



Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas
Dirección de Servicios Escolares
Departamento de Certificación Escolar
Autorización de impresión



Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
Fecha: 06 de Septiembre de 2021

C. Montserrat Argüello Utrilla

Pasante del Programa Educativo de Ingeniería Ambiental

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:
Identificación de la dispersión de los contaminantes de origen antropogénico en la atmósfera, en México

En la modalidad de: Curso Especial de Titulación

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Firmas

Mtro. Carlos Narcía López

Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

Dr. Juan Antonio Villanueva Hernández



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS
Y ARTES DE CHIAPAS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROGRAMA EDUCATIVO DE INGENIERÍA
AMBIENTAL**

CURSO ESPECIAL DE TITULACIÓN

TRABAJO DOCUMENTAL

**IDENTIFICACIÓN DE LA DISPERSIÓN
DE LOS CONTAMINANTES DE
ORIGEN ANTROPOGÉNICO EN LA
ATMÓSFERA, EN MÉXICO**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA:

MONTSERRAT ARGÜELLO UTRILLA

DIRECTOR:

DR. JUAN ANTONIO VILLANUEVA HERNÁNDEZ



TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

SEPTIEMBRE 2021

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	5
I.1.	CONCEPTOS GENERALES	6
I.2.	FUENTES DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	9
I.2.1.	FUENTES PUNTUALES O FIJAS.....	9
I.2.2.	FUENTES ANTROPOGÉNICAS	10
I.2.3.	DIFERENCIAS ENTRE FUENTES FIJAS Y DE ÁREA.....	11
I.2.4.	FUENTES NATURALES	11
I.3.	CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES.....	12
I.3.1.	CONTAMINANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS	12
I.3.2.	CONTAMINANTES CRITERIO.....	13
I.3.3.	CONTAMINANTES TÓXICOS	13
I.3.4.	CONTAMINANTES BIOLÓGICOS.....	14
I.4.	SITUACIÓN DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN MÉXICO	14
I.4.1.	EMISIÓN DE CONTAMINANTES POR FUENTE	15
I.4.2.	EMISIÓN DE CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO.....	16
I.4.3.	MONITOREO Y CALIDAD DEL AIRE	18
I.4.4.	CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVIDAD DE CALIDAD DEL AIRE EN ZONAS DE MÉXICO.....	20
I.4.5.	EMISIONES DE CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO EN EL ESTADO DE CHIAPAS, MÉXICO	22
I.5.	FACTORES RELACIONADOS A LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.....	23
I.6.	MODELOS DE DISPERSIÓN	25
II.	OBJETIVOS.....	29
II.1.	OBJETIVO GENERAL.....	29
II.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
III.	METODOLOGÍA.....	29
IV.	CONCLUSIONES	31
V.	ANEXOS.....	33
	Tabla 1. Inventario de Emisiones de Contaminantes atmosféricos por fuente, 2016 (Toneladas)	33
VI.	REFERENCIAS.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 EMISIÓN NACIONAL DE CONTAMINANTES POR FUENTE, 2014.....	15
FIGURA 2 EMISIÓN NACIONAL DE CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO POR CONTAMINANTE, 2014.....	16
FIGURA 3 EMISIÓN NACIONAL DE CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO, POR FUENTE Y CONTAMINANTE, 2014.....	17
FIGURA 4 EMISIÓN DE CONTAMINANTES POR ENTIDAD FEDERATIVA, 2014.....	18
FIGURA 5 CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVIDAD DE CALIDAD DEL AIRE EN ZONAS METROPOLITANAS O POBLACIONES EN MÉXICO, 2016.....	20
FIGURA 6 LÍMITES MÁXIMOS RECOMENDADOS DE ALGUNOS CONTAMINANTES.....	21

I. INTRODUCCIÓN

La atmósfera es un factor importante para el desarrollo y mantenimiento de la vida en la Tierra. Cumple funciones esenciales tales como filtrar la radiación ultravioleta (UV) provenientes del sol y regular el clima, tanto por el movimiento de las masas de aire frío y caliente sobre los océanos y las masas continentales y en el transporte del vapor de agua para la precipitación en los continentes. (Delworth y Greatbatch, 2000).

Los contaminantes en la atmósfera suelen provenir y estar presentes en nuestra actividad diaria, nos aquejan a cada uno y es un problema grave ambiental y a la salud que afecta de manera preocupante a los seres que habitamos el planeta y a la biodiversidad en general, por lo que su efecto puede verse reflejado en la disminución de calidad de vida, reducir la productividad y tener impactos negativos en la economía.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 2012 la contaminación del aire fue responsable de 3.7 millones de muertes en el planeta (11% por enfermedad pulmonar obstructiva crónica, 6% por cáncer de pulmón; 40% por enfermedad isquémica del corazón, 40% por accidente cerebrovascular y alrededor de 3% por infección respiratoria aguda). La mayor parte de estos decesos, cerca del 70%, ocurrió en los países de la región Pacífico Occidental y el sureste de Asia (1.67 millones y 936 000 muertes, respectivamente), sin embargo, en el continente americano se registraron cerca de 58 000 decesos (OMS, 2014).

La mala calidad del aire también tiene impactos en el ámbito económico, debido a que los problemas de salud de la población generan tanto la disminución de la productividad como un incremento del presupuesto que debe destinarse a los gastos en salud, afectando finalmente la competitividad de los países. El Banco Mundial ha estimado que el impacto al Producto Interno Bruto (PIB) en los países de América Latina como consecuencia de las afectaciones a la salud por la emisión de contaminantes a la atmósfera es de alrededor del 2% (Clean Air Institute, 2013).

Además de los efectos sobre la salud de las personas, la contaminación atmosférica también afecta a los bosques y ecosistemas acuáticos, debido a la presencia de contaminantes como los óxidos de nitrógeno y de azufre, los cuales se producen por la quema de combustibles fósiles y que, al combinarse con el agua presente en la atmósfera, provocan el fenómeno conocido como lluvia o deposición ácida.

Un contaminante emitido a la atmósfera es transportado en la dirección del viento predominante y dispersado por movimientos de aire perpendiculares al viento así como por turbulencia. Su dispersión es influenciada por diversos factores tales como el viento, estabilidad atmosférica, ubicación geográfica, que pueden afectar en gran medida la concentración de contaminantes en un área y la distancia alcanzada ya que el viento diluye y dispersa los contaminantes en torno a un área.

Muchos de los residuos de las actividades humanas, industriales se liberan a la atmósfera en forma de gases y pueden permanecer suspendidos en ella unos pocos días y han sido causa de algunos problemas ambientales que ocurren en la actualidad, como el cambio climático y el deterioro de la calidad del aire en zonas urbanas, por mencionar algunos ejemplos. Incide negativamente en personas que residen alrededor de complejos industriales que son expuestos a altos niveles de contaminantes y el área y cantidad de personas que afecta por medio de dispersión, asimismo, las afectaciones en las zonas agrícolas por los daños asociados principalmente a la lluvia ácida y a los oxidantes fotoquímicos e incremento de la temperatura. (SNIARN, 2018)

I.1. CONCEPTOS GENERALES

Para comprender de mejor forma el presente documento, se describen algunas definiciones de acuerdo a lo establecido por diversas fuentes ambientales:

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT)

Aire: Mezcla de gases de que está compuesta la atmósfera.

Atmósfera: Esfera física de la Tierra formada por una capa de aire que rodea sus superficies sólidas; constituye la parte más externa del planeta.

Capa de Ozono: La capa de ozono filtra la luz solar e impide que los efectos negativos de la radiación ultravioleta se manifiesten en la superficie del planeta, con lo que se preserva la vida en el mismo.

Contaminación: Deterioro o desequilibrio de los componentes habituales de las esferas física de la Tierra.

Inversión térmica: Incremento de la temperatura en un estrato atmosférico. Los episodios de inversión térmica conllevan una gran dificultad para la dispersión de los contaminantes atmosféricos que se encuentran cerca de la superficie terrestre.

Lluvia ácida: Más correctamente conocida como precipitación ácida porque incluye lluvia, niebla, rocío y partículas secas. Es el resultado de emisiones de óxidos sulfúrico y nitroso, que producen ácidos sulfúricos y nitros cuando entran en contacto con el agua, particularmente en presencia de la luz del sol.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-085-SEMARNAT-2011

Fuentes fijas: Toda instalación establecida en un solo lugar, que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales, de servicios o actividades que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-172-SEMARNAT-2019

Calidad del aire: Estado de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos en un periodo de tiempo y lugar determinados, cuyos valores máximos de concentración como medida de protección a la salud se establecen en las normas oficiales mexicanas y que son catalogados por un índice estadístico atendiendo sus efectos en la salud humana.

Contaminación: Es la presencia en el aire de uno o más contaminantes o la combinación de éstos.

Contaminante: Toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse y actuar en la atmósfera altera o modifica su composición y condición natural.

Estación de monitoreo automático: Instalación que consiste en una caseta que contiene analizadores automáticos, monitores y/o sensores meteorológicos, entre otros, destinados a medir las concentraciones de uno o más contaminantes del aire y, por lo general, algunos parámetros meteorológicos; con la finalidad de evaluar la calidad del aire en un área determinada.

Índice de Calidad del Aire: Indicador para la notificación del estado de la calidad del aire que evidencia el grado de pureza o de contaminación atmosférica y los efectos potenciales para la salud.

Riesgo a la salud: Es la probabilidad de la ocurrencia de un efecto adverso a la población humana ante la exposición a un contaminante.

Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire: Conjunto organizado de recursos humanos, técnicos y administrativos empleados para operar una o un conjunto de estaciones de monitoreo y/o muestreo que miden la calidad del aire en una zona o región.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-020-SSA1-2014

Aire ambiente: A la mezcla de elementos y compuestos gaseosos, líquidos y sólidos, orgánicos e inorgánicos, presentes en la atmósfera.

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-SSA1-2014

Aire ambiente: A la porción de la atmósfera externa a las construcciones que no está influenciada directamente por fuentes específicas de emisión, y que es representativa de una comunidad.

Partículas PM10: A las partículas con un diámetro aerodinámico igual o menor a 10 micrómetros.

Partículas PM2.5: A las partículas con un diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 micrómetros.

LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y PROTECCIÓN AL AMBIENTE (LGEEPA)

Ambiente: 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

Contaminación: La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.

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.

Emisión: Liberación al ambiente de toda sustancia, en cualquiera de sus estados físicos, o cualquier tipo de energía, proveniente de una fuente.

