, el coeficiente obtenido fue de 0.6046, por lo tanto, es una correlación positiva fuerte que al contrastar con el valor de  $p$  (0.0211) resulta ser significativa; las dos correlaciones negativas fueron la de temperatura-peso final y temperatura-peso inicial, la primera es de tipo negativa fuerte (-0.6847) significativa (valor  $p$  0.0146), mientras que la segunda es de tipo negativa débil (-0.4305) no significativa (valor  $p$  0.1092), esto se muestra en la **Figura 28**:



**Figura 28. Análisis de correlación de Pearson y contraste de hipótesis para las variables peso final - peso inicial - temperatura.**

Nota. En el grafico de dispersión se observa la relación negativa fuerte entre las variables temperatura y peso final, se aprecia, como a medida que aumenta la  $T^{\circ}$  disminuye el peso. Elaboración propia con el Programa R Commander.

En los resultados de los análisis para las variables peso inicial - sólidos volátiles - temperatura, se encontraron tres correlaciones, dos de ellas negativas y una positiva; la positiva es temperatura-sólidos volátiles, el coeficiente obtenido fue de 0.6419, por lo tanto, es una correlación positiva fuerte que al contrastar con el valor de  $p$  (0.0296) resulta ser significativa; las dos correlaciones negativas fueron la de temperatura-peso inicial y sólidos volátiles-peso inicial, la primera es de tipo negativa débil (-0.3918) significativa (valor  $p$  0.2184), mientras que la segunda es de tipo negativa débil (-0.4305) no significativa (valor  $p$  0.2184), esto se muestra en la **Figura 29**:



**Figura 29. Análisis de correlación de Pearson y contraste de hipótesis para las variables peso inicial - sólidos volátiles – temperatura.**

Nota. Se observan correlaciones negativas débiles que no resultan significativas, sin embargo, existe una correlación positiva fuerte entre la temperatura y los sólidos volátiles, a medida que aumenta la  $T^{\circ}$  aumentan los sólidos volátiles. Elaboración propia con el Programa R Commander.

Los resultados obtenidos bajo la Norma Mexicana para el Análisis de Agua, Determinación de Metales por Absorción Atómica en Aguas Naturales, Naturales Tratadas, Potables, Residuales y Residuales Tratadas (NMX-AA-051-SCFI-2001) y la Norma Mexicana Residuos – Determinación de Compuestos Orgánicos Volátiles por Cromatografía de Gases Acoplado a un Espectrómetro de Masas de Productos de Extracción de Constituyentes Tóxicos (PECT), Método de Prueba (NMX-AA-103-SCFI-2006) se muestran en la **Tabla 11 y Tabla 12**, el análisis del tamaño de partícula de la ceniza dio como resultado 344 µg:

**Tabla 11. Concentración de metales, metaloides y compuestos contenidos en cenizas de neumáticos analizados conforme la NMX-AA-051-SCFI-2001.**

	Resultados	Límites máximos permisibles (NOM-001-SEMARNAT-1996)
ARSÉNICO	10.00 mg/L*	0.2mg/L
CADMIO	13.00 mg/L*	0.2 mg/L
CIANURO	19.00 mg/L*	1.0 mg/L
COBRE	400.00 mg/L*	4.0 mg/L
CROMO	500.34 mg/L*	1.0 mg/L
MERCURIO	408.96 mg/L*	0.01 mg/L
NÍQUEL	1000.92 mg/L*	2.0 mg/L
PLOMO	2491.97 mg/L*	0.5 mg/L
ZINC	93.00 mg/L*	10.0 mg/L

\* limites excedentes de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana aplicable.

**Tabla 12. Concentración de compuestos orgánicos volátiles en cenizas de neumático conforme la NMX-AA-103-SCFI-2006.**

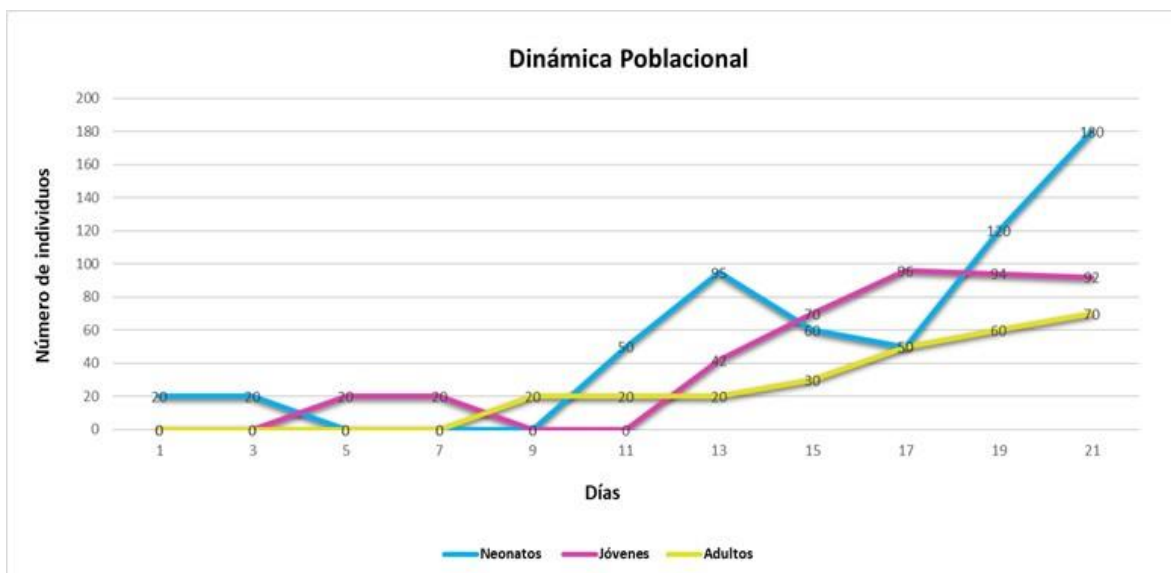
	Resultados	Límites máximos permisibles (NMX-AA-103-SCFI-2006)
BENCENO	1.58 LPC µg/L	0.03 LPC µg/L
CLOROBENCENO	2.37 LPC µg/L	0.03 LPC µg/L
CLOROFORMO	1.98 LPC µg/L	0.04 LPC µg/L
CLORURO DE VINILO	10.41 LPC µg/L	0.04 LPC µg/L
1,4- DICLOROBENCENO	2.33 LPC µg/L	0.04 LPC µg/L
1,2- DICLOROETANO	1.30 LPC µg/L	0.02 LPC µg/L
1,1- DICLOROETILENO	3.23 LPC µg/L	0.03 LPC µg/L
HEXAFLOROBENCENO	ND	ND
HEXCLOROBUTADIENO	6.13 LPC µg/L	0.10 LPC µg/L
METI ETIL CETONA	9.34 LPC µg/L	ND
PIRIDINA	ND	ND
TETRAFLOROETILENO	6.13 LPC µg/L	0.05 LPC µg/L
TETRAFLORURO DE CARBONO	11.73 LPC µg/L	0.02 LPC µg/L
TRICLOROETILENO	12.70 LPC µg/L	0.02 LPC µg/L

LPC= Límite práctico de cuantificación basado en 25 mL de muestra.

### 5.3. OBJETIVO ESPECÍFICO TRES

La caracterización de los posibles efectos ecotoxicológicos requiere mantener a la población adaptada a las condiciones de desarrollo de cultivos señaladas en la NMX-AA-087-SCFI-2010. El desarrollo de la población bajo las condiciones de la norma indicada fue monitoreado evaluando número de neonatos, jóvenes y adultos, así como, la mortalidad; se logró mantener la estabilidad de los cultivos en condiciones ambientales estándar como ciclos de luz-oscuridad, alimentación, oxigenación, dureza del agua, temperatura, mantenimiento adecuado de cultivos como es su limpieza regular y un área libre de sustancias tóxicas.

La dinámica poblacional durante se monitoreo durante 21 días, se obtuvo un desarrollo normal al mantenerse una población final de 342 individuos, la cual, fue iniciada n=20 neonatos con menos de 24 h de nacidos, obtenidos de la 3ª generación de una sola madre joven. El comportamiento de la dinámica poblacional sugiere un desarrollo adecuado como se aprecia hacia el día 17-21, en donde el número de neonatos supera al número de adultos y jóvenes **Figura 30**.



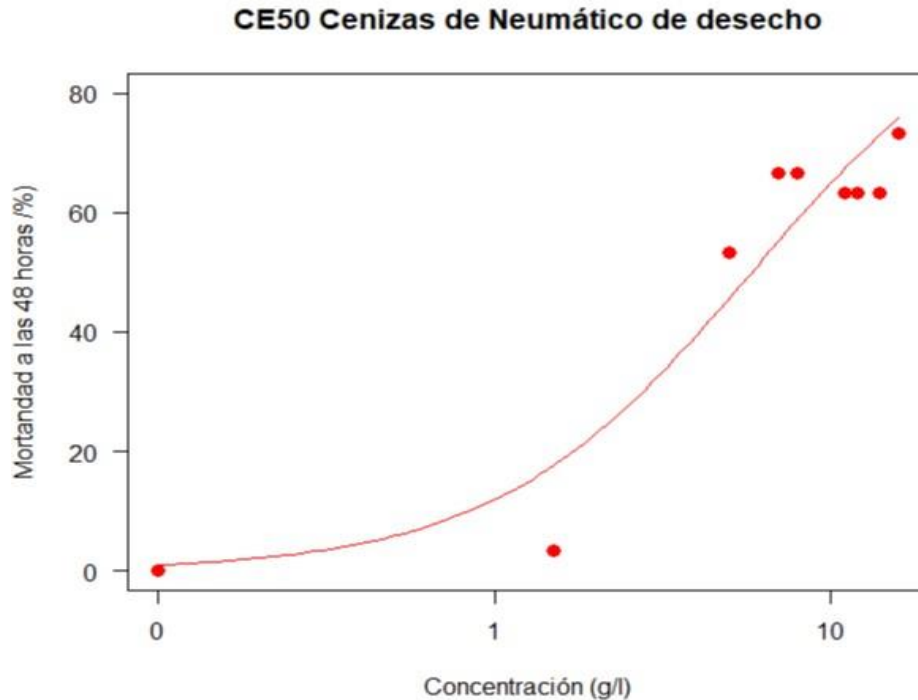
**Figura 30.** Dinámica poblacional de *D. magna* en condiciones control. El monitoreo del cultivo se desarrolló durante 21 días.

Los resultados obtenidos del conteo de individuos de la prueba de toxicidad aguda de cada una de las diluciones se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13. Conteo de inmovilidad o mortandad para el cálculo de la CE50 efectuado a las 48 horas.

	Concentración g/L	Organismos iniciales	Número de muertos a las 48 horas	Mortandad a las 48 horas %
	0	10	0	0
<b>grupo control</b>	0	10	0	0
	0	10	0	0
	1.5	10	1	10
<b>1</b>	1.5	10	0	0
	1.5	10	0	0
	5	10	6	60
<b>2</b>	5	10	5	50
	5	10	5	50
	7	10	7	70
<b>3</b>	7	10	7	70
	7	10	6	60
	8	10	8	80
<b>4</b>	8	10	6	60
	8	10	6	60
	11	10	6	60
<b>5</b>	11	10	7	70
	11	10	6	60
	12	10	7	70
<b>6</b>	12	10	6	60
	12	10	6	60
	14	10	6	60
<b>7</b>	14	10	7	70
	14	10	6	60
	16	10	8	80
<b>8</b>	16	10	7	70
	16	10	7	70

Los datos obtenidos del conteo de organismos inmóviles o muertos de cada dilución se analizaron con el método Probit con un paquete estadístico llamado R commander. La prueba de toxicidad aguda dio como resultado una CE<sub>50</sub> calculada para una exposición de 48 horas de 5.83 g/L (**Figura 31**).



**Figura 31. Concentración efectiva media de cenizas de neumáticos de desecho.**

Los efectos más críticos registrados durante el ensayo fueron en la variable reproducción del tratamiento C (4.5 g/L) ya que el día de la primera reproducción se retrasó cuatro días respecto al control y los demás tratamientos ( $p < 0.05$ ). En cuanto a la reproducción total, el número total de crías obtenidas durante 19 días fue mucho menor para todos los tratamientos respecto al testigo ( $p < 0,05$ ).

De acuerdo con lo anterior, el número promedio de crías por hembra grávida fue menor para los tratamientos en comparación con el grupo control ( $p < 0.05$ ), y no se observaron diferencias significativas entre tratamientos; esto repercute en el rendimiento poblacional como parámetro que permite conocer el número diario de dáfidos por mililitro, lo que evidencia el impacto de la alimentación en la supervivencia y estabilidad reproductiva. Por lo tanto, este indicador es más bajo para todos los tratamientos en comparación con el control.

