



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL

“Análisis de las concentraciones del Bióxido de Nitrógeno, a partir de los datos de la RAMA-ZMVT, 2011-2016”.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

C. Karla Aimée Sura Castellanos

DIRECTORA DE TESIS

Dra. en A. Ana Marcela Gómez Hinojos



Toluca México Septiembre 2018

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma del Estado de México**, por brindarme el apoyo y las herramientas para lograr realizar mis estudios profesionales.

A mi directora **Dra. A Ana Marcela Gómez Hinojos**, por su compromiso, trabajo y dedicación en el desarrollo de éste proyecto; Pero sobre todo por su tiempo, consejos y guía a pesar de sus ocupaciones.

A la **M. en C Adriana Guadalupe Guerrero Peñuelas** y el **M. en C Jorge Paredes Tavares**, por sus propuestas, consejos constructivos y tiempo dedicado que enriquecieron el desarrollo de la investigación.

DEDICATORIAS

A mis padres y hermanos, por su esfuerzo, dedicación, apoyo y comprensión durante todo el proceso de obtención de grado y las diversas etapas de mi vida.

A Emilio por su apoyo, paciencia y comprensión durante todo el tiempo que estuve concentrada en la realización de esta tesis. Gracias por el ánimo de superación personal y profesional constante, por ser mi cómplice en todos los ámbitos y por su amor incondicional.

Y, finalmente a todas las personas que colaboraron de alguna manera durante el desarrollo de este proyecto, y aquellos que realizan acciones para mejorar la calidad del aire.

ÍNDICE

Introducción	13
1. Metodología	19
1.1 Alcance de la investigación	19
1.1.1 Exploratoria	19
1.1.2 Descriptiva	19
1.1.3 Correlacional.....	19
1.2 Diseño de la investigación.....	19
1.3 Población de estudio	20
1.4 Instrumento de medición	20
1.5 Recolección de datos	21
1.6 Análisis estadístico.....	22
1.7 Procedimiento metodológico	23
1.7.1 Antecedentes.....	24
1.7.2 Marco Teórico.....	24
1.7.3 Marco contextual.....	25
1.7.4 Marco jurídico	25
1.7.5 Analizar base de datos	26
1.7.6 Resultados.....	26
1.7.7 Análisis de resultados	27
1.7.8 Conclusiones	27
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	29
1.1 Contexto internacional	30
1.2 México y el mundo	32
1.3 Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)	36
1.4 Bióxido de Nitrógeno (NO ₂).....	42
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	45
2.1 Contaminación atmosférica.....	46
2.1.1 Clasificación de la contaminación atmosférica	47
2.1.2 Principales contaminantes del aire	48
2.1.3 Efectos de la contaminación atmosférica	53

2.1.4 Factores que favorecen la concentración de contaminantes en la ZMVT	54
2.2 El IMECA: Índice Metropolitano de la Calidad del Aire	55
2.3 Cambio Climático	56
2.3.1 Efecto Invernadero.....	56
2.4. Radiación Solar.....	58
2.4.1 Estaciones del año y la Radiación Solar.....	59
2.5 Gases de Efecto Invernadero (GEI).....	61
2.5.1 Clasificación de los GEI.....	61
2.5.2 Principales fuentes antropogénicas de los GEI	63
2.6 Óxidos de Nitrógeno (NOx)	64
2.6.1. Propiedades de los NOx	66
2.6.2 Ambientes exteriores	67
2.6.3 Ambientes interiores	67
2.6.4 Química atmosférica NOx.....	68
2.6.5 Formaciones de NOx.....	71
2.6.6 Mediciones.....	72
2.6.7. Efectos en la salud.....	75
2.6.8 Efectos en el medio ambiente.....	76
2.6.9 Smog fotoquímico	77
2.7 Red Automática de Monitoreo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT)	77
2.7.1 Objetivos de la RAMA-ZMVT.....	77
2.7.2 Esquema de la RAMA-ZMVT.....	78
2.7.3 Estaciones de Monitoreo de la RAMA-ZMVT	78
CAPÍTULO 3. MARCO CONTEXTUAL.....	81
3.1 Localización	83
3.3 Actividades económicas.....	85
3.5 Clima.....	86
3.5.1 Meteorología	87
3.6 Dinámica de vientos.....	88
CAPÍTULO 4. MARCO JURÍDICO	90
4.1 Ámbito Internacional	92

4.1.1 Derechos Humanos y la calidad del aire.....	92
4.2 Ámbito nacional.....	94
4.2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM)	96
4.2.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)	97
4.3 Ámbito municipal.....	98
4.3.1 Aire limpio: para el Valle de Toluca 2007-2011	99
4.3.2 Programa para mejorar la calidad del aire Valle de Toluca 2012–2017	100
4.4 Normas Oficiales Mexicanas (NOM)	102
4.4.1 NOM-085-SEMARNAT-2011,	102
4.4.2 NOM-023-SSA1-1993,.....	104
4.4.3 NOM-037-ECOL-1993,	105
4.4.4 NOM-EM-167-SEMARNAT-2016.....	106
4.5 NOM-041-SEMARNAT-2015	107
4.4.6 NOM de los Óxidos de Nitrógeno (NOx).....	109
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y OBSERVACIONES.....	110
5.1 Bióxido de Nitrógeno (NO ₂).....	112
5.1.1 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico, hora en todas las estaciones de la RAMA	112
5.1.1.1 Concentraciones del NO ₂ , por estación de monitoreo atmosférico y hora, en todas las estaciones de la RAMA en el año 2011	112
5.1.1.2 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico y hora, en todas las estaciones de la RAMA en el año 2012	114
5.1.1.3 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico y hora en todas las estaciones de la RAMA en el año 2013	116
5.1.1.4 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico y hora en todas las estaciones de la RAMA en el año 2014	117
5.1.1.5 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico y hora en todas las estaciones de la RAMA en el año 2015	118
5.1.1.6 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico y hora, en todas las estaciones de la RAMA en el año 2016	120

5.1.2 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA	122
5.1.2.1 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2011	122
5.1.2.2 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2012	124
5.1.2.3 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2013	126
5.1.2.4 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2014	128
5.1.2.5 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2015	129
5.1.2.6 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2016	131
5.1.3 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA.....	133
5.1.3.1 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2011	133
5.1.3.2 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2012	135
5.1.3.3 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2013	137
5.1.3.4 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2014	138
5.1.3.5 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2015	139
5.1.3.6 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2016	141
5.1.4 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico, año y hora en el periodo 2011 -2016.....	142
5.1.4.1 Concentraciones de NO ₂ , por horas, de todas la estaciones de la RAMA, en el periodo 2011-2016.....	142
5.1.4.2 Concentraciones de NO _x por meses, de todas la estaciones de la RAMA, en el periodo 2011-2016.....	144
5.1.4.3 Concentraciones de NO ₂ , de todas la estaciones de la RAMA, en el periodo 2011-2016.....	147
5.2 Relación de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno y la Radiación Solar como precursor del Ozono.	149
5.2.1 Asociación entre variables	153