LEY AMBIENTAL PARA EL ESTADO DE CHIAPAS

Contaminación: A la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico.

Contaminante: A 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.

Emisión: A la liberación al ambiente de toda sustancia, en cualquiera de sus estados físicos, o cualquier tipo de energía, proveniente de una fuente.

I.2. FUENTES DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La contaminación del aire proviene de una mezcla de miles de fuentes de emisión que van desde chimeneas industriales y vehículos automotores hasta el uso de productos de limpieza y pinturas domésticos. Incluso la vida animal y vegetal puede desempeñar un papel importante en la contaminación del aire. En general, para los propósitos de un inventario de emisiones, las fuentes de emisión se agrupan en cuatro categorías principales:

- Fuentes puntuales o fijas
- Fuentes de área
- Fuentes móviles (de vehículos automotores)
- Fuentes naturales

I.2.1. FUENTES PUNTUALES O FIJAS

En México, las fuentes puntuales o fijas son definidas en el Artículo 6 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la

Contaminación de la Atmósfera, como toda instalación establecida en un solo lugar, que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales, de servicios o que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. Como se indica en el Artículo 111 Bis de la Ley y en el Artículo 11 del Reglamento mencionado, las fuentes puntuales bajo jurisdicción federal incluyen:

- Los siguientes sectores industriales: químico, petrolero y petroquímico; pinturas y tintas; automotriz; celulosa y papel; acero y hierro; vidrio; generación de energía eléctrica; asbestos; cemento y cal; así como tratamiento de aguas residuales.
- Todos los establecimientos, proyectos o actividades (industrial, comercial o de servicios) administrados por entidades públicas Federales.
- Fuentes que afecten el equilibrio ecológico de un estado o país adyacente.

Estos establecimientos deben solicitar una licencia de operación –actualmente denominada Licencia Ambiental Única (LAU), a través de la SEMARNAT.

De igual forma, anualmente deben presentar la estimación de emisiones de contaminantes a través de la Cédula de Operación Anual (COA) y realizar las mediciones en chimenea requeridas por la normatividad correspondiente.

En México existe el Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes criterio (INEM) que es un instrumento estratégico que permite consultar información sobre las emisiones que se generan en las entidades del país, así como conocer la influencia de las actividades antropogénicas y naturales en la contaminación del aire de un lugar. En el INEM se clasifican cuatro tipos de fuentes emisoras.

I.2.2. FUENTES ANTROPOGÉNICAS

Fuentes Fijas o Puntuales: son las instalaciones de ubicación fija, que tienen como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales de manufactura las cuales pueden generar emisiones contaminantes a la atmósfera.

Fuentes de Área: representan aquellas fuentes pequeñas, numerosas y dispersas, y no pueden ser incluidas de manera eficiente en un inventario de fuentes fijas, sin embargo, colectivamente las fuentes de área representan un porcentaje significativo de las emisiones de contaminantes. En las fuentes de área se incluyen los comercios, servicios, casas habitación, entre otros.

En los inventarios de fuentes de área, los datos de las emisiones se agrupan en fuentes similares o categorías. Un inventario de fuentes de área generalmente consiste de las siguientes grandes categorías:

- Quema de combustibles en fuentes estacionarias;
- Uso de solventes;
- Almacenamiento y transporte de derivados de petróleo;
- Fuentes industriales y comerciales ligeras;
- Fuentes agropecuarias;
- Manejo de residuos;
- Fuentes de área misceláneas.

I.2.3.DIFERENCIAS ENTRE FUENTES FIJAS Y DE ÁREA

La distinción entre fuentes fijas y de área es necesaria para permitir la recopilación eficiente de la información requerida para el desarrollo de inventarios de emisiones. El tratar a todos los establecimientos como fuentes fijas puede incrementar la precisión del inventario, pero esto implica el uso de más recursos para la compilación y mantenimiento del inventario de fuentes fijas. Un enfoque alternativo es recopilar la información en una base más simple al agregar las fuentes relacionadas (por ejemplo, talleres automotrices, panificadoras, entre otros), dentro de una sola fuente de área. Para el INEM se tienen definidas 28 categorías de Fuentes Fijas, y 7 categorías de Fuentes de Área subdivididas en 33 subcategorías.

Fuentes Móviles (carreteras y no carreteras): se trata de los vehículos con motores de combustión y similares, que debido a su funcionamiento generan o pueden a generar emisiones contaminantes a la atmósfera. Las fuentes móviles carreteras incluyen: tractocamiones, autobuses, camiones, automóviles, motocicletas; mientras que las fuentes móviles no carreteras comprenden: aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, embarcaciones, equipo y maquinarias (SNIARN, 2018).

I.2.4. FUENTES NATURALES

Se trata de cualquier fuente o proceso natural en la vegetación y los suelos que generen emisiones, suelen incluirse las emisiones biogénicas, las emisiones del suelo y la erosión eólica.

Emisiones biogénicas. Se trata de los contaminantes que la vegetación (pastos, cultivos, arbustos, bosques, etc.), emite a la atmósfera; la mayor parte son hidrocarburos, específicamente compuestos orgánicos volátiles (COV). Incluso en ciertas áreas, las emisiones biogénicas de hidrocarburos no metánicos (HCNM) pueden ser comparables o superiores a las emisiones de las fuentes antropogénicas.

Emisiones de suelos. El óxido nitroso (N_2O) es producido naturalmente en los suelos como parte de los procesos de desnitrificación (es decir, la reducción de nitritos y nitratos a nitrógeno gaseoso como N_2 o NO_x). Por su parte, los fertilizantes nitrogenados comerciales constituyen una fuente adicional de nitrógeno, lo cual incrementa las emisiones de óxido nitroso del suelo. Al igual que con el N_2O , la tasa de emisiones de NO_x de los suelos también depende de variables como el tipo de suelo, la humedad, la temperatura, el tipo de cultivo y otras prácticas agrícolas

Erosión eólica. Es otro fenómeno natural que genera emisiones. Sin embargo, debido a que dichas emisiones típicamente están asociadas con suelos perturbados, frecuentemente son tratadas como fuentes de área (SNIARN, 2018).

I.3. CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES

Según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC (2018), por su origen, los contaminantes pueden clasificarse como:

I.3.1. CONTAMINANTES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

Los **Contaminantes Primarios** son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera (óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, hidrocarburos, monóxido de carbono, entre otros). Los **contaminantes secundarios** se forman en la atmósfera por reacciones fotoquímicas, por hidrólisis o por oxidación (ozono, nitrato de peroxiacetilo, etc.).

Por el estado de la materia en el que se encuentran dichos contaminantes se clasifican como partículas o como gases. Las partículas son sólidos y líquidos finamente divididos que se pueden sedimentar, incluyen polvo, humo y cenizas. Los gases que incluyen también a los vapores, muchas veces son invisibles y a veces no se detectan con el sentido del olfato. Algunos de los contaminantes gaseosos más comunes son el monóxido de carbono, los hidrocarburos, el ozono, los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre.

A diferencia de las partículas, los gases no sedimentan sino que tienden a permanecer en la atmósfera, y a transformarse en compuestos más simples o más complejos o a formar parte de los ciclos biogeoquímicos.

Los efectos que los contaminantes causan en la salud humana son diferentes y el grado de afectación puede variar dependiendo de la edad de las personas. A continuación se describen los efectos de algunos de los contaminantes criterios.

Sin embargo, la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, también realiza una clasificación de los contaminantes de la siguiente manera:

I.3.2. CONTAMINANTES CRITERIO

Los contaminantes criterio son aquellos contaminantes normados a los que se les han establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire ambiente, con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población. Se miden de manera continua los contaminantes criterio: ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), las partículas en suspensión (PM₁₀, PM_{2.5}) y el plomo (Pb).

I.3.3. CONTAMINANTES TÓXICOS

Los contaminantes tóxicos del aire son compuestos en forma de gas o partículas que se encuentran en el aire en concentraciones bajas pero con características de toxicidad o persistencia que pueden representar un peligro para la vida humana, animal o vegetal. El término “contaminantes tóxicos del aire”, es utilizado para referirse a un grupo de compuestos químicos identificados por ser altamente nocivos a la salud humana y cuyos efectos pueden presentarse a corto o a largo plazo agudos o crónicos, respectivamente). También se les conoce como “contaminantes peligrosos del aire”. Esta categoría de contaminantes agrupa a muchas sustancias con efectos diversos, que dependen del tiempo y la dosis de exposición a que está expuesta una persona o un grupo de ellas, también es posible que las concentraciones ambientales que alcanzan estos compuestos tóxicos, se limiten a causar efectos irritantes. Como ejemplos de contaminantes tóxicos, se pueden mencionar el benceno, el tolueno y el xileno, que forman parte de los compuestos orgánicos. También existe un cierto número de compuestos tóxicos gaseosos no orgánicos, como el amoníaco y el cloro, otros que son emitidos como parte de las partículas son los metales pesados como el plomo, el cromo y el cadmio.

I.3.4. CONTAMINANTES BIOLÓGICOS

Los contaminantes biológicos son emitidos a partir de material vivo o en descomposición, por ejemplo, moho, esporas, partes de insectos, restos de piel humana o animal y plagas. Su presencia puede tener un impacto significativo en la calidad del aire, y también en interiores.

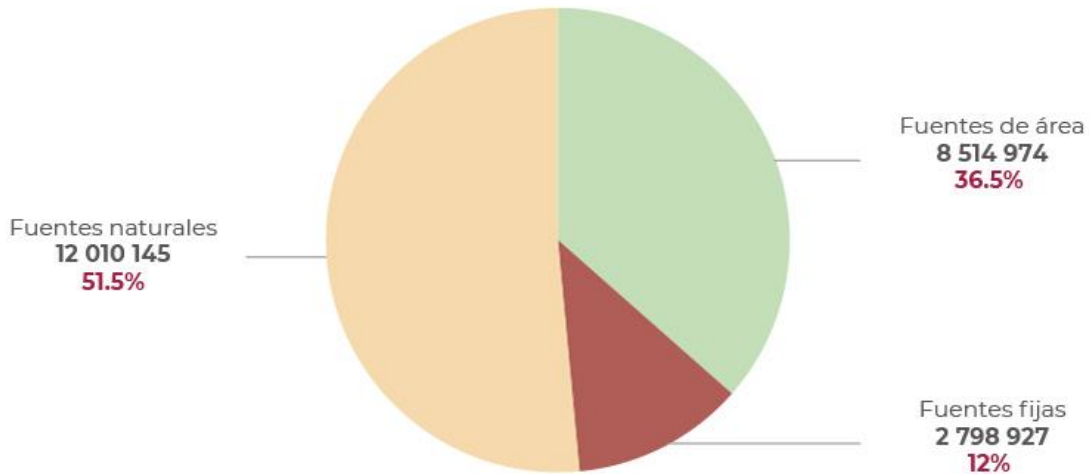
I.4. SITUACIÓN DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN MÉXICO

De acuerdo al informe presentado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2018). En 2014 se emitieron a nivel nacional, sin considerar a las fuentes móviles, alrededor de 23.3 millones de toneladas de contaminantes. En total, las fuentes naturales emitieron 51.5% del total de los contaminantes y las antropogénicas el 48.5% restante. En el caso de las emisiones de las fuentes naturales, el 86% correspondió a compuestos orgánicos volátiles (COV) provenientes de la vegetación y el restante 14% a óxidos de nitrógeno generados por la vegetación y la actividad microbiana del suelo.