Finalmente, destaca el valor de la Tasa de Crecimiento Finito (PGR), con datos positivos para los tratamientos. Cabe señalar que los valores positivos de este parámetro son indicativos de una población en aumento; sin embargo, aunque se registraron valores

positivos, cabe señalar que el dato está muy por debajo del grupo control, concretamente en el tratamiento C (4,5 g/ L). Los resultados se muestran en la tabla:

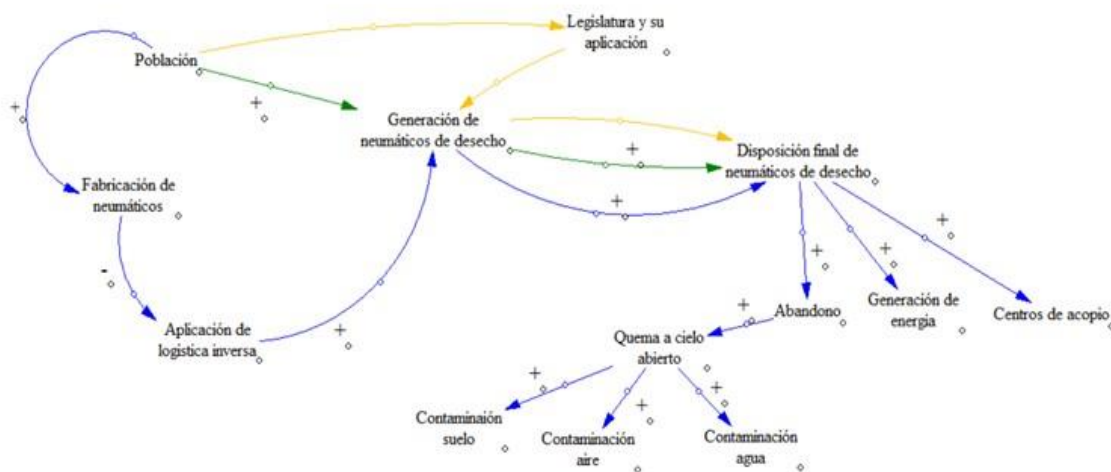
**Tabla 14. Conteo de inmovilidad o mortandad para el cálculo de la CE50 efectuado a las 48 horas.**

	Control	A (1.5 g/L)	B (3.5 g/L)	C (4.5 g/L)
<b>Primera reproducción (días)</b>	11.00 ± 0.00 <sup>a</sup>	11.00 ± 0.00 <sup>a</sup>	11.00 ± 0.00 <sup>a</sup>	15.00 ± 0.00 <sup>b</sup>
<b>Reproducción Total</b>	356.00 ± 19.31 <sup>c</sup>	178.67 ± 9.07 <sup>b</sup>	75.67 ± 13.58 <sup>a</sup>	65.00 ± 3.00 <sup>a</sup>
<b>Neonatos /Hembra Grávida</b>	4.39 ± 0.17 <sup>b</sup>	2.68 ± 0.18 <sup>a</sup>	2.57 ± 0.18 <sup>a</sup>	2.75 ± 0.34 <sup>a</sup>
<b>Supervivencia (%)</b>	95.55 ± 1.47 <sup>c</sup>	96.36 ± 0.71 <sup>c</sup>	83.35 ± 3.93 <sup>b</sup>	74.92 ± 3.42 <sup>a</sup>
<b>Rendimiento (daphnidos/día)</b>	0.11 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.05 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.02 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.02 ± 0.00 <sup>a</sup>
<b>Tasa Finita de Crecimiento (PGR)</b>	2.56 ± 0.09 <sup>c</sup>	1.78 ± 0.07 <sup>b</sup>	0.72 ± 0.24 <sup>a</sup>	0.63 ± 0.11 <sup>a</sup>

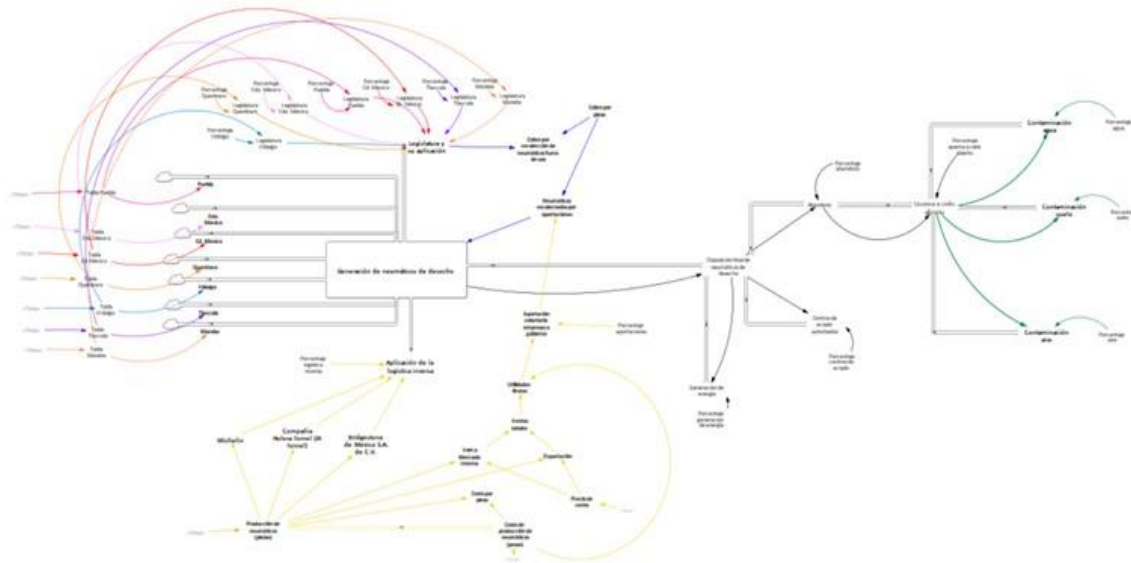
Los valores son medias ± desviación estándar. Las distintas letras indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

#### 5.4. OBJETIVO ESPECÍFICO CUATRO

Los resultados obtenidos de la implementación de la metodología para el objetivo específico cuatro que es Crear un modelo de simulación dinámica para analizar el sistema neumático de desecho con la información obtenida de los objetivos específicos se muestran en la **Figura 32 y 33**.



**Figura 32. Diagrama de influencias sistema neumáticos de desecho.**



**Figura 33. Diagrama de Forrester sistema neumáticos de desecho.**

Como resultados del objetivo cuatro se obtuvieron cinco simulaciones, la primera muestra la situación real, la cual, se obtuvo de la investigación realizada en los objetivos anteriores; las simulaciones siguientes se modificaron en cuanto a la participación de las empresas en aportaciones y la implementación de logística inversa, así como, en la aplicación de la legislatura; los porcentajes que se simularon fue el 1%, 2%, 3% y el 4%, estos porcentajes se definieron con base a la información obtenida de la ANDELLAC, que menciona, que el porcentaje máximo de las actividades de acopio en centros autorizados y generación de energía cuentan con el 2% cada una.

Las simulaciones permiten visualizar que ocurre en el sistema si una de las variables se incrementa. En el sistema neumático de desecho al aumentar la participación y la responsabilidad conforme a ley que tienen las empresas y el gobierno se puede observar que la generación disminuye, así como, la contaminación al medio ambiente.

A continuación, se muestran las funciones, en orden de aparición de izquierda a derecha de las variables dentro del sistema (**Figura 33**):

- Función para el cálculo de la generación de neumático desecho de la zona centro-sur.

$$f_{\text{GND}} = (1 * \text{HZCS}) - (\text{ALI} + \text{LA} + \text{NRA})$$

En donde:

GND= Generación de neumáticos de desecho  
HZCS= Habitantes de la zona centro-sur  
ALI= Aplicación de la logística inversa  
LA= Legislatura aplicada  
NRA= Neumáticos recuperados por aportaciones de empresas

- Función para el cálculo de la generación de energía en la zona centro-sur.

$$f_{GE} = (\%) (GND)$$

En donde:  
GE= Generación de energía  
%= Porcentaje de neumáticos de desecho que se usan para la generación de energía  
GND= Generación de neumáticos de desecho

- Función para el cálculo de los neumáticos de desecho que se encuentran en acopio autorizado

$$F_{NDAA} = (\%) (GND)$$

En donde:  
NDAA= Neumáticos de desecho en acopio autorizado  
%= Porcentaje de neumáticos de desecho en abandono  
GND= Generación de neumáticos de desecho

- Función para el cálculo de los neumáticos de desecho que se encuentran en abandono

$$F_{NDA} = (\%) (GND)$$

En donde:  
NDA= Neumáticos de desecho en abandono  
%= Porcentaje de neumáticos de desecho en abandono  
GND= Generación de neumáticos de desecho

- Función para el cálculo de los neumáticos de desecho que se queman a cielo abierto

$$F_{NDQ} = (\%) (NDA)$$

En donde:  
NDQ= Neumáticos de desecho quemados a cielo abierto  
%= Porcentaje de neumáticos de desecho que se queman a cielo abierto  
NDA= Neumáticos de desecho en abandono

- Función para el cálculo de la contaminación de suelo generada por la quema a cielo abierto de neumáticos de desecho

$$F_{cs} = (36.26\%) \text{ (NDQ)}$$

En donde:

CS= Contaminación de suelo

NDQ= Neumáticos de desecho quema a cielo abierto

36.26%= Porcentaje del neumático de desecho que se queda en el suelo después de la combustión

- Función para el cálculo de la contaminación de agua generada por la quema a cielo abierto de neumáticos de desecho

$$F_{cA} = (.02\%) \text{ (NDQ)}$$

En donde:

CA= Contaminación de agua

NDQ= Neumáticos de desecho quema a cielo abierto

.02%= Porcentaje mínimo del neumático de desecho que afecta a los organismos de agua dulce.

- Función para el cálculo de la contaminación de aire generada por la quema a cielo abierto de neumáticos de desecho

$$F_{cAI} = (63.54\%) \text{ (NDQ)}$$

En donde:

CAI= Contaminación de aire

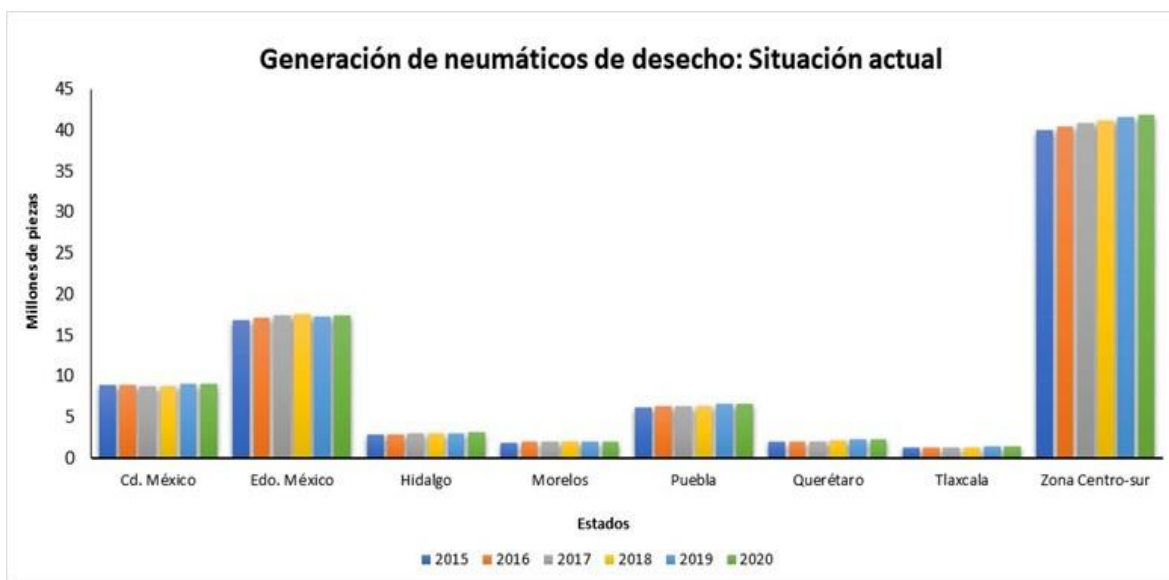
NDQ= Neumáticos de desecho quema a cielo abierto

63.54%= Porcentaje del neumático de desecho que se emite al aire durante la combustión

Una vez hecho el diagrama de Forrester, se prosiguió a las simulaciones y los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Para la situación actual se obtuvo que la falta de aplicación de la logística inversa, de la legislatura provoca que incremente el número de neumáticos desechados año con

año, así como, la contaminación que se emite al ambiente por la quema del mismo durante actividades antropogénicas.

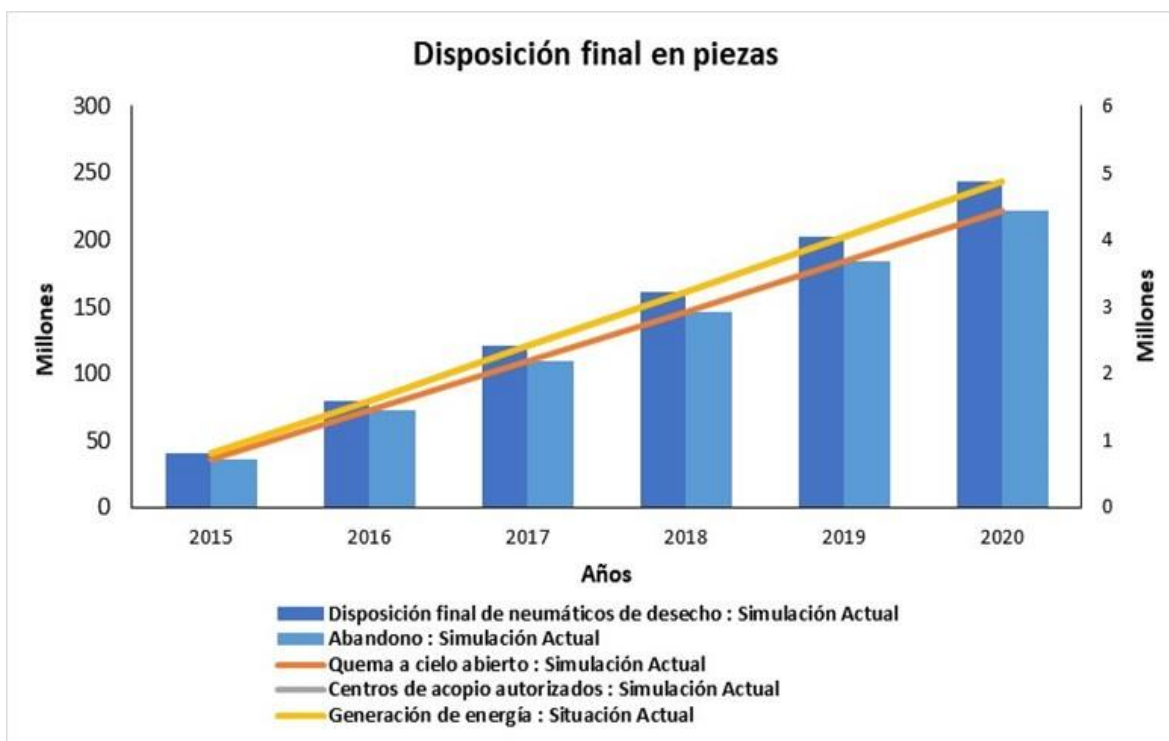


**Figura 34. Contribución por estado integrante de la zona centro-sur en la generación de neumáticos de desecho.**

Nota. La figura muestra la generación de neumáticos de desecho por cada estado en cada año en un intervalo de 2015 a 2020, así como, la cantidad total de la zona. Destaca que el Edo. de México es el principal generador seguido de la Cd. de México, también se observa como del año 2015 al 2020 ha incrementado este residuo de manejo especial, llegando a tener más de 40 millones de piezas generadas en el año 2020. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

La Figura 35 detalla la cantidad de piezas que tienen una disposición final de las mencionadas en esta investigación en párrafos anteriores; se realizó un gráfico de doble eje para poder visualizar los millones de neumáticos de desecho de cada una de las disposiciones, pues, si se utiliza una de un solo eje, solo se aprecia la información de disposición final y abandono.

