



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. Ana Karen Vargas Suárez

Pasante del Programa Educativo de Ingeniería Ambiental

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:
“Evaluación de los datos de la SEMAHN sobre el monitoreo de la calidad del aire de acuerdo a la NOM-172-SEMARNAT-2019 en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas”.

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

Mtro. Carlos Narcía López

Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

Dr. Juan Antonio Villanueva Hernández

Firmas:

**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y
ARTES DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA EDUCATIVO DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

CURSO ESPECIAL DE TITULACIÓN

TRABAJO DOCUMENTAL

**EVALUACIÓN DE LOS DATOS DE LA SEMAHN
SOBRE EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL
AIRE DE ACUERDO A LA NOM-172-SEMARNAT-
2019 EN TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTA:
ANA KAREN VARGAS SUÁREZ**

**DIRECTOR:
DR. JUAN ANTONIO VILLANUEVA HERNÁNDEZ**



TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS

SEPTIEMBRE 2021

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	3
II. OBJETIVOS	15
II.1. OBJETIVO GENERAL	15
II.2. OBJETIVO ESPECIFICO	15
III. METODOLOGÍA.....	15
IV. MARCO TEÓRICO	17
IV.1. QUE ES LA ATMOSFERA Y COMO SE CLASIFICA	17
IV.2. QUE ES UN CONTAMINANTE	19
IV.3. QUE ES LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	20
IV.4. QUE ES UN CONTAMINANTE ATMOSFÉRICO	21
IV.5. SITUACIÓN ACTUAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE	22
IV.6. FACTORES QUE INTERVIENE EN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	23
IV.7. IMPACTOS Y CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA SALUD	25
IV.8. IMPACTOS Y CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LOS ECOSISTEMAS Y EDIFICIOS	32
IV.9. FUENTES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	33
IV.10. CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES	36
IV.11. NORMATIVIDAD VIGENTE SOBRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN MÉXICO	38
IV.12. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE	47
IV.13. TECNOLOGÍAS DE MONITOREO ATMOSFÉRICO	49
IV.14. TECNOLOGÍAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR FUENTES MÓVILES (ESCAPES)	58
IV.15. EVALUACIÓN DE LOS DATOS MENSUALES DE PM2.5 Y OZONO (O3) PARA LA ZONA METROPOLITANA DE TUXTLA GUTIÉRREZ Y EL CUMPLIMIENTO DE LA NOM-172-SEMARNAT-2019	60
V. CONCLUSIONES, PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES.....	66
VI. ANEXOS	69
VII. REFERENCIAS DOCUMENTALES	72

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente a nivel mundial existe un consenso científico casi generalizado en torno a la idea de que nuestro modo de producción y consumo genera grandes alteraciones en el medio ambiente.¹

Una de estas alteraciones y uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial es la contaminación atmosférica, la cual ha ido en incremento principalmente por el crecimiento poblacional, el crecimiento de las industrias y el uso excesivo de combustibles fósiles, los cuales generan la emisión a la atmosfera de gases tales como el dióxido de carbono, óxido nitroso y metano; gases responsables del efecto invernadero, el deterioro de la capa de ozono y a su vez del calentamiento global.

La contaminación atmosférica no solo es una problemática para el medio ambiente y el planeta, sino que también representa un riesgo para la salud de los seres humanos; los efectos de la contaminación en la salud humana varían según el tipo de contaminante del que se trate, su concentración y el tiempo de exposición a dicho contaminante o contaminantes.

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), todas las personas están expuestas a la contaminación del aire; en el año 2016 se reportó que el acumulado de muertes prematuras atribuidas a la contaminación del aire exterior fue aproximadamente de 249 mil y alrededor de 83 mil muertes prematuras fueron atribuibles a la contaminación del aire debido al uso de combustibles sólidos en la vivienda en las Américas.²

Las poblaciones que habitan cerca de carreteras y grandes zonas industriales son las que están mayormente expuestas a altos niveles de contaminación ambiental, por lo que es necesario que se mantenga un monitoreo de la calidad del aire para poder tomar acciones y decisiones que prevengan posibles riesgos a la salud en la población y la aparición de enfermedades respiratorias, cardiacas, cáncer de pulmón, etc.

A nivel mundial existen guías de calidad del aire (GCA) generadas por la OMS que están destinadas a respaldar las medidas orientadas a conseguir una calidad del aire que proteja la salud pública de los seres humanos, cabe destacar que a pesar de la existencia de estas guías cada país cuenta con políticas

¹ Remacha, M. (2017). Medioambiente: desafíos y oportunidades para las empresas. España.

² OPS, & OMS. (2016). Organización Panamericana de la Salud: Calidad del Aire. Obtenido de <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>

ambientales propias que son diferentes y tienen establecidas normas de calidad del aire para proteger la salud de sus ciudadanos.

Las normas nacionales de cada país pueden variar en función al enfoque adoptado con el fin de equilibrar los riesgos para salud, la viabilidad tecnológica, los aspectos económicos y otros factores políticos y sociales. Por su parte las políticas ambientales dependen del nivel de desarrollo del país y su capacidad para la gestión de la calidad del aire, la creación de estas políticas puede tener variaciones dependiendo de las condiciones locales de cada país.

La situación de las diferentes zonas metropolitanas del mundo en cuanto a calidad del aire puede variar mucho en función del contaminante considerado, se pueden encontrar ciudades en desarrollo con niveles de PM10 y PM2,5 extremadamente elevados pero que a su vez tienen concentraciones de NO2 más bajas que en zonas con mayor proporción de vehículos diésel.

De acuerdo a la OMS en 2006, las pruebas para el ozono (O3) y el material particulado (MP) indican que hay riesgos para la salud con las concentraciones que hoy se observan en numerosas ciudades de los países desarrollados.³

En cuanto a las PM2.5 Y PM10, a mediados del año 2016, la Organización Mundial de la Salud publicó una base de datos con registros de mediciones y estimaciones de concentraciones promedio anual de las PM2,5 y PM10 para distintas ciudades y zonas metropolitanas del mundo, donde se tuvieron los resultados de las siguientes tablas. (Tabla 1 y 2)

Tabla 1.- Concentraciones promedio anual de las PM10 para distintas zonas metropolitanas del mundo

País	Ciudad	Concentración promedio anual PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Nigeria	Onitsha	594
Pakistán	Peshawar	540
República Islámica de Irán	Zabol	527
Pakistán	Rawalpindi	448

³ Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.

Nigeria	Kaduna	423
Nigeria	Aba	373
Arabia Saudita	Riyadh	368
Arabia Saudita	Al Jubail	359
Afganistán	Mazar-e Sharif	334

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente Chile, 2018.

Tabla 2.- Concentraciones promedio anual de las PM_{2,5} para distintas zonas metropolitanas del mundo

País	Ciudad	Concentración promedio anual PM_{2.5} (µg/m³)
República Islámica de Irán	Zabol	217
India	Gwalior	176
India	Allahabad	170
Arabia Saudita	Riyadh	156
Arabia Saudita	Al Jubail	152
India	Patna	149
India	Raipur	144
Camerún	Bamenda	132
China	Xingtai	128
China	Baoding	126

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente Chile, 2018.

China al ser uno de los países con mayor población y actividad industrial, además de presentar uno de los índices más altos de contaminación atmosférica; cuenta con diversos estudios, medidas de monitoreo de la calidad del aire, estrategias y políticas ambientales.

En un estudio realizado de 2015 a 2018, que evaluaba la política de control de la contaminación del aire de China con un sistema extendido de indicadores AQI (ICA, índice de calidad del aire o AQI, por sus siglas en inglés) en las regiones de Beijing, Tianjin y Hebei; calcularon los valores de la calidad del aire mediante el uso del modelo de filtrado colaborativo.

Por otro lado, el estudio también simulaba el efecto de las políticas de control de contaminación ambiental del gobierno chino desde marzo de 2016, esto con ayuda del Back Propagation (BP) Neutral Network (Red neutral de propagación hacia atrás BP).

Dicha simulación tuvo como resultado que las políticas de control han mejorado la calidad del aire de Beijing en un 55,74% y la de Tianjin en un 34,38%; mientras que la migración de empresas contaminantes ha provocado diferentes cambios en la calidad del aire en diferentes ciudades de la provincia de Hebei viéndose un deterioro de la calidad del aire en un 58,60% y un 38,68% en las ciudades de Shijiazhuang y Handan respectivamente.⁴

En Estados Unidos uno de los estados que presenta los más altos índices de contaminación atmosférica es Nueva York, derivado de esto el departamento de conservación ambiental y su programa de monitoreo del aire presentan reportes sobre la calidad ambiental del aire.

De acuerdo al artículo publicado en 2011, la exposición actual al promedio anual de concentraciones de PM2.5 causa más de 3000 muertes; más de 2.000 hospitalizaciones por causas respiratorias y cardiovasculares; y aproximadamente 6,000 visitas de emergencia por asma.⁵

En Latinoamérica por su parte, Chile cuenta con un Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), el cual maneja un portal que contiene información de la calidad del aire de todo el país.

las primeras mediciones sobre la calidad del aire en Chile datan del año 1964, y para 1988 el Ministerio de Salud de ese país había creado la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire y Variables Meteorológicas en la Región Metropolitana (Red MACAM, por sus siglas), en ese contexto quedo en evidencia que la Región Metropolitana registraba graves problemas de contaminación del aire y serios riesgos sobre las condiciones de salud de las personas.⁶

Apenas en el año de 2005 comenzaron a implementar el Sistema de Información Nacional de calidad de aire (SINCA), que concentra toda la información disponible de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en Chile.

⁴ Guanghui Yuan , & Weixin Yang. (2019). Evaluating China's Air Pollution Control Policy with Extended AQI Indicator System: Example of the Beijing-Tianjin-Hebei Region. Shanghai, China.

⁵ NYC Department of Health and Mental Hygiene. (2011). Air Pollution and the Health of New Yorkers: The Impact of Fine Particles and Ozone. Nueva York, EUA.

⁶ Ministerio del Medio Ambiente Chile. (2018). Guía de calidad del aire y educación ambiental. Chile.

Según el Ministerio del Medio Ambiente de Chile en su guía de la calidad del aire y educación, las emisiones de la mayoría de los principales contaminantes atmosféricos han ido en aumento desde el año 2005. Mientras que de acuerdo al informe de evaluación ambiental de Chile 2016, las emisiones de MP2.5, MP10 y de monóxido de carbono (CO) se incrementaron cerca de un 10% entre 2005 y 2011, por su parte las emisiones de óxidos de azufre (SOx), descendieron un 25% entre 2007 y 2011.⁷

El mismo informe señala que el 44% de las zonas metropolitanas de Chile supera el límite anual de PM10 y el 15% excedió el límite diario del contaminante, a su vez el 67% superó el umbral anual de PM2,5 y el 77% supero su límite diario.⁸

En Bogotá, Colombia, desde 1997 está en operación la red de monitoreo de calidad del aire (RMCAB) la cual registra concentraciones de contaminantes criterio (PM 10, PM2.5, O₃, CO, NO_x, SO₂) y variables meteorológicas.

En 2017, la RMCAB funcionó con 13 estaciones, 12 fijas y una móvil, y de acuerdo a sus registros los contaminantes que con mayor frecuencia excedieron los límites normativos fueron el PM y el ozono (O₃). Por otra parte, el sector del transporte fue el que represento el mayor porcentaje de emisiones de gases contaminantes (CO, CO₂ y NO_x), con el 90%.

En el caso de México la ausencia de la política ambiental en los años más intensos del crecimiento industrial trajo como consecuencia la contaminación del medio ambiente y el deterioro de los ecosistemas del país en las regiones consideradas con mayor índice de industrialización.⁹

La calidad del aire se ha visto afectada por la presencia de múltiples contaminantes como son las PM10, PM2.5, dióxido de nitrógeno, ozono, etcétera, lo que representa un serio problema de salud pública y deteriora la calidad de vida de sus habitantes.¹⁰

Derivado de lo anterior y con el objetivo de mantener la salud de la población mexicana y vigilar los índices de contaminación atmosférica, el gobierno mexicano ha creado normas y estrategias que permiten regular y monitorear la calidad del aire en las distintas entidades del país; gracias a las normas

⁷ OCDE. (2016). Evaluaciones del desempeño ambiental Chile, aspectos destacados. Chile.

⁸ CEPAL, & OCDE. (2016). Evaluaciones del desempeño ambiental, Chile. Santiago, Chile.

⁹ Lezama Escalante, C. (2006). La introducción de tecnologías: ¿nuevos caminos hacia la reestructuración productiva? Guadalajara, México.

¹⁰ Secretaria de Salud México. (2014). NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. México.

se permite establecer los estándares para la protección de la salud pública y las estrategias permiten vigilar el cumplimiento de esta normatividad.

Primeramente a nivel nacional la SEMARNAT diseñó la Estrategia Nacional la Calidad del Aire (ENCA), como una herramienta de planeación que oriente y coordine acciones entre diferentes instancias gubernamentales para controlar, mitigar y prevenir la emisión y concentración de contaminantes en la atmósfera en ambientes rurales y urbanos, con proyección al año 2030; esta estrategia establece objetivos y líneas de acción para mejorar la calidad del aire en el territorio nacional con el objeto de proteger la salud de la población, la flora y fauna de nuestros ecosistemas, y contribuir al desarrollo económico sustentable de México.

Por otro lado, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), cada año genera el informe nacional de la calidad del aire, el cual constituye un esfuerzo por poner a disposición de las autoridades ambientales, de salud, investigadores, estudiantes, organismos de la sociedad civil y otros interesados, un panorama de la calidad del aire en México durante el año, esto tiene la finalidad de que se cuente con información confiable para diseñar y evaluar políticas públicas que permitan mejorar el desempeño de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire existentes del país, así como reducir los riesgos a la salud asociados con la exposición a los contaminantes atmosféricos.

La evaluación de la calidad del aire en las zonas metropolitanas se ha vuelto de vital importancia para evitar los posibles impactos negativos de los contaminantes en la salud de la población, actualmente el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) y el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA) son los encargados de realizar los monitoreos de la calidad del aire y determinar si esta es buena, aceptable, mala, muy mala o extremadamente mala.

Zona metropolitana de la Ciudad de México

A nivel nacional contamos con varias zonas metropolitanas que tienen experiencia en el monitoreo de la calidad de aire, por ejemplo, la ciudad de México cuenta con el informe anual de la calidad del aire, el cual incluye información actualizada procedente de los resultados del programa de monitoreo atmosférico, a su vez el informe analiza los datos de calidad del aire de la Ciudad de México y su área metropolitana.

Según el informe anual de la Calidad del aire en Ciudad de México de 2018, desde el año 2006 el SO₂ no ha alcanzado concentraciones que impliquen un problema para la salud, esto debido al cambio de combustibles con bajo contenido de azufre; desde 2001 el CO no ha superado el valor límite normado de 11.0 ppm en el promedio de 8 horas.¹¹

En términos del cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas de salud ambiental, durante 2018 la concentración de SO₂, CO y NO₂, se mantuvieron por debajo de los límites máximos permisibles establecidos, no obstante, el O₃, las PM₁₀ y las PM_{2.5} rebasaron los valores normados durante la mayor parte del año.

En cuanto a los promedios anuales el SO₂ registró 4.3 ppb en toda la ZMCM; los óxidos de nitrógeno NO, NO₂ y NO_x tuvieron 16, 25 y 41 ppb, respectivamente, los niveles de concentración de estos compuestos presentaron una tendencia decreciente reduciéndose un 3% comparada con 2017; el CO registró una concentración anual de 0.4 ppm, lo cual represento el valor mínimo registrado históricamente; el O₃ obtuvo un promedio anual de 30 ppb.¹¹

De acuerdo al informe la zona metropolitana registro una calidad buena y regular durante 89 días del año, donde los valores correspondieron a menos de 100 puntos del índice; 271 días tuvieron una calidad mala y 5 días tuvieron una calidad muy mala, donde los valores son mayores a 150 puntos en el índice.

Cabe mencionar que durante la temporada de lluvia se registró lluvia ácida en toda la ZMCM, presentandose la mayor cantidad de muestras ácidas en el sur de la ciudad.

Zona metropolitana de Durango

De acuerdo al informe nacional de la calidad del aire en el año 2018, la ciudad de Durango incumplió los dos límites normados vigentes para PM₁₀ (promedio de 24 horas y promedio anual) y se tuvieron 99 días del año con una calidad del aire mala; para las PM_{2.5} los dos límites normados (promedio de 24 horas y promedio anual) fueron superados y el límite de 24 horas se superó en dos ocasiones a lo largo del año.