Las fuentes antropogénicas son de especial relevancia porque son las que se generan dentro o cerca de los centros de población y afectan en mayor grado la salud de las personas que viven dentro o cerca de ellos. A este respecto, el mayor volumen emitido provino de las fuentes de área (75.3%) mientras que las fuentes fijas aportaron el 24.7% restante.

I.4.1. EMISIÓN DE CONTAMINANTES POR FUENTE

Figura 1 Emisión nacional de contaminantes por fuente, 2014

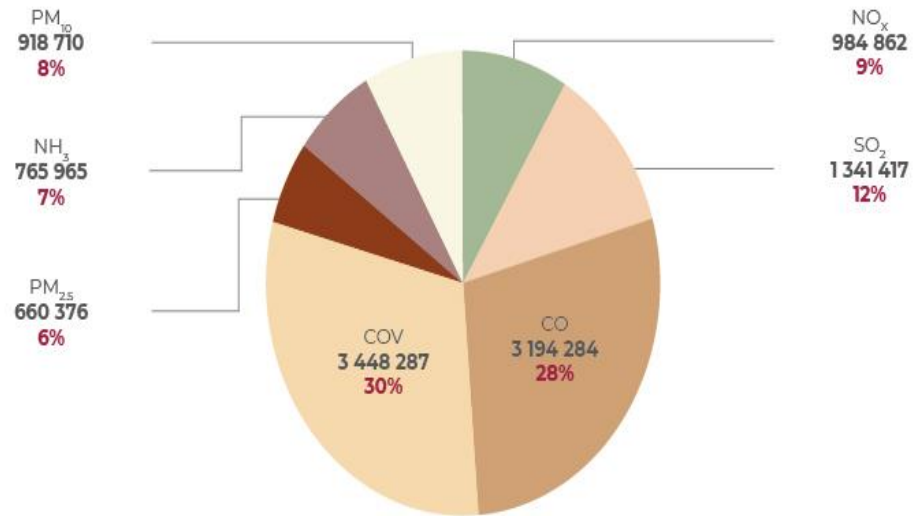


Los datos se muestran en toneladas. Fuente: Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y RETC, SEMARNAT. México. Agosto de 2018.

Los contaminantes emitidos en mayor proporción por fuentes antropogénicas en 2014, sin considerar a las fuentes móviles, fueron los Compuestos Orgánicos Volátiles (3.4 millones de toneladas; 30.5%), el monóxido de carbono (CO; 3.2 millones de toneladas; 28.2% del total) y el bióxido de azufre (SO₂; 1.3 millones de toneladas; 11.9%). Al resto de los contaminantes correspondió un porcentaje entre el 6 y el 9%. Las fuentes de área emitieron en mayor proporción COV (38% del total emitido por este tipo de fuente) y CO (34%), mientras que las fuentes fijas generaron principalmente SO₂ (47%) y NO_x (24%). Las fuentes naturales emitieron principalmente COV (86%) y NO_x (14%) (INECC, 2018).

I.4.2. EMISIÓN DE CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO

Figura 2 Emisión nacional de contaminantes de origen antropogénico por contaminante, 2014



Fuente. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y RETC, SEMARNAT. México. Agosto de 2018. La fuente no ofrece información sobre las emisiones de las fuentes móviles. Los datos se muestran en toneladas.

CO: monóxido de carbono

COV: compuestos orgánicos volátiles

NH₃: amoníaco

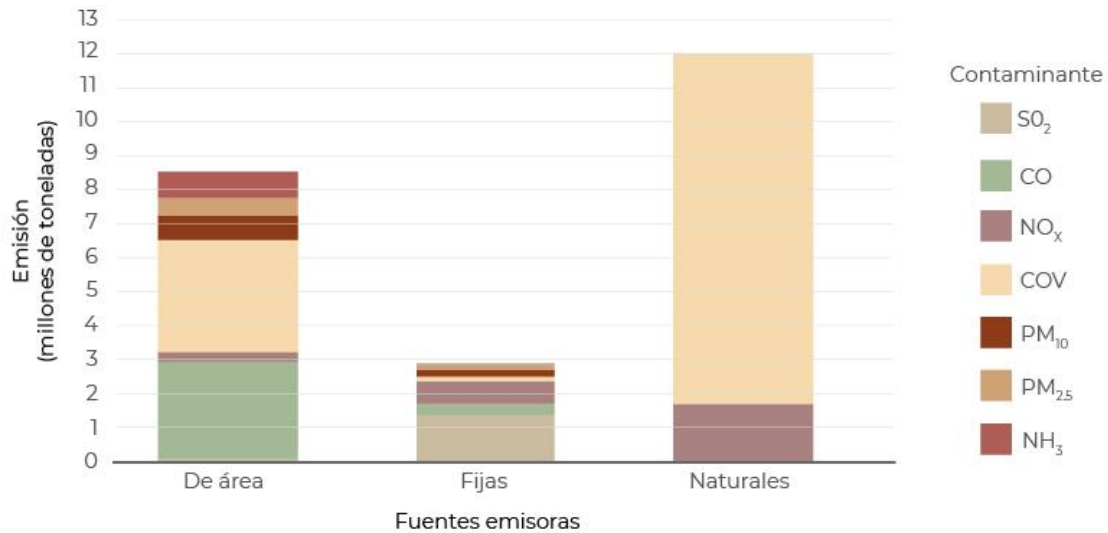
NO_x: óxidos de nitrógeno

PM_{2.5}: partículas iguales o menores a 2.5 micrómetros

PM₁₀: partículas iguales o menores a 10 micrómetros

SO₂: dióxido de azufre

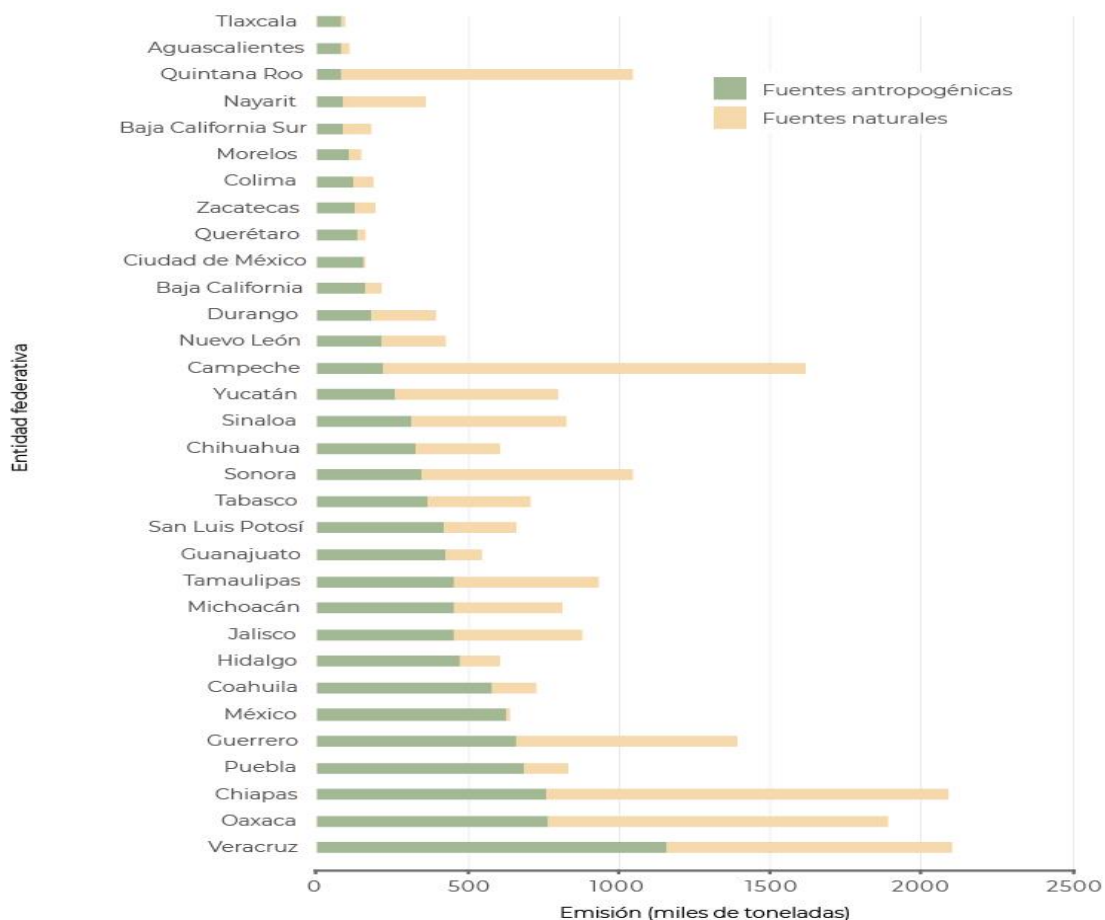
Figura 3 Emisión nacional de contaminantes de origen antropogénico, por fuente y contaminante, 2014



Fuente: Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y RETC, SEMARNAT. México. Agosto de 2018. La fuente no ofrece información sobre las emisiones de las fuentes móviles

A nivel estatal, sin considerar las emisiones de fuentes fijas, las cinco entidades federativas que emitieron una mayor cantidad de contaminantes fueron Veracruz, Chiapas, Oaxaca, Campeche y Guerrero. Sus contribuciones individuales oscilaron entre el 9 y 6% del total nacional. En contraste, Tlaxcala, Aguascalientes, Morelos, Ciudad de México y Querétaro emitieron, cada una, menos del 1%, (INECC, 2018).