Se observa como aumenta la acumulación durante los años, teniendo en 2015 un abandono de más de 36 millones de piezas y en el año 2020 una cantidad de más de 200 millones, así también, los neumáticos de desecho que se queman a cielo abierto han incrementado de aproximadamente 700,000 mil piezas en 2015 a más de 4 millones en el 2020.



**Figura 35. Disposición final en piezas de la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

Los resultados obtenidos en la simulación actual sobre la contaminación ambiental emitida al medio ambiente por la quema a cielo abierto de este residuo se representan en la Figura 36, en la cual, la contaminación se ve representada en piezas, es decir, durante la combustión del neumático un porcentaje se va al aire, otro al suelo y otro al agua, este porcentaje se multiplicó por el número de piezas que se incineran y da como resultado la cantidad en piezas de lo que contamina al ambiente.

Se observa que la contaminación al agua es menor a las de suelo y aire, esto se debe, a que el porcentaje obtenido es lo mínimo que se requiere para contaminar un medio dulce acuícola y esté presente cambios en el ecosistema.

Una vez más se aprecia que la falta de aplicación de la logística inversa y de la legislatura provoca que incremente la contaminación al ambiente año con año; en el 2015 se contaminó el aire con la quema de más de 462 mil neumáticos de desecho y en el 2020 fueron casi 3 millones.

El suelo fue contaminado con aproximadamente 263 mil y en 2020 con más de 1.5 millones, el agua recibió alrededor de 1,456 piezas en el 2015 y en el 2020 fueron 8,875.



**Figura 36. Contaminación ambiental generada por la quema a cielo abierto de neumáticos de desecho zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

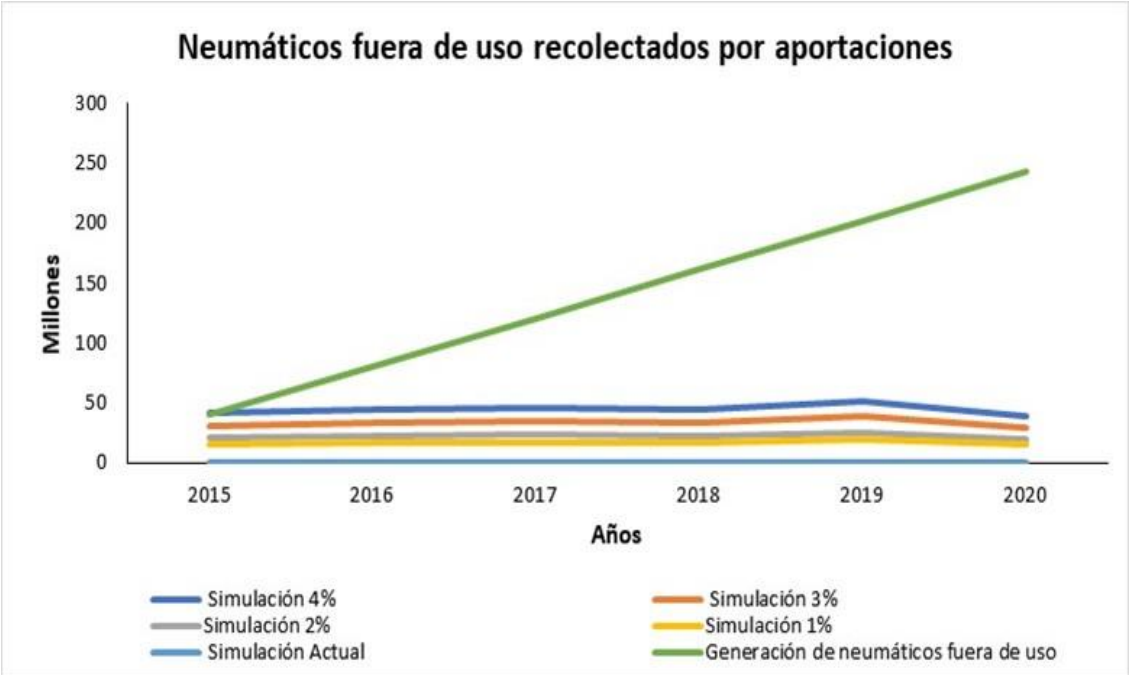
Los resultados obtenidos de las simulaciones 1%, 2%, 3% y el 4%, se muestran a continuación, en ellas se puede observar el cambio que hay cuando existe la participación de las empresas en aportaciones, la aplicación de la legislación y de la logística inversa como estrategia para la disminución de neumáticos fuera de uso y de esta manera evitar que se conviertan en neumáticos de desecho; al disminuir este residuo de manejo especial se está ayudando al ambiente.

En la **Figura 37**, se observan los resultados obtenidos en el cálculo de los neumáticos fuera de uso recolectados por aportaciones de empresas a gobierno, cuya finalidad es otorgar recursos económicos para tener presupuesto y poder implementar programas de limpieza, los porcentajes del 1%, 2%, 3% y el 4% se multiplicaron por la utilidad bruta de la industria manufacturera de neumáticos y se dividió entre \$15.00 (valor otorgado como cobro en centros de acopio autorizados para el almacenamiento de los residuos), esto nos da el número en piezas que podrían ser recolectados con esa aportación.

También se puede visualizar como la situación actual es muy diferente a los posibles escenarios, si las empresas aportaran el 3% de sus utilidades brutas se podría haber retirado 31,191,500 de piezas en el 2015, como se ha mencionado el porcentaje de las

simulaciones va multiplicado por las utilidades brutas de las empresas, por lo tanto en el 2020 debido a las bajas ventas y a la disminución en la producción de neumáticos las utilidades de la industria tuvieron una caída, aun así, si otorgaran el 3% en el 2020 se podrían haber retirado 29,572,200 de piezas.

Se puede observar que la generación de neumáticos fuera de uso va en aumento, sin embargo, con estas aportaciones se pueden recolectar y evitar que se conviertan en neumáticos de desecho.



**Figura 37. Neumáticos fuera de uso recolectados por aportaciones de empresas de la zona centro-sur.**

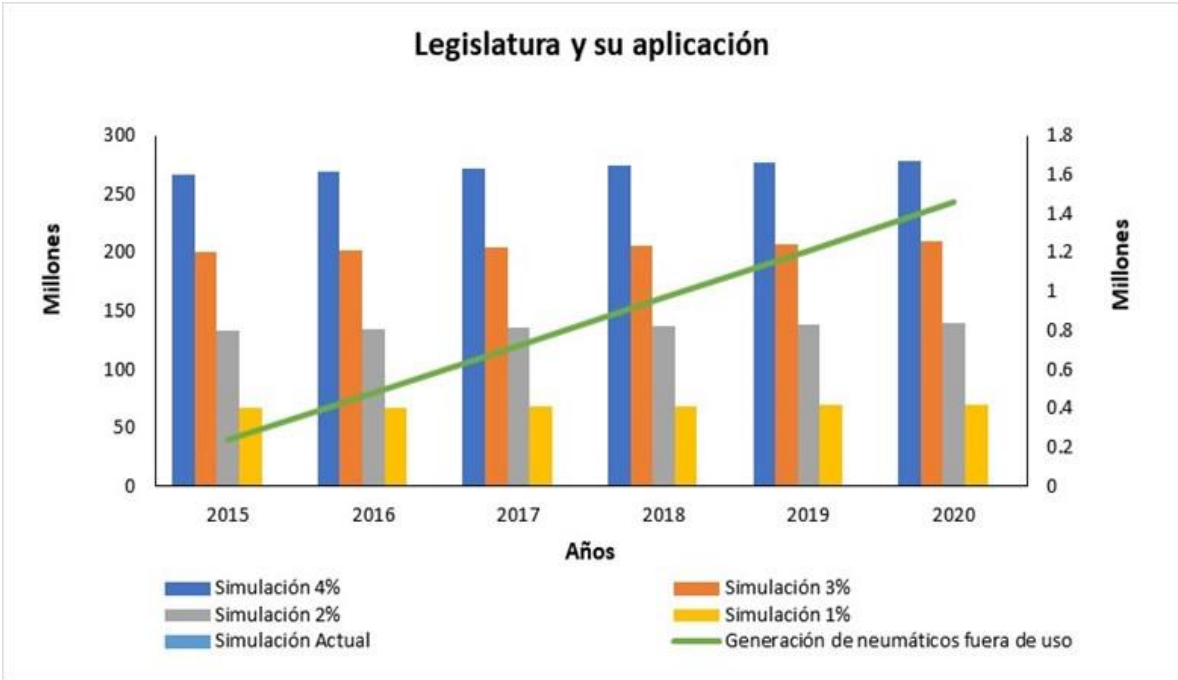
Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

En la **Figura 38**, se muestran los resultados de la multiplicación del porcentaje de la aplicación de la legislación (en este caso son 1%, 2%, 3% y 4%) y la generación de neumáticos fuera de uso; se observa que tan solo la simulación del 4% nos da una recolección de aproximadamente 1.6 millones de piezas cada año en el intervalo de 2015 al 2020.

La generación de neumáticos fuera de uso va en aumento, aunque los porcentajes utilizados parecen ser mínimos, debemos recordar que el 2% es el porcentaje máximo que

estipula la ANDELLAC en su informe sobre la disposición final es actividades de generación de energía y centros de acopio autorizados.

En la **Figura 38** se aprecia una gráfica combinada de dos ejes que muestra la comparación entre la generación de neumáticos fuera de uso y los neumáticos recolectados por gobierno a través de la implementación de programas para retirar este residuo de manejo especial y darle una disposición final adecuada.



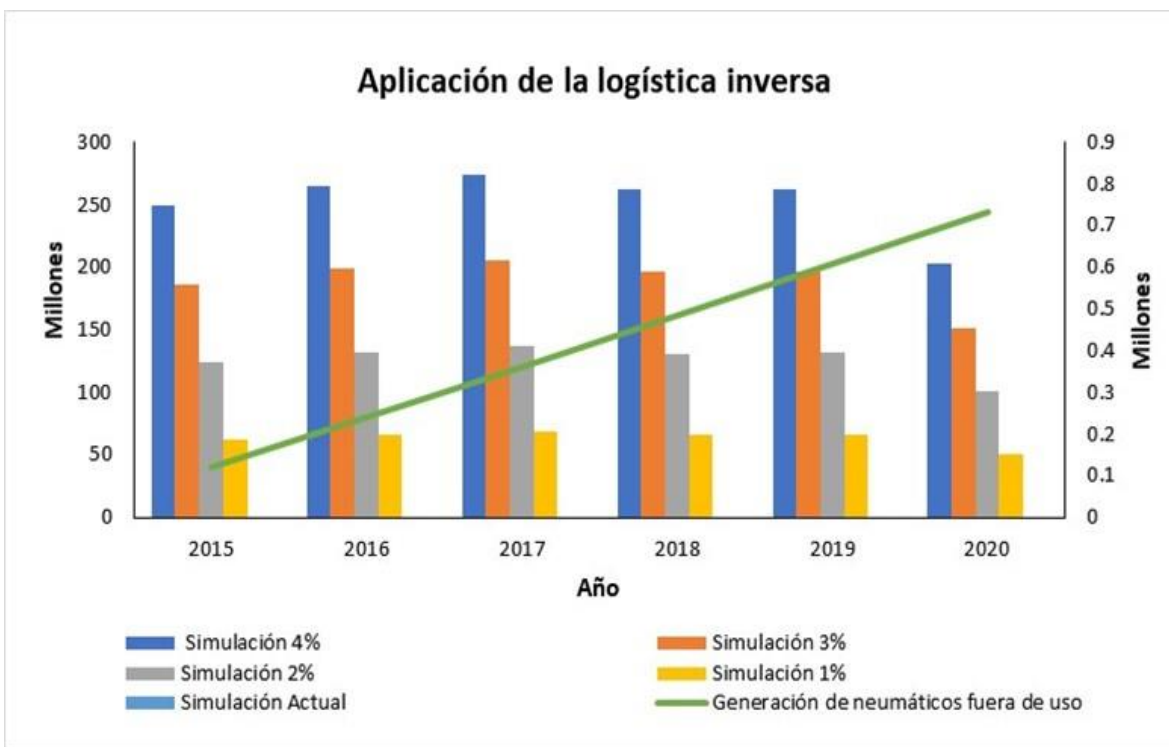
**Figura 38. Legislatura y su aplicación para la recolección de neumáticos fuera de uso en la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

En la **Figura 39**, se observan los resultados obtenidos en las cinco simulaciones sobre la aplicación por parte de las empresas de la logística inversa como estrategia para la disminución de este residuo.

Para obtener la cantidad de piezas, los valores que se multiplicaron fueron el porcentaje por la producción en piezas. Se observa que la cantidad que se podría recolectar en este periodo 2015 al 2020 es menor a un millón de piezas por año esto tomando en cuenta que es la simulación del 4%.

En la Figura también se aprecia que en el año 2020 hubo una disminución en piezas, eso se debe a que la producción de ese año disminuyó, por lo tanto, la cantidad es menor.