5.2.2 Correlación lineal simple.....	154
5.2.2.1 Coeficiente de correlación lineal de Pearson.....	155
CONCLUSIONES	157
RECOMENDACIONES	162
Bibliografía	165

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Principales Gases de Efecto Invernadero.....	33
Tabla 1.2. Las diez Aglomeraciones urbanas más pobladas de América Latina....	34
Tabla 1.3 Lineamientos de Gases contaminantes para la evaluación de la calidad del aire, Noviembre 1982.....	35
Tabla 1.4 Estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico y parámetros que mide	37
Tabla 1.5 Tabla Histórica: números de días que se superó la norma de los contaminantes.....	38
Tabla 1.6. Empresas registradas en el SIEM.....	41
Tabla 2.1. Descripción de los principales contaminantes atmosféricos químicos y sus fuentes.....	49
Tabla 2.2 Número de días fuera de norma, por contaminantes y por año.....	75
Tabla 4.1.Comparación de las directrices de la OMS sobre calidad del aire y las NOM en México y Estados Unidos.....	94
Tabla 4.2. Instituciones responsables de la vigilancia de las políticas públicas en materia de calidad del aire.....	95
Tabla 4.3. Inventario de Emisiones de fuentes puntuales para los NOx, en el Valle de Toluca.....	100
Tabla 4.4. Niveles máximos permisibles de emisión de Óxidos de Nitrógeno, ppm, en los equipos existentes a la entrada en vigor de la NOM.....	103
Tabla 4.5 Límites máximos permisibles de emisión de NO ₂ , para vehículos que utilizan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diésel.....	107
Tabla 4.6 Límites máximos permisibles de emisiones de NOx, del método dinámico.....	108
Tabla 4.7 NOM más relevantes de los Nox.....	109
Tabla 5.1. Promedio de la Velocidad del Viento, por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.....	145

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Estaciones de medición de la RAMA-ZMVT.....	21
Figura 1.2 Vehículos registrados en 2016, de los siete municipios para la gestión de la calidad del aire, de la ZMVT.....	40
Figura 1.3 Implicación del NO ₂ en la formación de contaminantes secundarios perjudiciales en la atmósfera.....	42
Figura 1.4. Formación de Ozono (O ₃).....	43
Figura 2.1. Clasificación de los contaminantes por su estado físico.....	51
Figura 2.2. Escala para valores IMECA en la ZMVT.....	55
Figura 2.3. Efecto Invernadero.....	57
Figura 2.4. Ángulos de la Radiación solar durante todo el año.....	60
Figura 2.5. Contaminantes atmosféricos naturales y antropogénicos más importantes.....	62
Figura 2.6. Origen antropogénico de los NO _x por sectores.....	67
Figura 2.7 Reacciones de los NO _x durante el día.....	70
Figura 2.8 Contribución porcentual del NO _x por sector.....	73
Figura 2.9 Representación espacial de las concentraciones (promedio de los máximos diarios).....	74
Figura 2.9.1 Estaciones de medición de la RAMA-ZMVT.....	80
Figura 3.1. Mapa de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.....	83
Figura 3.2 Mapa de los municipios considerados para la gestión de la calidad del aire de la ZMVT.....	84
Figura 3.3 Tipos de clima de la ZMVT, resaltando los siete municipios representativos para la Calidad del Aire.....	86
Figura 3.4 Climograma de los siete municipios de gestión de la calidad del aire en la ZMVT, con base en sus estaciones meteorológicas.....	88
Figura 3.5 Vientos predominantes de la ZMVT.....	89
Figura 4.1 Integración del Programa para mejorar la calidad del aire Valle de Toluca 2012–2017.....	101

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 5.1.1.1 Concentración de NO ₂ , por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2011.....	112
Gráfica 5.1.1.2 Concentración de NO ₂ , por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2012.....	114
Gráfica 5.1.1.3 Concentración de NO ₂ , por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2013.....	116
Gráfica 5.1.1.4 Concentración de NO ₂ , por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2014.....	117
Gráfica 5.1.1.5 Concentración de NO ₂ , por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2015.....	118
Gráfica 5.1.1.6 Concentración de NO ₂ , por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2016.....	120
Gráfica 5.1.2.1 Concentración de NO ₂ , por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2011.....	122
Gráfica 5.1.2.2 Concentración de NO ₂ , por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2012.....	124
Gráfica 5.1.2.3 Concentración de NO ₂ , por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2013.....	126
Gráfica 5.1.2.4 Concentración de NO ₂ , por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2014.....	128
Gráfica 5.1.2.5 Concentración de NO ₂ , por meses, de todas las estaciones de la RAMA-MVT en el año 2015.....	129
Gráfica 5.1.2.6 Concentración de NO ₂ , por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2016.....	131
Gráfica 5.1.3.1 Concentración de NO ₂ , de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2011.....	133
Gráfica 5.1.3.2 Concentración de NO ₂ , de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2012.....	135
Gráfica 5.1.3.3 Concentración de NO ₂ , de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2013.....	137
Gráfica 5.1.3.4 Concentración de NO ₂ , de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2014.....	138
Gráfica 5.1.3.5 Concentración de NO ₂ , de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2015.....	139

Gráfica 5.1.3.6 Concentración de NO ₂ , de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2016.....	141
Gráfica 5.1.4.1 Concentración de NO ₂ , por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.....	142
Gráfica 5.1.4.2 Concentración de NO ₂ , por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.....	144
Gráfica 5.1.4.3 Concentración de NO ₂ , de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.....	147
Gráfica 5.2.1 Concentración de O ₃ , por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.....	150
Gráfica 5.2.2 Concentración de NO ₂ , por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.....	151
Gráfica 5.2.3 Concentración de Radiación Solar, por horas, de cuatro estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.....	152
Gráfica 5.2.1.1 Asociación entre variables, NO ₂ y O ₃ en el periodo 2011–2016, en las estaciones de la RAMA-ZMVT.....	153
Gráfica 5.2.2.1 Correlación entre variables, NO ₂ y O ₃ , en el periodo 2011-2016, en las estaciones de la RAMA-ZMVT.....	154

Introducción

En los últimos años las zonas industriales cercanas a la zona de estudio de la RAMA-ZMVT se han expandido, ocasionado un aumento del NO₂ (SEMARNAT, 2000), el cual tiene grandes efectos ambientales y en la salud humana, ya que depende de la Radiación Solar, temperatura, emisión de contaminantes, tiempo transcurrido de las emisiones, por lo que sufre procesos de reconversión durante el día y la noche produciendo compuestos tóxicos, lo que representa un riesgo para la calidad del aire.