¹¹ SEDEMA. (2018). Informe Anual: Calidad del aire 2018, Ciudad de México. CDMX, México.

Para el dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂) predominaron los días con buena calidad del aire y no se registró ni un día con mala calidad del aire. Por último, para el Ozono (O₃) durante el 2018 no fue posible evaluar el cumplimiento de norma por insuficiencia de datos, sólo se dispuso de información suficiente para el 26% de los días del año y la misma indicó que al menos para esos días las concentraciones registradas de Ozono se mantuvieron por debajo del límite normado, reflejando una condición predominantemente de buena calidad del aire.

Con la poca información válida disponible se puede concluir que el contaminante que presentó una mala calidad del aire más constantemente fueron las partículas PM10.

Zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco

La zona metropolitana Guadalajara cuenta con una red de monitoreo integrado por 10 estaciones, para el año 2018 se registraron concentraciones superiores al límite normado de 24 horas para las PM10 en todas las estaciones de monitoreo que lo midieron; sin embargo, sólo se pudo determinar incumplimiento de norma en 5 de ellas debido al criterio de suficiencia de datos, para el límite de 24 horas se rebasó en 151 días del año (41%) a nivel de toda la zona metropolitana.

Para las partículas PM2.5, de las 6 estaciones de monitoreo existentes para este contaminante, tres estuvieron fuera de operación, en dos hubo suficiencia de datos y en la última (estación Santa Fe) se rebasó tanto el límite de 24 horas como el promedio anual, para el límite de 24 horas se rebasó el límite en 22 días del año (6%).

Para el ozono (O₃), en todas las estaciones se incumplió la norma de calidad del aire respectiva, las concentraciones más altas se registraron en la estación Miravalle donde el promedio de una hora más alto fue de 0.195 ppm y el promedio más alto de 8 horas fue de 0.144 ppm, siendo estos valores dos veces más altos que el límite normado; a lo largo del año los límites se rebasaron en el 33% de los días del año.

Para el dióxido de nitrógeno (NO), el dióxido de azufre (SO₂) y el monóxido de carbono (CO) los límites se cumplieron en todas las estaciones de monitoreo donde fueron medidos.

Es importante destacar que los contaminantes que con mayor frecuencia tuvieron una condición de mala calidad del aire fueron las PM10 (41% de los días del año), seguido del O₃ (33%) y las PM2.5 (6%).

Los días con concentraciones superiores a al menos uno de los límites normados para cualquier contaminante, fue de 216 equivalente al 59% de los días del año, dejando ver que en menos del 50% de los días del año se registraron niveles de contaminación por debajo de los límites recomendados para la protección de la salud de la población.

Zona metropolitana de Baja California, Mexicali

En un estudio realizado en 2020 por la Fundación para la Investigación de la Calidad del Aire A. C., se expresa que Mexicali ha sido catalogada como una de las ciudades más contaminadas de México y Latinoamérica; la contaminación atmosférica de esta zona está catalogada como una de las problemáticas ambientales de mayor impacto esto de acuerdo a los sondeos de percepción de la calidad del aire documentados en el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Baja California 2018-2027.

Para este estudio se procesaron datos de 65 sensores de PM2.5 que utilizan contadores ópticos de partículas y 3 estaciones normativas que utilizan contadores de partículas BAM-1020 basado en el método de operación equivalente EPA / USA para la supervisión de PPM10, PPM2.5 y PPM10-2.5.

Según este informe del promedio mensual para toda la red de sensores en el área urbana de Mexicali en el Índice de Calidad del Aire (AQI), los meses de enero y diciembre tuvieron una calidad insalubre para grupos sensibles (color naranja); febrero, marzo y de agosto a noviembre tuvieron una calidad moderada (color amarillo); y de abril a julio tuvieron una calidad buena (color verde).

El estudio tuvo como resultado que en 246 días del año el índice de la calidad del aire fue buena, 80 días tuvieron una calidad aceptable, 36 días tuvieron una calidad mal y 2 días muy mala.¹²

Zona metropolitana de Oaxaca

De acuerdo al informe nacional de la calidad del aire en el año en 2018 no se pudo realizar la evaluación de cumplimiento de las normas de calidad del aire para las PM2.5, el dióxido de nitrógeno (NO), el dióxido de azufre (SO₂) y el monóxido de carbono (CO), esto debido a la insuficiencia de información;

¹² REDSPIRA. (2020). Informe sobre calidad del aire en Mexicali durante 2020. Mexicali, Baja California, México.

con la poca información disponible se pudo concluir que no se registraron días con mala calidad del aire para estos cuatro contaminantes y que predominaron los días con buena calidad del aire.

En lo que respecta a las PM10, se registraron días con mala calidad en las dos estaciones de monitoreo existentes para la zona metropolitana, cabe mencionar que en ninguna de estas estaciones se pudo establecer el incumplimiento de la normatividad por no cumplir con el criterio de suficiencia de información para llevar a cabo la evaluación correcta. Para el ozono (O₃) la normatividad se incumplió para el límite promedio de 8 horas, en una de las dos estaciones que lo midieron.

Es importante señalar que las PM10 fueron el contaminante que con mayor frecuencia indicó una condición de mala calidad del aire, esto derivado de que se registraron concentraciones superiores al límite que establece la normatividad en lo que respecta al límite de 24 horas. El registro de días con límites superiores de PM10, es un indicador de los posibles riesgos a la salud de la población.

En lo que respecta al estado de Chiapas este no está incluido en el último Informe Nacional de la Calidad del Aire de 2018, por lo que es de vital importancia que los datos obtenidos para el estado sean analizados e incluidos en este informe.

Actualmente el área de Calidad del Aire de la Dirección de Cambio Climático y Economía Ambiental de la SEMAHN tiene dentro de sus atribuciones el instrumentar y ejecutar programas de monitoreo de la calidad del aire y control de la contaminación atmosférica en el Estado de Chiapas, es por eso que realiza un seguimiento constante de la calidad del aire en la capital del estado mediante dos estaciones ubicadas en el DIF Estatal y en Cahuaré.

Durante el mes de abril de 2019 la Dirección de Cambio Climático y Economía Ambiental de la SEMAHN informó que el día 27 del mismo la estación ubicada en Cahuaré reportó 129 unidades en el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (Imeca), situada en los rangos de 101 a 150, es decir que la calidad del aire fue calificada como mala.¹³

En cuanto a la estación localizada en las instalaciones del DIF Estatal, el día 28 de abril se situó en el rango de 51 a 100 del Imeca con 85 puntos, indicando que la calidad del aire fue regular. Por otro lado,

¹³ SEMAHN. (Junio de 2019). SEMAHN Sala de prensa. Obtenido de SEMAHN Boletín no. 1014: https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/noticias/ver_noticia/1014

el valor máximo de partículas PM10 obtenido durante el mes de abril fue de 175 unidades en el IMECA, indicando una muy mala calidad del aire.

El último reporte del que se tiene registro es de febrero de 2021, en el que se emitió una alerta de precontingencia ambiental debido a que se alcanzaron 79.9 ug/m³ de partículas PM 2.5 en el aire de Tuxtla Gutiérrez.¹⁴

En Chiapas no hay demasiados antecedentes respecto al tema de calidad del aire, pero se destaca el Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Chiapas, en donde se muestran los indicadores para el año 2014, 2015 y 2017 de la estación de monitoreo ubicada en el Palacio municipal de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, los dos parámetros tomados en cuenta en este trabajo fueron partículas menores o iguales a 10 micrómetros (PM10) y para ozono (O₃).

El documento de este programa dio como resultado que, para ambos contaminantes, PM10 y Ozono, se registraron días con calidad del aire mala (rojo). Las PM10 estuvieron por arriba de los 75 µg/m³ (límite de 24 horas de la **NOM-025-SSA1-2014**) en 24 días en 2014, 1 día en 2015 y 5 días en 2017, mientras que el ozono sólo registró días con calidad del aire mala en 4 días del 2017 (concentraciones por arriba de 0.095 ppm, de acuerdo al límite de 1 hora).¹⁵

En otro estudio realizado por investigadores de la UNICACH, UNACH y el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2013, presentaron un sistema de monitoreo remoto de contaminantes basado en espectroscopia por absorción óptica diferencial pasiva, el cual permitía detectar trazas de contaminantes presentes en la atmósfera; dicho estudio tuvo como resultados que existía cierta aproximación entre las mediciones realizadas con técnicas convencionales (puntual) y el DOAS (trayectoria), siendo este un sistema confiable que permite hacer estudios de emisiones bajo el concepto de medición por fuente de área, así como evaluaciones de la calidad del aire de manera más integral.

Como ya vimos el monitoreo sistemático de la calidad del aire permite lograr el diseño de estrategias efectivas y eficientes que contribuyan a mejorar la calidad del aire, a la evaluación del impacto real de los

¹⁴ Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural. (Febrero de 2021). Boletín No. 1239. Obtenido de https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/noticias/ver_noticia/1239

¹⁵ SEMARNAT, & SEMAHN. (2018). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Chiapas 2018 - 2027. Chiapas, México.

programas de gestión, así como generar información confiable y oportuna que ayude a las autoridades en la toma de decisiones y a los ciudadanos en la prevención de riesgos a la salud.¹⁶

En este trabajo se pretende realizar la evaluación de los datos presentados por la SEMAHN sobre el monitoreo de los contaminantes ozono (O₃) y partículas PM_{2.5} generados en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, esto de acuerdo a la norma oficial mexicana “**NOM-172-SEMARNAT-2019**, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud.

El primer capítulo se centrará en explicar que es que es la atmosfera y como se clasifica; que es un contaminante; que es la contaminación atmosférica y que es un contaminante atmosférico; la situación actual, factores y causas de la contaminación del aire; los impactos y consecuencias de los contaminantes atmosféricos en la salud, los ecosistemas y los edificios; fuentes de la contaminación atmosférica y clasificación de los contaminantes; el índice de la calidad del aire y las normas vigentes en materia de calidad del aire en México; y las tecnologías de monitoreo atmosférico y control del los contaminantes atmosféricos.

En el segundo capítulo se presenta la evaluación de los datos generados por el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA) sobre los contaminantes ozono (O₃) y partículas PM_{2.5} en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, datos que fueron recopilados de la SEMAHN y se analizaron de acuerdo a la norma oficial mexicana **NOM-172-SEMARNAT-2019**.

¹⁶ SEDEMA. (2018). Informe Anual: Calidad del aire 2018, Ciudad de México. CDMX, México.

II. OBJETIVOS

II.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar los datos de los contaminantes PM2.5 y Ozono (O₃) registrados por la SEMAHN en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, de acuerdo a la **NOM-172-SEMARNAT-2019**

II.2. OBJETIVO ESPECIFICO

- Identificar las características principales y de donde provienen los contaminantes atmosféricos PM2.5 Y O₃, en la zona metropolitana de Tuxtla Gutiérrez.
- Recabar los datos mensuales generados por la Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural (SEMAHN) durante los meses enero - julio de 2021, sobre los contaminantes PM2.5 y Ozono (O₃) para la zona metropolitana de Tuxtla Gutiérrez.
- Realizar la evaluación de los datos mensuales de PM2.5 y Ozono (O₃) para la zona metropolitana de Tuxtla Gutiérrez y el cumplimiento de la NOM-172-SEMARNAT-2019.

III. METODOLOGÍA

El presente trabajo se basa en un tipo de investigación cualitativa ya que es una investigación meramente documental que aspira a recoger la información completa sobre un tema específico, para luego proceder a su interpretación.

De acuerdo a Sampieri, Fernández y Baptista en 2014, una investigación cualitativa se basa en investigaciones previas, el enfoque cualitativo (también conocido como investigación naturalista, fenomenológica o interpretativa) es una especie de “paraguas” en el cual se incluye una variedad de concepciones, visiones, técnicas y estudios no cuantitativos.

Para el planteamiento de este trabajo se detectaron las fuentes más relevantes referentes al tema principal, se consultaron múltiples medios y se realizó una recolección e investigación exhaustiva de datos en diversas fuentes.

Primeramente, para el desarrollo de la introducción, el marco teórico y el cumplimiento del primer objetivo del trabajo, se extrajo y recopiló la información actual, relevante, confiable y necesaria en

múltiples fuentes de información nacionales e internacionales, como lo son los artículos de investigación en revistas académicas y periódicos, los libros, las notas informativas y boletines de las paginas oficiales mexicanas, las guías y los medios electrónicos diversos.

Para el desarrollo y cumplimiento del objetivo número dos, se hizo el uso de la información generada por el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA) sobre los datos diarios de los contaminantes PM2.5 y Ozono en Tuxtla Gutiérrez. Para poder conseguir esos datos nos dirigimos a la página oficial de la SEMAHN donde encontramos tablas de datos diarios desde el primero de enero de 2021 hasta el treinta de junio de 2021.

Posteriormente para el cumplimiento del tercer objetivo, con ayuda de lo establecido en la NOM-172-SEMARNAT-2019 y mediante la implementación de gráficos y tablas de excel, se evaluaron los datos obtenidos del monitoreo realizado por la SEMAHN; esto con la finalidad de analizar el comportamiento diario de los contaminantes en los 6 meses muestreados, encontrar cuáles fueron las mayores concentraciones de los contaminantes, en que meses se presentaron los picos de contaminación más altos, cuantas veces se rebasaron los límites permisibles de PM2.5 y Ozono establecidos por la normatividad, que meses tuvieron una calidad del aire buena y cuales no y definir cuantos días del total muestreado tuvieron una calidad del aire buena, aceptable, mala, muy mala y extremadamente mala.

Finalmente se generaron las conclusiones tomando en cuenta la correlación entre los niveles altos de contaminación de Ozono y PM2.5; y los factores que intervienen en la contaminación atmosférica como lo son las variables meteorológicas y las emisiones extraordinarias.

IV. MARCO TEÓRICO

IV.1. QUE ES LA ATMOSFERA Y COMO SE CLASIFICA

El planeta tierra es el único planeta conocido que cuenta con una atmósfera que permite la existencia de agua en sus tres estados: líquido, sólido y gaseoso, esto se debe en parte a que la tierra tiene la masa idónea para tener una atmósfera adecuada en su composición que le permite albergar vida.

La atmosfera es la capa de gas que rodea a la tierra, es una estructura muy delgada cuyo espesor es aproximadamente el 0.25% del diámetro de la tierra (aproximadamente 30 km) y está dividida en capas.

Otra forma de definir a la atmosfera es como una cobertura gaseosa compuesta principalmente por nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂) molecular, con pequeñas cantidades de otros gases, como vapor de agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂).¹⁷

Esta atmósfera y la distancia existente entre el sol y la tierra permiten mantener una temperatura apta para el desarrollo de los seres vivos, sin la atmósfera la temperatura terrestre alcanzaría más de 75°C durante el día y más de 130°C bajo cero en la noche, lo que haría imposible la existencia de los seres humanos.¹⁸

De la energía solar que arriba al planeta poco más del 30 por ciento es reflejada por la atmósfera o por la superficie terrestre y lo restante es absorbido por el planeta, la razón de que esto suceda es que la capa de ozono situada en la estratosfera, absorbe parte de los rayos ultravioleta del Sol (rayos UVB y UVC) protegiendo de esta forma la tierra.

La composición de la atmosfera ha cambiado a través de la historia del planeta, pero además de contener el aire, la atmosfera está conformado por una mezcla de gases (78.1% de nitrógeno, 20.9% de oxígeno y 0.9% de argón) y aerosoles; además de contener partículas sólidas y líquidas en suspensión.

La atmósfera puede ser dividida en una serie de capas en función de la variación de la temperatura con la altura, de forma ascendente las capas de la atmosfera son la troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera:

¹⁷ Ministro de Educación, Ciencia y Tecnología. (s/a). LA ATMÓSFERA. Argentina.

¹⁸ CECADESU, & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Calidad del aire: una práctica de vida. México.

- Troposfera, llega hasta un límite superior situado a 9 Km de altura en los polos y los 18 km en el ecuador, en ella se producen importantes movimientos verticales y horizontales de las masas de aire; su temperatura va disminuyendo conforme se va subiendo, hasta llegar a -70°C en su límite superior.

En esta capa se originan los fenómenos meteorológicos como lo son las lluvias, vientos, cambios de temperatura, tormentas tropicales, huracanes, etc.