**Figura 39. Aplicación de la logística inversa para la recolección de neumáticos fuera de uso en la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

A continuación, se muestra los resultados de las cinco simulaciones que se obtuvieron del sistema específicamente en la generación de neumáticos de desecho, obtenidos con la función:

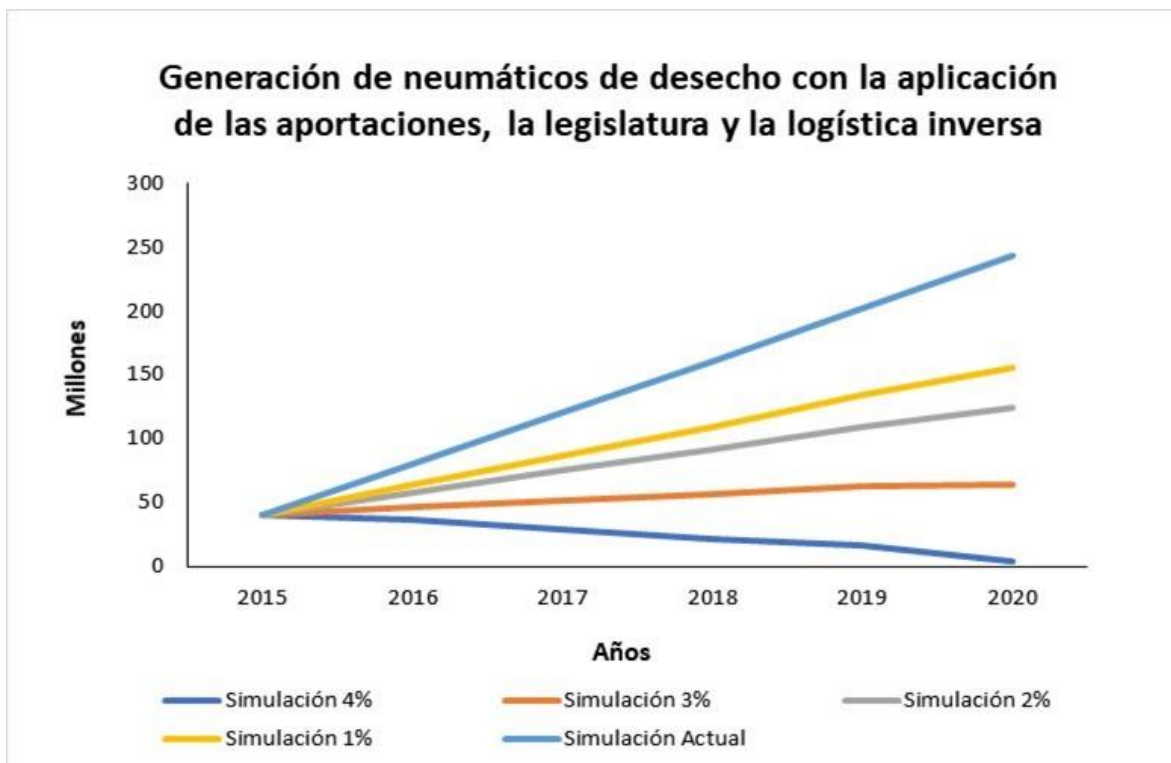
$$f_{GND} = (1 * HZCS) - (ALI + LA + NRA)$$

En la **Figura 40** se observa los cambios significativos que se podrían haber obtenido si se hubiera aplicado la legislatura, logística inversa y las aportaciones por parte de las empresas en la zona centro-sur, es decir, si cada una de las tres se llevara a cabo al mismo tiempo en el mismo año; los resultados como se muestran son positivos, al haber una disminución considerable en la generación de este residuo; como ya se ha escrito en el documento la gravedad está en la incineración a cielo abierto, al recolectarlo cuando se encuentra fuera de uso permite que no se disponga de el con facilidad cuando se abandona.

En la **Figura 40** se visualiza como en el año 2015 comienza con una cantidad de 40,000,300 piezas y conforme pasan los años aumentan o disminuyen, esto como consecuencia directa de aplicar o no las tres variables antes mencionadas.

Por lo tanto, la situación actual mejoraría si se pusiera en práctica actividades para su recolección acopio y envío a diversas actividades que garanticen una disposición final adecuada, así mismo, se observa como en la simulación del 4% va disminuyendo la generación de neumático de desecho gracias a la aplicación de las tres variables, teniendo 40,000,300 piezas en 2015, 36,065,700 piezas en 2016, en 2017 teniendo 29,479,300 piezas, en el 2018 teniendo 21,768,100 piezas, en el 2019 teniendo 16,405,100 piezas y en el 2020 teniendo 4,234,220 de piezas.

Los resultados de la simulación del 4% y los de la situación actual son muy diferentes, pues la diferencia al pasar los años tomando en cuenta la acumulación dan como consecuencia que en el año 2020 sin la aplicación tenemos una generación de más de 243 millones de piezas y con la aplicación del 4% tan solo se tendrían un poco más de 4 millones de piezas.

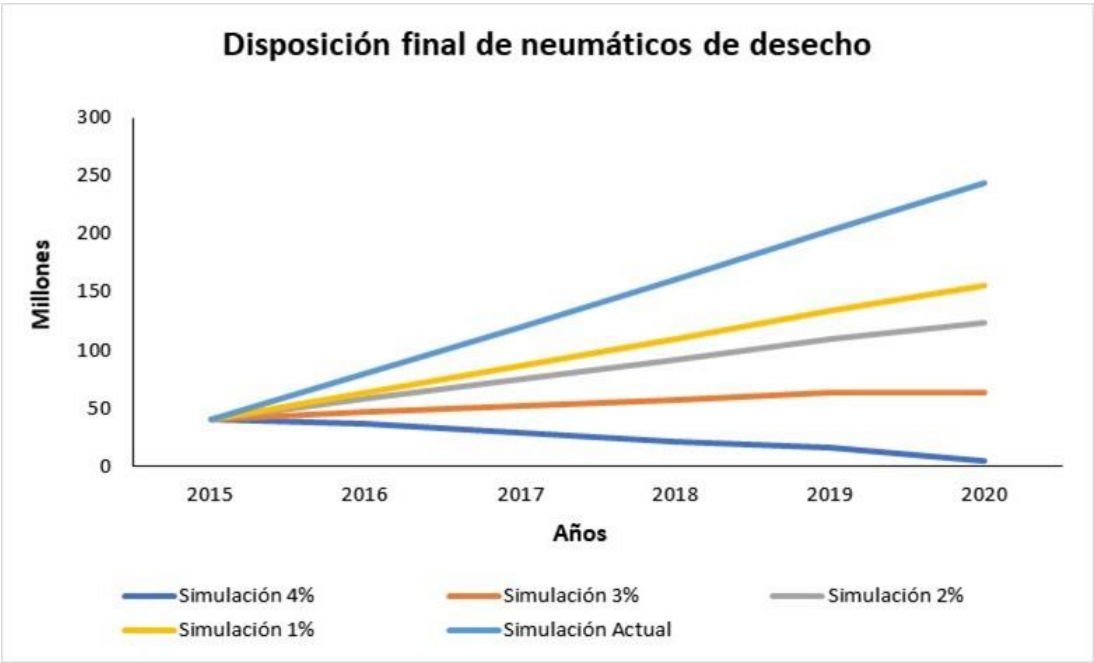


**Figura 40. Generación de neumáticos de desecho con la aplicación de la legislatura, logística inversa y las aportaciones por parte de las empresas en la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

Al existir una disminución en la generación de neumáticos de desecho todo el sistema se ve afectado positivamente, debido, a que por consecuencia disminuye la cantidad que requieren de una disposición final, luego entonces, la cantidad que es enviada a las actividades de generación de energía y centros de acopio autorizado será menor, así como, los que se abandonarían, de igual forma la cantidad que se quemara a cielo abierto será menor, como consecuencia directa, habrá una disminución en la contaminación al ambiente.

A continuación, se muestra en la **Figura 41** los resultados obtenidos para la disposición final de este residuo de manejo especial. Se observa como en cada una de las simulaciones del 1% al 4% la cantidad de piezas va disminuyendo considerablemente, teniendo en el año 2020 para la simulación del 1% una cantidad de 155,487,000 de piezas, para la simulación del 2% la cantidad de 124,027,000 piezas, en la simulación del 3% la cantidad de 64,130,800 de piezas y para la simulación del 4% una cantidad de 4,234,220 de piezas.



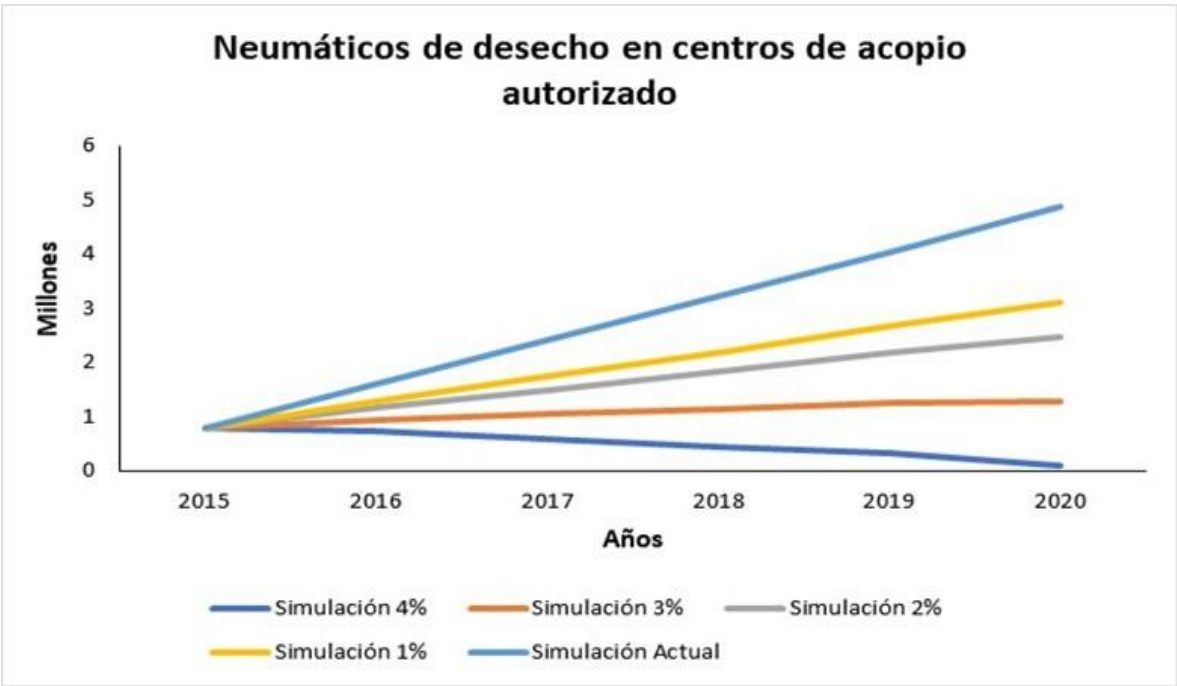
**Figura 41. Disposición de neumáticos de desecho de la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

A continuación, se muestra en la **Figura 42** los resultados obtenidos para la disposición final de este residuo en centros de acopio autorizado, en la **Figura 43** los

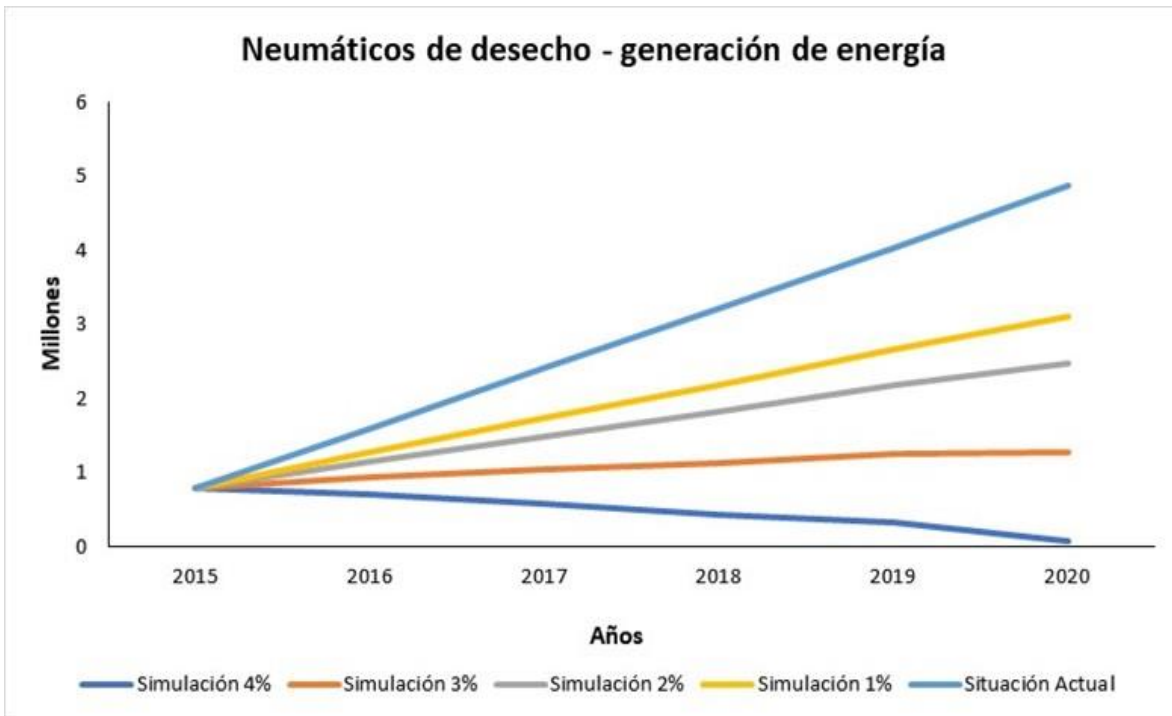
resultados de los que son enviados a generación de energía y en la **Figura 44** los resultados de los que se encuentran en abandono. Se observa como en cada una de las simulaciones del 1% al 4% la cantidad de piezas va disminuyendo, sin embargo, la cantidad enviada a acopio y a generación de energía es menor comparada con las que se encuentran en abandono, lo que beneficia al sistema es desde la aplicación de las tres variables al inicio, por lo tanto, la cantidad que se encuentra en las disposiciones finales será menor a la situación actual.

Para la simulación de acopio y generación de energía (Figura 42 y 43) del 1% en el año 2020 se tiene 3,109,740 piezas; para la simulación del 2% la cantidad de 2,480,550 piezas; en la simulación del 3% la cantidad de 1,282,620 piezas y para la simulación del 4% una cantidad de 84,684 piezas; en la simulación del 1% de abandono (Figura 44) se tienen en el año 2020 la cantidad de 141,493,000 piezas, en la simulación del 2% la cantidad 112,865,000 piezas, en la del 3% la cantidad de 58,359,000 piezas y en la del 4% la cantidad de 3,853,140 piezas.