Es por ello que la presente investigación tiene como objetivo general analizar la relación de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno (NO₂), y la Radiación Solar (RS), en el periodo 2011–2016 con base en datos de la RAMA-ZMVT; para conocer si existe un aumento en la concentración y una relación con el Ozono (O₃).

Asimismo, se pretende observar el comportamiento que presenta este gas, su impacto al encontrarse en altas concentraciones, así como la funcionalidad de las normas que controlan y regulan las emisiones del NO₂.

En este sentido, los objetivos particulares de esta investigación se centran en primer lugar en analizar los promedios diarios, mensuales y anuales de las concentraciones de NO₂; analizar las concentraciones de NO₂ en horarios diurnos y nocturnos, en el periodo 2011–2016, con los datos obtenidos de la RAMA-ZMVT; y en segunda instancia en analizar las concentraciones de Radiación Solar y Ozono en horarios diurnos y nocturnos, así como analizar la relación del comportamiento del NO₂ y la RS como precursor del O₃, en el periodo 2011–2016, con base en datos de la RAMA-ZMVT.

Los objetivos de la investigación se pretenden cumplir obteniendo la información por medio de datos reportados por las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de Toluca (RAMA-ZMVT), las cuales reportan los municipios de Lerma, Metepec, San Mateo Atenco, Toluca, Ocoyoacac, Xonacatlán y Zinacantepec, ya que para la gestión de la calidad del aire solo son considerados

éstos siete municipios, debido a su significativa contribución en la contaminación atmosférica por su dinámica e interacción socioeconómica.

En los últimos años; se ha observado el efecto que tienen los Gases de Efecto Invernadero en relación a los problemas del calentamiento global; debido a que tienen como propiedad absorber y emitir radiación infrarroja a la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes, provocando el efecto invernadero. Los principales GEI presentes en la atmósfera son vapor de agua (H_2O), Dióxido de Carbono (CO_2), Óxido Nitroso (N_2O), Metano (CH_4), Ozono (O_3), además de los antropogénicos como Halocarbonos y otras sustancias con contenido de Cloro y Bromo (Benavides & León, 2007).

Sin embargo a pesar que el NO_2 , no es un GEI, el Índice de Desempeño Ambiental en su actualización 2016, añadió el indicador para Bióxido de Nitrógeno, en la categoría de calidad del aire, debido a que este gas es especialmente tóxico para los seres humanos, lo cual tuvo como resultado mejorar la calidad del aire (Piedra, 2016).

Asimismo de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental EPA, 1999 la concentración del NO_2 , es proporcional al aumento del efecto invernadero, ya que tiene la capacidad de absorber mayor cantidad de Radiación Solar y producir compuestos tóxicos al reaccionar con la luz, provocando un aumento en la temperatura.

El N_2O junto con el Óxido Nítrico (NO) y NO_2 , son conocidos en conjunto como Óxidos de Nitrógeno (NO_x), los cuales son contaminantes primarios de gran trascendencia en los problemas de contaminación de las ciudades; sin embargo solo se tiene interés como contaminantes para el NO y al NO_2 , ya que están implicados en la contaminación del aire. El NO_2 es un compuesto químico gaseoso derivado de los procesos de combustión y formado por la combinación de un átomo de nitrógeno y dos de oxígeno, el cual presenta un riesgo para la salud y medio ambiente, ya que es un gas tóxico e irritante (Geoambiental, 2013).

Las emisiones de NO_2 producen compuestos tóxicos, causando lluvia acida, formación de smog fotoquímico, destrucción de la capa de Ozono, así como tos,

dolores de cabeza y desordenes gastrointestinales por la exposición crónica de bajas dosis, que pueden producir hasta la muerte (PRTR España, 2014).

De acuerdo con Bonn (2003), la contaminación atmosférica es resultado del proceso de industrialización de las grandes concentraciones urbanas, por la emisión de gases provenientes de fuentes móviles y fijas, los cuales implican un proceso de combustión que generan gases contaminantes tales como Dióxido y Monóxido de Carbono, NO_x, Azufre, entre otros contaminantes; siendo el sector transporte e industrial la fuente principal de emisiones de GEI.

En los años noventa, el Instituto Nacional de Ecología (INE), realizó el primer inventario de emisiones totales en la ZMVT, para conocer los responsables de las emisiones de los contaminantes en la atmósfera, lo que tuvo como resultado que el 68% corresponde al transporte, 25% erosión de suelos, 4% a servicios y el 3% corresponden a la industria. Sin embargo, como consecuencia del aumento de la población y el crecimiento de la mancha urbana, la calidad del aire en las ciudades se ha modificado debido a que se ha convertido en un importante punto de desarrollo económico, por la cercanía que se tiene con la Ciudad de México, lo que ha propiciado la expansión de la zona industrial y los municipios que la rodean (SEMARNAT, 2000). Derivado de estos inventarios, se dio a conocer que el NO₂, es uno de los gases más contaminantes de la atmósfera, el cual es producido principalmente por combustión automotriz e industrial, por lo que debido a sus grandes efectos ambientales y por la afectación a la salud humana resulta importante disminuir las emisiones provenientes de estos sectores.

De acuerdo con Galán & Fernández (2006), durante el día, el NO₂, sufre un proceso de reconversión, permitiendo la generación de O₃, mientras que en la noche al existir ausencia de luz Solar, el NO₂ se convierte en Trióxido de Nitrógeno (N₂O₃) que reacciona con el NO₂ para generar Ácido Nítrico (HNO₃), el cual provoca lluvia ácida, tomando esta base, será entonces que ¿Las concentraciones de NO₂, incrementarán en horarios diurnos y disminuirán en horarios nocturnos?, las evidencias de este estudio indican que sí, debido a que el parque vehicular y la

Radiación Solar se presenta durante el día, sin embargo los resultados de Díaz Cordero (2012), cuestionan la propuesta ya que el NO_2 depende de la intensidad de luz Solar, temperatura, emisión de contaminantes y tiempo transcurrido de las emisiones, siendo este caso podría ser que ¿Las concentraciones de NO_2 , se encuentren relacionadas con diferentes factores en determinados horarios durante el día y la noche, en el periodo 2011-2016, de acuerdo con los datos de la RAMA-ZMVT?

En la actualidad la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de Toluca (RAMA-ZMVT) se encarga de evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire, para brindar información en caso de situaciones de alerta, alarma y emergencia, así como de observar la tendencia de los contaminantes a lo largo del tiempo a través de reportes diarios, mensuales y anuales (SMA, 2014).