- Estratosfera, tiene un espesor aproximado de 30 km y se compone por nitrógeno, oxígeno y ozono.
- Mesosfera, en esta capa la concentración de ozono y otros gases es baja y la temperatura disminuye a medida que aumenta la altitud.
- Termosfera o ionosfera, es la capa más externa de la atmósfera, el aumento de temperatura en esta capa se debe al bombardeo de nitrógeno y oxígeno moleculares y de especies atómicas por partículas energéticas, como los electrones y protones, provenientes del Sol.
- Exosfera, se extiende hasta los 9.600 km lo que constituye el límite exterior de la atmósfera.

Figura 1. Capas de la atmósfera



Fuente: Álvarez , Menéndez, & Bravo, 2018.

La composición de la atmósfera y los procesos que en ella se desarrollan tienen gran influencia en la actividad humana y en el comportamiento del medio ambiente en general por eso es necesario hacer el seguimiento constante de la dinámica de la atmósfera y los fenómenos que ocurren en ella.¹⁹

IV.2. QUE ES UN CONTAMINANTE

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente define a un contaminante como 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.

De acuerdo a la **NOM-172-SEMARNAT-2019** se puede definir a un contaminante como 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.

Otra forma de definir a un contaminante es como toda materia o sustancia, sus combinaciones o compuestos, derivados químicos o biológicos así como toda forma de energía, radiaciones ionizantes, vibraciones o ruido que al incorporarse y actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento del ambiente alteran o modifican su composición o afectan la salud.²⁰

También se puede definir a un contaminante como una sustancia que se encuentra en un medio al cual no pertenece y que lo hace a niveles que pueden causar efectos adversos o desfavorables para la salud, el medio ambiente y las edificaciones.

¹⁹ Pabón, J., Zea, J., León, G., Hurtado, G., González, O., & Montealegre, J. (1998). La atmósfera, el tiempo y el clima. Colombia.

²⁰ Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, & SEMARNAT. (2018). Glosario de términos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México.

IV.3. QUE ES LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación puede definirse como cualquier modificación indeseable del ambiente, causada por la introducción de agentes físicos, químicos o biológicos en cantidades superiores a las naturales, que resulta nociva para la salud humana, daña los recursos naturales o altera el equilibrio ecológico.²¹

También puede definirse a la contaminación como la presencia de ciertos compuestos (gaseosos, líquidos o sólidos) que habitualmente no se encuentran en el aire, que se incorporan dispersos en pequeñas cantidades, pero suficientes para afectar a su calidad, y que pueden causar efectos nocivos en los seres humanos, en la fauna y flora y afectan también a la estabilidad del patrimonio cultural (como edificios o monumentos).²²

Otra forma de definir la contaminación es como la presencia en el aire de uno o más contaminantes o la combinación de éstos.²³

De igual manera se entiende por contaminación atmosférica a la presencia en la atmósfera de sustancias de cualquier naturaleza en una cantidad que implique riesgos para la salud de las personas y los demás seres vivos, así como que puedan atacar a distintos materiales, reducir la visibilidad o producir olores desagradables.

La contaminación atmosférica puede tener un carácter local o planetario, en el local los efectos ligados al foco se sufren en las inmediaciones del mismo; mientras que en el planetario las características del contaminante afectan el equilibrio del planeta y zonas alejadas a las que contienen los focos emisores.

Los principales mecanismos de contaminación atmosférica son los procesos industriales que implican combustión, tanto en industrias como en automóviles y calefacciones residenciales, que generan dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, entre otros contaminantes.

La definición de contaminación atmosférica se deriva de dos conceptos básicos; contaminación que se define como la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o una combinación de ellos, en concentraciones y permanencia superiores o inferiores (según corresponda) a las establecidas en la

²¹ Venegas, E., & CEGESTI. (2010). Calidad del aire y sus efectos en la salud humana.

²² Álvarez, E., Menéndez, J., & Bravo, M. (Junio de 2018). Calidad del aire: Situación en España y escenarios a futuro para la CAPV, Madrid y Barcelona. España.

²³ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. México.

legislación del país; y contaminante, que es definido como todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, cuya presencia a ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo en el ambiente, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas o del medio ambiente en general.

Entonces se puede entender como contaminación atmosférica a la presencia en el aire de uno o más contaminantes, o cualquier combinación de ellos en concentraciones o niveles tales que puedan constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.²⁴

Figura 2. Contaminación del aire por chimeneas industriales



Fuente: National Park Service, 2005.

IV.4. QUE ES UN CONTAMINANTE ATMOSFÉRICO

Un contaminante atmosférico es cualquier sustancia química o biológica, que al agregarse al aire puede modificar sus características naturales, por ejemplo, el humo, polvos, gases, cenizas, bacterias, los residuos y los desperdicios.²⁵

²⁴ Ministerio del Medio Ambiente Chile. (2018). Guía de calidad del aire y educación ambiental. Chile.

²⁵ Vallejo, M., Jáuregui, K., Hermosillo, A., Márquez, M., & Cárdenas, M. (Septiembre de 2002). Efectos de la contaminación atmosférica en la salud y su importancia en la ciudad de México. México.

También se puede definir a un contaminante atmosférico como cualquier sustancia en el aire que, en alta concentración, puede dañar a los seres humanos, animales, vegetales o materiales.; puede incluir casi cualquier compuesto natural o artificial de materia flotante susceptible de ser transportado por el aire.²⁶

Estos contaminantes se encuentran en forma de partículas sólidas, gotas líquidas, gases o combinadas y generalmente se clasifican en los emitidos directamente por la fuente contaminante (contaminantes primarios) y los producidos en el aire por la interacción de dos o más contaminantes primarios.

Los contaminantes atmosféricos, provienen de fuentes móviles (tráfico rodado) y de fuentes fijas de combustión (industrias, usos residenciales, climatización y procesos de eliminación de residuos).

IV.5. SITUACIÓN ACTUAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

La problemática de la contaminación atmosférica ha existido en el planeta desde su conformación, en el pasado era asociada a eventos naturales tales como el choque de meteoritos, las erupciones volcánicas, los incendios forestales, las tormentas de polvo y arena.

Pero actualmente la contaminación no solo es asociada a los fenómenos naturales, si no que en su mayoría se relaciona con la aparición y el desarrollo de la especie humana en el planeta, la cual ha implicado un progresivo aumento en la emisión de contaminantes a la atmósfera, empeorando la calidad del aire las ciudades con mayor número de habitantes y desarrollo industrial, dentro de los causantes de esta problemática destacan el aumento del parque automotriz, el crecimiento de las industrias, el uso de leña para calefacción y el uso de otros combustibles fósiles.

Entre todas las actividades humanas, el sector energético es la principal fuente de emisiones contaminantes de gases de efecto invernadero a la atmosfera, de igual manera el uso de combustibles fósiles y biomasa es responsable de una gran proporción de las emisiones de tres importantes contaminantes como lo son el SO₂, NO_x y PM primario (es decir emitido directamente y no formado en la atmósfera a partir de precursores gaseosos).²⁷

A nivel mundial las emisiones de SO₂, NO_x y PM se relacionan con dos realidades que son la pobreza y un modelo de desarrollo y urbanización fundamentado en el uso intensivo de los combustibles fósiles.

²⁶ SGPA, & SEMARNAT. (2017). Estrategia Nacional de calidad del aire, visión 2017-2030. Ciudad de México, México.

²⁷ Querol, X. (2018). La calidad del aire en las ciudades, un reto mundial. Madrid, España.

De acuerdo la Agencia Internacional de Energía en 2016, el carbón es responsable de cerca del 60% de las emisiones globales de SO₂, mientras que los combustibles utilizados en el transporte (especialmente el diésel) generan más de la mitad de los NO_x, emitidos en mundo.²⁸

Cabe mencionar que el impacto de las emisiones del vehículo urbano se amplifica porque estas emisiones son liberadas directamente al nivel de la calle y no desde altas chimeneas, provocando que estas emisiones se incorporen directamente al aire que es respirado por los seres humanos.

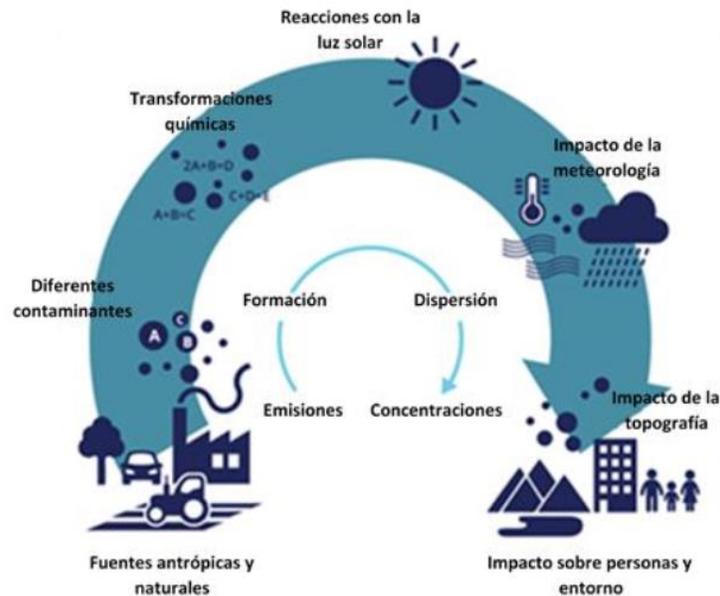
IV.6. FACTORES QUE INTERVIENE EN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Según múltiples estudios y especialistas existen varios factores que pueden intervenir de forma negativa o positiva en la contaminación atmosférica y la dispersión de los contaminantes en el ambiente, los principales factores que intervienen o influyen en la contaminación atmosférica son tres los eventos meteorológicos, las características geográficas y las fuentes de emisión.

- Los eventos meteorológicos, estos determinan el estado y movimiento de las masas de aire lo cual influye directamente en la dispersión de contaminantes en el ambiente, otro factor que influye es la temperatura del aire la cual determina los movimientos del aire y las condiciones de estabilidad o inestabilidad atmosférica.
- Las características geográficas, influyen en la difusión y acumulación de los contaminantes, un ejemplo de esto son las montañas, las cuales frenan los vientos favoreciendo la acumulación de contaminantes; por otro lado, parte las zonas urbanizadas influyen en el movimiento de las masas de aire, disminuyendo su velocidad y generando turbulencias que contribuyen a la acumulación de los contaminantes.
- Las fuentes de emisión, son las fuentes antropogénicas que se encargan de expulsar y generar los contaminantes al ambiente, estas fuentes varían dependiendo de la zona y se concentran en mayor cantidad en las zonas industriales y urbanizadas.

²⁸ International Energy Agency. (2016). Energy and Air Pollution, World Energy Outlook 2016 Special Report. París, Francia.

Figura 3. Elementos que intervienen sobre los contaminantes desde su emisión hasta su concentración



Fuente: Álvarez , Menéndez, & Bravo, 2018.

La gestión de la calidad del aire en las ciudades es particularmente compleja, dentro de los factores que condicionan la calidad del aire urbano y dificultan la mejoría de dicha calidad se encuentran:

- La multiplicidad de contaminantes y sus interrelaciones; los impactos generados por la contaminación en la salud humana, el clima y los ecosistemas, se debe a la presencia de múltiples contaminantes que producen reacciones sinérgicas o antagónicas en algunos casos.²⁹
- Multiplicidad de fuentes; los lugares de emisión y fuentes son diversos, las fuentes pueden ser por tráfico, sectores residencial, comercial e institucional, industria, gestión de residuos, etc.
- Complejidad del sector (transporte rodado, fuente móvil); a pesar de su gran influencia la contaminación atmosférica, no es fácil modelizar el comportamiento de las emisiones del transporte rodado, esto debido a que un mismo vehículo puede producir emisiones distintas en función de diversos factores como son el estilo de conducción, la velocidad de movimiento, el estado de la vía o el nivel de congestión en cada momento, la antigüedad del vehículo y su mantenimiento.

²⁹ Querol, X. (2018). La calidad del aire en las ciudades, un reto mundial. Madrid, España.

- Elevados gradientes espaciotemporales; la influencia de los factores locales asociada a la circulación del viento y a la heterogeneidad de las fuentes, la presencia de edificios y otros obstáculos artificiales, se transcribe a diferencias de concentración en torno a un mismo punto de muestreo, como ejemplo se tiene que contaminantes como el NO₂ la variación puede llegar a ser hasta del 50% en un radio de 5-10 m de distancia.
- Influencia de las condiciones meteorológicas; algunas condiciones meteorológicas pueden dificultar la ventilación en la ciudad y conllevar la remanencia de contaminantes.

IV.7. IMPACTOS Y CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA SALUD

Se considera que el aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar de los seres humanos, no obstante, su contaminación sigue simbolizando un peligro para la salud de las personas alrededor del mundo.

De acuerdo a múltiples estudios y evaluaciones realizados por la OMS cada año se atribuyen más de dos millones las muertes prematuras a los efectos de la contaminación del aire en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados, producto de la quema de combustibles sólidos, aunado a eso más de la mitad de esta carga de enfermedad recae en las poblaciones de los países en desarrollo.³⁰

A su vez la Organización Mundial de la Salud considera la contaminación atmosférica como una de las más importantes prioridades mundiales en salud, ya que se estima que la contaminación ambiental debida a partículas es responsable de 1,4% de todas las muertes en el mundo.³¹

La problemática de la contaminación del aire se ha convertido en una constante en muchas ciudades industriales de todo el mundo, lo que ha causado problemas de salud a la población y a los ecosistemas; tal es el caso de la niebla tóxica londinense de 1952, que ocasionó cerca de 4 mil fallecimientos y el deterioro de los bosques europeos por la lluvia ácida en los años cincuenta y sesenta.

La contaminación atmosférica en las zonas urbanas o metropolitanas puede empeorar considerablemente la calidad del aire que se respira en los espacios cerrados e interiores, como lo son los

³⁰ Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.

³¹ Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. España.

hogares y las oficinas, esta contaminación se da principalmente cuando estos espacios se encuentran cercanos o a los alrededores de alguna fuente de contaminación.

Múltiples estudios indican que la contaminación atmosférica es responsable del aumento en el número de personas afectadas por conjuntivitis, laringitis, asma y bronquitis y la exposición por largos periodos de tiempo aumenta el porcentaje de la aparición de enfisema pulmonar y cáncer broncopulmonar.

Para determinar si los contaminantes pueden tener efectos nocivos sobre la salud, se debe tener en cuenta cuatro aspectos básicos:

- La toxicidad de los contaminantes y sus concentraciones en el aire interior: este aire puede tener compuestos orgánicos o partículas que desencadenen alergias u otros efectos negativos sobre la salud.
- La exposición: los seres humanos estamos expuestos a diversos contaminantes por el simple hecho de respirar, pero el efecto de estos contaminantes variara dependiendo del tiempo al que se está expuesto y las concentraciones del contaminante.
- Las relaciones entre exposición y reacción: para evaluar el riesgo planteado por un determinado contaminante, se debe conocer la respuesta del cuerpo a diferentes concentraciones de ese contaminante en el aire.
- Caracterización del riesgo: durante la última etapa del proceso de evaluación de riesgos se analizan todas las pruebas científicas recogidas para determinar la probabilidad de que un contaminante determinado provoque una enfermedad.³²

En México la evidencia acumulada hasta ahora indica que los contaminantes atmosféricos son responsables de contribuir al aumento de la mortalidad general, de la mortalidad infantil, de la mortalidad de mayores de 65 años y de las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias y cardíacas.³³

De acuerdo a la **NOM-172-SEMARNAT-2019**, la contaminación del aire representa el mayor riesgo ambiental para la salud y diversos estudios experimentales, así como estudios epidemiológicos en humanos indican que la exposición a contaminantes en el aire ambiente está asociada a una amplia gama

³² Venegas, E., & CEGESTI. (2010). Calidad del aire y sus efectos en la salud humana.

³³ Secretaría de Salud. (2014). NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. México.

de efectos adversos que repercuten de manera negativa en la calidad de vida de la población en general y de los grupos vulnerables, principalmente los niños, mujeres en gestación, adultos mayores, sobre todo si padecen de enfermedades preexistentes y las personas con problemas respiratorios, como asma o enfisema.

De acuerdo con información proporcionada por el Instituto Nacional de Salud Pública respecto a la evidencia epidemiológica nacional sobre los efectos adversos a la salud del material particulado, ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre, la contaminación del aire tiene diversos efectos adversos sobre la salud y afecta la calidad de vida de quienes habitan principalmente en zonas urbanas de nuestro país.³⁴

Los efectos nocivos de la contaminación atmosférica varían dependiendo del tipo de contaminante, el grado o nivel de exposición, el tiempo de exposición el cual puede ser prologando o de corto plazo, el estado nutricional y de salud de la persona y la carga genética de cada individuo; algunos de los efectos provocados por los principales contaminantes se encuentran en la siguiente tabla. (Tabla 3)

Tabla 3.- Procedencia y efectos negativos para la salud provocados por los principales contaminantes

Contaminante	Procedencia	Efectos en la salud
Dióxido de azufre (SO ₂)	Son producto de la combustión de combustibles fósiles.	En bajas concentraciones provoca irritación en las vías respiratorias y en altas concentraciones puede provocar bronquitis y traqueítis. Este contaminante puede alterar el funcionamiento de los bronquios, producir daño pulmonar, daño a las vías respiratorias, irritación ocular y paros cardíacos.