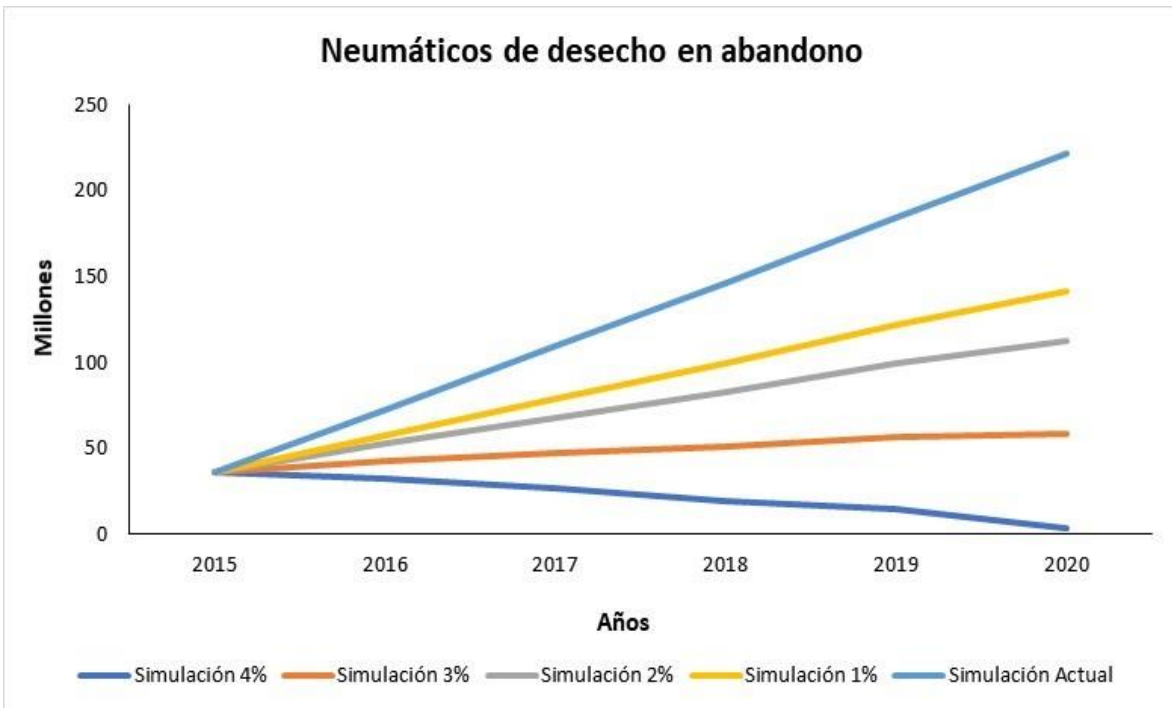
**Figura 42. Disposición de neumáticos de desecho en centros de acopio autorizado de la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).



**Figura 43. Neumáticos de desecho enviados para la generación de energía en la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

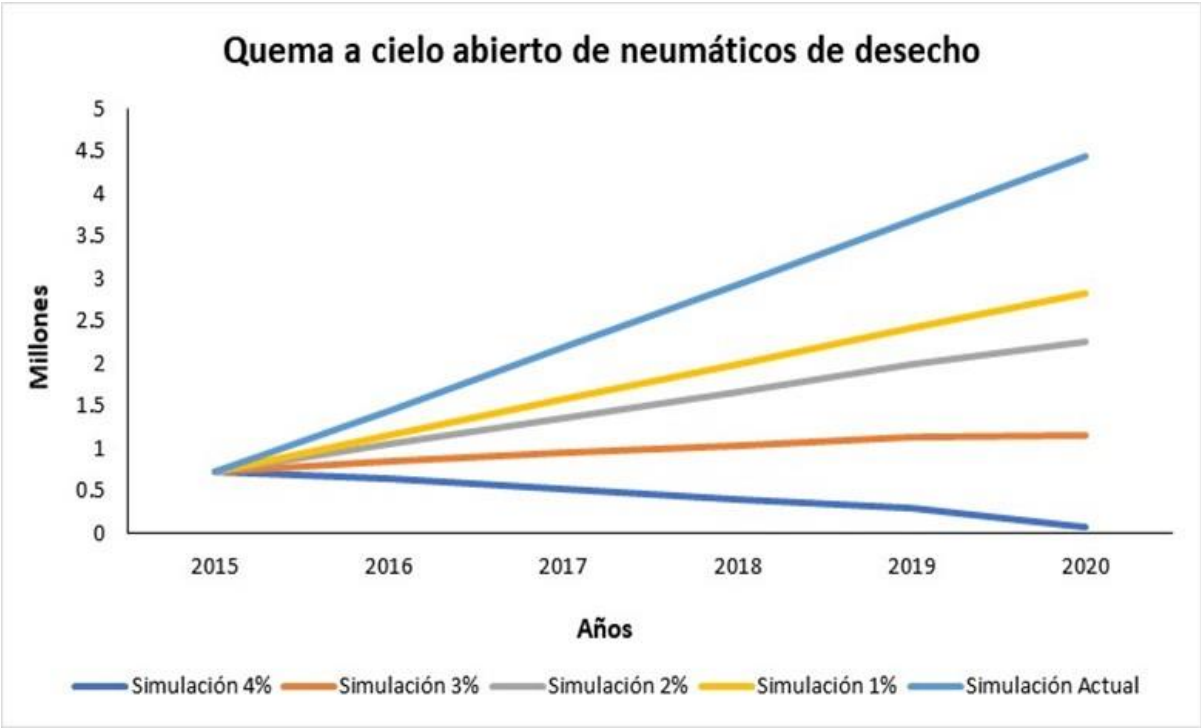


**Figura 44. Neumáticos de desecho en abandono en la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

Como se ha visto hasta ahora las variables del sistema están relacionadas, si una aumenta otra disminuye y produce un efecto en las siguientes, es decir, si las tres variables de aplicación que son legislatura, logística inversa y aportaciones aumentan por la relación que tiene la generación de neumáticos de desecho disminuye, por lo tanto, la cantidad en abandono también disminuye, así como, la cantidad disponible para la quema a cielo abierto, lo que da como resultado, que la contaminación al ambiente sea menor comparada con la situación actual, en ningún resultado mostrado anteriormente ni en los que siguen se minimiza el problema o desaparece, la medida es en miles y millones de piezas.

En la **Figura 45** se observa como la cantidad de neumáticos quemados a cielo abierto disminuyen en las simulaciones, nuevamente en la situación actual en el año 2020 se tiene la cantidad de 4,437, 540 piezas y si se aplica la simulación del 2% disminuye a 2,257,300 piezas y en la simulación del 4% se obtiene 77,063 piezas; la disminución es considerable pasando de millones a miles.



**Figura 45. Quema a cielo abierto de neumáticos de desecho en la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

A continuación, se muestra en la **Figura 46** los resultados obtenidos para la Contaminación del agua, en la **Figura 47** los resultados de la Contaminación del aire y en

la **Figura 48** los resultados de la Contaminación del suelo por la quema a cielo abierto en la zona centro-sur de México.

Se observa como las variables de contaminación están relacionadas con la quema a cielo abierto y la disposición final de abandono dentro del sistema, las funciones utilizadas para el cálculo fueron:

Contaminación de suelo generada por la quema a cielo abierto de neumáticos de desecho

$$F_{cs} = (36.26\%) \text{ (NDQ)}$$

Contaminación de agua generada por la quema a cielo abierto de neumáticos de desecho

$$F_{cA} = (.02\%) \text{ (NDQ)}$$

Contaminación de aire generada por la quema a cielo abierto de neumáticos de desecho

$$F_{cAI} = (63.54\%) \text{ (NDQ)}$$

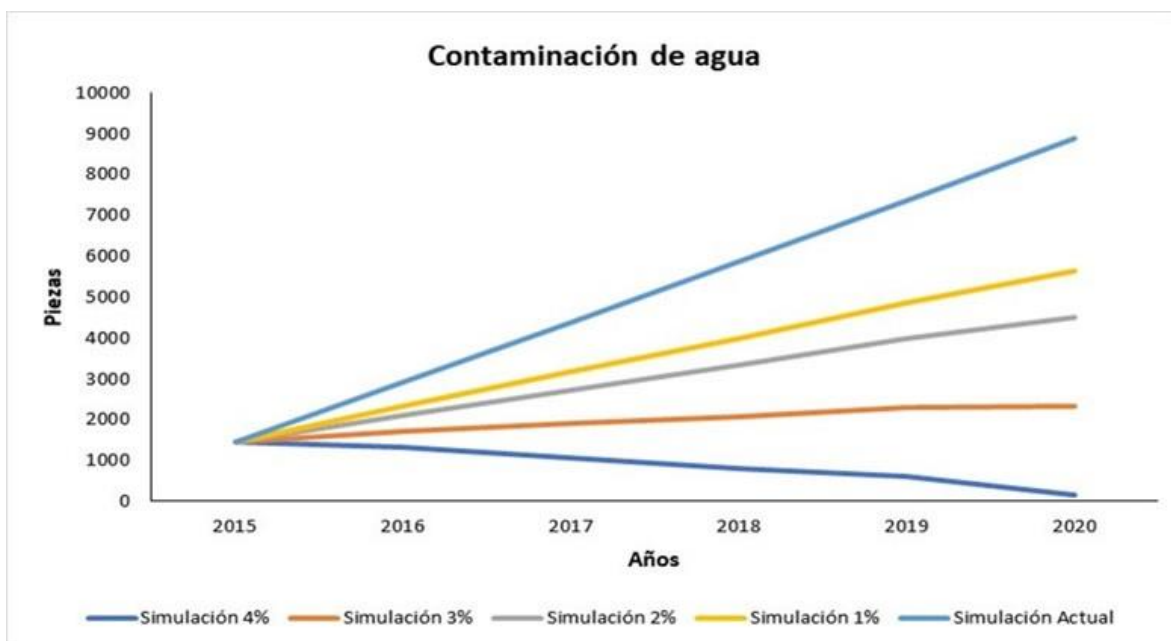
En cada una de las simulaciones del 1% al 4% la cantidad de piezas que contaminan va disminuyendo, sin embargo, no muestra que se detenga, ni que no exista o deje de hacerlo.

Lo que se observa como resultado es la comparación entre la situación actual y las simulaciones cuyo origen viene desde los inicios del sistema; la contaminación generada va en relación a un porcentaje constante depende de si es suelos, aire, agua y a la cantidad de neumáticos de desecho que se queman.

En la **Figura 46** se observa como en la situación actual la contaminación al agua va en aumento llegando al año 2020 con lo equivalente a 8,875 piezas, afectando al ecosistema receptor, en la simulación del 4% se muestra lo equivalente a 154 piezas; durante la quema no se tiene control de nada, las emisiones al aire son demasiadas, en la **Figura 47** se visualiza la situación actual en el año 2020 de la contaminación que se emite al aire en la quema a cielo abierto de 4,437,540 piezas que es un equivalente a 2,819,610 en forma de sólidos volátiles, si se aplica la simulación del 4% la cantidad de sólidos volátiles para el mismo año disminuiría a lo equivalente de 48,966 piezas.

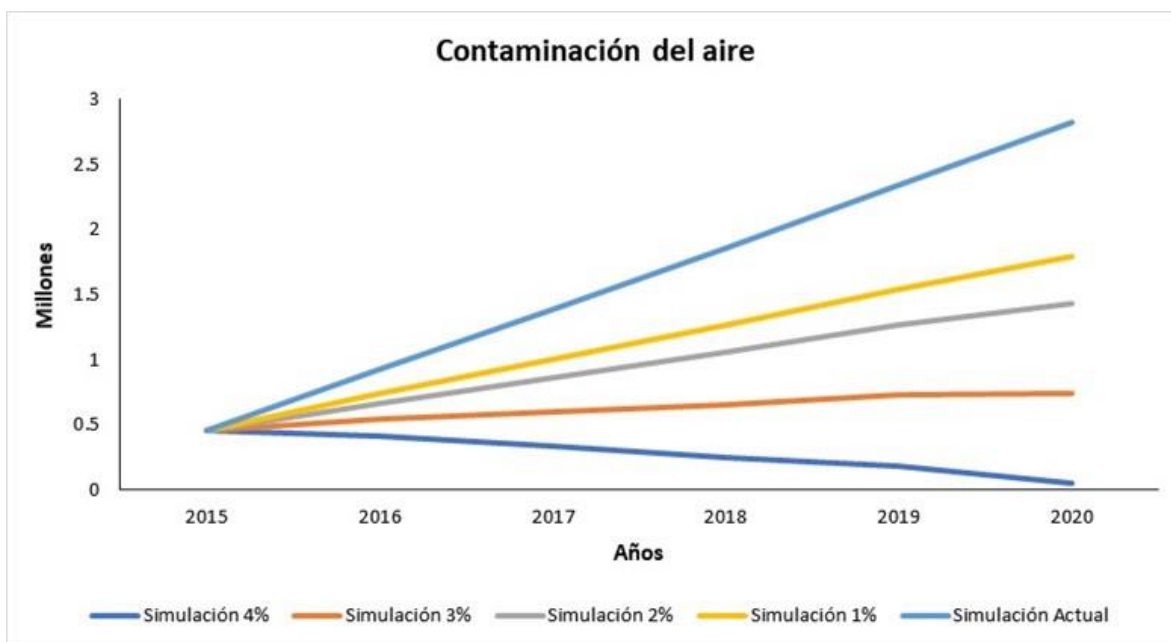
Los resultados para la situación actual de la contaminación de suelo durante la quema se aprecian en la **Figura 48**, notando como en el año 2020 la contaminación ha aumentado teniendo lo equivalente a 1,609,050 de piezas en forma de cenizas, nuevamente en las simulaciones se aprecia la disminución si se aplica el 1%,2%,3% o 4% de logística inversa, aportaciones y legislatura en el sistema, dando como resultado, en el

año 2020 en la simulación del 1% lo equivalente a 1,026,110 piezas, en la del 2% la cantidad de 818,497 piezas, en la del 3% la cantidad de 423,220 piezas y finalmente en la simulación del 4% la cantidad de 27,943 piezas.