Desafortunadamente los antecedentes presentados hasta el momento muestran que el estudio de las concentraciones de NO_2 en la zona de estudio es poco explorado, por ello se busca contribuir con información acerca del comportamiento de las concentraciones de los NO_2 , con base en los datos obtenidos de la RAMA-ZMVT, además de informar a la población los efectos que pudieran provocar, así como un marco teórico que nos ayude a explicar los procesos urbanos que las generan, ya que las concentraciones de NO_2 , no solo son importantes en la atmósfera por sus efectos en la salud, sino también porque genera efectos indirectos fundamentales en el cambio climático, ya que son precursores del Ozono en la troposfera, además de la formación de contaminantes que contribuyen en la producción de aerosoles, ácidos, nitratos, y varios compuestos orgánicos nitrogenados (SEDESU, 2016).

Es por ello que esta investigación pretende poder probar, que las mayores concentraciones de Bióxido de Nitrógeno se presentaran en horarios matutinos, y debido a la Radiación Solar causaran un aumento en la generación de Ozono en el periodo 2011–2016; mediante un análisis de los promedios diarios, mensuales y anuales de las concentraciones de NO_2 , RS y O_3 en horarios diurnos y nocturnos.

Por otra parte la presente investigación consta de seis capítulos, en donde el primero presenta los antecedentes históricos y las distintas medidas de control acerca del estudio del NO₂ en el ámbito internacional, nacional y local, además de cómo es su distribución en el mundo, las acciones y políticas que han tomado distintos países para mejorar la calidad del aire.

En el capítulo 2, se presenta un marco de definiciones donde se describen de manera general los conceptos principales relacionados a efecto invernadero, contaminantes atmosféricos, NO₂, Radiación Solar y la RAMA, además de su origen y efectos en la salud y medio ambiente.

El capítulo 3, aborda las características topográficas, socioeconómicas y naturales de los municipios reportados en los datos de la RAMA-ZMVT, que contribuyen significativamente a la contaminación atmosférica, y en donde se encuentran las estaciones de monitoreo atmosférico, así como la localización de las distintas áreas urbanas, al igual que el diseño de la RAMA, su ubicación, operación y distribución de las estaciones que la conforman. Mientras que el capítulo 4, profundiza en las leyes y normas aplicables para el control, emisión y evaluación del NO₂, describiendo el funcionamiento de las políticas respecto a su posible o no cumplimiento, así como las dependencias encargadas de su acatamiento presentadas en los cuatro niveles de gobierno: internacional, federal, municipal y local.

El capítulo 5, presenta un análisis cuantitativo sobre los resultados del comportamiento del NO₂, en el periodo 2011–2016, con base en las estaciones de la RAMA-ZMVT, mediante promedios anuales, mensuales y diarios; además de una correlación de variables cuantitativas entre el NO₂ y la Radiación Solar, para encontrar relación causal que existe entre ellas, derivado de la observación del comportamiento diario del NO₂.

Por último el capítulo 6 contiene las conclusiones y recomendaciones finales de la investigación realizada, con base en los resultados obtenidos del análisis del comportamiento de las concentraciones de NO₂; con la finalidad de priorizar las

acciones para mejorar la calidad del aire por medio de información verídica y confiable.

Estudiar el NO₂ resulta de gran importancia, para observar cual ha sido el aumento de las concentraciones atmosféricas, lo cual impacta directamente en la salud, ocasionando irritación del sistema respiratorio y ocular, enfermedades del corazón, problemas respiratorios, cansancio, náuseas y hasta provocar la muerte, además de los problemas ambientales como la lluvia ácida y smog (ATSDR, 2002). Por lo que conocer cuáles son las concentraciones en los últimos años, como ha sido el comportamiento de este contaminante, su relación con la Radiación Solar y el Ozono, así como el cumplimiento y regulación de las normas que lo regulan resulta de gran importancia.

1. Metodología

1.1 Alcance de la investigación

Para definir el alcance de la investigación se utilizó la clasificación para los tipos de investigación; los cuales pueden ser exploratorios, descriptivos y correlacionales (Hernández, 2010).

La presente investigación se pretende sea:

1.1.1 Exploratoria

Debido a que la variable estudiada en esta investigación es diferente a otros estudios realizados, lo que la ubica dentro una problemática particular y crea un antecedente para nuevos estudios.

1.1.2 Descriptiva

Puesto que llevó a cabo la recolección de datos y análisis de las concentraciones del NO₂, del año 2011-2016.

1.1.3 Correlacional

En vista de que va a analizar las concentraciones del NO₂ para siete estaciones; así como la relación existente entre NO₂ y RS, como precursor de O₃.

1.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación se considera **no experimental**, debido a que no se realizó el manejo de la variable porque los efectos ya habían ocurrido; es por eso

que la variable se trabaja a partir de las bases de datos en la zona de estudio, para ser analizadas posteriormente (Hernández, 2010).

Así mismo debido a que la recolección de datos se analizaron en un tiempo determinado en función de la relación existente entre ellas, la investigación fue **transeccional o transversal**.

1.3 Población de estudio

La población de estudio sobre la que se desarrolla la investigación, se constituye por los municipios de la ZMVT en donde se encuentran distribuidas las estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA-ZMVT, ya que éstos contribuyen significativamente a la contaminación atmosférica por su dinámica e interacción socioeconómica (SEMARNAT, 2007).

En la presente investigación se planeó recolectar los datos de las emisiones de NO₂ y la Radiación Solar, tomando en cuenta, la población de estudio mencionada, con base en los datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT (**RAMA-ZMVT**).