³⁴ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. México.

<p>Monóxido de carbono (CO)</p>	<p>Es producto de la combustión incompleta de los combustibles al existir una cantidad insuficiente de oxígeno.</p> <p>Aproximadamente el 80% de estas emisiones provienen de vehículos a motor y los procesos industriales, mientras que el otro porcentaje pertenece a la combustión residencial de leña para calefacción, cocinas y humo de cigarrillo.</p>	<p>En altas concentraciones provoca la inhabilitación del transporte de oxígeno hacia las células; el CO sustituye al oxígeno en la sangre formando la carboxihemoglobina (COHb), lo que desencadena que haya un menor transporte de oxígeno en la sangre, una disminución de las funciones neuroconductuales, menor peso en niños recién nacidos y retardo en el desarrollo postnatal.</p> <p>Si una persona adulta se expone a este contaminante de manera prolongada se provoca mareo, dolor de cabeza, desmayos, cambios fisiológicos, cambios patológicos y finalmente, la muerte.</p>
<p>Bióxido de nitrógeno (NO₂)</p>	<p>Se produce durante el quemado de maderas y combustibles fósiles, como gasolina, carbón y gas natural.</p> <p>Los vehículos son los principales emisores de este contaminante, siendo los vehículos con motor diésel</p>	<p>Provoca problemas respiratorios y daño pulmonar, mayor susceptibilidad a las infecciones, daño celular, irritación ocular y pérdida de las mucosas.</p>

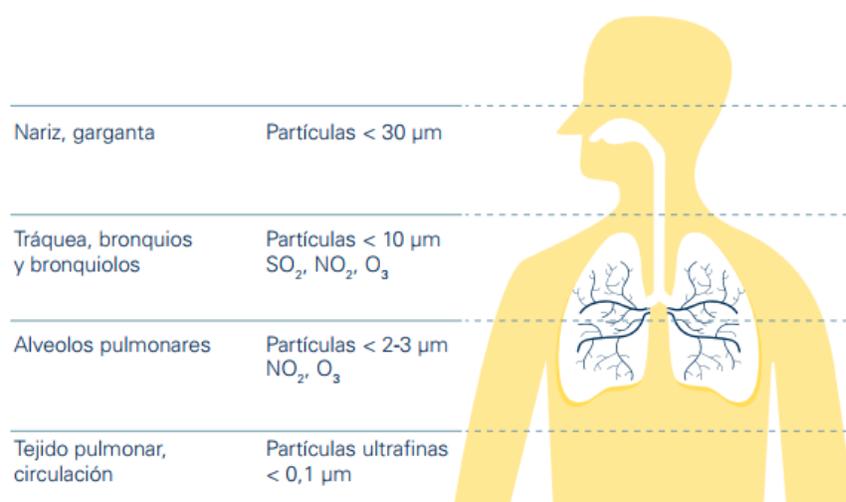
	los que emiten una mayor cantidad.	
Partículas suspendidas PM2.5	<p>Se producen principalmente en zonas urbanas y provienen de centrales térmicas, procesos industriales, tráfico de vehículos, combustión de leña para calefacción y carbón e incineradores industriales.</p> <p>Se forman básicamente por</p>	<p>Son agravantes del asma y otras enfermedades respiratorias, reducen la función pulmonar, son asociadas con el desarrollo de diabetes y en mujeres embarazadas puede ocasionar problemas en el desarrollo del feto, disminuyendo su tamaño.</p> <p>La exposición a largo plazo a niveles altos de PM2.5 se asocia de manera significativa a hospitalizaciones por neumonía adquirida.</p>
Partículas suspendidas PM10	<p>medio de procesos mecánicos, como las obras de construcción, la resuspensión del polvo de los caminos y el viento.</p>	<p>Agravan las enfermedades respiratorias y respiratorias cardiovasculares, cuando su exposición es crónica o prolongada y las concentraciones altas, pueden causar un incremento en el riesgo de morbilidad y mortalidad.</p> <p>Las PM10 se han asociado con fenómenos irritativos como tos crónica, síntomas respiratorios nocturnos, neuropatías,</p>

		<p>bronquitis, asma bronquial y cáncer pulmonar.</p> <p>A su vez la exposición a largo plazo a niveles altos de PM10 durante los meses de verano se asocia con mayores síntomas de apnea obstructiva y menor saturación durante el sueño.</p>
<p>Ozono (O₃)</p>	<p>Proviene del uso de hidrocarburos y principalmente por el uso de vehículos. También es el principal componente del esmog fotoquímico.</p> <p>El ozono se forma en la atmósfera mediante reacciones fotoquímicas en presencia de luz solar y contaminantes precursores, como los óxidos de nitrógeno (NOx) y diversos compuestos orgánicos volátiles.</p>	<p>El ozono es un irritante fuerte que puede limitar las vías respiratorias, lo cual fuerza al sistema respiratorio a trabajar más para proporcionar oxígeno.</p> <p>Provoca tos, dolores de cabeza, irritación de ojos, nariz y garganta, incremento de la mucosidad, cierre de las vías respiratorias, dolores de tórax, languidez, malestar y náuseas.</p> <p>También puede dañar partes profundas de los pulmones; causar ruido al respirar, dolor de pecho, sequedad en la garganta, dolor de cabeza o náusea y producir mayor fatiga.</p> <p>En altas concentraciones genera</p>

		<p>efectos más nocivos como lo son reducir la función pulmonar, inflamar las células que recubren los pulmones, empeorar las enfermedades respiratorias tales como el asma y agravar enfermedades crónicas del corazón.</p>
--	--	---

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & CECADESU, 2013; Ministerio del Medio Ambiente Chile, 2018; Organización Mundial de la Salud, 2006; Venegas & CEGESTI, 2010.

Figura 4. Penetración de diversos contaminantes en el sistema respiratorio



Fuente: Querol, 2018.

IV.8. IMPACTOS Y CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LOS ECOSISTEMAS Y EDIFICIOS

La contaminación atmosférica no solo afecta a la salud humana, sino que también tiene efectos sobre los ecosistemas que soportan la vida, el suelo, el agua y los bosques, de igual manera tiene efectos sobre la diversidad, los cultivos, los bienes, monumentos históricos y elementos construidos como los edificios.

Los efectos de la contaminación del aire sobre los ecosistemas se presentan como resultado de los contaminantes secundarios como lo es la lluvia ácida, la caída de partículas ácidas obstruye y acidifica los diminutos poros de las hojas, dificultando el proceso de fotosíntesis y degradando los suelos, esto a su vez afecta a las raíces y la nutrición de las plantas. La lluvia ácida también afecta a los ecosistemas acuáticos provocando la disminución de peces al acidificar lagos, lagunas, ríos y arroyos.

Por otro lado, los edificios, estatuas y esculturas también se ven afectados por la lluvia ácida y la sedimentación seca de partículas ácidas al contribuir a la corrosión de los metales (como el bronce) y al deterioro de la pintura y la piedra (como el mármol y la piedra caliza).³⁵

Igualmente, los contaminantes atmosféricos deterioran fachadas esto derivado del depósito de las partículas suspendidas en el aire, además de provocar daños en los elementos metálicos y plásticos debido al incremento de la velocidad de corrosión por exposición a medio ambientes agresivos.

En la siguiente tabla se pueden encontrar algunos de los efectos negativos que tienen los contaminantes atmosféricos sobre los ecosistemas, cultivos y bienes. (Tabla 4)

Tabla 4.- Efectos negativos que tienen los contaminantes atmosféricos sobre los ecosistemas, cultivos y bienes

Contaminante	Efectos sobre los ecosistemas y cultivos	Efectos sobre los bienes
Dióxido de azufre (SO ₂)	Tiene efectos sobre la biodiversidad, los suelos y los ecosistemas acuáticos y forestales; causa daños a la vegetación,	Causa afectaciones a las edificaciones por medio de los procesos de acidificación.

³⁵ CECADESU, & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Calidad del aire: una práctica de vida. México.

	degradación de la clorofila, reducción de la fotosíntesis y pérdida de las especies.	
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	Causa acidificación y eutroficación de ecosistemas, además de que limita el crecimiento vegetal.	Causa afectaciones a las edificaciones a través de los procesos de acidificación.
Partículas suspendidas PM2.5	Afectan de manera negativa en el crecimiento vegetal y a la fauna.	Causa daño a las edificaciones, deterioro en la estética y deterioro en la durabilidad de sus materiales.
Partículas suspendidas PM10		Crea un efecto amarillento o ennegrecimiento de los elementos estructurales y arquitectónicos
Ozono (O ₃)	Reduce la producción y calidad de las cosechas, reduce la absorción de CO ₂ por las plantas y disminuye la tasa de crecimiento de los árboles, así como su capacidad de adaptación a las sequías y altas temperaturas.	

Fuente: Hernández, 2018.

IV.9. FUENTES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica tiene su origen en fuentes naturales y antropogénicas, dentro de las fuentes naturales se encuentran los fenómenos propios de la naturaleza que se producen en la superficie y en el interior de la tierra, tal es el caso de las erupciones volcánicas; la actividad volcánica la cual

produce emisiones de gases, vapores, polvos y aerosoles; los incendios forestales; la descomposición de la vegetación y las tormentas de polvo.

El otro origen de la contaminación es el antropogénico, este origen corresponde a las actividades o intervenciones que realizan los seres humanos, siendo la principal causa la combustión de materiales que se desprenden de la actividad industrial, comercial, la producción, el uso de vehículos y el uso de combustibles fósiles.

Las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos de origen antropogénico pueden ser puntuales, generalmente son fijas y tienen un gran caudal de emisión, como es el caso de las grandes factorías aisladas de instalaciones industriales; o pueden ser zonales, es decir, una mezcla de fuentes fijas y móviles de diferente entidad.³⁶

Las fuentes antropogénicas a su vez presentan una subdivisión des tres grupos que son las fuentes fijas, las fuentes móviles y las fuentes fugitivas. (Tabla 5)

Tabla 5.- Clasificación de las fuentes antropogénicas

Fuente	Definición
Fijas	Son aquéllas situadas en un lugar físico particular, definido e inamovible. Se consideran las emisiones generadas por la quema de combustibles producto de actividades industriales y residenciales.
Móviles	Son las fuentes que pueden desplazarse, a éstas se asocian las emisiones de gases en tubos de escape, desgaste de frenos y neumáticos de distintos tipos de transporte motorizado, como automóviles, camiones, buses, barcos, aviones y motocicletas. Otra forma de definir las es como cualquier máquina, aparato o dispositivo emisor de contaminantes a la atmósfera que no tiene un lugar fijo.
Fugitivas	Son las emisiones que no son canalizadas por ductos, chimeneas

³⁶ Aránguez, E., Ordóñez, J., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (Marzo de 1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. España.

u otros sistemas hacia el exterior, tales como aquellas provenientes del tránsito de vehículos por calles sin pavimentar, de la construcción y las demoliciones, entre otras.

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente Chile, 2018.

Figura 5. Fuente móvil de contaminación



Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible , 2021.

El inventario de emisiones de contaminantes a la atmósfera es uno de los elementos base para la gestión de la calidad del aire, a través de los inventarios se conoce el tipo y cantidad de contaminantes que son emitidos al aire por los diferentes sectores o categorías; de acuerdo a este inventario las emisiones pueden provenir de las siguientes fuentes:

- Fuentes fijas, es la segunda fuente emisora de bióxido de azufre (SO_2) con el 19%, están integradas por el sector industrial y son analizadas por los establecimientos de jurisdicción federal y de giro estatal, todas en materia de atmósfera.
- Fuentes de área, para este inventario se estiman emisiones de 30 categorías, dentro de las que se encuentran la cocción de alimentos en casa habitación, el uso de solventes, las actividades ganaderas, agrícolas, los incendios forestales, entre otros.

Estas fuentes incluyen una o varias actividades distribuidas en un área determinada, cuyas contribuciones particulares, a diferencia de las fuentes fijas puntuales, no pueden identificarse y evaluarse de forma precisa.³⁷

Es la principal fuente emisora de bióxido de azufre (SO₂) con el 61%; monóxido de carbono (CO) con el 57%; y amoníaco (NH₃) con el 99%. Por otro lado, es la segunda fuente emisora de PM10 en el 17%; PM2.5 con el 44%; y óxidos de nitrógeno (NOx) con el 16%.

- Fuentes móviles, están relacionadas con los vehículos automotores como lo son las motocicletas, los automóviles, las camionetas, las pick up, los autobuses y los tractocamiones. En esta categoría también se contemplan las fuentes móviles no carreteras, como la aviación y servicios auxiliares, embarcaciones marinas, locomotoras, maquinaria agrícola y maquinaria de la construcción.

Las fuentes móviles carreteras son la segunda fuente emisora de bióxido de azufre (SO₂) con el 19%; óxidos de nitrógeno (NOx) con el 36%; y monóxido de carbono (CO) en el 42%.

- Fuentes naturales, provenientes de las emisiones erosivas, las erupciones volcánicas, el proceso de la fotosíntesis de las plantas y aquellas emisiones que no dependen de la actividad del hombre.

Son las principales fuentes emisoras de compuestos orgánicos volátiles (COV) con el 87%; óxidos de nitrógeno (NOx) con el 60%; PM10 con el 81%; y PM2.5 con el 50%.

IV.10. CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

La contaminación por fuentes de origen antropogénico pueden ser clasificadas en dos clases principales; los contaminantes primarios, los cuales son vertidos directamente a la atmósfera por alguna fuente de emisión como las chimeneas y automóviles; y los contaminantes secundarios, los cuales son originados

³⁷ SGPA, & SEMARNAT. (2017). Estrategia Nacional de calidad del aire, visión 2017-2030. Ciudad de México, México.

en el aire como consecuencia de la transformación y reacciones químicas que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera.³⁸

Contaminantes primarios

- Óxidos de azufre (SO_x), se forman por la combustión del azufre presente en el carbón y el petróleo, forman con la humedad ambiente aerosoles los cuales incrementan el poder corrosivo de la atmósfera, disminuyendo la visibilidad y provocando la lluvia ácida.
- Monóxido de carbono (CO), considerado el contaminante más abundante en la capa inferior de la atmósfera, es producido por la combustión incompleta de compuestos de carbono y alrededor del 70% por ciento del CO provienen de la combustión de los vehículos.
- Óxidos de nitrógeno (NO_x), se producen en la combustión de productos fósiles, destacando los vehículos, carbón y quemas de madera, producción de fertilizantes y explosivos, tabaco y calderas.
- Partículas, es el material respirable presente en la atmósfera tales como el polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen, entre otras. La normatividad mexicana maneja dos tamaños de partículas de acuerdo a su tamaño, las cuales son las partículas PM10 y las PM2.5.
- Hidrocarburos (HC), está asociado a la mala combustión de derivados del petróleo, sus fuentes más importantes de emisión son el transporte por carretera, los disolventes, pinturas, vertederos y la producción de energía.

Los más dañinos para la salud son los compuestos orgánicos volátiles (COV), las dioxinas, los furanos y los bifenilos policlorados (PCB).

Contaminantes secundarios

- Ozono (O₃), este contaminante forma parte de la composición de la atmósfera, sin embargo, a baja altura (O₃ troposférico) resulta perjudicial por su carácter oxidante, reactivo, corrosivo y tóxico, por lo que reacciona con rapidez generando compuestos secundarios.

³⁸ CECADESU, & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Calidad del aire: una práctica de vida. México.

- Lluvia ácida, es un proceso por el cual ciertos ácidos se forman en la atmósfera a partir de contaminantes y luego se precipitan a la tierra. Los causantes de este fenómeno son el SO₂ (dióxido de azufre) y los NO_x.

La lluvia ácida se forma en presencia del agua, O₂ y otros compuestos químicos que forman ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido nítrico (HNO₃) que se precipitan a la tierra en forma líquida.

- Contaminación fotoquímica, está constituida por la luz solar y sustancias susceptibles a ser oxidadas. El smog fotoquímico es una mezcla de contaminantes que se forman por reacciones producidas por la luz solar al incidir sobre los contaminantes primarios.