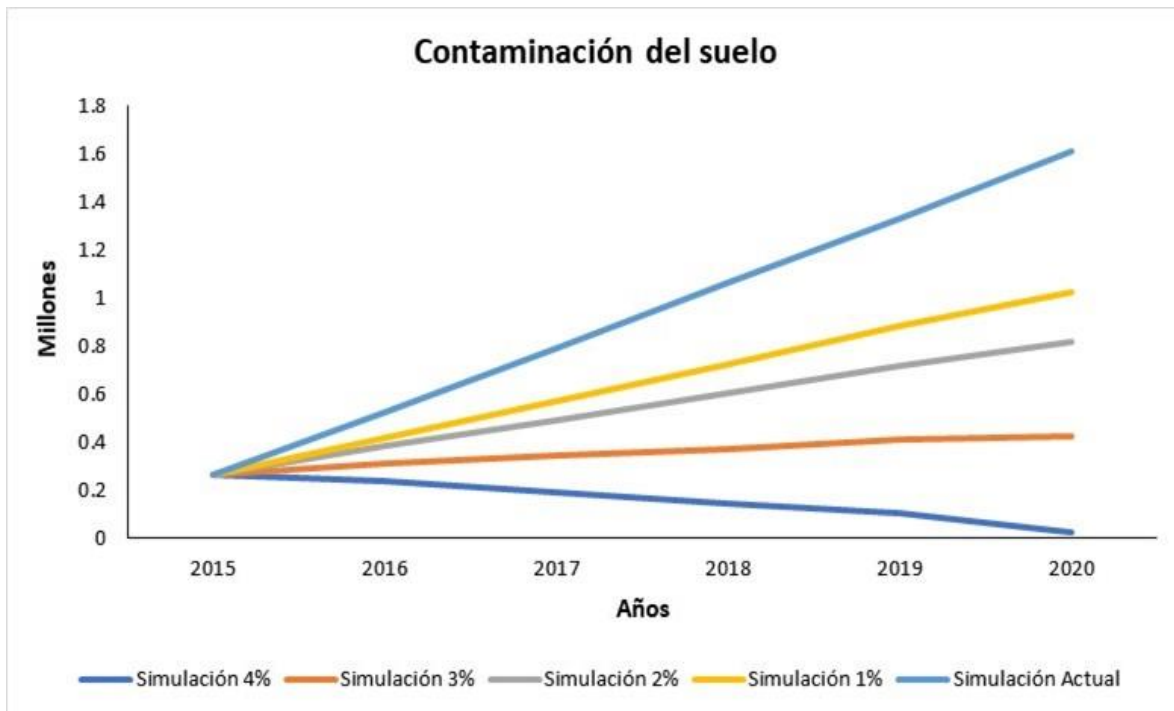
**Figura 46. Contaminación del agua como consecuencia de la quema a cielo abierto del neumático de desecho en la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).



**Figura 47. Contaminación del aire como consecuencia de la quema a cielo abierto del neumático de desecho en la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).



**Figura 48. Contaminación del suelo como consecuencia de la quema a cielo abierto del neumático de desecho en la zona centro-sur.**

Nota. Elaborado con datos de INEGI (2022), usando el programa (Ventana Systems, 2015).

## CAPITULO VI. DISCUSIÓN

---

El acelerado crecimiento de la población y de las economías ha propiciado el incremento de los residuos de toda índole, dentro de ellos están los neumáticos de desecho. Esta situación aunada a la falta de una economía circular y a la falta de estrategias dentro de las empresas manufactureras de neumáticos de la zona centro-sur de México, han contribuido al acumulamiento de este residuo especial a lo largo de los años; se debe destacar que se agudiza la problemática al carecer de una aplicación activa del marco jurídico nacional y de las sanciones oportunas.

Numerosos estudios han investigado los daños que provoca el mal manejo y disposición final de este desecho, afectando tanto a los seres vivos como al ambiente (Castro, 2008; Health Protection Agency, 2010, 2012; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2011).

En la presente investigación se describe la zona geoeconomica centro-sur con base en los Objetivos de Desarrollo Sustentable de la Agenda 2030, esto con la finalidad de enriquecer la información existente sobre la división realizada por Bassols (1992) y Cantú (2009), si bien, los mapas pueden mostrar por Estado las diferencias que existen, en cuanto a zona se observo que es esta la más importante de México, debido al número de población, al parque vehicular que alberga, al bajo porcentaje de población que vive por debajo del umbral internacional de pobreza, al alto porcentaje de escuelas con acceso a electricidad, por residir tres empresas manufactureras de neumáticos importantes, etc.

Para la localización de las empresas manufactureras de neumáticos en la zona, se tomo como base la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE, 2019), aplicando la encuesta estructurada vía telefónica al gerente de producción o similar de cada empresa registrada bajo la clasificación del SCIAN (Sistema de Clasificación Industrial del Norte) con el código 326211, se identificaron 24 empresas, de las cuales 15 son empresas manufactureras y 9 son oficinas administrativas o centros de almacenaje, de las 15 son tan solo 3 las que producen neumático y las 12 restantes manejan y/o distribuyen productos del hule. En este sentido se detecta que el Directorio Nacional tiene mal clasificadas a las empresas.

En cuanto a la aplicación de la encuesta a estas tres empresas manufactureras se detectó que existe el conocimiento del término “logística inversa”, aunque no es

implementado como una estrategia dentro de sus procesos, por lo tanto, no propician la reducción de este contaminante en el ambiente.

Estos resultados son los primeros en obtenerse sobre la aplicación de la logística inversa en los procesos de manufactura de los neumáticos como estrategia para la disminución del mismo una vez desechado, existen investigaciones como la de Gómez (2011) y Bermeo et al., (2012) que copilan información, la cual, permite identificar la importancia de esta estrategia en las cadenas de suministro de empresas en los ámbitos nacional e internacional para proteger el medio ambiente y recuperar valor a los productos, a través de procesos de reciclaje, reúso y disposición, entre otros. Banguera et al., (2018), realizaron una investigación en la que describen varias características del diseño de redes de logística inversa bajo responsabilidad extendida del productor, esto en Santiago de Chile, los resultados que obtuvieron muestran los conjuntos óptimos de centro de servicio, centros de acopio y plantas de reprocesamiento para cada escenario, permitiendo estudiar el máximo beneficio/mínima inversión para desarrollar un sistema de gestión bajo la ley nacional del país.

Los resultados obtenidos en la estimación de la generación de neumáticos de desecho en la zona coincide con la fórmula utilizada en las estimaciones llevadas a cabo por año respectivamente para todo el país por la COCEF (2008), por Cohen & Jáuregui (2010), Esparza Ramos et al., (2011) y INECC & SEMARNAT (2012), las cuales, se basan en la regla universalmente aceptada de uno por habitante; pero difiere con la publicada por CNIH & ANILLAC (2013) y por el Manejo Responsable de Llantas Usadas A.C. (2015), debido a que ellos estiman una generación de 28,900,000 y de 32,000,000 al año, no proporcionan información alguna sobre el proceso llevado para la obtención de sus cifras. En este trabajo se reporta que los porcentajes de los niveles de contaminación por disposición final proporcionados por la ANDELLAC son también utilizados por el Gobierno del Distrito Federal (2002).

Esta investigación ha demostrado que para la estimación de la contaminación por disposición final quema a cielo abierto, la incineración auto sostenida de los fragmentos se desarrolló con rapidez después de 29.53 segundos  $\pm 4.49$ , el tiempo de incineración promedio fue de 8.33 minutos  $\pm 2.38$ , contaminando el aire con un porcentaje promedio de 63.54% respecto al peso inicial, al liberarlo en forma de emisiones de sólidos volátiles, esto coincide con el porcentaje reportado por Kerekes et al. (2018), la temperatura de ignición

fue de  $333.6^{\circ}\text{C} \pm 84.2$ , este hallazgo es compatible con los de Hansen (1995) y Juma et al., (2007), quienes indican que la temperatura de ignición oscila entre  $300\text{-}350^{\circ}\text{C}$ .

La incineración a cielo abierto de neumáticos de desecho al ser una combustión incompleta y no controlada es nociva para el ambiente y el ser humano.

Los resultados del análisis de las cenizas bajo la Norma NMX-AA-051-SCFI-2001, indican que el plomo (Pb) es el metal pesado con mayor presencia, sin embargo, existe la presencia de zinc (Zn) en menor cantidad, también contiene concentraciones de arsénico (As) y otros metales pesados como cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), cobre (Cu) y níquel (Ni); estos datos se compararon con los límites máximos permisibles (LMP) para metales pesados contenidos en el agua para uso en riego agrícola de la NOM-001-SEMARNAT- 1996 y del Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89., (1989), así como, los Límites máximos permisibles (LMP) para aguas naturales de la EPA 440/5- 86-001 / Quality Criteria for Water (1986) y se obtuvo que las concentraciones sobrepasaron los LMP tanto de la Norma, del Acuerdo y del estatuto de la EPA. En cuanto al análisis realizado bajo la Norma NMX-AA-103-SCFI-2006, los resultados que se obtuvieron sobrepasaron los LMP de la misma desde un 5266% hasta un 63500%.

Los resultados obtenidos de las pruebas de toxicidad aguda y crónica realizadas en el organismo *Daphnia magna* demuestran que los elutriados de cenizas de neumático de desecho representan un riesgo para el organismo. Se obtuvo una CE50 calculada para una exposición de 48 horas de 5.83 g/L, esto coincide con Wik & Dave (2006), quienes reportaron que existen efectos tóxicos en *P. subcapitata*, *D. magna* y *Ceriodaphnia dubia* expuestas a una serie de extractos acuosos secuenciales de polvo de neumáticos raspado de las bandas de rodamiento de los neumáticos, ellos obtuvieron un intervalo de CE50 a las 48 h que fue de 0.5g/L > 10.0 g/L, pero contrasta con los hallazgos de Marwood et. al (2011), quienes reportaron que los elutriados de sedimentos enriquecidos con partículas de desgaste de neumáticos y carreteras no mostraron toxicidad para tres especies de prueba acuáticas comunes en concentraciones nominales de 10g/L o menos, sin embargo, es evidente que las diferencias entre los hallazgos se pueden atribuir a los elutriados, así como, a las condiciones de prueba.

En cuanto a la prueba crónica se registraron datos importantes en cuanto a la afectación de la población al ser expuesta a tres diferentes tratamientos subletales, se observaron efectos específicos sobre parámetros asociados a la reproducción total: el

retraso en la madurez sexual y la reducción en el promedio de neonatos por hembra grávida, lo que perturbo el rendimiento poblacional y la tasa finita de crecimiento. Este efecto reproductivo se respalda en el “principio de asignación”, el cual, menciona que la energía se reparte en exigencias como mantenimiento, crecimiento y reproducción del organismo, si en alguno se gasta energía extra los dos restantes tendrán menos energía disponible, por lo tanto, la disminución en la reproducción permitió el mantenimiento y la supervivencia de los organismos (Heckmann et al., 2007; Linares et al., 2020).

Se debe resaltar que el valor de PGR tiene datos positivos para los tratamientos, los cuales, son indicativo de una población en aumento, no obstante, pese a que se registraron valores positivos, es de subrayar que los datos resultan muy por debajo del grupo control, es decir, la población se reduce conforme aumenta la concentración de cenizas; esto discrepa con los datos obtenidos por Panko et al. (2012), los cuales, mencionan que los elutriados de sedimentos enriquecidos con partículas de desgaste de neumáticos y carreteras no mostraron toxicidad, ni afectaciones en crecimiento y supervivencia en sus organismos de prueba.

Marwood et al., (2011) han demostrado que el Zinc es el metal pesado más abundante en neumáticos y tiene mayor probabilidad de presentar toxicidad en el organismo de prueba, los resultados obtenidos son consistentes con investigaciones previas como las de Gualtieri, Andrioletti, Mantecca, et al., (2005) y la de Wik et al. (2009); la concentración obtenida de Zn en el estudio realizado a las cenizas sobrepasa las concentraciones letales agudas soluble en exposiciones de 48 h de D. magna, las cuales, oscilan aproximadamente entre 50 µg/L a > 3 mg/L dependiendo de las condiciones de prueba (Marwood et al., 2011; Mount & Norberg, 1984; Muysen & Janssen, 2007; Oda et al., 2006).

Los resultados obtenidos del modelo de simulación dinámica del sistema neumático de desecho de la zona centro-sur, son cinco simulaciones, la primera muestra la situación real, la cual, se obtuvo de la investigación realizada en los objetivos anteriores; las simulaciones siguientes se modificaron en cuanto a la participación de las empresas en aportaciones y la implementación de logística inversa, así como, en la aplicación de la legislación; los porcentajes que se simularon fue el 1%, 2%, 3% y el 4%, estos porcentajes se definieron con base a la información obtenida de la ANDELLAC, que menciona el

porcentaje máximo de las actividades de acopio en centros autorizados y generación de energía cuentan con el 2% cada una.

Cada una de las simulaciones permite visualizar que ocurre en el sistema si una de las variables incrementa. En el sistema neumático de desecho se obtuvo que tres variables son fundamentales en la disminución de la contaminación, al aumentar la participación de las empresas, de las aportaciones y la aplicación de la legislación, se visualiza como resultado la disminución en la contaminación generada en suelo, aire y agua, lo que implica una disminución en el impacto ambiental específicamente por la quema a cielo abierto. Como se sabe cada sistema es particular pues tiene sus propias variables que lo conforman, así como, sus relaciones son únicas del sistema, aunado, a los datos que lo integran, Rodríguez et al., (2017), en su investigación utilizaron la dinámica de sistemas para explicar el comportamiento de las emisiones generadas por cuatro procesos: la producción de llantas nuevas, el reencauche, la trituración mecánica y el co-procesamiento, esto con cifras de la Alcaldía Mayor de Bogotá.

## CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

---

La contaminación en la zona centro-sur ha sido resultado de un crecimiento en las economías, las cuales demandan mayores insumos y servicios para su población, aunado, a la falta de una economía circular, lo que propicia que este desecho se acumule al pasar de los años. Los resultados demuestran que se tiene conocimiento de estrategias para su disminución, pero no se llevan a cabo, tal es el caso de la logística inversa.