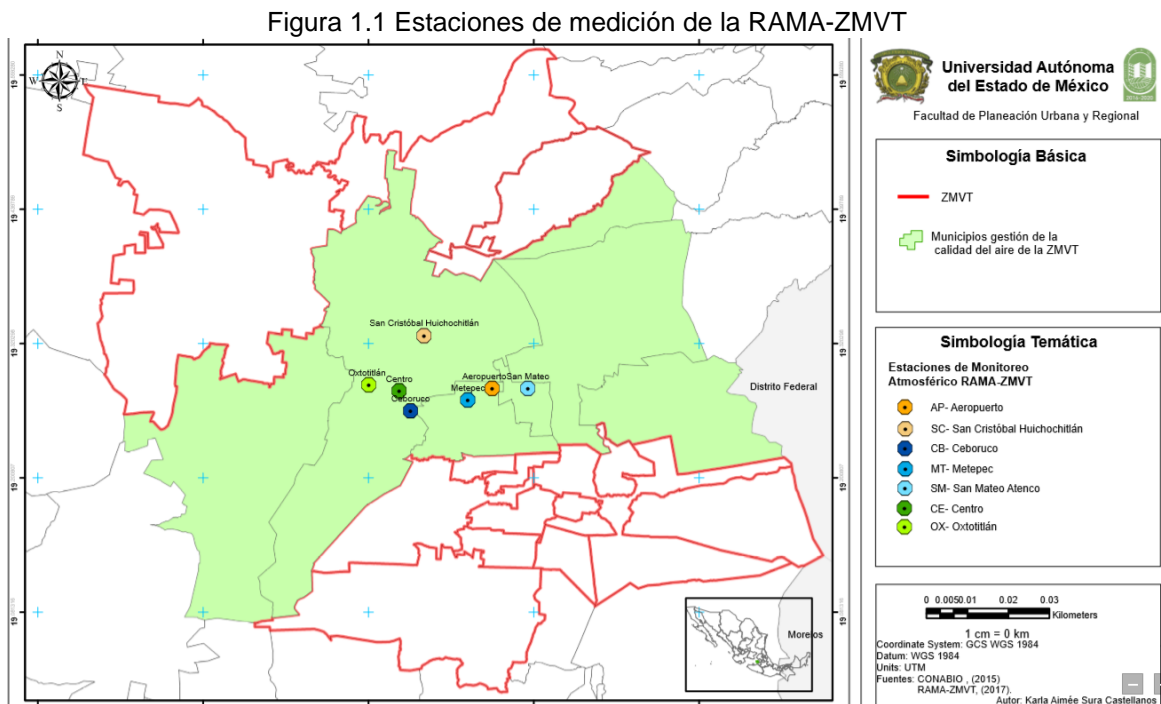
1.4 Instrumento de medición

El instrumento utilizado en esta investigación fue la base de datos de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA-ZMVT), la cual maneja siete estaciones fijas y una móvil de medición distribuidas en municipios de la ZMVT, desde 1998 (Muñoz, 2015).

1.5 Recolección de datos

Se llevó a cabo la recolección de datos referentes a las concentraciones de NO_2 , en las 7 estaciones de la RAMA-ZMVT, las cuales se dividen en tres secciones dentro de la ZMVT, como se muestran a continuación (Ver figura 1.1):

1. **Zona Centro:** Toluca Centro y Oxtotitlán
2. **Zona Norte:** Aeropuerto y San Cristóbal Huichochitlán
3. **Zona Sur:** Metepec, Ceboruco y San Mateo Atenco



Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO, 2015.

Por otra parte los valores de Radiación Solar se recolectaron en cuatro estaciones las cuales son de Toluca Centro, Aeropuerto, San Cristóbal Huichochitlán y Metepec.

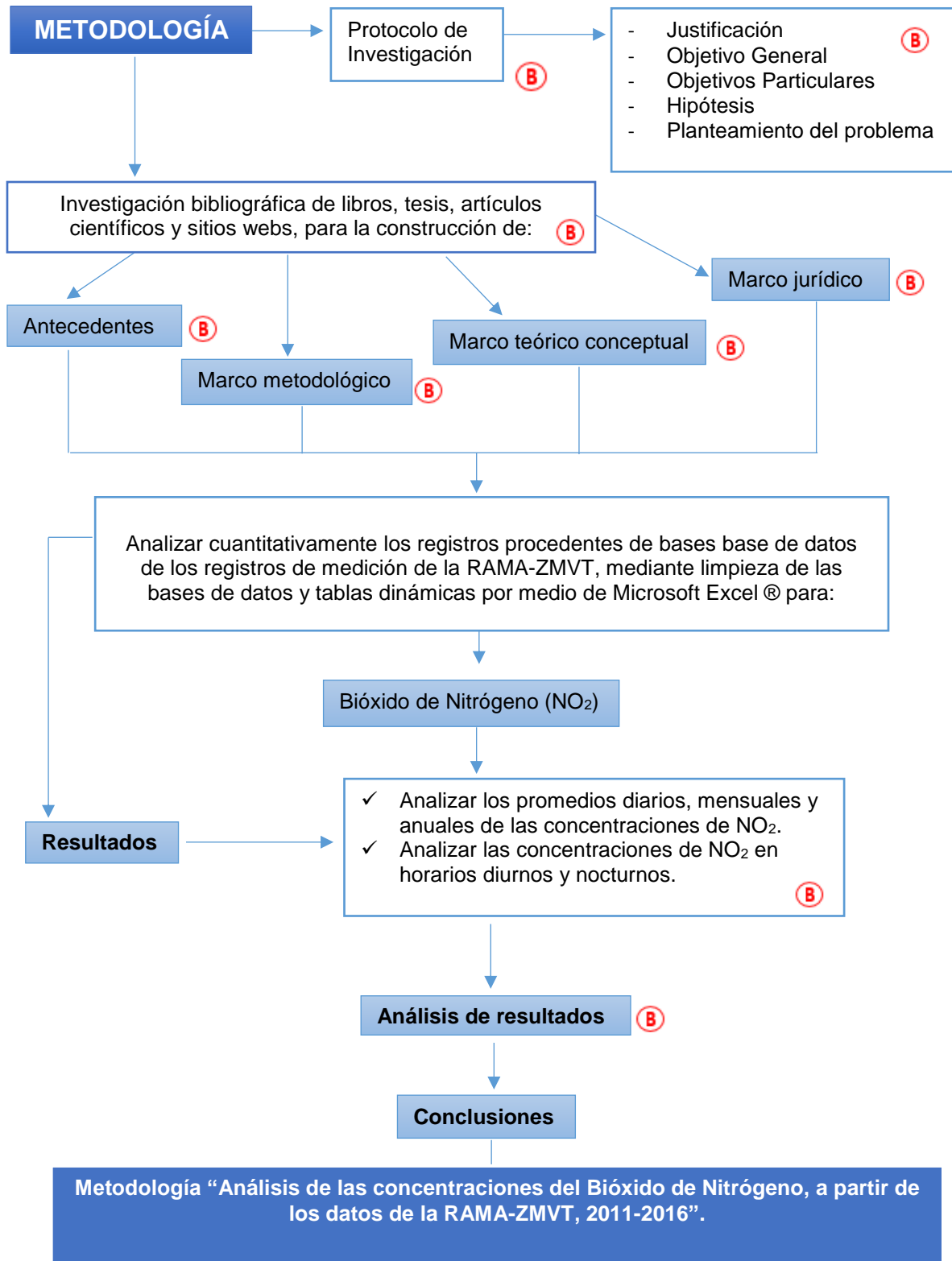
1.6 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos recolectados, fue realizado por el programa Microsoft Excel para Windows.

Debido a que el alcance principal de la investigación es exploratoria y descriptiva, se partió de la recolección de datos de los promedios diarios, mensuales y anuales de las concentraciones de NO₂ de la población de estudio.

Posteriormente se realizó la descripción de la medición y análisis de las variables con base en los datos recabados.

1.7 Procedimiento metodológico



NOTA: Bibliografía.

1.7.1 Antecedentes

Se buscaron investigaciones que se han realizado al respecto del presente tema y referentes al NO₂ en relación con sus efectos en el medio ambiente y salud, contaminación atmosférica, cambio climático, así como los distintos factores que propician su generación.