IV.11. NORMATIVIDAD VIGENTE SOBRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN MÉXICO

IV.11.1 NOM-172-SEMARNAT-2019, LINEAMIENTOS PARA LA OBTENCIÓN Y COMUNICACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE Y RIESGOS A LA SALUD

La Norma Oficial Mexicana **NOM-172-SEMARNAT-2019**, tiene como objetivo el establecer los lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud, con el fin de informar de manera clara, oportuna y continua el estado de la calidad del aire, los probables daños a la salud que ocasiona y las medidas que se pueden tomar para reducir la exposición.

Este índice ayuda a homologar el cálculo y la difusión de los niveles de contaminación, es de observancia obligatoria en todas las zonas metropolitanas indicando que estas zonas deben contar con estaciones de monitoreo y deben informar a su población a través de esta herramienta sobre la calidad del aire.

Los contaminantes que maneja la **NOM-172-SEMARNAT-2019** son:

- Monóxido de carbono (CO): este contaminante está compuesto por un átomo de oxígeno y uno de carbono, es un gas inodoro, incoloro e insípido, no irritante pero altamente tóxico. Es el gas que más se emite junto con el vapor de agua (H₂O) y el dióxido de carbono (CO₂) pero tiene una mayor variabilidad en su distribución espacial y temporal.

Se emite en la combustión incompleta del gas natural, gas propano, gasolina, petróleo, queroseno, madera o carbón, así como en otros procesos como la quema de biomasa y subproductos durante los procesos oxidativos para la obtención de sustancias químicas.

- Material particulado: se define técnicamente como una suspensión de partículas finas sólidas o líquidas en un gas, cuando estas partículas se emiten directamente a la atmósfera se denominan partículas primarias y se clasifican como secundarias cuando se forman por reacciones químicas.

La importancia de las partículas radica en los fenómenos que las forman, la ubicación geográfica junto con la mezcla de emisiones que determinan su composición y la química atmosférica. Las partículas tienen una serie de propiedades que se consideran para su caracterización como son la concentración numérica, su masa, tamaño, composición química, propiedades aerodinámicas y ópticas.

Las PM_{2.5} son las partículas con un diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 micrómetros, mientras que las PM₁₀ son las partículas con un diámetro aerodinámico igual o menor a 10 micrómetros y sus componentes principales son el hollín, plomo, sulfatos e hidrocarburos.

- Dióxido de azufre (SO₂): este contaminante está compuesto por un átomo de azufre y dos de oxígeno, es un gas incoloro, irritante, con un olor penetrante que se comienza a percibir cuando supera los 300 ppb y un olor fuerte por encima de 500 ppb, no tiene características inflamables, no es explosivo y es muy estable, además de ser soluble en agua.

Este gas es precursor del ácido sulfúrico (H₂SO₄), el cual es un componente de los aerosoles que afecta la deposición ácida, el clima global y la capa de ozono; durante su proceso de oxidación en la atmósfera forma sulfatos y estos sulfatos forman parte del material particulado PM₁₀, a su vez, en presencia de humedad forma ácidos en forma de aerosoles y produce una parte importante de material particulado secundario o fino PM_{2.5}.

Es producido por la combustión de combustibles fósiles, plantas generadoras de electricidad y procesos industriales.

- Dióxido de nitrógeno (NO₂): es un potente agente oxidante formado por un átomo de nitrógeno y dos de oxígeno, es considerado como un gas tóxico e irritante de color marrón-amarillento. Este gas es precursor del ácido nítrico que es un componente de la deposición ácida además de ser un intermediario entre la emisión del NO y la formación del ozono.

Se estima que la exposición de 300 a 800 ppb de NO₂ en interiores, producido por las estufas, reduce la capacidad pulmonar en aproximadamente 10%.³⁹

Es producido por la oxidación del NO, la quema de combustibles fósiles, la quema de biocombustible y biomasa; en interiores las fuentes de emisión son los calentadores de queroseno, las estufas que usan madera o gas LP, la quema de biocombustibles para cocinar y el humo del cigarro.

- Ozono (O₃): es una molécula compuesta por 3 átomos de oxígeno, a su vez es un contaminante incoloro e inodoro, que se forma por una reacción química entre los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) en presencia de luz solar, el origen principal de estos VOCs y NO_x son las fuentes móviles que incluyen automóviles, camiones y autobuses, el equipo agrícola y el equipo para la construcción.

Es un contaminante reactivo y toxico que contribuye al efecto invernadero, desprende un fuerte olor (metálico y picante) cuando excede 20 ppb y en grandes concentraciones toma un color púrpura debido a que absorbe la longitud de onda verde de la luz visible por lo que refleja el rojo y azul.⁴⁰

Las bandas de calidad del aire y riesgo que componen el índice aire y salud se construyen considerando los intervalos de concentración señalados en las siguientes tablas: (Tabla 6 a la 11)

³⁹ Jacobson, M. (2012). *Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions*. Cambridge, Inglaterra.

⁴⁰ SEDEMA. (2018). *Informe Anual: Calidad del aire 2018*, Ciudad de México. CDMX, México.

Tabla 6.- Obtención del Índice AIRE Y SALUD para PM10

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM10 promedio móvil ponderado de 12 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Buena	Bajo	50
Aceptable	Moderado	>50 y 75
Mala	Alto	>75 y 155
Muy Mala	Muy Alto	>155 y 235
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	>235

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019.

Tabla 7.- Obtención del Índice AIRE Y SALUD para PM2.5

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de PM2.5 promedio móvil ponderado de 12 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Buena	Bajo	25
Aceptable	Moderado	>25 y 45
Mala	Alto	>45 y 79
Muy Mala	Muy Alto	>79 y 147
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	>147

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019.

Tabla 8.- Obtención del Índice AIRE Y SALUD para Ozono (O_3)

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de ozono (O_3) promedio de una hora (ppm)	Intervalo de ozono (O_3) promedio móvil de ocho horas (ppm)
Buena	Bajo	0.051	0.051
Aceptable	Moderado	>0.051 y 0.095	>0.051 y 0.070
Mala	Alto	>0.095 y 0.135	>0.070 y 0.092
Muy Mala	Muy Alto	>0.135 y 0.175	>0.092 y 0.114
Extremadamente	Extremadamente	> 0.175	> 0.114

Mala	Alto		
------	------	--	--

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019.

Tabla 9.- Obtención del Índice AIRE Y SALUD para dióxido nitrógeno (NO₂)

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de dióxido de nitrógeno (NO ₂) promedio de una hora (ppm)
Buena	Bajo	0.107
Aceptable	Moderado	>0.107 y 0.210
Mala	Alto	>0.210 y 0.230
Muy Mala	Muy Alto	>0.230 y 0.250
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	>0.250

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019.

Tabla 10.- Obtención del Índice AIRE Y SALUD para dióxido azufre (SO₂)

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de dióxido de azufre (SO ₂) promedio móvil de 24 horas (como aproximación al promedio de 24 horas) (ppm)
Buena	Bajo	0.008
Aceptable	Moderado	>0.008 y 0.110
Mala	Alto	>0.110 y 0.165
Muy Mala	Muy Alto	>0.165 y 0.220
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	>0.220

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019.

Tabla 11.- Obtención del Índice AIRE Y SALUD para monóxido de carbono (CO)

Calidad del aire	Nivel de riesgo asociado	Intervalo de monóxido de carbono (CO) promedio móvil de ocho horas (ppm)
Buena	Bajo	8.75
Aceptable	Moderado	>8.75 y 11.00
Mala	Alto	>11.00 y 13.30

Muy Mala	Muy Alto	>13.30 y 15.50
Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	>15.50

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019.

La norma relaciona la concentración de cada contaminante criterio con una categoría de calidad del aire, asignando un nivel de riesgo y emite las recomendaciones tanto para la protección de los grupos sensibles como para la población en general. (Tabla 12)

Tabla 12.- Nivel de riesgo y recomendaciones de acuerdo a la calidad del aire

Bandera	Calidad del Aire	Riesgo	Recomendaciones
Verde	Buena	Bajo	La población en general puede disfrutar de las actividades al aire libre.
Amarilla	Aceptable	Moderado	Grupos sensibles: deben reducir actividades al aire libre. Demás población: pueden disfrutar de las actividades al aire libre.
Naranja	Mala	Alto	Grupos sensibles: deben evitar la actividad física al aire libre. Demás población: deben reducir las actividades físicas y vigorosas al aire libre.
Roja	Muy Mala	Muy Alto	Grupos sensibles: deben evitar la actividad física al aire libre. Demás población: deben reducir las actividades físicas vigorosas al aire libre.
Morada	Extremadamente Mala	Extremadamente Alto	Toda la población debe permanecer en espacios interiores y acudir al médico si se presentan síntomas

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019.

IV.11.2. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-SSA1-2014, SALUD AMBIENTAL. VALORES LÍMITE PERMISIBLES PARA LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS PM10 Y PM2.5 EN EL AIRE AMBIENTE Y CRITERIOS PARA SU EVALUACIÓN

La **NOM-025-SSA1-2014**, tiene como objeto establecer los valores límite permisibles de concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y los criterios para su evaluación, con la finalidad de proteger la salud de la población.

De acuerdo a la norma el material particulado tanto PM10 como PM2.5 son una mezcla compleja de sustancias en estado líquido o sólido, que permanece suspendida en la atmósfera por periodos variables de tiempo. Su origen puede ser primario (partículas producidas directamente por alguna fuente contaminante) o secundario (se forman en la atmósfera, como resultado de la interacción química entre gases y partículas primarias).

Las PM10 se depositan en la región extratorácica del tracto respiratorio (nariz, boca, naso, oro y laringofaringe), contienen materiales de la corteza terrestre y se originan en su mayoría por procesos de desintegración de partículas más grandes, además de que pueden contener material biológico como polen, esporas, virus o bacterias o provenir de la combustión incompleta de combustibles fósiles.

Por otro lado, las PM2.5 están conformadas por gases y por material proveniente de la combustión, se depositan mayormente en la región traqueobronquial (tráquea hasta bronquiolo terminal) y en ocasiones pueden ingresar a los alvéolos, este tipo de material particulado es considerado por múltiples estudios como el más dañino para la salud de los seres humanos.

Las partículas ultrafinas (PM0.1) son generadas directamente por combustión y actividad fotoquímica, estas se depositan en la región alveolar, incrementando la posibilidad de atravesar la membrana alvéolo capilar hacia el torrente sanguíneo y migrar hacia otros órganos del cuerpo.

Con la finalidad de proteger la salud de la población más vulnerable se establecen dos valores límite, tanto para las concentraciones ambientales de las PM10 como de las PM2.5, expresados en la siguiente tabla. (Tabla 13)

Tabla 13.- Límites máximos permisibles para las PM10 y PM2.5

Partículas	Límite de 24 horas	Límite anual
PM10	75 µg/m ³	40 µg/m ³
PM2.5	45 µg/m ³	12 µg/m ³

Fuente: Secretaria de Salud, 2014.

Cabe destacar que para poder evaluar los datos de acuerdo a la norma se deben cumplir con varios criterios dentro de los que se encuentran:

- Que para el cálculo del promedio de 24 horas de cada día se requerirá un mínimo de 75% de las concentraciones horarias válidas (18 registros).
- Que para el cálculo del promedio anual se requerirá de un mínimo de datos en 1 año calendario, este mínimo se evaluará a partir de la cantidad de muestras de 24 horas válidas obtenidas en cada uno de los 4 trimestres del año y para cada trimestre se requerirá un mínimo de 75% de muestras válidas.

Para la validación anual será necesario contar con al menos 3 trimestres válidos, en caso contrario no podrá evaluarse el cumplimiento de la norma.

- Un sitio cumple con lo establecido en esta norma para PM10 y PM2.5 si cumple con los límites de 24 horas y anual.

IV.11.3. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-020-SSA1-2014, SALUD AMBIENTAL. VALOR LÍMITE PERMISIBLE PARA LA CONCENTRACIÓN DE OZONO (O₃) EN EL AIRE AMBIENTE Y CRITERIOS PARA SU EVALUACIÓN

La **NOM-020-SSA1-2014**, tiene como objeto establecer los valores límite permisibles de concentración de ozono en el aire ambiente para la protección de la salud humana; así como los criterios para su evaluación, esto con la finalidad de proteger la salud de la población.

De acuerdo a la norma el Ozono (O₃) es un contaminante secundario que se forma por una reacción fotoquímica entre emisiones primarias de óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles

(COVs) o hidrocarburos (HCs) en presencia de la radiación solar. El tiempo de vida de este contaminante en la atmósfera va depender de la presencia y abundancia de sus precursores y sus concentraciones más elevadas se suelen presentar durante las horas del día en que se registra la mayor temperatura.

Con el objetivo de proteger la salud de la población más susceptible se establecen dos valores límite para las concentraciones ambientales del O₃, expresados en la siguiente tabla. (Tabla 14)

Tabla 14.- Límites máximos permisibles para el Ozono

Contaminante	Promedio horario	Promedio móvil de 8 horas
Ozono (O ₃)	0.095 ppm	0.070 ppm

Fuente: Secretaria de Salud México, 2014.

Para que los datos puedan ser evaluados correctamente de acuerdo a la norma, se deben cumplir con los criterios siguientes:

- Para el cálculo de concentración horaria se debe cumplir con el mínimo del 75% de los registros de minutos en 1 hora.
- Para el cálculo de concentración del promedio móvil de 8 horas se deben tener al menos 6 horas con concentraciones horarias.
- Para el cálculo de concentración anual se debe contar al menos con el 75% de los registros necesarios para evaluar cada límite (a partir de valores horarios, al menos 6588 registros para 1 año bisiesto y al menos 6570 registros para 1 año no bisiesto; a partir de valores diarios, al menos 275 registros para 1 año bisiesto y al menos 274 registros para 1 año no bisiesto).
- Un sitio de monitoreo cumple con el límite de 1 hora cuando cada una de las concentraciones horarias sea menor o igual que 0.095 ppm.

En caso de que se tenga menos del 75% de los registros en el periodo y alguna de las concentraciones horarias sea mayor que 0.095 ppm, se incumplirá la norma.

- Un sitio de monitoreo cumple con el límite del promedio móvil de 8 horas cuando el valor máximo anual sea menor o igual a 0.070 ppm.

En caso de que se tenga menos del 75% de los registros en el periodo y alguna de las concentraciones de los promedios móviles de 8 horas sea mayor que 0.070 ppm, se incumplirá la norma.

IV.12. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE

La calidad del aire es la condición del aire que prevalece a nuestro alrededor, una calidad del aire buena se refiere al estado del aire limpio (28% oxígeno, 78% de nitrógeno y 1% trazas de otros compuestos) de apariencia transparente y libre de contaminantes tales como el humo, el polvo y el smog, entre otras impurezas de composición gaseosa.⁴¹

Por su parte el índice de calidad del aire es una herramienta preventiva que sirve para conocer de forma sencilla, clara y oportuna, a través de una escala de valores y colores, los niveles de contaminación del aire, con información sobre el riesgo por la exposición a los contaminantes y las acciones de protección que puede realizar la población.

Para poder determinar la calidad del aire de una zona o ciudad se necesita evaluar una serie de indicadores estadísticos que hacen posible el conocer las características del aire en un lugar y tiempo establecido.

El grado de deterioro de la calidad del aire varía dependiendo de la zona y es debido principalmente a la emisión de contaminantes atmosféricos por dos fuentes principales:

- Las fuentes naturales: como la erupción de los volcanes, la producción de polvo ocasionada por los tornados y tormentas, los incendios forestales, la emisión natural de la vegetación, etc.
- Las fuentes antropogénicas: como la combustión en los vehículos, los gases tóxicos de algunas industrias, la generación de basura y desechos, la emisión de gases y partículas por crematorios, las fugas de gas de uso doméstico e industrial; de igual forma por la generación de compuestos orgánicos volátiles (COV) provenientes del material utilizado en la impermeabilización, los solventes, las imprentas y los artículos de limpieza de uso doméstico.

⁴¹ SEDEMA. (2018). Informe Anual: Calidad del aire 2018, Ciudad de México. CDMX, México.

Po otro lado, el índice de la calidad del aire es un valor adimensional, que es calculado a partir de la información obtenida y procedente de las unidades o estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos, dicho índice se obtiene por medio de los lineamientos que se encuentran en la **NOM-172-SEMARNAT-2019**, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud; que tiene por objetivo el facilitar a la población la comprensión de la información relacionada con la contaminación del aire a nivel local.