La disposición final de los neumáticos fuera de uso es también un tema importante, que se tiene que abordar, de 37,246,889 millones en el año 2020, solo 744,938 fueron enviados a un centro de acopio y la misma cantidad fue dirigida a la generación de energía en hornos de cemento. El resto se queda en abandono y es un foco de infección constante, incluso pasa de ser un residuo de manejo especial a un residuo peligroso al ser quemado, los efectos del humo por inhalación pueden causar desde intoxicaciones agudas o subagudas hasta conducir al coma o a la muerte por asfixia durante intensas exposiciones.

Las evidencias indican que el 63.54% del peso inicial se va al aire durante la combustión en forma de sólidos volátiles y el resto se queda en el suelo como cenizas, se demostró tanto con una evaluación de toxicidad aguda como crónica que estas son dañinas para los ecosistemas dulceacuícolas, al afectar al primer consumidor de la cadena trófica, el organismo *D. magna*. Además, contienen principalmente metales pesados, arsénico y compuestos orgánicos volátiles que sobrepasaron los LMP por las NOM.

Si bien esto se expresa de forma individual, tenemos que resaltar el modelo de simulación dinámica que involucro los tres factores del desarrollo sustentable, cuyos datos de las variables se obtuvieron del logro de los tres objetivos específicos anteriores; en dicha simulación se tomó un periodo de cinco años (2015-2020), esta simulación dio como resultado la visualización del problema a través de los años, demostró un crecimiento en la cantidad de neumáticos de desecho, y por ende, un impacto en el ambiente negativo por la quema de los mismos, observando ser el aire el afectado en primer lugar.

También se detectó las variables que si aumentan pueden provocar un cambio positivo en el sistema y estas son: participación de las empresas, aportaciones y aplicación de la legislatura, en las simulaciones propuestas del 1%, 2%, 3% y el 4%, se observó un cambio en la cantidad final que es quemada a cielo abierto y por consecuencia una disminución en el impacto negativo al ambiente. Esto se debe a que los esfuerzos conjuntos

pueden reducir el crecimiento de este residuo si recolectan los neumáticos fuera de uso y los canalizan a una disposición final adecuada.

Estos resultados nos deben hacer reflexionar que es necesario visualizar el problema de forma holística e interdisciplinaria, para poder tomar decisiones que permitan establecer precedentes de lo que podemos o no hacer para la disminución de este residuo. Se debe hacer valer el Marco Jurídico que existe, obligar a las empresas a cumplirlo y esto beneficiara al ambiente, los entes sociales son la clave para el cambio en cuanto a este residuo de manejo especial.

## CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS

---

1. Adachi, K., & Tainosho, Y. (2004). Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust. *Environment International*, 30(8), 1009–1017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.04.004>
2. Agency, H. P. (2010). Chemical Hazards and Poisons Report - Issue 18, October 2010. 18.
3. B.V., E. (2021). SCOPUS. <https://www-scopus-com.proxydgb.buap.mx/term/analyzer.uri?sid=2fd9162b7acd4338544d60043d7ff8&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY+%28+%28+%28+%22scrap+tire%22+OR+%22waste+tire%22+%29+AND+%28+%22environmental+pollution%22+OR+%22environmental+contamin>
4. Barbabosa, R. (2022). ¿QUE SON LOS SISTEMAS COMPLEJOS? (p. 9). [https://www.researchgate.net/publication/358862988\\_QUE\\_SON\\_LOS\\_SISTEMAS\\_COMPLEJOS](https://www.researchgate.net/publication/358862988_QUE_SON_LOS_SISTEMAS_COMPLEJOS)
5. Banguera, L. A., Sepúlveda, J. M., Ternero, R., Vargas, M., & Vásquez, Ó. C. (2018). Reverse logistics network design under extended producer responsibility: The case of out-of-use tires in the Gran Santiago city of Chile. *International Journal of Production Economics*, 205(August), 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.006>
6. Bassols, Á. (1992). México: formación de regiones económicas. In Instituto de investigaciones Económicas (Ed.), *Universidad Nacional Autónoma de México (Primera re, Issue 1)*. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://ru.iiec.unam.mx/1563/1/MexFormDeReqEco.pdf>
7. Bermeo, W., Gálvez, P., & Zapata, H. (2012). *Logística Inversa:Proceso. Modelos y Casos*.
8. Cano, E., Cerezo, L., & Urbina, M. (2007). Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso (J. de la S. Ríus (ed.)). Fundación CEIM; Comunidad de Madrid. Dirección General de Universidades e Investigación. [www.madrimasd.org](http://www.madrimasd.org)
9. Cantú, G. M. D. de. (2009). México. Estructuras política, económica y social. (L. G. Figueroa (ed.); tercera ed). Pearson educación de México S.A. de C.V.
10. Castro, G. (2007). Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos. [https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material\\_Complementario/Reutilizacion\\_Reciclado\\_y\\_Disposicion\\_final\\_de\\_Numatico.pdf](https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Reutilizacion_Reciclado_y_Disposicion_final_de_Numatico.pdf)
11. Castro, G. (2008). Materiales y Compestos para la Industria del neumático. Diciembre, 1–57. [http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material\\_Complementario/Materiales\\_y\\_Compeostos\\_para\\_la\\_Industria\\_del\\_Numatico.pdf](http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compeostos_para_la_Industria_del_Numatico.pdf)
12. Centre Français du Caoutchouc et des Polymères industriels. (2007). Incendie dans un entrepôt de stockage de pneumatiques équipé d'une installation sprinkler. [https://www.lecaoutchouc.com/images/Partie\\_publicque\\_ESS/Dossier\\_N3\\_synthese\\_Version\\_française.pdf](https://www.lecaoutchouc.com/images/Partie_publicque_ESS/Dossier_N3_synthese_Version_française.pdf)
13. Centro de Estudios Transfronterizos de Norte América. (2010). Evaluación de la legislación de las llantas de desecho en los estados fronterizos de los Estados

- Unidos y México. <https://www.csgwest.org/programs/documents/4-FINAL-NACTS-CLFreportesobrelasllantasdedesechorevisionfebrero2010.pdf>
14. Clarivate, © 2021. (2021). Web of Science. [http://apps.webofknowledge.com.proxydgb.buap.mx/summary.do?product=WOS&search\\_mode=CitationReport&colName=WOS&page=1&qid=2&SID=6BqHHCx1VS6q8E2bshw](http://apps.webofknowledge.com.proxydgb.buap.mx/summary.do?product=WOS&search_mode=CitationReport&colName=WOS&page=1&qid=2&SID=6BqHHCx1VS6q8E2bshw)
  15. CNIH & ANILLAC. (2013). Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho. In Semarnat.
  16. COCEF. (2008). Propuesta de estrategia y política pública. [https://www.nadb.org/uploads/files/4\\_propuesta\\_de\\_estrategia\\_y\\_politica\\_publica\\_para\\_el\\_manejo\\_integral\\_de\\_llantas\\_2008.pdf](https://www.nadb.org/uploads/files/4_propuesta_de_estrategia_y_politica_publica_para_el_manejo_integral_de_llantas_2008.pdf)
  17. Cohen, M. A., & Jáuregui, Ó. F. (2010). Las agencias ambientales binacionales de México y Estados Unidos: balance y perspectiva a dieciséis años de su creación. *Norteamérica*. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-35502010000100006](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-35502010000100006)
  18. DeDavid.com. (2019). Marcas de neumáticos. <https://www.neumaticos-taller.com/>
  19. DENUE. (2019). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. In Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/>
  20. Downard, J., Singh, A., Bullard, R., Jayarathne, T., Rathnayake, C. M., Simmons, D. L., Wels, B. R., Spak, S. N., Peters, T., Beardsley, D., Stanier, C. O., & Stone, E. A. (2015). Uncontrolled combustion of shredded tires in a landfill - Part 1: Characterization of gaseous and particulate emissions. *Atmospheric Environment*, 104, 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.12.059>
  21. Ellen MacArthur Foundation. (2014). Hacia una Economía Circular - Resumen Ejecutivo. 9. [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/EMF\\_Spanish\\_exec\\_pages-Revise.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/EMF_Spanish_exec_pages-Revise.pdf)
  22. Esparza Ramos, F. J., de la Riva Alvarado, J. C., Sotelo Villa, J. S., & Figueroa Parra, I. Y. (2011). Factibilidad Y Plan de Manejo de Llantas de Desecho Municipio de Ojinaga. SEMARNAT- México U.S. EPA COCEF Frontera 2012. [http://server.cocef.org/Final\\_Reports\\_B2012/20167/20167\\_Final\\_Report\\_ES.pdf](http://server.cocef.org/Final_Reports_B2012/20167/20167_Final_Report_ES.pdf)
  23. Gobierno de España. (n.d.). Calidad del aire. Retrieved May 11, 2021, from <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/default.aspx>
  24. Gobierno del Distrito Federal. (2002). Llantas usadas diagnóstico de la situación actual en el Distrito Federal. In Secretaría del Medio Ambiente. [http://www.residuossolidos.df.gob.mx/work/sites/tdf\\_rs/resources/LocalContent/54/2/LLANTAS\\_USADAS\\_DIAG.pdf](http://www.residuossolidos.df.gob.mx/work/sites/tdf_rs/resources/LocalContent/54/2/LLANTAS_USADAS_DIAG.pdf)
  25. Gómez, R. (2011). Logística inversa un proceso de impacto ambiental y productividad. *Producción + Limpia*, 5(2), 63–76. <http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/93/1/63-76.pdf>
  26. Groover, M. P. (2014). 9.2 Manufactura de neumáticos y otros productos de hule. In M. Á. Toledo Castellanos (Ed.), *Introducción a los procesos de manufactura* (pp. 191–194). McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
  27. Hansen, P. A. (1995). *Fire in tyres. Heat release rate and response of vehicles*.
  28. Health Protection Agency. (2010). *Chemical Hazards and Poisons Report - Issue 18, October 2010*. 18.

29. Health Protection Agency. (2012). *Chemical Hazards and Poisons Report - Issue 21, June 2012*. 21.
30. Higa, Y., Thi Yen, N., Kawada, H., Hai Son, T., Thuy Hoa, N., & Takagi, M. (2010). Geographic distribution of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* collected from used tires in Vietnam. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 26(1), 1–9. <https://doi.org/10.2987/09-5945.1>
31. Honório, N. A., Cabello, P. H., Codeço, C. T., & Lourenço-De-Oliveira, R. (2006). Preliminary data on the performance of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* immatures developing in water-filled tires in Rio de Janeiro. *Memorias Do Instituto Oswaldo Cruz*, 101(2), 225–228. <https://doi.org/10.1590/S0074-02762006000200017>
32. INECC, & SEMARNAT. (2012). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos; 2012. 201.
33. INEGI. (2015). Resultados definitivos de la encuesta intercensal 2015. Boletín de Prensa, 524/15, 1–4. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/intercensal/2015/doc/especiales2015\\_12\\_3.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/intercensal/2015/doc/especiales2015_12_3.pdf)
34. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016). Estadísticas a propósito de... la Industria hulera. [http://www.cnih.org.mx/hule\\_8ago2016\\_camara.pdf](http://www.cnih.org.mx/hule_8ago2016_camara.pdf)
35. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2018 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (ed.); Instituto). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/AEGPEF\\_2018/702825107017.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/AEGPEF_2018/702825107017.pdf)
36. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020a). Mapa Digital de México para escritorio V 6.3.0 (6.3.0). <https://www.inegi.org.mx/temas/mapadigital/>
37. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020b). Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030- Gobierno de México. Sistema de Información de Los Objetivos de Desarrollo Sostenible, México Derechos Reservados © INEGI.
38. Juma, M., Korenova, Z., Markos, J., Jelemensky, L., Bafrnec, M., & Koren, Z. (2007). Experimental study of pyrolysis and combustion of scrap tire. *Polym. Adv. Technol*, November 2006, 144–148. <https://doi.org/10.1002/pat>
39. Kerekes, Z., Lubláy, É., & Kopecskó, K. (2018). Behaviour of tyres in fire: Determination of burning characteristics of tyres. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 133(1), 279–287. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7001-9>
40. Laguna, G., Marcelín, R., Patrick, G., & Vázquez, G. (2016). COMPLEJIDAD Y SISTEMAS COMPLEJOS : UN ACERCAMIENTO MULTIDIMENSIONAL (Mariana Benítez, E. Vizcaya, O. Miramontes, E. Azpeitia, & L. Caballero (eds.)). EditoraC3 y Coplt-arXives. <http>
41. Linares, G. Y., Linares, F. G., García, V. S., Martínez, C. R., Peña, M. R., & Morales, L. L. (2020). The effects of oxytetracycline chronic toxicity on the population dynamics of *D. Magna* in the presence of UV-B. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(3), 4195–4205. [https://doi.org/10.15666/aeer/1803\\_41954205](https://doi.org/10.15666/aeer/1803_41954205)
42. López, F. A., Centeno, T. Á., & Alguacil, F. J. (2012). Aprovechamiento energético de residuos: el caso de los neumáticos fuera de uso. 1–9.