Figura 4 Emisión de contaminantes por entidad federativa, 2014



Fuente. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y RETC, SEMARNAT. México. Agosto de 2018. No se incluye información sobre fuentes móviles

I.4.3. MONITOREO Y CALIDAD DEL AIRE

Los sistemas de monitoreo de la calidad del aire constituyen una fuente importante de información que permite conocer las concentraciones de contaminantes a las que está expuesta la sociedad y apoyar el diseño de políticas públicas para reducir su impacto sobre la salud. En este contexto, la Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, establece las condiciones mínimas que deben ser observadas para el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire y su campo de aplicación, que incluye zonas o centros de población que cuenten con alguna de las siguientes condiciones: asentamientos humanos con más de 500 000 habitantes, zonas metropolitanas, asentamientos humanos con emisiones superiores a 20 000 toneladas anuales de contaminantes criterio primarios, conurbaciones

y aquellas que por sus características requieran del establecimiento de estaciones de monitoreo y/o de muestreo de contaminantes atmosféricos (DOF, 2012b).

En México se han establecido estaciones y redes de monitoreo atmosférico en sitios que van desde ciudades y zonas metropolitanas, hasta localidades donde existe una intensa actividad industrial. En este contexto, el país contaba en 2017 con equipos instalados para la medición de estos contaminantes en 30 entidades, con un total de 249 estaciones

La calidad de la información que es generada en cada estación a lo largo del país es verificada y validada por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), y este mismo instituto es el responsable de dar a conocer la información. Dado lo anterior, en las siguientes secciones se muestran las tendencias en la calidad del aire solo para aquellas ciudades o zonas metropolitanas del país que cuentan con información adecuada para hacerlo.

La red de monitoreo más grande del país se localiza en la ZMVM, que cuenta con 23 estaciones de monitoreo automático, 2 manuales y 9 mixtas. La red registra, entre otras variables, las concentraciones de O₃, CO, SO₂, NO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}, considerados como contaminantes criterio.

I.4.4. CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVIDAD DE CALIDAD DEL AIRE EN ZONAS DE MÉXICO

Figura 5 Cumplimiento de la normatividad de calidad del aire en zonas metropolitanas o poblaciones en México, 2016



Fuente: INECC. Informe Nacional de Calidad del Aire 2016. México. INECC. México, 2017.
 AMM: Área Metropolitana de Monterrey

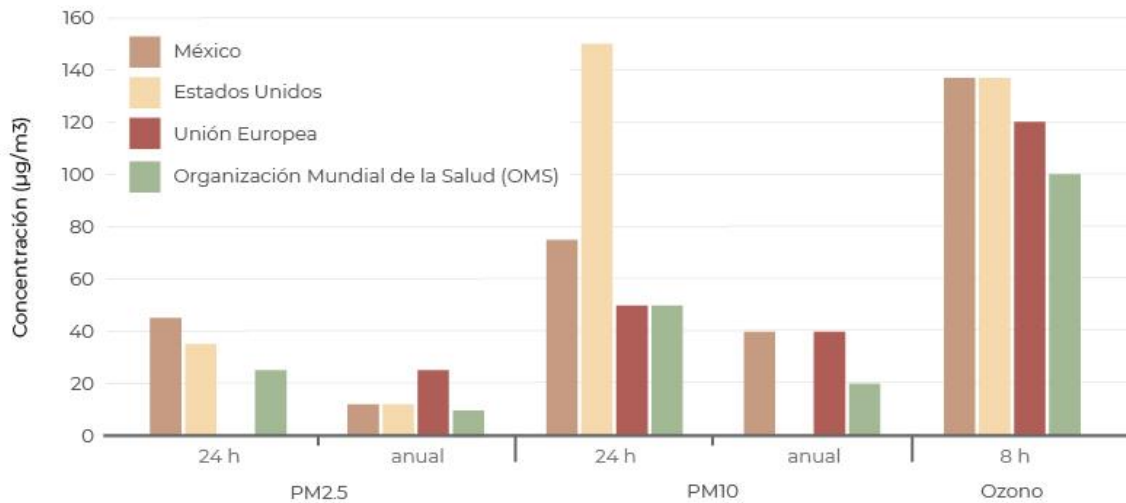
ZMG: Zona Metropolitana de Guadalajara

ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México

ZMVT: Zona Metropolitana del Valle de Toluca

Derivado de los problemas de la contaminación del aire y de sus efectos sobre la salud de la población, se han generado normas que establecen las concentraciones máximas de contaminantes en períodos definidos de tiempo que, de rebasarse, incrementan los riesgos a la salud. Nuestro país ha tenido avances y mejoras significativas en la definición de sus normas de calidad del aire desde su primera publicación, en 1994, hasta la fecha. No obstante, los valores establecidos como límites máximos de concentración aún se encuentran por arriba de los recomendados por la OMS, la Unión Europea y, en algunos casos, respecto a Estados Unidos. Estas normas son expedidas por la Secretaría de Salud, mientras que la SEMARNAT es responsable de las normas que establecen los procedimientos para la medición y calibración del equipo empleado para medir las concentraciones de los contaminantes, de establecer los valores máximos permisibles de emisión a la atmósfera y las especificaciones en cuanto la calidad

Figura 6 Límites máximos recomendados de algunos contaminantes



Fuente: SEMARNAT Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. 2018

I.4.5. EMISIONES DE CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO EN EL ESTADO DE CHIAPAS, MÉXICO

El análisis del inventario estatal de emisiones año base 2016, considerando únicamente las emisiones generadas por la actividad antropogénica, revela que el municipio de Tuxtla Gutiérrez se constituye como el principal emisor de contaminantes atmosféricos en el Estado de Chiapas, contribuye con el mayor aporte de contaminantes criterio generados: 12% PM10; 10% de PM2.5; 12% de SO₂; 10% de NO_x, 14% de COV; y 16% de CO. Otros municipios que sobresalen por su contribución a la emisión de contaminantes al aire son Tapachula, Venustiano Carranza, Huixtla, San Cristóbal de las Casas, Chiapa de Corzo, Palenque, Ocosingo y Comitán de Domínguez.

En términos de las fuentes específicas de estos contaminantes destaca que las partículas suspendidas (PM10 y PM2.5), así como los compuestos orgánicos volátiles y el CO son generados principalmente por la combustión doméstica, en tanto que el SO₂ y los NO_x se generan mayoritariamente por la combustión agrícola.

Con la información disponible con respecto a la calidad del aire y, sobre todo, del inventario de emisiones, el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Chiapas ha establecido un conjunto de medidas y acciones, como el fortalecimiento de la regulación en los sectores industrial, del transporte público, de comercios y servicios y del consumo de leña, así como la optimización de la movilidad en las principales zonas urbanas del Estado, la implementación de mejores prácticas y técnicas ambientales en la actividad agropecuaria y el fortalecimiento institucional en áreas como el monitoreo de la calidad del aire y en la elaboración y actualización del inventario de emisiones.

Paralelamente a la instrumentación de estas medidas, se ha contemplado la implementación de otras que están asociadas al tema de la comunicación y educación ambiental con el objetivo de informar, concientizar y comprometer a la población en acciones que hagan frente a los problemas y retos ambientales, asociados al deterioro de la calidad de aire. (PROAIRE Chiapas, 2018)

I.5. FACTORES RELACIONADOS A LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Un contaminante emitido a la atmósfera es arrastrado por las corrientes de aire siguiendo la dirección predominante de uno de los factores principales en su dispersión: el viento. Los movimientos perpendiculares al viento y la turbulencia colaboran en la dispersión de dicho contaminante. La velocidad del viento afecta en gran medida la concentración de contaminantes en un área. Mientras mayor sea la velocidad del viento, menor será la concentración de contaminantes. El viento diluye y dispersa rápidamente los contaminantes en el área circundante.

La predicción del desplazamiento de la pluma de una sustancia emitida a la atmósfera alrededor del punto de emisión, es un tema de gran interés en el ámbito de la Calidad del Aire, y suele ser manejado con los modelos gaussianos de dispersión que permiten calcular las concentraciones de sustancias en los puntos de interés. Los modelos permiten variar las condiciones meteorológicas, topográficas y las características de las fuentes emisoras, para crear escenarios que ayuden a determinar los factores que intervienen en la ocurrencia de las peores condiciones de contaminación.

La inversión térmica (IT) es un fenómeno natural que se caracteriza por un cambio en la tendencia normal del aire al enfriarse con la altitud; cuando existe ésta, la temperatura aumenta con la altitud en determinado estrato atmosférico. Este aumento térmico puede producirse desde la superficie o a partir de una cierta altura. Se pueden presentar cuatro tipos de inversiones térmicas (de tierra, por subsidencia, por turbulencia y frontal), de tal manera que, bajo ciertas condiciones meteorológicas puede predominar alguna de ellas y contribuir a intensificar la acumulación y concentración de contaminantes en el aire.

La IT se vuelve peligrosa en una zona urbana debido a que la capa de aire caliente que cubre la región impide el desarrollo de corrientes de aire ascendentes que dispersen los contaminantes. Esta situación se agrava en presencia de masas de aire de alta presión que propician una inversión prolongada durante varios días. Los contaminantes del aire en la superficie llegan a concentrarse hasta llegar a valores nocivos o letales para los seres vivos. Una IT es peligrosa porque acentúa los efectos dañinos de las islas de calor y las cúpulas de polvo que se forman sobre las áreas urbanas (Alfaro et al., 2008).

Otros factores meteorológicos básicos que afectan la concentración de contaminantes en el aire ambiental son la radiación solar, precipitación y humedad. Para efectos de dispersión de contaminantes es deseable una condición atmosférica inestable ya que el movimiento vertical del aire se ve favorecido, generalmente,

en el día cuando la radiación origina que el aire circundante en la superficie de la tierra esté más caliente y liviano respecto al aire de la atmosfera; el movimiento constante se origina cuando el aire caliente se eleva mezclándose con el frío y pesado de la parte superior y este tiende a bajar. En cambio, una condición estable obstaculiza el esparcimiento de los medios contaminantes del aire puesto que el aire más caliente se encuentra encima del frío inhibiendo así la mezcla vertical; esta condición también es conocida como inversión térmica.

Cuando una descarga vertical de aire caliente es lanzada a la atmósfera libre donde existe un viento permanente, esta subirá primero y posteriormente viajará con el viento. Este proceso diluye los contaminantes y los aleja de la fuente. Al mismo tiempo que la pluma o penacho (descarga visible de contaminante) se desplaza desde la fuente, el proceso de mezcla atmosférico y turbulencia producen que la pluma se extienda o disperse en ambas direcciones (lateral y vertical). La difusión molecular juega un papel menor en la dispersión de contaminantes y generalmente no es considerado.