En 1982 se implementó en México el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (Imeca) como valor de referencia para notificar a la población de las grandes ciudades y zonas metropolitanas sobre los niveles de contaminación del aire que prevalecen en su zona de residencia o trabajo.⁴²

Posteriormente en 1986, se comenzó a difundir oficialmente el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) a través de los medios disponibles de la época y sustituyó al Índice Mexicano de la Calidad del Aire (IMEXCA) el cual inició su publicación diaria el 6 de diciembre de 1977.

Dentro del Imeca las concentraciones de los contaminantes van una escala de 0 a 500 puntos, para este índice se asignan colores y un calificativo que facilitan a la población la comprensión de los datos, en la tabla siguiente se encuentran estas clasificaciones y su significado en relación con la salud. (Tabla 15)

Tabla 15.- Valores Imeca, su relación con la calidad del aire y efectos a la salud

Valor Imeca	Calidad del aire	Efectos en la salud
0-50	Buena	Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre.
51-100	Regular	Posibles molestias en niños, adultos mayores y grupos sensibles. Se pueden realizar actividades al aire libre.
101-150	Mala	Posibles efectos adversos en la salud de la población, en particular en niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma.

⁴² CECADESU, & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Calidad del aire: una práctica de vida. México.

		Evita realizar actividades al aire libre.
151-200	Muy mala	Efectos adversos en la salud de la población en general, en particular en los niños, adultos mayores y población sensible. Evita realizar actividades al aire libre. Evita salir de casa, mantén ventanas y puertas cerradas.
>200	Extremadamente mala	Causante de efectos adversos a la salud de la población en general. Se pueden presentar complicaciones graves en los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias como el asma. Evita realizar actividades al aire libre. Evita salir de casa, mantén ventanas y puertas cerradas. Mantente informado de las instrucciones de Protección Civil y las autoridades de salud.

Fuente: CECADESU & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013.

IV.13. TECNOLOGÍAS DE MONITOREO ATMOSFÉRICO

Las zonas metropolitanas son las que suelen presentar mayores niveles de contaminación debido a la densidad poblacional, la cantidad de vehículos e industrias, por esta razón se han implementado redes de monitoreo para contar con datos rápidos y exactos respecto al nivel contaminantes presentes en sectores y horas específicas.

El monitoreo atmosférico permite conocer en tiempo real el estado de la calidad del aire en las diferentes zonas, esto con la finalidad de poder informar oportunamente a la población de la calidad del aire que respiran y los posibles riesgos a la salud.

De acuerdo a la **NOM-172-SEMARNAT-2019** se puede definir a los sistemas de monitoreo de la calidad del aire como el 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.

En México la red de medición de la calidad del aire es parte de un sistema de medición de calidad del aire (SMCA); la red de medición de la calidad del aire es el conjunto de estaciones de muestreo manual y/o de monitoreo automático o semiautomático de contaminantes (ambos de partículas y contaminantes gaseosos). Estas estaciones miden valores de inmisión, es decir, la concentración en el aire de cada contaminante, las medidas más usadas para expresar la concentración de los contaminantes son los mg/m³ y las partes por millón (ppm).

Las redes de medición de la calidad del aire, pueden ser clasificadas en redes manuales de muestreo y redes automáticas de monitoreo.

Redes manuales

Son el conjunto de dos o más estaciones manuales para el muestreo de contaminantes, son utilizadas principalmente para el muestreo de partículas suspendidas y mediante un manejo adecuado de la muestra es posible determinar la concentración del contaminante.⁴³

Estas redes tienen diferentes elementos que dependerán en gran parte de los objetivos del monitoreo de la calidad del aire, dentro de los principales elementos se encuentran:

- Los equipos de muestreo.
- Laboratorios de análisis de muestras
- Programas de muestreo
- Procedimientos para el manejo de la muestra

⁴³ Instituto Nacional de Ecología. (s/a). Manual 3: Redes estaciones y equipos de medición de la calidad del aire. México.

Redes automáticas

Son el conjunto de dos o más estaciones automáticas para la medición de contaminantes atmosféricos; cada estación contiene diversos equipos, analizadores automáticos y monitores o sensores meteorológicos, estos están destinados a monitorear las concentraciones de uno o más contaminantes del aire y algunos parámetros meteorológicos.

Los equipos de las redes automáticas utilizan métodos de medición que aprovechan las propiedades físicas y químicas de los contaminantes atmosféricos para determinar sus concentraciones.

Las redes de monitoreo cuentan con estaciones de monitoreo que pueden ser clasificadas por su tipo de operación y por su movilidad, como se muestra en la siguiente tabla. (Tabla 16)

Tabla 16.- Clasificación de las estaciones de monitoreo

Clasificación	Tipo de estación
Por su tipo de operación	Estaciones manuales: en estas estaciones, después de llevar a cabo el muestreo de los contaminantes, la muestra es trasladada a un laboratorio para su análisis.
	Estaciones automáticas: como su nombre lo indica, son aquellas que se encuentran integradas con por equipo de medición automático y continuo que les permite tener datos al instante sin necesidad de tener que analizarlos después en un laboratorio.
	Estaciones mixtas: este tipo de estación integra equipos manuales y automáticos.
Por su movilidad	Estaciones Fijas: se consideran fijas cuando los equipos de medición son colocados al interior de un inmueble de construcción permanente.
	Estaciones Móviles: son casi siempre motorizadas o remolcables, generalmente se usan durante campañas temporales y trabajos prospectivos o de investigación.

También sirven de auxiliar en caso de una falla en alguna estación fija o cuando se presentan casos de emergencia atmosférica.

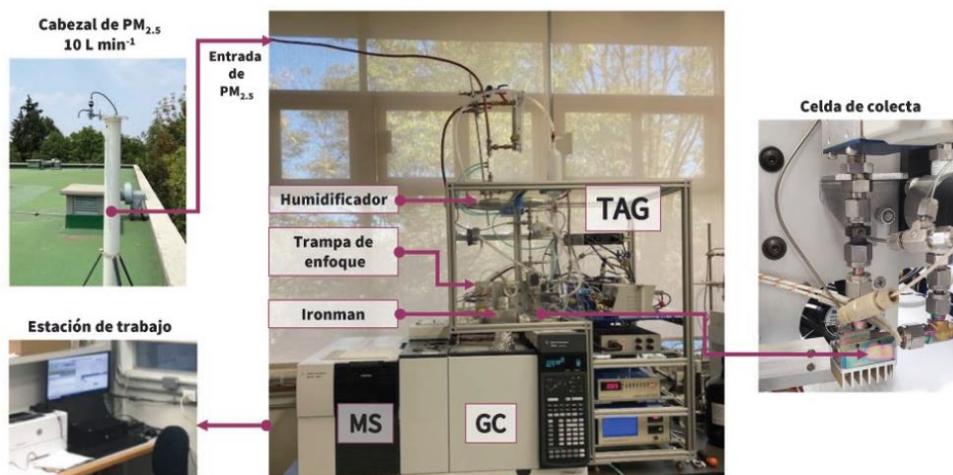
Fuente: Instituto Nacional de Ecología, s/a.

Figura 6. Estación automática fija de monitoreo atmosférico para PM10



Fuente: CECADESU & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013.

Figura 7. Colecta de PM_{2.5} mediante el Termodesorbedor de Aerosoles Orgánicos (TAG) acoplado al Cromatógrafo de Gases (GC) – Espectrómetro de Masas (MS)



Fuente: SEDEMA, 2018.

Para la ubicación de las estaciones de monitoreo se deben seguir varios criterios dentro de los que se encuentran la densidad de la población, entre más grande sea el centro poblacional se debe incrementar el número de estaciones de monitoreo; la distribución de fuentes de emisión, para ciudades industrializadas o zonas metropolitanas las fuentes de emisión pueden ser más por lo que se deberán colocar más estaciones de monitoreo o colocarse en sitios estratégicos; la meteorología y la topografía de la zona.

Dentro las estaciones de monitoreo se utilizan múltiples equipos para la medición de la calidad del aire, cada uno de éstos operan de manera individual o en conjunto para tomar muestras, realizar mediciones, transformar una señal, mostrar y almacenar los resultados y calibrar el resto de los equipos.

En la medición de los contaminantes criterio, ya sean gases o partículas, los principios de operación de los equipos utilizados en una estación deben cumplir con los métodos de referencia o equivalentes que están establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas con el objetivo de generar datos validos para el monitoreo de la calidad del aire.

Los equipos de análisis de los contaminantes atmosféricos varían dependiendo del contaminante que se pretende analizar, estos equipos se pueden dividir en analizadores automáticos de gases y monitores de partículas.

Analizadores automáticos

Los analizadores automáticos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de un contaminante gaseoso para determinar su concentración; estos analizadores cuentan con tres sistemas internos interdependientes (sistema electrónico, sistema neumático y sistemas ópticos):

- Electrónico, este contiene el software de operación, controla el funcionamiento del analizador y realiza automáticamente los cálculos para el reporte de los resultados.
- Óptico, en este se aplica el método de medición del analizador, mediante procesos físicos y/o químicos, dependiendo del gas que se debe analizar.
- Neumático, consta principalmente de la bomba de succión y de las conexiones y tuberías por donde circula la muestra de gas.

A su vez el método de medición es diferente dependiendo del contaminante criterio que se desea analizar, en la siguiente tabla se puede observar el tipo de analizador/método por contaminante. (Tabla 17)

Tabla 17.- Tipo de analizador/método por contaminante

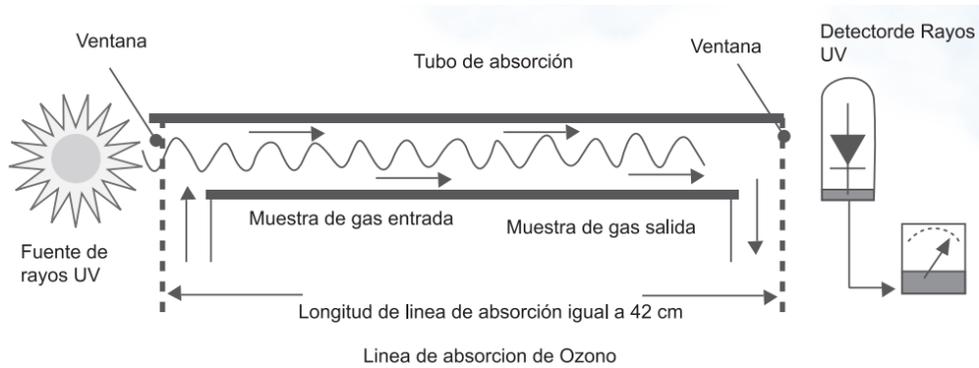
Contaminante criterio	Tipo de analizador	Descripción
Ozono (O ₃)	Analizador de O ₃ (Fotometría UV)	Este analizador tiene un principio de operación que se conoce como el método de fotometría UV y consiste en medir la cantidad de luz ultravioleta, a una longitud de onda de 254 nm, absorbida por el ozono presente en una muestra. Su operación se basa en la Ley de Beer-Lambert, en donde la muestra pasa por el interior de las celdas y la molécula de ozono absorbe una cantidad de luz, la cual

		se compara con la cantidad de luz medida en la celda de referencia con la finalidad de calcular la concentración.
Monóxido de carbono (CO)	Analizador de CO (Fotometría infrarroja, IR)	<p>Su principio de operación se basa en la capacidad que tiene este gas para absorber energía en determinadas longitudes de onda.</p> <p>En estos analizadores se mide la absorción de luz infrarroja, llevada a cabo por las moléculas de CO en intervalos relativamente pequeños de longitudes de onda centradas sobre la región de máxima absorción del contaminante.</p>
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	Analizador de NO _x (Quimiluminiscencia)	<p>Estos analizadores usan una técnica analítica basada en la medición de la cantidad de luz generada por una reacción química. Los analizadores de NO_x utilizan la reacción que tiene lugar entre el óxido nítrico (NO) contenido en la muestra de aire y el ozono (O₃) que genera.</p> <p>Cabe resaltar que el NO₂ no participa en la reacción de quimiluminiscencia por lo que los analizadores están provistos de un convertidor a través del cual pasa la muestra de aire en forma alternada para que el dióxido de nitrógeno se reduzca a NO.</p>
Bioxido de azufre (SO ₂)	Analizador de SO ₂ (Fluorescencia pulsante)	Estos analizadores tienen como principio la fluorescencia pulsante, la cual se basa en el hecho de que las moléculas de SO ₂ absorben radiación ultravioleta (UV) a una longitud de onda en el intervalo de 210-410 nm, entrando en un estado instantáneo de excitación para posteriormente decaer a un estado de

		energía inferior y emitiendo un pulso de luz fluorescente de una longitud de onda mayor en el intervalo de 240 a 410 nm.
--	--	--

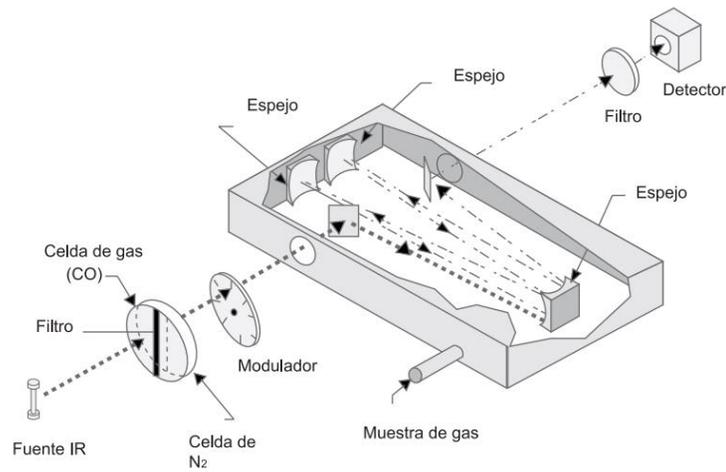
Fuente: Instituto Nacional de Ecología, s/a.

Figura 8. Esquema del principio de operación para un analizador de ozono



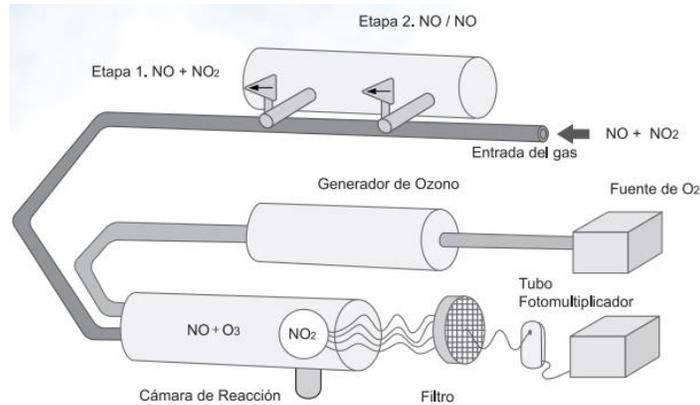
Fuente: Instituto Nacional de Ecología, s/a.

Figura 9. Esquema del principio de operación para un analizador de monóxido de carbono



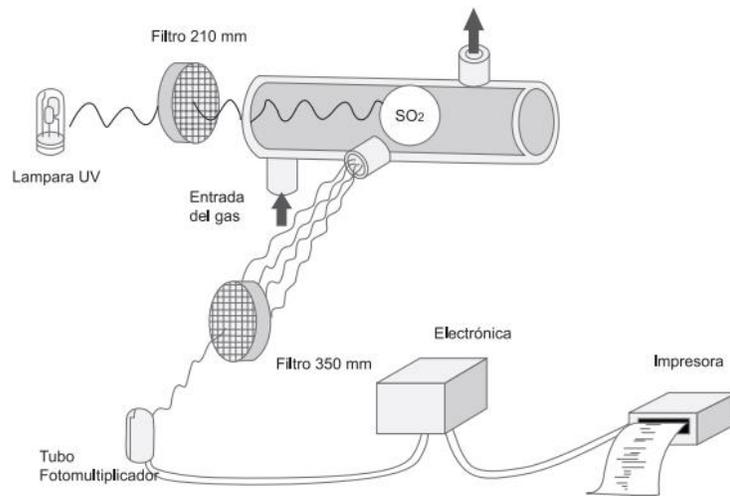
Fuente: Instituto Nacional de Ecología, s/a.

Figura 10. Esquema del principio de operación para un analizador de óxidos de nitrógeno



Fuente: Instituto Nacional de Ecología, s/a.

Figura 11. Esquema del principio de operación para un analizador de dióxido de azufre



Fuente: Instituto Nacional de Ecología, s/a.