- [http://www.energia2012.es/sites/default/files/Aprovechamiento energético de residuos,el caso de los neumáticos fuera de uso.pdf](http://www.energia2012.es/sites/default/files/Aprovechamiento_energético_de_residuos,el_caso_de_los_neumáticos_fuera_de_uso.pdf)
43. Machin, E. B., Pedroso, D. T., & de Carvalho, J. A. (2017). Energetic valorization of waste tires. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(August 2016), 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.110>
  44. Manejo Responsable de Llantas Usadas, A. C. (2015). Plan de Manejo de Neumáticos Usados de Desecho Conforme a la NOM-161-SEMARNAT-2011. Semarnat, 88. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/190012/Plan\\_de\\_Manejo\\_de\\_Neumaticos\\_Usados.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/190012/Plan_de_Manejo_de_Neumaticos_Usados.pdf)
  45. Marwood, C., McAtee, B., Kreider, M., Ogle, R. S., Finley, B., Sweet, L., & Panko, J. (2011). Acute aquatic toxicity of tire and road wear particles to alga, daphnid, and fish. *Ecotoxicology*, 20(8), 2079–2089. <https://doi.org/10.1007/s10646-011-0750-x>
  46. Matute, F., Calle González, F. E., & Hernán, P. (2011). Implementación y estandarización de estrategias de manufactura “5’S y Kanban” en el área de preparación de materiales en la Empresa Continental Tire Andina S.A. Universidad Politécnica Salesiana Ecuador.
  47. Mellado, V., & Carracedo, D. (1993). Contribuciones de la filosofía de la ciencia a la didáctica de las ciencias. *Enseñanza de Las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 11(3), 331–339. <https://ddd.uab.cat/record/23365>
  48. Murray, V. (2003). Chemical Hazard and Poisons Report Chemical Hazards and Poisons Report Editorial. 1, 1–40.
  49. Ortiz, O., Ocampo, W., & Laura, D. (2017). Environmental impact of end-of-life tires: Life cycle assessment comparison of three scenarios from a case study in Valle Del Cauca, Colombia. *Energies*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/en10122117>
  50. Park, I., Kim, H., & Lee, S. (2018). Characteristics of tire wear particles generated in a laboratory simulation of tire/road contact conditions. *Journal of Aerosol Science*, 124(July), 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.07.005>
  51. Pereira, J. . (2010). Consideraciones básicas del pensamiento complejo de Edgar Morin, en la educación. *Revista Electrónica Educare*, 14(1), 67–75. <http://revistas.una.ac.cr/index.php/EDUCARE/article/view/1510%5Cnhttp://revistas.una.ac.cr/index.php/EDUCARE/article/download/1510/1430>
  52. Periódico “El Observador.” (2018). Cementos Melón reciclará 2.500 neumáticos y los convertirá en combusti. <https://web.observador.cl/cementos-melon-reciclara-2-500-neumaticos-y-los-convertira-en-combustible-alternativo/>
  53. Piotrowska, K., Kruszelnicka, W., Bałdowska-Witos, P., Kasner, R., Rudnicki, J., Tomporowski, A., Flizikowski, J., & Opielak, M. (2019). Assessment of the environmental impact of a car tire throughout its lifecycle using the LCA method. *Materials*, 12(24), 1–25. <https://doi.org/10.3390/MA12244177>
  54. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2011). Directrices técnicas para el manejo ambientalmente racional de neumáticos usados y de desecho. 1–64. <http://archive.basel.int/meetings/cop/cop10/documents/UNEP-CHW.10-06-Add.1-Rev.1.Spanish.pdf>
  55. QGIS.org. (2021). QGIS 3.16. Geographic Information System API Documentation. (3.16.). <https://qgis.org/pyqgis/3.16/index.html>.

56. Ramos, G., Alguacil, F. J., & López, F. A. (2011). The recycling of end-of-life tyres. Technological review(). *Revista de Metalurgia (Madrid)*, 47(3), 273–284. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1052>
57. Rodríguez, S. S. (2017). Reutilización De Neumáticos Fuera de Uso. Universidad de la Laguna.
58. Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2014). Metodología de la investigación (M. I. R. Martínez (ed.); Sexta edic, Vol. 7, Issue 2). Mc Graw Hill Education.
59. Sampieri, R. H., & Torres, C. P. M. (2018). Metodología de la investigación (M. Rocha (ed.); primera ed). McGraw-Hill Interamericana editores, S.A. de C.V.
60. Sánchez, R. (2012). Segunda vida de los neumáticos usados. *Redalyc*, 1(1), 1–39. <http://www.redalyc.org/pdf/863/86323612003.pdf>
61. Secretaría de Energía. (2017). Guías para el uso eficiente de la energía en el transporte. In *SENER* (Issue 1). [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/95197/cuidado\\_de\\_neumaticos.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/95197/cuidado_de_neumaticos.pdf)
62. NOM-161-SEMARNAT-2011, *DIARIO OFICIAL* 12 (2013). [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131748/23.\\_LEY\\_GENERAL\\_PARA\\_LA\\_PREVENCION\\_Y\\_GESTION\\_INTEGRAL\\_DE\\_LOS\\_RESIDUOS.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131748/23._LEY_GENERAL_PARA_LA_PREVENCION_Y_GESTION_INTEGRAL_DE_LOS_RESIDUOS.pdf)
63. Sharma, V. K., Fortuna, F., Mincarini, M., Berillo, M., & Cornacchia, G. (2000). Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment. *Applied Energy*, 65(1–4), 381–394. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00085-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00085-9)
64. The R Foundation. (2021). The R Project for Statistical Computing.
65. TNU(Tratamiento neumáticos usados). (2017). Memorias 2017 (TNU (ed.); 2017th ed.). <https://www.tnu.es/>
66. Tsai, W. H. (2018). Carbon taxes and carbon right costs analysis for the tire industry. *Energies*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/en11082121>
67. Ventana Systems, I. (2015). Vensim. Vensim Help.
68. Wik, A., & Dave, G. (2006). Acute toxicity of leachates of tire wear material to *Daphnia magna*-Variability and toxic components. *Chemosphere*, 64(10), 1777–1784. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.12.045>
69. Wik, A., & Dave, G. (2005). Environmental labeling of car tires — toxicity to *Daphnia magna* can be used as a screening method. 58, 645–651. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.103>
70. Wik, A., Nilsson, E., Källqvist, T., Tobiesen, A., & Dave, G. (2009). Toxicity assessment of sequential leachates of tire powder using a battery of toxicity tests and toxicity identification evaluations. *Chemosphere*, 77(7), 922–927. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.034>
71. Yadav, J. S., & Tiwari, S. K. (2019). The impact of end-of-life tires on the mechanical properties of fine-grained soil: A Review. *Environment, Development and Sustainability*, 21(2), 485–568. <https://doi.org/10.1007/s10668-017-0054-2>

## DEFINICIONES Y ACRÓNIMOS

---

Para los efectos de este estudio se entiende por definición:

**Neumático de desecho (ND):** es un residuo de manejo especial cuya disposición final se encuentra en centros de acopio autorizados o clandestinos o son enviados para recibir un tratamiento de incineración.

**Neumático de desuso:** Es aquel neumático que ha cumplido con el propósito para el cual ha sido creado y ha culminado su vida útil, ya sea por desgaste de la banda, por los kilómetros recorridos o por falla. Se considerarán también los neumáticos de rechazo de fabricación y aquellos neumáticos de los que se desprenda su poseedor, aun cuando en ellos no concurren los requisitos arriba descritos.

**Residuo (R):** es cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó (LEGEPA, 2018).

**Residuos de Manejo Especial (RME):** son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos (LGPGIR, 2018).

**Disposición Final (DF):** es la acción de depositar o confinar permanentemente residuos en sitios e instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas y sus elementos (LGPGIR, 2018).

**Tratamiento:** procedimientos físicos, químicos, biológicos o térmicos, mediante los cuales se cambian las características de los residuos y se reduce su volumen o peligrosidad (LGPGIR, 2018).

**Incineración:** es cualquier proceso para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en la cual todos los factores de combustión, como la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales previamente establecidos. En esta definición se

incluye la pirólisis, la gasificación y plasma, sólo cuando los subproductos combustibles generados en estos procesos sean sometidos a combustión en un ambiente rico en oxígeno (LGPGIR, 2018).

**Termólisis:** proceso térmico a que se sujetan los residuos en ausencia de, o en presencia de cantidades mínimas de oxígeno, que incluye la pirólisis en la que se produce una fracción orgánica combustible formada por hidrocarburos gaseosos y líquidos, así como carbón y una fase inorgánica formada por sólidos reducidos metálicos y no metálicos, y la gasificación que demanda mayores temperaturas y produce gases susceptibles de combustión (LGPGIR, 2018).

**Aprovechamiento de los Residuos:** conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar el valor económico de los residuos mediante su reutilización, remanufactura, rediseño, reciclado y recuperación de materiales secundados o de energía (LGPGIR, 2018).

**Reutilización:** es el empleo de un material o residuo previamente usado, sin que medie un proceso de transformación (LGPGIR, 2018).

**Reciclado:** transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos (LGPGIR, 2018).

**Co-procesamiento:** integración ambientalmente segura de los residuos generados por una industria o fuente conocida, como insumo a otro proceso productivo (LGPGIR, 2018).

**Plan de Manejo:** instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, con fundamento en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de subproductos y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno (LGPGIR, 2018).

**Ambiente:** es el conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados (LEGPEA, 2018).

**Contaminación:** es la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico (LEGPEA, 2018).

**Contaminante:** toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural (LEGPEA, 2018).

**Contingencia ambiental:** situación de riesgo, derivada de actividades humanas o fenómenos naturales, que puede poner en peligro la integridad de uno o varios ecosistemas (LEGPEA, 2018).

**Emisión:** liberación al ambiente de toda sustancia, en cualquiera de sus estados físicos, o cualquier tipo de energía, proveniente de una fuente (LEGPEA, 2018).

**Impacto ambiental:** modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza (LEGPEA, 2018).

**Zonas geoeconómicas:** conjunto de Estados que han sido agrupados por cuatro condiciones básicas: recursos naturales, estar vinculadas mediante relaciones internas, cierta homogeneidad en el grado de desarrollo de las fuerzas de producción y especialización predominante en una rama de la producción (Cantú, México Estructuras política, económica y social, 2009).

**Zona centro-sur:** conjunto de Estados integrados por Puebla, Edo. de México, Querétaro, Hidalgo, Morelos, Tlaxcala y Cd. de México (Cantú, México Estructuras política, económica y social, 2009).

**Zona noroeste:** conjunto de Estados integrados por Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Nayarit (Cantú, México Estructuras política, económica y social, 2009).

**Fauna silvestre:** las especies animales que subsisten sujetas a los procesos de selección natural y que se desarrollan libremente, incluyendo sus poblaciones menores que se encuentran bajo control del hombre, así como los animales domésticos que por abandono se tornen salvajes y por ello sean susceptibles de captura y apropiación (LEGPEA, 2018).

**Flora silvestre:** las especies vegetales, así como los hongos, que subsisten sujetas a los procesos de selección natural y que se desarrollan libremente, incluyendo las poblaciones o especímenes de estas especies que se encuentran bajo control del hombre (LEGEPA, 2018).

**Economía lineal:** modelo económico de producción vigente que se basa principalmente en un proceso lineal de consumo de recursos. Bajo el paradigma “take-make-waste” (“extraer-fabricar-consumir eliminar”), los bienes son producidos a partir de las materias primas, luego vendidos, utilizados y finalmente desechados como residuos (Martínez, 2018).

**Economía circular:** nuevo modelo económico de producción que busca mantener los materiales, los productos y sus componentes en procesos circulares, mediante los cuales pueden ser reintegrados en la cadena de valor una vez terminada su vida útil (Xavier Marcet, 2018).

**Logística inversa:** se define como el proceso de planificación, desarrollo y control eficiente del flujo de materiales, productos e información desde el lugar de origen hasta el de consumo, de manera que se satisfagan las necesidades del consumidor, recuperando el residuo obtenido y gestionándolo de modo que sea posible su reintroducción en la cadena de suministro, obteniendo un valor agregado y/o consiguiendo una adecuada eliminación del mismo (Castillo, 2012).

**Cámara Nacional de la Industria Hulera (CNIH):** Órgano representativo de la Industria Hulera en México desde 1943, es una institución de interés público, autónoma y con personalidad jurídica, la integran personas físicas y morales que se dedican a la transformación del hule en productos manufacturados (Manejo Responsable de Llantas Usadas, 2015).

**Asociación de Distribuidores de Llantas y Plantas Renovadoras A.C. (ANDELLAC):** Asociación civil que inició en 1972, convocando a los distribuidores de las marcas que se fabricaban en México, proveedores que atendían la red de distribución con equipos de alineación, balanceo, válvulas, herramientas, rines de lujo, amortiguadores, etc. (Manejo Responsable de Llantas Usadas, 2015).

**Asociación Nacional de Importadores de Llantas (ANILLAC):** Asociación Civil, constituida desde mayo de 2003, que tiene por objeto principal “Mantener la unión de todas las personas físicas y morales dedicadas a la importación, distribución, compra y venta de neumáticos y cámaras (Manejo Responsable de Llantas Usadas, 2015).

**Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC):** se dedica a coordinar, promover y desarrollar, con la participación que corresponda a otras dependencias y entidades, la investigación científica y tecnológica relacionada con la política nacional en materia de bioseguridad, desarrollo sustentable, protección del medio ambiente, preservación y restauración del equilibrio ecológico y conservación de los ecosistemas y cambio climático (INECC, 2019)

**Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT):** es la dependencia de gobierno que tiene como propósito fundamental, constituir una política de Estado de protección ambiental, que revierta las tendencias del deterioro ecológico y sienta las bases para un desarrollo sustentable en el país. A través de una visión que busca que exista un país en el que todos abriguen una profunda y sincera preocupación por cuidar y conservar todo cuanto la naturaleza ha dado a nuestra patria, conciliando el genio humano con el frágil equilibrio de los demás seres vivos y su medio ambiente para alcanzar el desarrollo sustentable (CONABIO, 2019).

**Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR):** es una Ley reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y 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 (LGPGIR, 2018).

**Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEGEPA):** es una Ley reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción (LEGEPA, 2018) (Unión, 2018).

**Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF):** es una institución binacional creada en 1993 por los gobiernos federales de México y los Estados Unidos de Norteamérica, dentro del marco del Tratado de Libre Comercio de América del Norte, para enfrentar los impactos ambientales en su frontera común derivados del dinamismo esperado por el NAFTA (BDAN, 2019).

**Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI):** es un organismo público autónomo responsable de normar y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, así como de captar y difundir información de México en cuanto al territorio, los recursos, la población y economía, que permita dar conocer las características de nuestro país y ayudar a la toma de decisiones.

**NOM-161-SEMARNAT-2011:** NORMA Oficial Mexicana que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo (SEMARNAT, 2011) (PROFEPA, 2013).

**Paradigma sistémico u holístico:** Fenómeno psicológico y social, enraizado en las distintas disciplinas humanas y orientado hacia la búsqueda de una cosmovisión basada en preceptos comunes al género humano. Etimológicamente el holismo representa “la práctica del todo” o “de la integralidad”, su raíz holos, procede del griego y significa “todo”, “íntegro”, “entero”, “completo”, y el sufijo ismo se emplea para designar una doctrina o práctica (Jesús Briceño, 2010).