A la vez que la pluma se aleja de la fuente emisora (arrastrada por el viento), la altura final de la línea central de la pluma alcanza un valor basado en la flotación termal (debido a la temperatura de descarga) y al momento (debido a la velocidad de la descarga vertical) de la descarga de la chimenea. Por lo tanto, una descarga alcanzará mayor altura si mayor es su temperatura, y una descarga con una velocidad inicial vertical alta subirá a mayor altura que una descarga con una velocidad inicial baja. Si la temperatura de la descarga es cercana a la temperatura del aire y su velocidad de descarga es muy baja (a menos de 2 m/s), la pluma no subirá significativamente por la punta de la chimenea.

El transporte de la pluma depende de la corriente de aire o viento, y la definición de viento requiere varios parámetros como su velocidad, dirección, altura del viento y el tiempo promediado. La velocidad y dirección del viento están normalmente medidas a una altura de diez metros sobre el nivel del terreno. La velocidad del viento se mide usando un anemómetro y la dirección usando una veleta.

La dispersión de la pluma ocurre como resultado de la mezcla atmosférica y la turbulencia, que son el resultado de factores termales y mecánicos. La energía del sol es absorbida por la tierra y convertida en calor que se irradia entonces en los niveles más bajos de la atmósfera por conducción y convección creando remolinos térmicos y turbulencias. Generalmente, las condiciones más turbulentas ocurren durante los periodos de velocidad del viento de baja a moderada y con intensa radiación solar (tardes). Las condiciones atmosféricas sumamente estables ocurren durante las noches claras con poco viento y pueden mantener los contaminantes cerca de la tierra y en las cercanías de la fuente de descarga,

produciendo concentraciones altas de contaminantes en la pluma. Las máximas concentraciones de contaminantes se localizarán en los límites del área abarcada y cercana a la fuente de descarga.

El estudio de estos factores en una determinada zona es de gran utilidad, ya que permite conocer su capacidad potencial para la dispersión y eliminación de los contaminantes (Pacheco et al., 2020)

I. 6. MODELOS DE DISPERSIÓN

Los modelos de dispersión son herramientas computacionales que resuelven la ecuación de continuidad descrita con anterioridad utilizando diversos métodos y aproximaciones.

En el esfuerzo de predecir las concentraciones de contaminantes en un punto alejado del foco emisor y resolver la ecuación de continuidad, se han desarrollado varios tipos de modelos matemáticos para estimar la calidad del aire (Salas, 2004).

La aplicación de un modelo detallado de dispersión de contaminantes atmosféricos requiere el uso de datos meteorológicos también detallados; dirección del viento, velocidad del viento y radiación solar o nubosidad que son conocidos como datos primarios; y otros obtenidos a partir de éstos, como son las categorías de estabilidad atmosférica en base a la clasificación de Pasquill y la altura de mezcla urbana y rural. Esto permitirá conocer el comportamiento real de la pluma de dispersión, es decir, la ubicación de las zonas más afectadas por la “caída” de los contaminantes. (Arregui, 2007)

En general, como anteriormente se ha dicho, los modelos de difusión atmosférica, se trata, de una manera aproximada, de resolver las ecuaciones de difusión que gobiernan el movimiento de los contaminantes en el flujo turbulento atmosférico. Y según el método de solución, de acuerdo al autor Garces et al. (2015) se subdividen en:

- Modelos de caja, son los más sencillos, tratan la zona en estudio como un sistema cerrado en el que se mueven los contaminantes por impulso del viento medio. Son modelos puramente mecánicos, que suelen incorporar un módulo químico para simular la transformación de los contaminantes.
- Modelos gaussianos, son los más utilizados. Consideran que el penacho emitido sigue una distribución gaussiana perpendicular al movimiento convectivo principal. De este modo se pretende simular la difusión

de contaminantes en la dirección no dominante. Sin embargo, no han conseguido una descripción real del fenómeno de difusión, aunque permiten obtener resultados aproximados muy rápidamente.

- Modelos de diferencias finitas, tratan de resolver la ecuación de difusión atmosférica utilizando diferentes planteamientos físicos

Eulerianos, utilizan un sistema de referencia absoluto y tratan de calcular la difusión referida a este sistema mediante distintas soluciones de integración numérica.

La solución analítica más ampliamente utilizada, y que ha tenido mayor difusión, es la ecuación gaussiana, y ha sido también el origen de diversas formulaciones numéricas.

Según lo escrito por Salas (2004), en el esfuerzo de predecir las concentraciones de contaminantes en un punto alejado del foco emisor y resolver la ecuación de continuidad, se han desarrollado varios tipos de modelos matemáticos para estimar la calidad del aire. Entre éstos se incluyen, modelos gaussianos, urbanos, regionales y globales, que se describen a continuación.

Los Modelos Gaussianos son de uso común en problemas de dispersión de contaminantes no reactivos de fuentes puntuales tales como chimeneas industriales. Básicamente suponen que el penacho de un efluente presenta una distribución normal o de Gauss (Gaussiana) de las concentraciones en torno al eje de simetría definido por la dirección del viento. Estos modelos son aptos para estimar efectos locales y que su grado de precisión y acierto es, en general, decreciente en tanto se aplican en localidades con relieves complejos y caracterizados por circulaciones atmosféricas complejas.

b) Modelos urbanos y regionales Los modelos de escala urbana y regional están, a menudo, orientados a ser herramientas de gestión de calidad del aire. Los problemas de escala urbana y regional son complejos pues hay que considerar los efectos de múltiples fuentes, contaminantes primarios y secundarios, procesos de deposición y meteorología local y regional. Eso requiere la integración de modelos y bases de datos. Los aspectos meteorológicos son tratados a través de modelos meteorológicos de diagnóstico o pronóstico. En los primeros se estiman los campos de viento a partir de datos meteorológicos (de superficie y altura) recopilados de estaciones de monitoreo utilizando métodos que buscan una interpolación y extrapolación óptima de las observaciones. En los segundos, se calculan los parámetros meteorológicos a partir de las ecuaciones que describen las relaciones físicas fundamentales del movimiento y la energía en el aire. El desarrollo actual de los esfuerzos de modelación de procesos

atmosféricos tiende a integrar ambos tipos de modelos a través de las técnicas conocidas como asimilación de datos

Modelos globales Los modelos globales resuelven la ecuación de continuidad para toda la atmósfera. Estos modelos, al igual que los modelos locales y regionales, han ido creciendo en complejidad e n la medida que más variables y trazas con tiempos de recambio más cortos han sido incorporadas en ellos y el desarrollo de computadores más rápidos lo han hecho factible

Modelo Gaussiano de Dispersión Este modelo describe a través de una fórmula simple el campo tridimensional de concentraciones generadas por una fuente puntual en condiciones meteorológicas y de emisión estacionarias. Dicho de otra forma, calcula los niveles de inmisión en un punto del espacio de coordenadas (x,y,z) donde el origen del sistema de coordenadas se fija en la base de la chimenea.

A medida que un penacho progresa en la dirección del viento, el modelo gaussiano supone que el perfil de concentración por mezcla turbulenta adquiere una distribución gaussiana. Si la condición atmosférica es neutra, entonces se desarrollará un penacho en forma de cono. La concentración en la línea central del penacho será máxima a una distancia cercana del foco emisor y disminuirá en la dirección viento abajo. A medida que la distancia viento abajo aumenta, los extremos del penacho pueden impactar sobre el terreno.

La ecuación general del modelo de Gauss para la determinar la concentración de un contaminante en un punto espacial es:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right)$$

Donde:

x, y, z : coordenadas espaciales en metros (m)

C (x, y, z) : concentración de contaminante en un punto (x,y,z) (g. m⁻³)

Q: caudal de emisión (g.s⁻¹)

$\sigma_y \sigma_z$, : desviaciones estándar en las direcciones "y" y "z" respectivamente (m)

u: velocidad media de viento (m.s⁻¹) en el sentido del eje x

h: altura efectiva de emisión (m)

El modelo gaussiano se encuentra lejos de ser exacto. Sin embargo, se han incorporado a su ecuación general algunos términos adicionales para mejorar su desempeño frente a determinadas situaciones. Entre estas, es conveniente destacar la incorporación de términos reflectivos para simular la reflexión que puede sufrir un penacho, ya sea total o parcial debido a su interacción con el suelo subyacente o cuando su desarrollo en altura se encuentra limitado por una capa de inversión térmica. También se han incorporado términos de decaimiento, deposición y transformaciones químicas para simular procesos de remoción de los contaminantes desde la atmósfera, tratamiento de fuentes lineales, área o volumen, efectos de fumigación de un penacho sobre el suelo, efectos de edificaciones, penachos que ven limitado su desarrollo al ser atrapados al interior de un valle, penachos inclinados, terreno complejo y dispersión en zonas costeras, etc. No obstante lo anterior, estos ajustes no son suficientes para representar todos estos procesos y deben ser utilizados cuidadosamente. A la vez, van en desmedro de la mayor ventaja de los modelos gaussianos, esto es, su simplicidad. Acerca de la ecuación Gaussiana, el cálculo de los coeficientes de dispersión y la elevación del penacho, se puede encontrar una extensa literatura desarrollada para este tema, así como en Bustos, 2003, complemento a la presente investigación. Los requisitos de los datos de modelos de dispersión de tipo gaussiano entran en tres categorías: a) Datos de la fuente: ubicación de chimeneas y otras fuentes (coordenadas), altura física de la chimenea y su diámetro interno, velocidad de salida del gas desde la chimenea. Algunos modelos de dispersión pueden requerir de datos de entrada adicionales tales como la elevación de la fuente y el terreno, dimensiones de edificaciones próximas (por ejemplo, el ancho promedio del edificio y el espacio entre los edificios), distribución del tamaño de la partícula y sus correspondientes tasas de deposición y coeficientes de reflexión superficial.

Datos meteorológicos: La mayoría de los modelos gaussianos acepta datos meteorológicos de superficie que consideran la clasificación de estabilidad a cada hora, dirección y velocidad del viento, la temperatura atmosférica y la altura de la capa de mezcla.

Datos de los receptores: La identificación y codificación de todos los receptores (por ejemplo, áreas con alta población o concentración máxima esperada a nivel del suelo). Normalmente, los receptores son especificados por sus coordenadas y elevación (Salas, 2004).