Monitores de partículas suspendidas

Al igual que los analizadores de gases, los monitores de partículas reportan resultados en tiempo real, pero a diferencia de los analizadores de gases, no llevan a cabo un análisis de la muestra, únicamente determinan la concentración de partículas aprovechando las propiedades físicas de las mismas.

Estos monitores son usados para el monitoreo en el ambiente de las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} y utilizan principalmente dos métodos, el de atenuación beta y el de microbalanza oscilatoria:

- Microbalanza oscilatoria o de elemento oscilante, esta tecnología permite hacer determinaciones de masa muy precisas, con mayor resolución que las microbalanzas convencionales.

El muestreador TEOM (Tapered-Element Oscillating Microbalance, por sus siglas en inglés) mide la cantidad de masa recolectada de una muestra de aire a una velocidad casi continua., este muestreador recolecta las partículas en un filtro colocado en el extremo de un elemento puntiagudo oscilante, que tiene su otro extremo fijo.

- Atenuación de radiación beta, en este tipo de equipos el aire del ambiente se introduce al sistema por medio de una bomba de succión, depositando las partículas en el filtro de manera intermitente.

Algunos de estos monitores usan ciclos de medición en los cuales el filtro y muestra se transportan automáticamente para ser medida; otros monitores son capaces de medir continuamente la masa y la concentración de las partículas en el filtro, ya que la recolección y la medición se hacen simultáneamente en el mismo segmento del filtro.

Para el monitoreo de la calidad del aire también se debe considerar el uso de equipos y sensores meteorológicos que midan la velocidad del viento, la dirección del viento, la presión, la temperatura, la humedad relativa y la precipitación pluvial.

A su vez se debe contar con sistemas de calibración para el control de calidad, posterior a implementar cualquier actividad de medición es importante que los equipos (analizadores, monitores, muestreadores y sensores) sean revisados para asegurar que se encuentran calibrados y en caso de no ser así estos equipos deberán ser debidamente calibrados para proceder con un muestreo de la calidad del aire efectivo y correcto.

IV.14. TECNOLOGÍAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR FUENTES MÓVILES (ESCAPES)

La mayoría de los sistemas de control de gases de escape se basan en convertidores catalíticos con diversas funciones de activación de reacciones químicas y en filtros para retener el material particulado.

Los convertidores catalíticos o catalizadores tratan de activar ciertas reacciones químicas en los gases de escape pasándolos por uno o varios monolitos que contienen muchos conductos de pequeño diámetro, en cuya superficie interior se depositan metales o compuestos que hacen la función de catalizadores de dichas reacciones químicas.⁴⁴

Catalizadores de oxidación

Su objetivo es el acelerar las reacciones de oxidación del CO y los HC: $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ y $\text{HC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$; se usan en motores diésel debido al contenido de oxígeno en el gas de escape en dichos motores.

El único inconveniente de este tipo de catalizadores es que debajo de 200 °C el rendimiento del catalizador en la conversión de CO y HC es muy bajo.

Catalizadores de reducción

En esencia, un catalizador de platino (Pt) o de paladio (Pd) puede comportarse como de oxidación o de reducción según el contenido de oxígeno en el gas de escape; su objetivo es capturar y almacenar los NO_x durante condiciones de mezcla pobre para liberarlos en condiciones de mezcla rica.

Catalizadores de tres vías

Puesto que los metales nobles actúan sobre los gases de escape acelerando los procesos de oxidación del CO e HC, y de reducción del NO, un catalizador de tres vías es el que tiene por objetivo actuar sobre los tres contaminantes en un gas de escape de una combustión con mezcla estequiométrica.

Sistemas de reducción catalítica selectiva

Se basan en reacciones entre amoníaco y NO y NO₂ para dar N₂ y agua, activadas por un catalizador en una matriz de substrato cerámico.

Filtros de partículas

Son utilizados para retener las partículas de hollín que emiten los motores diésel y algunos motores de gasolina actuales; están compuestos por una estructura monolítica de material cerámico poroso extruido

⁴⁴ Querol, X. (2018). La calidad del aire en las ciudades, un reto mundial. Madrid, España.

similar al de los catalizadores, contienen una gran cantidad de canales paralelos de sección transversal cuadrada.

IV.15. EVALUACIÓN DE LOS DATOS MENSUALES DE PM2.5 Y OZONO (O₃) PARA LA ZONA METROPOLITANA DE TUXTLA GUTIÉRREZ Y EL CUMPLIMIENTO DE LA NOM-172-SEMARNAT-2019

La zona metropolitana de Tuxtla Gutiérrez es considerada una de las zonas que presenta mayores concentraciones de contaminantes atmosféricos, esto por ser una zona metropolitana y abarcar la ciudad capital del estado de Chiapas; estas concentraciones altas de contaminantes se deben en su mayoría a que en las ZM la densidad poblacional es mayor y el crecimiento de la población es constante, esto a su vez representa una cantidad mayor de vehículos e industrias que interactúan en una misma zona.

Los niveles altos de contaminación desencadenan impactos negativos al medio ambiente, los ecosistemas, los monumentos y edificaciones, además de representar riesgos para la salud de la población que van desde efectos leves como tos, irritación de las vías respiratorias, irritación ocular, dolor de cabeza, mareos, sequedad en la garganta; hasta efectos fuertes como la conjuntivitis, laringitis, asma, bronquitis, desmayos, daño pulmonar, neumonía, cáncer pulmonar y la muerte.

Por esta razón el monitoreo y la evaluación de la calidad del aire en la ZM de Tuxtla Gutiérrez se ha convertido en algo indispensable para evitar los daños en la salud de la población y para mantenerlos informados de la calidad del aire que respiran, siendo esta herramienta una forma de prevención del riesgo a la salud.

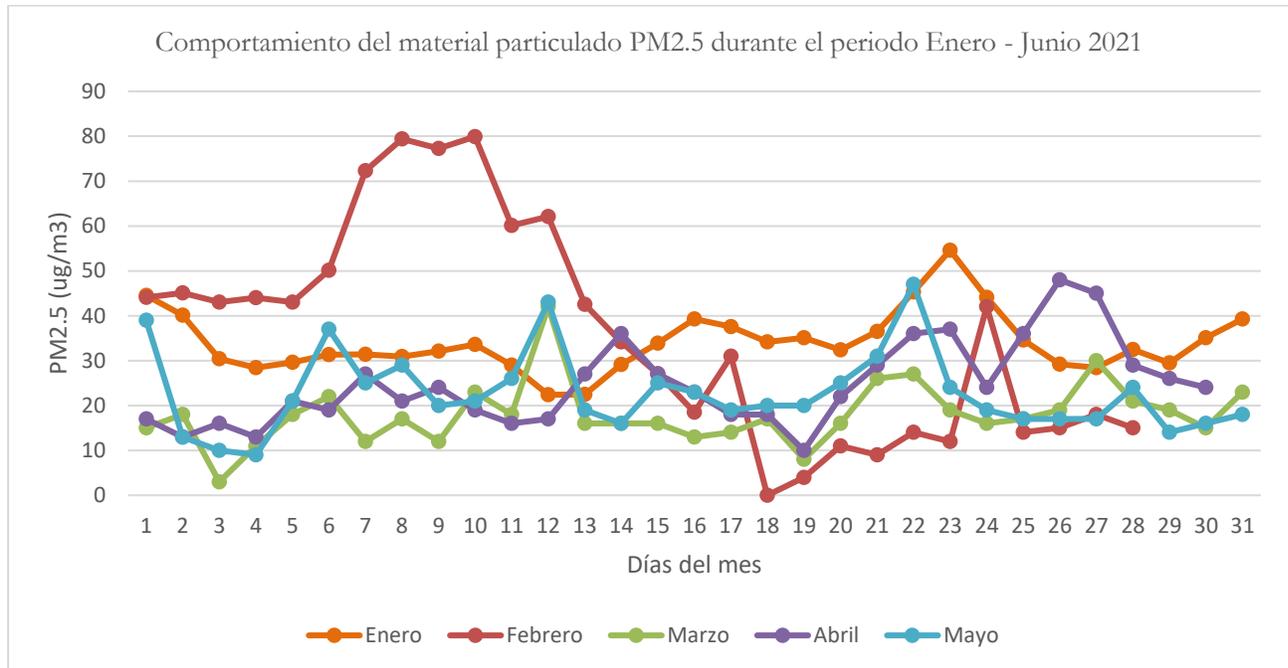
Para este capítulo se realizó el análisis de los datos generados para los contaminantes PM2.5 Y Ozono (O₃), durante el monitoreo de la calidad del aire realizado por el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) y el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA) en la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; los datos analizados se recabaron de la página oficial de la Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural (SEMAHN) y comprendieron datos diarios de la calidad del aire de la primera mitad del 2021 (periodo enero – junio).

El análisis se hizo con base en la **NOM-172-SEMARNAT-2019**, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud.

Material particulado PM2.5

El comportamiento del material particulado PM2.5 para el promedio de 24 horas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) diario en los meses de enero a junio se puede apreciar en la siguiente gráfica, cabe mencionar que los días en los que el valor fue de cero es indicativo de que durante esa fecha no se recabaron datos. (Grafica. 1)

Grafica 1. Comportamiento del material particulado PM2.5 durante el periodo Enero – Junio



Fuente: Propia, realizada con datos de la SEMAHN.

Los datos analizados indican que para el mes de enero el resultado más alto fue el día 23 con $54.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM2.5, para febrero el día 10 con $79.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para marzo el día 12 con $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para abril el día 26 con $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para mayo el día 22 con $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para junio el día 03 con $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo el mes febrero el que tuvo el valor mas alto para partículas PM2.5 y rebasando el límite máximo permisible de 24 horas ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Con estos datos se tiene como resultado que en la primera mitad del 2021 en cuatro de los meses (enero, febrero, abril y mayo) se rebaso el límite máximo de 24 horas.

De acuerdo **NOM-172-SEMARNAT-2019**, el promedio mensual indico una calidad buena para los meses de marzo, abril, mayo y junio; mientras que indico una calidad del aire aceptable en los meses de enero y febrero.

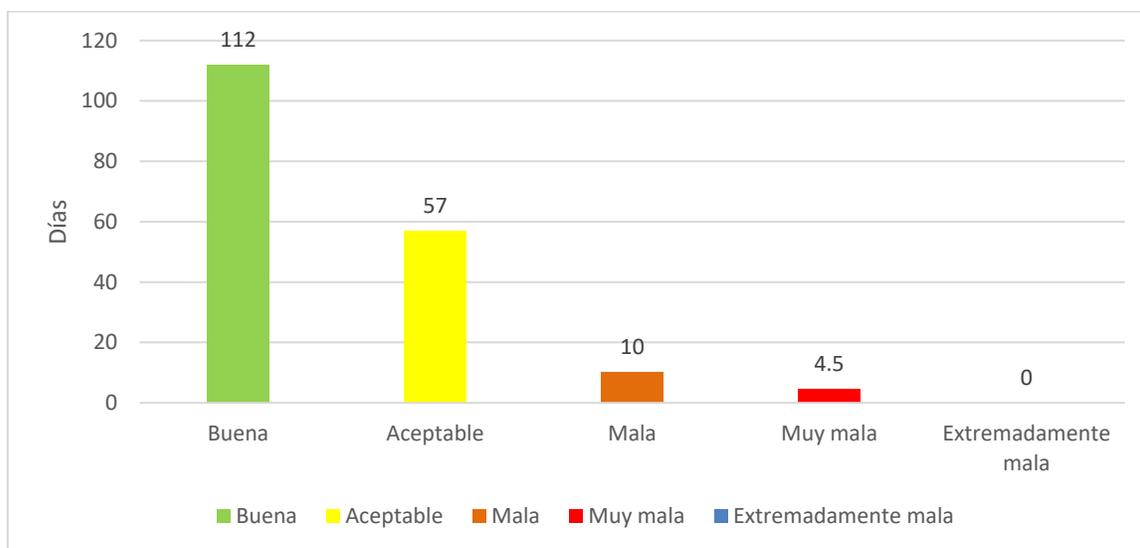
Figura 12. Promedio mensual según el Índice Aire y Salud



Fuente: Propia.

Por otro lado, en el primer semestre del año (periodo enero – junio) el total de días con calidad del aire buena fue de 112, con calidad del aire aceptable 57 días, con calidad del aire mala 10 días, con calidad del aire muy mala 2 días y con calidad del aire extremadamente mala 0 días. (Grafica. 2)

Grafica 2. Total de días según la calidad del aire en el Índice Aire y Salud

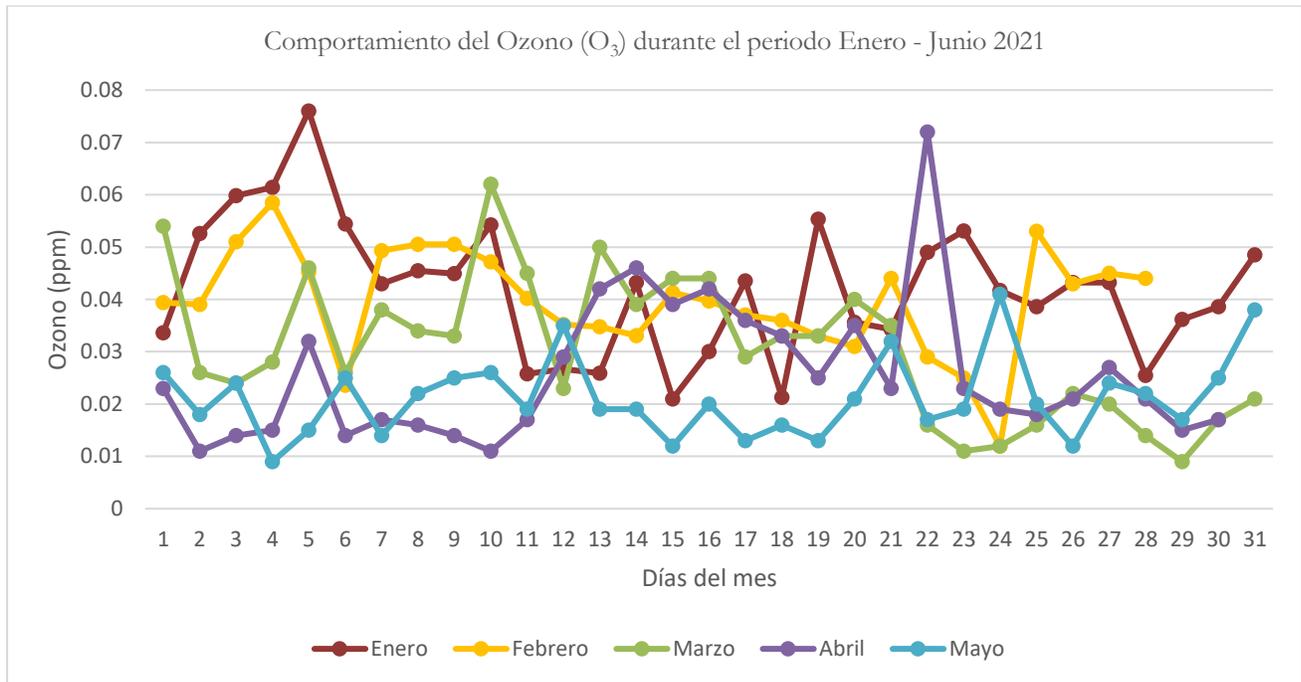


Fuente: Propia, realizada con datos de la SEMAHN.

Ozono (O₃)

El comportamiento del Ozono (O₃) para el promedio móvil de ocho horas (ppm) en los meses de enero a junio se puede ver en la gráfica que se presenta a continuación. (Grafica. 3)

Grafica 3. Comportamiento del Ozono durante el periodo Enero – Junio



Fuente: Propia, realizada con datos de la SEMAHN.

Los datos analizados indicaron que para el mes de enero el resultado más alto fue el día 05 con 0.076 ppm de Ozono, para febrero el día 04 con 0.058 ppm, para marzo el día 10 con 0.062 ppm, para abril el día 22 con 0.072 ppm, para mayo el día 24 con 0.041 ppm y para junio el día 01 con 0.036 ppm, siendo el mes enero el que tuvo el valor más alto de Ozono (O₃), rebasando el límite máximo para el promedio móvil de 8 horas (0.070 ppm)

Derivado de estos datos el resultado es que en el periodo enero – junio de 2021 se superó el límite máximo para el promedio móvil de 8 horas en dos meses (enero y abril), mientras que en los otros cuatro meses no se rebaso el límite.

De acuerdo **NOM-172-SEMARNAT-2019**, el promedio mensual indico una calidad buena para todos los meses analizados.