Por otra parte se investigaron los antecedentes históricos y actuales respecto a las medidas de control del NO₂, presentados de lo general a la particular desde un ámbito internacional hasta el local, haciendo énfasis en el comportamiento del NO₂; y basados en esta búsqueda se compararon los diferentes valores y aplicaciones de las normas referentes al Bióxido de Nitrógeno.

El estudio del NO₂, es un tema en el que se necesita profundizar su estudio, principalmente por la expansión de la ciudad de Toluca y de las zonas industriales en los últimos años, lo cual trae consigo el incremento de concentraciones de NO₂, principalmente a causa de procesos de combustión derivados del sector transporte e industria.

1.7.2 Marco Teórico

Se llevó acabo el análisis de todos los conceptos que se manejan en el proceso de la investigación, relacionados con el NO₂ tales como: Cambio Climático, contaminación atmosférica, efecto invernadero, contaminantes atmosféricos, NO_x, Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), y debido a que no existe suficiente información del tema de la zona de estudio en específico acerca del NO₂, se realizó la construcción de un marco de definiciones con los principales conceptos y la información más relevante acerca de los procesos relacionados con el estudio de NO₂ y el impacto en sus diferentes áreas.

1.7.3 Marco contextual

Se estudió y llevó a cabo el análisis de todos los conceptos que se manejan en el proceso de la investigación, así como la descripción de las características topográficas, socioeconómicas y naturales correspondientes de la zona de estudio tales como localización, actividades económicas y clima de la zona de estudio, para lograr entender el comportamiento del NO₂; asimismo la importancia que tienen algunas características para la dispersión o disminución de este gas tales como la dinámica de vientos.

1.7.4 Marco jurídico

Se revisaron, analizaron e investigaron el conjunto de instrumentos de carácter legal, ya sean normas, leyes, reglamentos y decretos, bajo las cuales se rige la calidad del aire en función del NO₂.

Asimismo las leyes y normas aplicables para el control, emisión y evaluación del NO₂, para conocer el funcionamiento de la ley respecto a su posible o no cumplimiento, además de las instituciones encargadas de su acatamiento en la ZMVT.

Primeramente se investigó la relación de las leyes en el ámbito internacional, nacional, federal, municipal y de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), y posteriormente se llevó a cabo un análisis y relación del material legal que rigen y controlan las emisiones de Dióxido de Nitrógeno en los diferentes niveles de gobierno.

1.7.5 Analizar base de datos

Se analizaron las bases de datos en función de los registros de la medición del comportamiento del NO₂, en el periodo 2011–2016, obtenidos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT).

El análisis cuantitativo se realizó con datos procedentes de bases de la RAMA-ZMVT; las cuales fueron revisadas y depuradas de datos inválidos ocasionados por discrepancias en los límites de los diferentes contaminantes y por problemas técnicos a lo largo del periodo de estudio; a través de Microsoft Excel ®.

Posteriormente a la limpieza de las bases de datos se realizaron tablas dinámicas con los promedios anuales, mensuales y diarios del NO₂, para lograr observar de manera conjunta su comportamiento.

Asimismo a través de la RAMA-ZMVT, se obtuvieron también las bases de datos de Radiación Solar, Ozono y Velocidad del Viento, las cuales llevaron el mismo proceso de revisión y depuración que el NO₂ en el periodo 2011–2016, para posteriormente ser trabajadas en tablas dinámicas, a través de promedios anuales, mensuales y diarios; sin embargo para el caso de Radiación Solar y Ozono también fue realizada una asociación entre variables, correlación lineal simple y el coeficiente de correlación lineal de Pearson a través de Microsoft Excel ® para posteriormente lograr comprobar de manera cuantitativa la de relación existente entre las variables.

1.7.6 Resultados

Derivado del análisis de las bases de datos por medio de promedios diarios, mensuales y anuales de las concentraciones de NO₂, procedentes de las bases de datos generadas a partir de la RAMA-ZMVT, se muestra el comportamiento del NO₂, mediante la generación de gráficas, en las cuales se puede observar los cambios que han presentado las concentraciones durante el periodo de estudio, de manera anual, durante el día y los meses.

Por otra parte procedente del análisis de las bases de datos de RS se presenta una correlación de variables cuantitativas entre el NO₂ y la RS, para encontrar la influencia que existe entre ellas; lo cual permite comprobar o negar la hipótesis de la investigación.

1.7.7 Análisis de resultados

Con base en el análisis de los datos recabados y de acuerdo con los resultados de la investigación se observó el comportamiento durante todo el periodo del NO₂, de manera diaria, mensual y anual, expresada mediante gráficas que muestran patrones definidos y los resultados de la compilación de datos durante el periodo.

Por otra parte se analizó la influencia de la formación de O₃, en relación con la RS y NO₂, para analizar la correlación existente entre ellos y conocer si existe una relación directa en el aumento de la concentración de NO₂ y el O₃ en la zona de estudio durante el periodo 2011–2016. Asimismo derivado del resultado de la correlación entre variables que se realizó empleando datos de tipo cuantitativo, mediante bases de datos generadas a partir de la RAMA-ZMVT, se desarrolló un análisis comparativo diacrónico que consiste en una asociación de variables y una correlación lineal simple; y con base en los resultados del análisis se concluye.

1.7.8 Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos de la investigación, análisis y correlación de variables, se realizan las conclusiones finales de la investigación, donde se proyecta el análisis de las concentraciones de NO₂, en el periodo 2011–2016, de las concentraciones obtenidas por las estaciones de la RAMA-ZMVT.

En primera instancia se realizaron las conclusiones de los resultados del análisis anual de las concentraciones de NO₂, durante todo el periodo; seguidos por los resultados del análisis mensual de las concentraciones de NO₂; y por último se

realizaron los análisis de los promedios, obtenidos de las bases de datos de la RAMA-ZMVT, que anteriormente fueron analizadas. Y basándonos en estos resultados y en la información bibliográfica investigada, se evaluó la propuesta inicial de la hipótesis.

Por otra parte se realizaron las conclusiones del análisis de los resultados de la causalidad entre las concentraciones de NO₂ y Radiación Solar, como precursores de O₃, con lo que se evalúa posteriormente la hipótesis correspondiente. Asimismo se realizaron las conclusiones del análisis de la comparación de los límites establecidos por organizaciones internacionales en la normatividad encargada de regular el NO₂ y para finalizar se presentan las recomendaciones de toda la investigación.

CAPÍTULO 1.

ANTECEDENTES

“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; los efectos de la contaminación del aire sobre los ecosistemas son resultado de los contaminantes secundarios, como la lluvia ácida (SEMARNAT, 2013)”.

Este capítulo tiene como finalidad presentar los antecedentes históricos al respecto de las distintas medidas de control acerca del estudio del NO₂; el cual se encuentra integrado por dos partes, en la primera sección se presentan los antecedentes desde el ámbito internacional al local, con base en las estaciones de la RAMA-ZMVT, y el comportamiento NO₂; y en la segunda sección se encuentra el epílogo con los principales criterios que serán debatidos a lo largo de la tesis.