II. OBJETIVOS

II.1. OBJETIVO GENERAL

Identificar la dispersión de contaminantes atmosféricos por emisiones de origen antropogénico en México

II.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las sustancias más contaminantes en la atmósfera de origen antropogénico en México.
- Identificar los factores que contribuyen a la dispersión de los contaminantes antropogénicos de la atmósfera.
- Describir los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.

III. METODOLOGÍA

El presente documento se basó en una investigación con enfoque cualitativo, de acuerdo a Hernández Sampieri (2018) conociendo las técnicas para recolectar datos, como la revisión de documentos para principalmente buscar la “dispersión o expansión” de los datos e información. Utilizando un método de investigación bibliográfico, se reunieron las condiciones metodológicas que consiste en utilizar datos secundarios como fuente de información.

Se inició con una idea particular para desarrollar, partiendo de un problema ambiental y social en el mundo. Teniendo en cuenta el problema que se requirió plantear, se relacionaron datos ya existentes que proceden de distintas fuentes para proporcionar una visión panorámica y enfocar la investigación a un periodo de tiempo y lugar específico, tomando en cuenta factores que lograran sustentar el propósito y los objetivos específicos al tema, siendo estos propuestos en tres etapas.

Después de una inmersión inicial en el campo, que fue complementada en todo el proceso, se procedió a una búsqueda, recopilación, organización y valoración de los datos bibliográficos para redactar una investigación significativa con definiciones que proporcionan al lector una mejor comprensión del documento.

Para el primer objetivo se exploraron fuentes referentes a la atmósfera, contaminación atmosférica, calidad del aire, fuentes de contaminación, leyes y Normas Mexicanas, que aportaron a la descripción de las definiciones generales.

Posteriormente, se obtuvieron mediante diversas bases de datos, principalmente provenientes de informes de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural (SEMAHN) y Leyes y Normas publicadas en el Diario Oficial de la Federación (DOF), información puntual sobre la situación de contaminación atmosférica y las sustancias con origen antropogénico que más contaminan en los estados de la República Mexicana a partir del año 2014.

Se examinó y recopiló la base de datos estadísticos proporcionada por el Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (BADESNIARN) obteniendo información sobre los principales contaminantes de cada estado de la República Mexicana agrupado por tipos de fuente.

En el segundo objetivo, se analizaron diversas fuentes de artículos y literatura sobre contaminación atmosférica y los factores relacionados a su dispersión. Se recabaron datos sobre los puntos más iterativos e importantes para ser plasmadas en la investigación.

Finalmente, para el tercer objetivo se indagó en diversas fuentes de artículos y literatura sobre los modelos de dispersión de los contaminantes atmosféricos y posteriormente se realizó una descripción del compendio de información para el presente documento.

IV. CONCLUSIONES

Los contaminantes emitidos en mayor proporción por fuentes antropogénicas en 2014, sin considerar a las fuentes móviles, fueron los Compuestos Orgánicos Volátiles (3.4 millones de toneladas; 30.5%), el monóxido de carbono (CO; 3.2 millones de toneladas; 28.2% del total) y el bióxido de azufre (SO₂; 1.3 millones de toneladas; 11.9%) y a nivel estatal, sin considerar las emisiones de fuentes fijas, las cinco entidades federativas que emitieron una mayor cantidad de contaminantes fueron Veracruz, Chiapas, Oaxaca, Campeche y Guerrero. Sus contribuciones individuales oscilaron entre el 9 y 6% del total nacional.

En el 2016, el bióxido de azufre SO₂ vuelve a ser relevante, como una de los contaminantes de mayor emisión en México, representado en la Tabla del Inventario de Emisiones de Contaminantes atmosféricos por fuente, que se encuentra en Anexos del presente documento. Teniendo en cuenta que es complejo lograr una comparación apropiada, ya que en las distintas ediciones del Inventario Anual realizado por la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes de SEMARNAT incorpora mejoras metodológicas y se amplía el detalle de la información.

La calidad del aire en una región depende principalmente de las emisiones industriales, vehiculares, de actividades humanas y de las condiciones meteorológicas y son mucho los autores que han demostrado la estrecha relación existente entre las situaciones meteorológicas y los niveles de contaminación alcanzados en un momento dado. Existen factores que influyen directamente en los niveles de contaminación como lo son el viento, la estabilidad atmosférica y la precipitación, y que la dirección y velocidad del viento está condicionada por la topografía

Los modelos matemáticos de calidad del aire son herramientas matemáticas imprescindibles destinadas a simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes cuando se dispersan o reaccionan en la atmósfera. Se basan en datos meteorológicos, topográficos, tasas de emisión de los contaminantes desde su origen y las características físicas de la fuente, teniendo como objetivo fundamental caracterizar el movimiento de los contaminantes atmosféricos primarios, que una vez emitidos ingresan directamente a la atmósfera y en algunos casos, contaminantes secundarios que se forman como resultado de reacciones complejas.

Otro punto a destacar en los modelos de dispersión es que en base a estos se puede definir cómo contribuye una determinada fuente a los problemas de calidad del aire, para establecer un diseño efectivo de estrategias que permitan reducir sus emisiones contaminantes

También, es de importancia divulgar información sobre las consecuencias de la contaminación atmosférica puesto que la población mayormente está expuesta a fuentes de origen antropogénicas, para ello, actualmente existen indicadores como el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA) o Índice Aire y Salud en cada estado de la República Mexicana con el propósito de informar de manera clara, oportuna y continua el estado de la Calidad del Aire, los probables daños a la salud que ocasionan los contaminantes y las medidas que pueden tomar las personas para reducir la exposición, asociando, también, un nivel de riesgo a la salud que es clasificado con un color. Esta información es publicada por el gobierno estatal, y en algunos casos, municipales, que son responsables del monitoreo y que tienen la obligación de obtener y comunicar los datos mencionados anteriormente.

V. ANEXOS

Tabla 1. Inventario de Emisiones de Contaminantes atmosféricos por fuente, 2016 (Toneladas)

Entidad federativa	Tipo de Fuente	Contaminante									
		SO ₂	CO	NO _x	COV	PM ₁₀	PM _{2.5}	NH ₃			
Aguascalientes	Fuentes fijas	1,992.04	222.75	2,718.73	1,478.44	474.63	334.21	4.95			
	Fuentes de área	228.25	23,322.95	1,291.17	17,351.08	8,203.10	4,821.74	43,696.99			
	Fuentes móviles carreteros	387.99	61,222.07	13,154.73	6,446.90	917.89	839.74	105.25			
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	32.18	830.57	1,347.64	163.04	105.96	101.95	0.00			
Baja California	Fuentes naturales	-	-	6,365.45	26,273.59	-	-	-			
	Fuentes fijas	835.10	8,574.68	12,182.51	8,228.92	3,308.13	2,777.89	23.03			
	Fuentes de área	185.30	27,614.47	1,849.13	48,329.43	8,113.28	4,127.68	9,255.81			
	Fuentes móviles carreteros	842.01	156,009.89	38,289.44	14,341.43	2,226.24	2,039.08	209.94			
Baja California Sur	Fuentes móviles que no circulan por carretera	65.82	1,950.47	2,287.89	449.79	109.09	105.12	0.93			
	Fuentes naturales	-	-	783.83	5,629.72	-	-	-			
	Fuentes fijas	32,842.64	5,532.84	26,948.52	203.23	2,164.93	1,066.18	15.83			
	Fuentes de área	22.04	4,127.04	330.30	9,126.40	1,527.77	685.69	1,933.65			
Campeche	Fuentes móviles carreteros	363.03	81,863.65	16,091.72	6,931.79	759.47	693.62	85.72			
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	56.06	1,390.22	1,079.17	309.81	51.72	50.40	0.01			
	Fuentes naturales	-	-	434.73	5,310.02	-	-	-			
	Fuentes fijas	108,966.17	4,987.84	18,538.94	508.70	4,635.75	3,809.44	25.07			
Coahuila	Fuentes de área	184.42	34,971.46	1,321.67	12,137.60	6,779.65	4,198.95	7,064.31			
	Fuentes móviles carreteros	440.12	60,173.12	11,350.70	4,868.28	1,153.12	1,058.61	106.20			
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	58.36	995.39	2,447.02	224.27	174.22	167.59	0.00			
	Fuentes naturales	145,107.16	24,863.88	63,066.58	5,798.73	22,785.10	14,902.16	410.84			
Colima	Fuentes de área	319.66	36,654.25	2,268.44	42,767.87	10,688.27	7,383.01	17,349.28			
	Fuentes móviles carreteros	865.63	94,482.35	30,238.93	9,699.35	3,301.06	3,030.25	151.74			
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	70.76	1,359.01	5,392.55	332.35	214.90	200.96	0.21			
	Fuentes naturales	-	-	6,976.48	28,173.66	-	-	-			
Chiapas	Fuentes fijas	16,228.02	2,658.20	7,071.50	282.17	4,494.70	3,237.38	55.37			
	Fuentes de área	156.41	14,772.38	904.18	13,200.69	3,452.26	2,248.45	4,235.77			
	Fuentes móviles carreteros	329.73	55,132.46	11,819.02	4,788.05	898.03	823.31	79.08			
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	49.67	755.34	1,681.24	189.01	104.24	100.29	0.00			
Chihuahua	Fuentes naturales	-	-	5,428.60	83,536.96	-	-	-			
	Fuentes fijas	12,090.47	1,837.13	3,342.42	209.43	5,275.03	3,088.16	65.94			
	Fuentes de área	859.55	228,936.51	7,444.08	70,988.20	28,057.06	22,680.64	46,729.33			
	Fuentes móviles carreteros	914.27	171,046.33	29,965.42	13,111.35	2,208.88	2,024.69	230.67			
Ciudad de México	Fuentes móviles que no circulan por carretera	38.25	840.81	1,933.63	196.56	89.53	84.68	0.04			
	Fuentes naturales	-	-	114,346.99	1,213,023.93	-	-	-			
	Fuentes fijas	12,619.11	22,052.81	20,544.75	1,478.08	3,388.10	2,582.78	103.11			
	Fuentes de área	761.90	129,761.51	5,848.56	60,291.35	40,509.80	21,791.21	21,492.36			
Estado de México	Fuentes móviles carreteros	1,276.71	238,830.12	53,684.77	22,119.94	3,182.03	2,910.90	275.65			
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	192.56	4,408.51	10,845.58	938.87	664.31	634.48	0.76			
	Fuentes naturales	-	-	13,629.93	68,635.30	-	-	-			
	Fuentes fijas	92.73	904.23	2,196.92	12,481.93	890.08	661.46	17.08			
Guatemala	Fuentes de área	296.30	4,721.43	1,810.20	111,861.37	3,699.74	1,445.19	13,934.01			
	Fuentes móviles carreteros	282.01	242,825.76	52,437.11	28,289.17	5,641.86	2,853.67	943.90			
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	332.14	32,584.12	4,361.28	1,806.38	75.07	72.70	0.82			