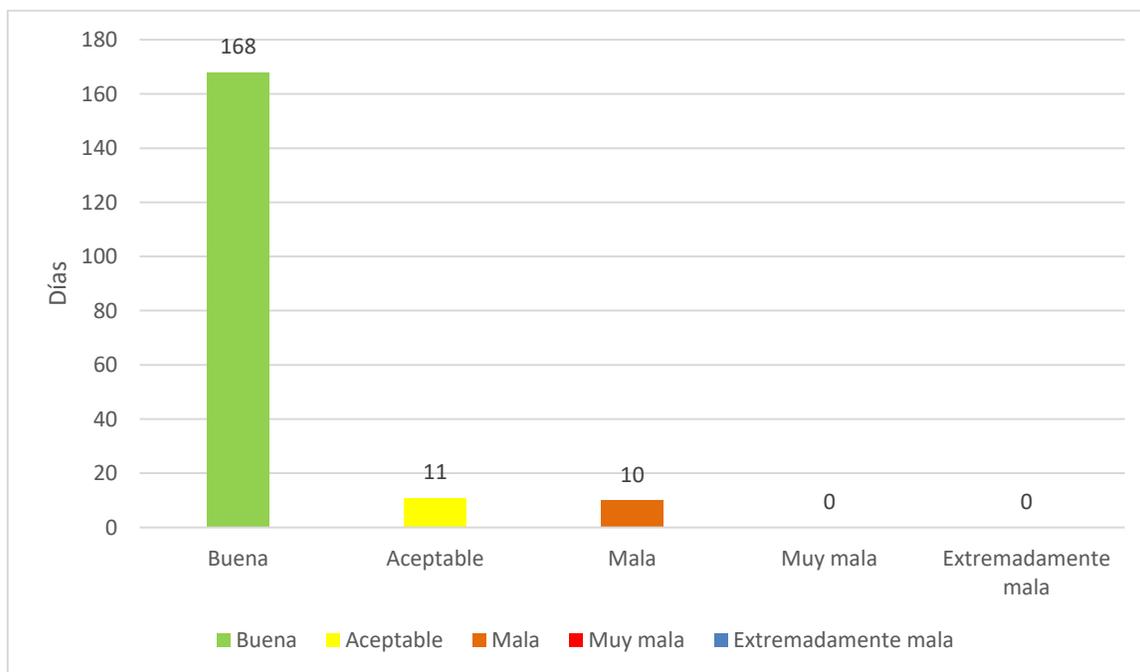
Figura 13. Promedio mensual según el Índice Aire y Salud



Fuente: Propia.

Por otra parte, en la primera mitad del año (enero – junio) del total de 181 días muestreados, 168 días presentaron una buena calidad del aire, 11 días una aceptable calidad del aire y 2 días tuvieron una mala calidad del aire; mientras que se presentaron 0 días con calidad del aire muy mala o extremadamente mala. (Grafica. 4)

Grafica 4. Total de días según la calidad del aire en el Índice Aire y Salud



Fuente: Propia, realizada con datos de la SEMAHN.

Cabe resaltar que el análisis del promedio anual para PM_{2.5} no se pudo realizar ya que no se contaba con la información de al menos 3 trimestres validos del año. Para el caso del Ozono (O₃) tampoco se pudo analizar y evaluar la concentración anual debido a que no se contaron con los datos necesarios.

En la zona metropolitana de Tuxtla Gutiérrez el comportamiento de los contaminantes depende en parte de los fenómenos meteorológicos registrados durante el año, a la vez que se ve afectado por las emisiones extraordinarias dentro de las que se incluyen los incendios forestales, los incendios en área urbana, las quemas de terrenos agrícolas, el incremento extraordinario en el tránsito vehicular que sucede comúnmente durante días festivos y el uso de pirotecnia.

Los resultados de este análisis indicaron que el mes de febrero fue el que presentó mayores niveles de contaminación por PM_{2.5} y más días con calidad del aire regular y mala, esto puede ser debido a los acontecimientos informados por los boletines de la SEMAHN, de que durante el mes febrero se presentaron 57 puntos de calor (correspondientes a las quemas agropecuarias), un incendio forestal y poca presencia de viento, propiciando de esta manera la acumulación de la masa de partículas contaminantes e incrementando los niveles de contaminación por PM_{2.5} (polvo, polen y residuos muy finos de fuego).

Para el caso del Ozono (O₃) el mes de enero fue el que presentó más días con una calidad del aire regular o mala, siendo los primeros siete días del mes los que más se vieron afectados, esto puede ser en parte derivado de las festividades de inicio de año (año nuevo y día de reyes) en donde se queman grandes cantidades de juegos pirotécnicos. Por otra parte, durante el mes de abril el día 23, se presentó un pico de contaminación por Ozono que rebasó el límite máximo para el promedio móvil de 8 horas.

V. CONCLUSIONES, PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES

En la actualidad la contaminación de la atmósfera ha incrementado como consecuencia del creciente desarrollo industrial, el incremento del flujo vehicular y el uso indiscriminado de combustibles fósiles, los problemas relacionados con la contaminación atmosférica y el deterioro de la calidad del aire se han convertido en una prioridad de las grandes ciudades y las principales zonas metropolitanas.

En la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, el monitoreo y la gestión de la calidad del aire se han vuelto indispensables para redirigir los esfuerzos a generar políticas efectivas para el control de las emisiones a la atmósfera, con la finalidad de lograr la reducción de los niveles de contaminación y alcanzar niveles seguros para la protección de la salud de la población.

Los objetivos del presente trabajo se cumplieron al cien por ciento y no hubo mayores complicaciones a la hora de conseguir los datos necesarios; se logró identificar las principales características y el origen de los contaminantes atmosféricos PM_{2.5} y Ozono; se recabaron los datos mensuales del periodo enero – junio generados mediante el monitoreo de la calidad del aire de la zona metropolitana de Tuxtla Gutiérrez, realizado por la SEMAHN; y se realizó la evaluación de los datos obtenidos y el cumplimiento de la **NOM-172-SEMARNAT-2019**.

Con los resultados obtenidos de este trabajo de investigación se puede concluir que en la primera mitad del 2021 (periodo enero - junio) la ZM de Tuxtla Gutiérrez incumplió con el límite máximo permisible de 24 horas del contaminante PM_{2.5} durante el mes de enero (54.6 µg/m³), febrero (79.9 µg/m³), abril (48 µg/m³) y mayo del (47 µg/m³) presentando concentraciones mayores a los 45 µg/m³ establecidos por la **NOM-172-SEMARNAT-2019** como LMP.

Además de que se tuvieron 112 días con calidad de aire buena, 57 con calidad aceptable, 10 con calidad mala y 2 con calidad muy mala.

De acuerdo a lo establecido por la norma, el cálculo del promedio de 24 horas para las PM_{2.5} fue posible por contarse con el 75% de las concentraciones horarias válidas, mientras que no fue posible realizar el cálculo del promedio anual al contarse solo con datos de dos trimestres de los tres necesarios para la evaluación del cumplimiento de la norma.

Para el contaminante Ozono (O_3), la ZM de Tuxtla Gutiérrez incumplió con el límite máximo permisible para el promedio móvil de 8 horas durante los meses de enero (0.076 ppm) y abril (0.072 ppm) presentando concentraciones mayores a los 0.070 ppm establecidos por la **NOM-172-SEMARNAT-2019** como LMP.

Por otra parte, se tuvieron 168 días con calidad de aire buena, 11 con calidad aceptable y 2 con calidad mala.

De acuerdo a lo establecido por la norma, el cálculo de concentración del promedio móvil de 8 horas fue posible por contar con al menos 6 horas con concentraciones horarias, mientras que no fue posible realizar el cálculo de concentración anual al no contarse con los 6588 registros de valores horarios o los 275 registros de valores diarios necesarios para la evaluación del cumplimiento de la norma.

En relación con la calidad del aire de otras zonas metropolitanas, la ZM de Tuxtla Gutiérrez rebaso los límites máximos permisibles de ambos contaminantes evaluados (Ozono y $PM_{2.5}$) en varias ocasiones, incumpliendo así con lo establecido en la **NOM-172-SEMARNAT-2019**, y aunque los valores de contaminación en la ZM de Tuxtla Gutiérrez fueron más bajos en comparación con los de otras zonas metropolitanas del país, se sigue incumpliendo la norma.

En cuanto a las limitaciones de este trabajo, estas se debieron más que nada a la insuficiencia de datos de los contaminantes PM_{10} , dióxido nitrógeno, dióxido azufre y monóxido de carbono (CO), necesarios para la evaluación del cumplimiento total de la **NOM-172-SEMARNAT-2019**. Esto indica la necesidad de que se midan los dos contaminantes analizados y los demás contaminantes criterio, durante todo el año y no sólo durante dos trimestres del año.

La necesidad de mejorar la calidad del aire se deriva del problema de salud pública que suponen efectos negativos en la salud de la población que van desde afecciones respiratorias, hasta morbilidad y mortalidad prematura.

Por lo que se propone fortalecer la operación de las estaciones de monitoreo para que pueda evaluarse el cumplimiento de las NOM de calidad del aire, además de cuantificar de manera más precisa la distribución de días con calidad del aire buena, regular y mala.

Por otro lado, se propone plantear a la SEMAHN la apertura de los datos de todos los contaminantes criterio a los investigadores y público en general, para facilitar el planteamiento de nuevos trabajos de investigación, artículos e informes sobre la contaminación atmosférica y el monitoreo de la calidad del aire de la zona metropolitana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Se recomienda que para trabajos posteriores se haga la evaluación anual de los datos de ambos contaminantes (PM2.5 y Ozono), así como la evaluación del cumplimiento de la **NOM-172-SEMARNAT-2019** de los demás contaminantes (PM10, dióxido nitrógeno, dióxido azufre y monóxido de carbono).

Además, se recomienda hacer un reporte anual del cumplimiento de la normatividad y proporcionar los datos y resultados de estos reportes para su integración en los informes nacionales anuales de la calidad del aire.

VI. ANEXOS

Tabla 18.- Datos del mes con las concentraciones promedio de 24 horas más altas de PM_{2,5} para la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Día	Concentración promedio de 24 horas durante el mes de febrero de 2021 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
1	44.1	22
2	45.1	18
3	43	19
4	44	22
5	43	24
6	50.1	25
7	72.3	24
8	79.4	26
9	77.3	26
10	79.9	26
11	60.1	26
12	62.1	25
13	42.5	24
14	34.2	25
15	27.1	23
16	18.5	24
17	31	26
18	0	21
19	4	21
20	11	18
21	9	22
22	14	21
23	12	24
24	42	25

25	14	26
26	15	26
27	18	27
28	15	28

Fuente: SEMAHN y SMCA, 2021.

Tabla 19.- Datos del mes con las concentraciones promedio móvil de ocho horas más altas de Ozono (O₃) para la Zona Metropolitana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Día	Concentración promedio móvil de ocho horas durante el mes de enero de 2021 (ppm)	Temperatura (°C)
1	0.0336	20
2	0.0526	20
3	0.0598	20
4	0.0614	20
5	0.076	20
6	0.0544	20
7	0.043	20
8	0.0455	20
9	0.0449	19
10	0.0542	21
11	0.0258	20
12	0.0267	19
13	0.0259	19
14	0.0432	21
15	0.021	20
16	0.03	19
17	0.0435	21
18	0.0213	20

19	0.0553	21
20	0.0356	24
21	0.0343	24
22	0.049	25
23	0.0531	25
24	0.0417	25
25	0.0386	25
26	0.0432	25
27	0.0432	25
28	0.0255	24
29	0.0362	24
30	0.0386	24
31	0.0485	23

Fuente: SEMAHN y SMCA, 2021.

VII. REFERENCIAS DOCUMENTALES

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. México.
- Álvarez , E., Menéndez, J., & Bravo, M. (Junio de 2018). Calidad del aire: Situación en España y escenarios a futuro para la CAPV, Madrid y Barcelona. España.
- Aránguez , E., Ordóñez , J., Serrano, J., Aragonés , N., Fernández, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (Marzo de 1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. España.
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. España.
- CECADESU, & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Calidad del aire: una práctica de vida. México.
- CEPAL, & OCDE. (2016). Evaluaciones del desempeño ambiental, Chile. Santiago, Chile.
- García Lara, C., Nájera Aguilar, H., Camas Anzueto, J., & Mendoza Vazquez, S. (2013). Medición remota de ozono en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, utilizando la técnica DOAS. Chiapas, México.
- Green Facts. (2021). *Green Facts: Facts on Health and the Environment*. Obtenido de <https://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/contaminante.htm>
- Guanghai Yuan , & Weixin Yang. (2019). Evaluating China's Air Pollution Control Policy with Extended AQI Indicator System: Example of the Beijing-Tianjin-Hebei Region. Shanghai, China.
- Hernández, A. (2018). Impacto de la contaminación atmosférica en las edificaciones patrimoniales de La Habana, Cuba. Efectos para un futuro climático. Habana vieja, Cuba.
- INECC, & SEMARNAT. (2019). Informe nacional de la calidad del aire 2018. Ciudad de México, México.
- Instituto Nacional de Ecología. (s/a). Manual 3: Redes estaciones y equipos de medición de la calidad del aire. México.

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático , & SEMARNAT. (2018). Glosario de términos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México.
- International Energy Agency. (2016). Energy and Air Pollution, World Energy Outlook 2016 Special Report. París , Francia.
- Jacobson, M. (2012). Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions. Cambridge, Inglaterra.
- Lezama Escalante, C. (2006). La introducción de tecnologías: ¿nuevos caminos hacia la reestructuración productiva? Guadalajara, México.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible . (Julio de 2021). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Colombia 2021*. Obtenido de Emisiones Atmosféricas Contaminantes:
<https://www.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/gestion-del-aire/emisiones-contaminantes>
- Ministerio del Medio Ambiente Chile. (2018). Guía de calidad del aire y educación ambiental. Chile.
- Ministro de Educación, Ciencia y Tecnología. (s/a). LA ATMÓSFERA. Argentina.
- National Park Service. (2005). *Air Quality Core Slides: Sources of Air Pollution*. Obtenido de
https://web.archive.org/web/20050124221758/http://www2.nature.nps.gov/air/pubs/Core_Slides/sources.htm
- NYC Department of Health and Mental Hygiene. (2011). Air Pollution and the Health of New Yorkers: The Impact of Fine Particles and Ozone. Nueva York, EUA.
- OCDE. (2016). Evaluaciones del desempeño ambiental Chile, aspectos destacados. Chile.
- OPS, & OMS. (2016). *Organización Panamericana de la Salud: Calidad del Aire*. Obtenido de
<https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.

- Pabón, J., Zea, J., León, G., Hurtado, G., González, O., & Montealegre, J. (1998). *La atmósfera, el tiempo y el clima*. Colombia.
- Querol, X. (2018). *La calidad del aire en las ciudades, un reto mundial*. Madrid, España.
- REDSPIRA. (2020). *Informe sobre calidad del aire en Mexicali durante 2020*. Mexicali, Baja California, México.
- Remacha, M. (Febrero de 2017). *Medioambiente: desafíos y oportunidades para las empresas*. España.
- Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación, sexta edición*. México.
- Secretaría de Medio Ambiente e Historia Natural. (Febrero de 2021). *Boletín No. 1239*. Obtenido de https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/noticias/ver_noticia/1239
- Secretaría de Salud. (2014). *NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación*. México.
- Secretaría de Salud México. (2014). *NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O3) en el aire ambiente y criterios para su evaluación*. México.
- Secretaría del Medio Ambiente de la C. de México. (2016). *Calidad del aire en la ciudad de México, informe anual 2015*. CDMX, México.
- SEDEMA. (2018). *Informe Anual: Calidad del aire 2018, Ciudad de México*. CDMX, México.
- SEMAHN. (Junio de 2019). *SEMAHN Sala de prensa*. Obtenido de SEMAHN Boletín no. 1014: https://www.semahn.chiapas.gob.mx/portal/noticias/ver_noticia/1014
- SEMARNAT. (1988). *LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE*. México.
- SEMARNAT, & SEMAHN. (2018). *Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Chiapas 2018 - 2027*. Chiapas, México.

SGPA, & SEMARNAT. (2017). Estrategia Nacional de calidad del aire, visión 2017-2030. Ciudad de México, México.

Vallejo, M., Jáuregui, K., Hermosillo, A., Márquez, M., & Cárdenas, M. (Septiembre de 2002). Efectos de la contaminación atmosférica en la salud y su importancia en la ciudad de México. México.

Venegas, E., & CEGESTI. (2010). Calidad del aire y sus efectos en la salud humana.