1.1 Contexto internacional

A raíz de los cambios del sistema climático por las concentraciones de GEI, en 1972 se establece el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el cual tiene como finalidad lograr una comprensión de las causas e impactos del Cambio Climático en la economía y el bienestar humano (UNEP, 2015).

Pero fue hasta 1988, que la comunidad internacional reaccionó creando el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), por iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el PNUMA, el cual presenta el primer informe de evaluación, en el cual evidencia por primera vez los efectos del Cambio Climático y fomenta acciones para combatirlo (IPCC, 2008).

Los informes del IPCC se utilizaron como base para las decisiones adoptadas en el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), y desempeñaron un papel importante en las negociaciones que dieron lugar al Protocolo de Kyoto en 1992, siendo uno de los instrumentos jurídicos internacionales más importantes destinado a luchar contra el Cambio Climático, ya que tuvo como objetivo reducir los principales GEI, responsables del calentamiento global, los cuales son: Óxido nitroso (N₂O), Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF₆) (CNMA, 1998). Así mismo en la Cumbre de Poznan en Polonia, 2008, se consideró que el Cambio Climático se debe a la emisión de los GEI mencionados,

por el uso de combustibles fósiles que provienen del sector transporte e industria los cuales aumentaron a partir de 1970.

En relación con los retos y desafíos del Cambio Climático de acuerdo con Díaz Cordero, (2012), para el siglo XXI, se concluye que se necesita la estabilización de los GEI, desarrollar un marco normativo posterior a Kyoto 2012, e implementar el uso de tecnologías para abatir el Cambio Climático y programas de mitigación.

Es por ello y a la necesidad urgente de resolver el importante desfase que existe entre las promesas de mitigación de las emisiones de los GEI, que se aprobaron en el Acuerdo de Paris en Diciembre del 2015, con el fin de mantener para el 2020, el aumento de la temperatura media mundial por debajo de los 2 °C, y limitar el aumento de la temperatura a 1,5 °C (CMNUCC, 2015); consciente de que el Cambio Climático representa una amenaza con efectos potencialmente irreversibles para el planeta, por lo que exige la cooperación de todos los países y su participación en una respuesta para acelerar la reducción de las emisiones mundiales de gases contaminantes (CMNUCC, 2015).

1.2 México y el mundo

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), define al Cambio Climático como cualquier alteración del clima, debido a la variabilidad de temperatura por actividades naturales o antropogénicas y a procesos externos, tales como la Radiación Solar, variaciones en los parámetros orbitales de la Tierra, los movimientos de la corteza terrestre y la actividad volcánica. El IPCC busca informar sobre las consecuencias a largo plazo que manifiesta el Cambio Climático y que pueden verificarse con las bases de datos climáticos (Benavides & León, 2007).

Los procesos industriales son una de las principales causas antropogénicas que ocasionan un cambio en el clima, debido a la quema de combustibles fósiles como: petróleo, gasolina, gas, derivados y entre otros; los cuales producen gases que se liberan a la atmósfera y cambian su composición. Es por ello que el IPCC busca que los países se comprometan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, realizando sus procesos industriales con más eficiencia y limpieza. (Conde, 2006).

Algunos de los gases que son regulados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, son los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), los cuales son emitidos principalmente por procesos industriales y por el sector transporte; asimismo debido a que en esta clasificación se incluyen hidrocarburos, como algunos compuestos que contienen átomos de Oxígeno, entre ellos se encuentra el NO_2 , por su importante papel en la formación de O_3 y por los efectos indirectos fundamentales en el cambio climático que esto genera. (Martínez & Fernández, 2004).

Estudios hechos desde hace más de 25 años, en México, demuestran que debido al crecimiento de actividades industriales, así como quema de combustibles fósiles, los impactos posibles de un cambio climático son considerables, por lo que deben de tomarse medidas de control de los contaminantes más dañinos para la calidad del aire, así como para la salud de la población, tales como el NO_2 , el cual ha presentado un aumento importantes en los últimos años a nivel mundial (Conde, 2006).

El Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008 menciona que el calentamiento global es evidencia del exceso de la capacidad de carga de la atmósfera del planeta por las enormes acumulaciones de GEI, que atrapan el calor en la misma (Tabla 1.1), (Díaz Cordero, 2012).

Tabla 1.1 Principales Gases de Efecto Invernadero

Gases de Efecto Invernadero	Daño a la atmosfera
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Responsable del 60% del aumento del efecto invernadero responsable del Cambio Climático
Óxido Nitroso (N ₂ O)	Una molécula de N ₂ O es 200-300 veces más efectiva que una molécula de CO ₂ en efecto invernadero
Metano (CH ₄)	Contribuye entre 15-20% en el incremento del efecto invernadero
Ozono (O ₃)	Provoca daños en la flora y materiales
Hidrofluorocarbonos (HCFCs)	Destruyen la capa de Ozono y contribuyen al efecto invernadero

Fuente: Elaboración propia con base en Inventario Nacional de emisiones de Gases de Efecto Invernadero, (INE, 2006).

Por otra parte debido a los problemas climáticos indirectos que puede ocasionar el NO₂; también son primordiales en la contaminación atmosférica; ya que de acuerdo con Lacasaña, et al., (1999), puede ser de carácter local o mundial, dependiendo la magnitud que tenga el foco de emisión, pudiendo afectar hasta el equilibrio del planeta y zonas alejadas. Los problemas ocasionados por la contaminación atmosférica tienen gran interés en el mundo por lo que se han propuesto diferentes medidas para combatirla; sin embargo a partir del siglo XX, la urbanización en los países latinoamericanos ha crecido exponencialmente, teniendo en la actualidad 10 grandes aglomeraciones urbanas con más de dos millones de habitantes (Tabla 1.2); entre ellas se encuentra la Ciudad de México, que también es de las ciudades más grandes del mundo, que de 1984 hasta 1993, incrementó el uso de vehículos a un ritmo acelerado de 42.3%, (Lacasaña, et al., 1999).

Tabla 1.2. Las diez aglomeraciones urbanas más pobladas de América Latina.

Aglomeraciones	Habitantes
1. Ciudad de México, México	20.137.000
2. Sao Paulo, Brasil	19.823.000
3. Buenos Aires, Argentina	13.602.000
4. Rio de Janeiro, Brasil	11.711.000
5. Lima, Perú	9.303.000
6. Bogotá, Colombia	8.759.000
7. Santiago, Chile	6.737.000
8. Belo Horizonte, Brasil	5.414.000
9. Caracas, Venezuela	5.209.000
10. Guadalajara, México	4.434.000

Fuente: Elaboración propia con base en las diez Aglomeraciones más pobladas de América Latina, (Eduardo, 2012).