Fuente: Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN) Emisiones de contaminantes atmosféricos por fuente, 2020

Tabla 1. Inventario de Emisiones de Contaminantes atmosféricos por fuente, 2016 (Toneladas)

Entidad federativa	Tipo de Fuente	Contaminante											
		SO ₂	CO	NO _x	COV	PM ₁₀	PM _{2.5}	NH ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	NH ₃		
Ciudad de México	Fuentes naturales	-	-	101.10	8,734.23	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fuentes fijas	15,137.52	3,453.45	4,162.21	2,711.57	1,965.66	1,455.02	1,455.02	1,455.02	1,455.02	1,455.02	115.29	
	Fuentes de área	681.96	85,623.43	3,696.03	69,217.28	23,321.37	15,693.86	38,939.07	15,693.86	15,693.86	15,693.86	38,939.07	
	Fuentes móviles	504.21	79,172.64	22,592.65	6,863.38	1,979.83	1,815.67	88.35	1,979.83	1,815.67	1,815.67	88.35	
Guanajuato	Fuentes naturales	95.67	2,407.34	5,115.36	459.40	403.15	367.13	0.00	403.15	367.13	367.13	0.00	
	Fuentes fijas	17,305.35	6,888.98	6,953.54	12,057.45	3,341.93	2,602.79	89.47	3,341.93	2,602.79	2,602.79	89.47	
	Fuentes de área	1,222.61	94,212.32	4,916.34	67,265.63	34,636.33	22,727.68	44,194.19	34,636.33	22,727.68	22,727.68	44,194.19	
	Fuentes móviles	1,762.83	225,044.91	58,654.17	23,902.99	5,513.88	5,056.50	435.79	5,513.88	5,056.50	5,056.50	435.79	
Guerrero	Fuentes naturales	85.34	1,757.27	4,596.55	400.51	246.26	234.95	0.03	246.26	234.95	234.95	0.03	
	Fuentes fijas	62,510.65	3,747.60	25,129.15	42.29	5,918.23	3,379.44	3.15	5,918.23	3,379.44	3,379.44	3.15	
	Fuentes de área	513.42	143,379.88	4,835.35	50,308.66	20,144.32	14,866.77	19,854.35	20,144.32	14,866.77	14,866.77	19,854.35	
	Fuentes móviles	796.13	214,258.60	29,489.38	15,561.17	1,415.22	1,292.77	230.46	1,415.22	1,292.77	1,292.77	230.46	
Hidalgo	Fuentes naturales	24.41	577.18	700.76	127.81	34.94	33.63	0.01	34.94	33.63	33.63	0.01	
	Fuentes fijas	146,094.52	8,765.23	26,850.54	3,897.12	9,156.03	6,520.17	257.25	9,156.03	6,520.17	6,520.17	257.25	
	Fuentes de área	248.50	67,370.44	11,306.87	34,382.34	24,872.10	9,819.30	18,866.54	24,872.10	9,819.30	9,819.30	18,866.54	
	Fuentes móviles	761.92	95,886.56	30,770.26	10,820.06	2,546.29	2,334.97	151.47	2,546.29	2,334.97	2,334.97	151.47	
Jalisco	Fuentes naturales	140.52	3,839.76	6,664.19	676.82	650.30	627.84	0.02	650.30	627.84	627.84	0.02	
	Fuentes fijas	14,479.70	3,205.82	6,113.98	4,193.61	14,037.56	8,206.79	49.87	14,037.56	8,206.79	8,206.79	49.87	
	Fuentes de área	1,996.45	199,797.68	9,632.08	103,832.67	50,731.61	34,229.05	78,390.31	50,731.61	34,229.05	34,229.05	78,390.31	
	Fuentes móviles	224.76	327,983.03	80,369.14	40,663.18	2,305.59	2,094.40	768.01	2,305.59	2,094.40	2,094.40	768.01	
México	Fuentes naturales	333.30	8,613.52	11,980.08	1,737.16	993.52	960.02	0.07	993.52	960.02	960.02	0.07	
	Fuentes fijas	1,797.70	10,933.11	12,315.41	10,442.93	2,746.40	2,232.86	123.63	2,746.40	2,232.86	2,232.86	123.63	
	Fuentes de área	625.47	147,658.01	9,906.94	163,927.11	30,547.15	20,267.38	47,645.49	30,547.15	20,267.38	20,267.38	47,645.49	
	Fuentes móviles	354.53	517,223.42	123,866.81	99,748.16	3,440.73	3,119.12	1,156.18	3,440.73	3,119.12	3,119.12	1,156.18	
Michoacán	Fuentes naturales	110.85	2,804.78	5,892.03	543.69	450.26	432.09	0.03	450.26	432.09	432.09	0.03	
	Fuentes fijas	20,789.75	5,398.79	55,860.75	225,073.46	5,739.92	3,662.44	185.12	5,739.92	3,662.44	3,662.44	185.12	
	Fuentes de área	820.47	146,474.46	5,766.67	61,580.03	27,073.94	18,739.30	29,828.83	27,073.94	18,739.30	18,739.30	29,828.83	
	Fuentes móviles	2,065.72	379,944.19	70,026.89	32,143.76	4,466.22	4,087.75	522.09	4,466.22	4,087.75	4,087.75	522.09	
Morelos	Fuentes naturales	154.35	3,450.62	7,146.22	689.78	567.06	545.65	0.01	567.06	545.65	545.65	0.01	
	Fuentes fijas	385.27	3,197.22	9,062.83	491.20	1,379.00	861.69	5.46	1,379.00	861.69	861.69	5.46	
	Fuentes de área	140.08	22,364.51	1,412.49	24,700.19	4,757.35	3,110.51	9,925.56	4,757.35	3,110.51	3,110.51	9,925.56	
	Fuentes móviles	509.55	100,651.86	18,563.11	8,007.44	1,042.37	954.33	142.04	1,042.37	954.33	954.33	142.04	
Nayarit	Fuentes naturales	11.57	3,337.10	2,282.61	329.45	340.51	328.00	0.01	340.51	328.00	328.00	0.01	
	Fuentes fijas	144.15	835.09	544.81	15.04	3,419.29	1,950.56	0.87	3,419.29	1,950.56	1,950.56	0.87	
	Fuentes de área	213.39	26,260.30	1,376.57	15,755.37	6,735.73	4,189.41	8,576.80	6,735.73	4,189.41	4,189.41	8,576.80	
	Fuentes móviles	355.04	74,150.85	12,975.27	6,166.93	990.26	907.43	88.03	990.26	907.43	907.43	88.03	

Fuente: Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN) Emisiones de contaminantes atmosféricos por fuente, 2020

Tabla 1. Inventario de Emisiones de Contaminantes atmosféricos por fuente, 2016 (Toneladas)

Entidad federativa	Tipo de Fuente	Contaminante									
		SO ₂	CO	Nox	COV	PM ₁₀	PM _{2.5}	NH ₃			
Nayarit	Fuentes móviles que no circulan por carretera	63.86	1,479.82	3,061.54	288.77	251.71	242.81				0.00
	Fuentes naturales	-	-	7,973.02	107,034.20	-	-	-	-	-	-
	Fuentes fijas	16,678.64	27,552.09	30,952.04	8,256.11	9,790.77	7,207.60				196.93
Nuevo León	Fuentes de área	56.09	11,574.75	1,904.01	56,534.52	8,104.58	2,524.17				18,350.19
	Fuentes móviles carreteros	145.96	206,936.93	64,959.19	21,403.36	1,719.08	1,569.63				425.92
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	125.33	3,004.32	4,513.74	705.89	142.91	134.41				0.05
	Fuentes naturales	-	-	11,204.88	46,272.31	-	-	-	-	-	-
	Fuentes fijas	99,603.21	2,827.06	7,234.52	1,023.03	6,665.10	3,925.48				86.84
Oaxaca	Fuentes de área	886.52	202,944.12	6,590.06	59,285.34	25,794.35	20,353.04				25,230.81
	Fuentes móviles carreteros	623.66	87,081.60	22,191.41	8,712.67	1,646.43	1,509.56				185.26
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	98.41	2,581.37	4,259.94	487.26	373.95	360.61				0.01
	Fuentes naturales	-	-	158,651.52	2,034,064.80	-	-	-	-	-	-
	Fuentes fijas	9,191.49	3,242.48	11,922.74	1,808.24	3,527.60	2,340.63				27.34
Puebla	Fuentes de área	1,636.74	153,312.67	6,700.32	75,016.56	36,290.24	28,229.06				46,337.78
	Fuentes móviles carreteros	1,366.12	213,292.73	50,331.84	20,044.01	3,932.80	3,605.16				339.84
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	65.90	1,566.87	3,855.60	318.83	255.43	244.01				0.02
	Fuentes naturales	-	-	119,582.05	768,355.49	-	-	-	-	-	-
	Fuentes fijas	1,972.82	1,747.15	4,639.15	4,715.39	1,124.27	922.69				33.55
Queretaro	Fuentes de área	359.28	31,295.64	1,674.32	25,969.46	9,153.31	6,628.66				34,241.98
	Fuentes móviles carreteros	758.75	86,317.84	27,843.13	9,519.75	2,501.20	2,294.54				159.50
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	36.95	916.60	1,843.88	192.11	110.85	105.80				0.02
	Fuentes naturales	-	-	7,852.84	43,696.00	-	-	-	-	-	-
	Fuentes fijas	84.07	155.71	1,250.92	50.16	2,186.89	1,243.12				0.13
Quintana Roo	Fuentes de área	115.91	23,320.47	1,182.71	20,075.96	4,077.84	2,548.96				3,297.38
	Fuentes móviles carreteros	716.16	117,396.32	22,700.42	10,751.64	1,368.48	1,253.05				234.55
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	140.20	3,708.06	2,045.92	830.69	49.31	48.50				0.02
	Fuentes naturales	-	-	1,477.95	125,983.03	-	-	-	-	-	-
	Fuentes fijas	64,448.21	7,203.94	22,018.66	2,708.29	13,417.59	8,610.85				77.50
San Luis Potosí	Fuentes de área	742.53	65,938.41	3,002.37	34,863.12	19,053.46	12,616.83				22,029.98
	Fuentes móviles carreteros	1,191.33	137,812.31	37,369.41	14,980.70	4,558.18	4,184.99				242.05
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	109.85	2,648.52	5,771.48	526.52	424.06	406.92				0.01
	Fuentes naturales	-	-	23,157.38	144,546.25	-	-	-	-	-	-
	Fuentes fijas	55,754.11	583.11	4,117.75	441.81	1,149.93	716.05				76.46
Sinaloa	Fuentes de área	580.44	104,255.27	5,133.10	42,801.09	29,916.08	18,112.93				34,425.96
	Fuentes móviles carreteros	964.45	165,112.03	39,101.23	15,559.71	3,006.37	2,756.44				237.37
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	167.92	3,555.86	7,375.07	764.87	495.16	476.11				0.02
	Fuentes naturales	-	-	405.01	428,056.20	-	-	-	-	-	-
	Fuentes fijas	17,625.84	3,018.55	9,090.12	2,542.42	2,399.86	1,816.25				96.87
Sonora	Fuentes de área	974.18	125,823.79	5,177.89	44,692.47	23,614.58	14,449.32				29,479.28
	Fuentes móviles carreteros	1,081.52	130,938.83	39,430.64	11,843.06	3,925.52	3,604.79				191.52
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	139.32	2,721.49	7,456.04	626.06	399.91	380.70				0.18
	Fuentes naturales	-	-	11,607.60	107,783.88	-	-	-	-	-	-
	Fuentes fijas	76,617.65	3,850.50	9,467.16	355.90	4,624.27	2,999.13				73.72
Tabasco	Fuentes de área	260.75	67,094.47	2,303.84	29,816.17	9,202.21	6,585.90				9,637.15

Fuente: Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN) Emisiones de contaminantes atmosféricos por fuente, 2020

Tabla 1. Inventario de Emisiones de Contaminantes atmosféricos por fuente, 2016 (Toneladas)

Entidad federativa	Tipo de Fuente	Contaminante									
		SO ₂	CO	NO _x	COV	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{10+2.5}	NH ₃		
Tabasco	Fuentes móviles carreteros	699.62	109,036.61	19,712.05	8,555.22	1,762.71	1,617.76	165.04			
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	52.23	978.06	1,768.48	226.91	106.82	102.67	0.01			
	Fuentes naturales	-	-	63,029.79	277,300.66	-	-	-	-		
Tamaulipas	Fuentes fijas	121,484.43	85,375.08	24,738.07	9,561.98	10,076.13	7,927.76	317.60			
	Fuentes de área	425.88	65,120.97	3,763.77	49,596.70	30,626.88	14,956.10	15,732.48			
	Fuentes móviles carreteros	1,310.80	202,064.70	45,232.72	17,395.22	3,577.15	3,281.35	251.29			
Tlaxcala	Fuentes móviles que no circulan por carretera	234.45	4,635.62	10,006.95	1,004.50	742.53	716.50	1.08			
	Fuentes naturales	-	-	20,282.44	124,825.92	-	-	-			
	Fuentes fijas	1,043.33	359.28	978.68	1,878.79	274.32	194.22	5.32			
Veracruz	Fuentes de área	109.87	25,603.98	1,220.22	15,128.16	5,860.45	3,545.46	11,456.29			
	Fuentes móviles carreteros	425.26	62,670.65	15,419.63	6,530.62	1,140.93	1,043.44	104.64			
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	54.37	1,408.76	2,632.92	256.76	245.64	237.04	0.01			
Yucatán	Fuentes naturales	-	-	21,926.54	66,623.20	-	-	-			
	Fuentes fijas	220,273.68	31,806.57	41,561.10	2,267.56	37,789.46	23,689.83	457.70			
	Fuentes de área	1,265.94	267,710.01	10,038.09	108,625.28	38,165.79	28,650.87	93,139.11			
Zacatecas	Fuentes móviles carreteros	1,971.32	240,781.04	63,763.27	24,572.20	6,079.04	5,579.99	448.92			
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	192.91	4,096.21	9,042.22	867.84	634.69	608.93	0.03			
	Fuentes naturales	-	-	133,826.24	945,416.37	-	-	-			
Zacatecas	Fuentes fijas	19,913.29	3,124.36	9,144.20	229.78	1,806.53	1,234.43	26.69			
	Fuentes de área	276.03	70,498.14	2,586.72	29,695.25	7,967.43	6,337.01	25,064.24			
	Fuentes móviles carreteros	633.10	112,193.91	17,762.74	10,970.30	1,189.92	1,089.03	207.49			
Zacatecas	Fuentes móviles que no circulan por carretera	36.49	703.62	1,607.94	179.49	46.18	42.82	0.00			
	Fuentes naturales	-	-	49,709.19	492,305.18	-	-	-			
	Fuentes fijas	1.46	10.08	16.23	142.01	3,573.80	1,883.81	0.46			
Zacatecas	Fuentes de área	474.02	75,246.32	3,144.13	22,396.47	22,065.65	13,092.54	13,550.74			
	Fuentes móviles carreteros	527.29	67,968.33	20,055.50	6,139.64	1,812.97	1,663.51	95.14			
	Fuentes móviles que no circulan por carretera	145.96	4,154.66	6,472.32	722.98	690.85	667.83	0.00			
Fuentes naturales	-	-	26,020.75	152,106.92	-	-	-	-			

Fuente: Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN) Emisiones de contaminantes atmosféricos por fuente, 2020

VI. REFERENCIAS

- Alfaro, B., Limón, R., Martínez, T., Ramos, G., Reyes, A., & Tijerina, M. (2008). *Ciencias del Ambiente*. Ed. Patria.
- Arregui B. (2007). Metodología para la Generación de Modelos Gaussianos de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos. Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador.
- Carrasco, B. J., & Calderero, J. F. (2000). *Aprendo a investigar en educación*. Rialp.
- Clean Air Institute. (2013, mayo). *La Calidad del Aire en América Latina. Una Visión Panorámica*. https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/La_Calidad_del_Aire_en_Am%C3%A9rica_Latina.pdf
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2017, diciembre). *Clasificación de los Contaminantes del Aire Ambiente*. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/2-clasificacion-de-los-contaminantes-del-aire-ambiente>
- Delworth, T. L., & Greatbatch, R. J. (2000). Multidecadal Thermohaline Circulation Variability Driven by Atmospheric Surface Flux Forcing. *Journal of Climate*, 13(9), 1481–1495. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1481:MTCVDB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1481:MTCVDB>2.0.CO;2)
- DOF. (1988a). *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente LGEEPA*.
- DOF. (1988b). *Reglamento de la Ley General del equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*.
- DOF. (2012). *Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición. NOM-085-SEMARNAT-2011*.
- DOF. (2014a). *Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. NOM-020-SSA1-2014*.
- DOF. (2014b). *Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para la evaluación. NOM-025-SSA1-2014*.

- DOF. (2019). *Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. NOM-172-SEMARNAT-2019.*
- Garces, A. H., Haza, U. J., González, J. A., Long, J. C., Rodríguez, S. S., Martínez, F. G., & Valle, A. T. (2015). Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones. *UCE Ciencia*, 3(2).
- INECC. (2007, noviembre). *Calidad del Aire y Efectos a la Salud.* <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/233/cap4.html>
- INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2016, México.*
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2020). *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019, México.* Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos.
- DOF. (1988b). *Reglamento de la Ley General del equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.*
- Pacheco, P. R., Parodi, M. C., Mera, E. M., & Salini, G. A. (2020). Variables meteorológicas y niveles de concentración PM10 en Andacollo, Chile, un estudio de dispersión y entropías. *Scielo*, 31(6).
- Periódico Oficial del Estado de Chiapas. (2015). *Ley Ambiental para el Estado de Chiapas.*
- Salas, C. B. (2004). *Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: análisis del proceso.*
- Sampieri, H., & Torres, C. P. M. (2018). *Metodología De La Investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (1a ed.). McGraw-Hill.

- S.E.M.A.H.N. (2021a, julio 13). *Gráfica de monitoreo de la calidad del aire en la zona Metropolitana de Tuxtla* Gutiérrez [Gráfico].
https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/index.php/calidad_aire/datos_historicos
- S.E.M.A.H.N. (2021b, julio 15). *Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire*.
www.semahn.chiapas.gob.mx.
https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/index.php/calidad_aire
- SEMARNAT. (2014). *Programa Especial de Cambio Climático 2014–2018. Gobierno de la República. México*.
https://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/transparencia/programa_especial_de_cambio_climatico_2014-2018.pdf
- SEMARNAT. (2015, diciembre). *Glosario de Educación Ambiental*.
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/glosario-de-educacion-ambiental>
- SEMARNAT. (2016a). *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes fijas por sector SCLAN*.
http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE01_42%26IBIC_user=dgeia_mce%26IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=* &NOMBREENTIDAD=Chiapas
- SEMARNAT. (2016b). *Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes de área*.
http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE01_44%26IBIC_user=dgeia_mce%26IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=* &NOMBREENTIDAD=Chiapas

- SEMARNAT. (2016c). *Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de fuentes fijas por origen de las emisiones.*
http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE01_41%26IBIC_user=dgeia_mce%26IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*%26NOMBREENTIDAD=Chiapas
- SEMARNAT. (2016d). *Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuente.* S.
http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE01_40_B%26IBIC_user=dgeia_mce%26IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*%26NOMBREENTIDAD=Chiapas
- SEMARNAT. (2018a). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Chiapas.*
- SEMARNAT. (2018b). *Fuentes de Contaminación Atmosférica.*
<https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica>
- SEMARNAT. (2019a, marzo). *Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio INEM.*
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>
- SEMARNAT. (2019b, mayo). *Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.*
- SEMARNAT. (2021a, abril). *Programa de Gestión para mejorar la Calidad del Aire del Estado de Chiapas. ProAire.* https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/310363/26_ProAire_Chiapas.pdf
- SEMARNAT. (2021b, abril 7). *Programas de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire ProAire.* gob.mx.
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire>

- SEMARNAT. (2021c, julio). *Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. Estaciones de medición de contaminantes criterio por municipio*.
http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AIRE01_14%26IBC_user=dgeia_mce%26IBC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=* &NOMBREENTIDAD=Chiapas
- Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. (2018). *Atmósfera* (N.º 18). SEMARNAT. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html>
- WHO. (2014). *Burden of disease from Ambient Air Pollution for 2012*.
https://www.who.int/airpollution/data/AAP_BoD_results_March2014.pdf