Sin embargo de acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente (SMA), en México, a partir del 29 de Noviembre de 1982, la entonces Secretaria de Salubridad y Asistencia estableció lineamientos para determinar el criterio base para la evaluación de la calidad del aire de los gases más dañinos, en donde se encuentra el NO₂ (Tabla 1.3), (SMA , 1990).

Tabla 1.3 Lineamientos de contaminantes para la evaluación de la calidad del aire.

Contaminante	Criterio (Normal)
Monóxido de Carbono	1.3 ppm en 8 hrs
Bióxido de Azufre	0.13 ppm en 24 hrs
Bióxido de Nitrógeno (NO₂)	0.21 ppm en 1 hr
Ozono (O₃)	0.11 ppm en 1 hr
Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)	150 ug/m ³ en 24 hrs
Partículas suspendidas totales	275 ug/m ³ en 24 hrs
Plomo	1.5 ug/m ³ promedio de 3 meses

Fuente: Elaboración propia con base en el Programa Integral contra la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, (SMA , 1990).

El sector transporte es la principal fuente de emisiones de los GEI, así como del NO₂, ocasionado por la combustión de vehículos y seguido por las instalaciones de las grandes industrias, que de acuerdo con el artículo de Benavides & León, (2007), los GEI, tienen la capacidad de absorber y reemitir las radiaciones de onda larga que provienen del sol y la que refleja la superficie de la Tierra hacia el espacio, controlando el flujo de energía natural a través del sistema climático; sin embargo a pesar que el NO₂, no es considerado GEI, el clima debe de adaptarse de igual manera a las concentraciones de estos gases, lo que genera un aumento en la radiación infrarroja absorbida en la atmósfera, por intentar mantener el equilibrio de la misma, es por esto que se genera un Cambio Climático indirecto que trae como consecuencia mayor aumento en la formación de O₃, temperatura global, lluvia ácida, así como un impacto directo en, ecosistemas y salud humana (Benavides & León, 2007).

1.3 Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)

El monitoreo de emisiones en la ZMVT, inicia en 1975, principalmente para muestreo de partículas suspendidas y algunos contaminantes gaseosos (CENICA, 1996); en 1987, se incorporan las mediciones de Óxidos de Nitrógeno y Bióxido de Azufre en 3 de las 5 estaciones que se tenían establecidas; sin embargo fue hasta el año de 1993, que se puso en operación la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT (RAMA-ZMVT), la cual está integrada por siete estaciones distribuidas en tres zonas de la ciudad y con una unidad móvil de monitoreo; cada estación cuenta con equipo para realizar el monitoreo de los parámetros que definen la calidad del aire, que son: Partículas Suspendidas Totales (PST), O₃, Bióxido de Azufre (SO₂), NO_x, Hidrocarburos (HFC) y Monóxido de Carbono (CO), (SEMARNAT, 2000), (Tabla 1.3.1).

Además de medir los parámetros meteorológicos, la RAMA-ZMVT se encarga de crear medidas para controlar la contaminación, evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire y brindar información en caso de situaciones de alerta, alarma y emergencia, para dar a conocer el impacto que ejercen ciertos contaminantes sobre la población, así mismo desarrollar estrategias de control para prevenir problemas por contaminación, o bien, eliminarlos.

Tabla 1.4 Estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico y parámetros que mide.

No.	Zona	Estación	NOx	SO ₂	PM ₁₀	O ₃	CO	PM _{2.5}	Radiación Solar
1	Centro	Oxtotitlán (OX)	X	X	X		X	X	
2	Centro	Toluca – Centro (CE)	X	X	X	X	X	X	X
3	Sur	Metepec (MT)	X	X	X	X	X	X	X
4	Sur	San Mateo Atenco (SM)	X	X	X			X	
5	Norte	S.L. Tepaltitlán (CB)	X	X	X	X	X	X	
6	Norte	Aeropuerto (AP)	X	X	X	X		X	X
7	Norte	San Cristoal (SC)	X	X	X			X	

Fuente: Elaboración propia con base en el Segundo Informe de Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas 1997, (CENICA, 1997).

Por influencia de la RAMA-T, en 1993, el Instituto Nacional de Ecología (INE), realizó el primer inventario de emisiones totales en la ciudad de Toluca, para conocer los responsables de las emisiones de los contaminantes en la atmósfera, lo que tuvo como resultado que se producen 470 mil ton/año, de las cuales 68% corresponde al transporte, 25% erosión de suelos, 4% a servicios y el 3% corresponden a la industria (SEMARNAT, 2000).

El Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA), es un valor de referencia para informar a la población los niveles de contaminación en el aire y tomar las medidas adecuadas para proteger la salud; las concentraciones de los contaminantes se transforman en una escala 0 a 500 puntos; cualquier contaminante que sobrepasa los 100 puntos significa que ha rebasado la norma y en consecuencia se corren riesgos potenciales para la salud (SMA, 2007).

De acuerdo con el Primer Informe de Calidad del Aire para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, CENICA (1997), el número de días que se rebasó alguna de las normas fue de 60 días (17%); mientras que para el Segundo Informe en 1997, el número de días en que se rebasó alguna norma de calidad del aire fue de 30 días

(8%); no obstante en los dos años el nivel por arriba de los 150 puntos IMECA únicamente se alcanzó en un día (CENICA, 1997).

Tabla 1.5 Tabla Histórica: número de días que se superó la norma de los contaminantes de 1996 a 2005.

Año	Números de días que se superó la norma		
	NOx	PM ₁₀	O ₃
1996	0	-	24
1997	1	-	32
1998	1	57	32
2000	2	18	39
2002	1	81	20
2004	1	138	8
2005	0	173	22

Fuente: (Arce, 2011)

De acuerdo con los informes realizados por la Secretaria del Medio Ambiente, (1990), en la ZMVT, se presentan problemas de calidad del aire relevantes en lo referente a las PM₁₀, O₃ y para el caso del NO₂, mientras que el SO₂ como el CO no han presentado valores fuera de la norma durante dicho periodo.

El “Programa Aire Limpio para el Valle de Toluca 1997–2000” el cual es una iniciativa que surgió como respuesta a la necesidad de vivir en un ambiente limpio, para cumplir las normas de calidad de aire establecidas; incorpora proyectos y acciones para revertir el deterioro de la calidad del aire en la ZMVT, y aunque no se han presentado contingencias ambientales, si se han superado la normas en algunos días en los últimos años del NO₂ (SEMARNAT, 2000).

Como consecuencia del aumento de la población y el crecimiento de la mancha urbana en la ZMVT, el clima de la ciudad de Toluca se ha modificado (Méndez, et al., 2007), debido a que las variaciones atmosféricas se dan principalmente entre zonas urbanas y rurales, que a medida que crecen, aumenta la contaminación del

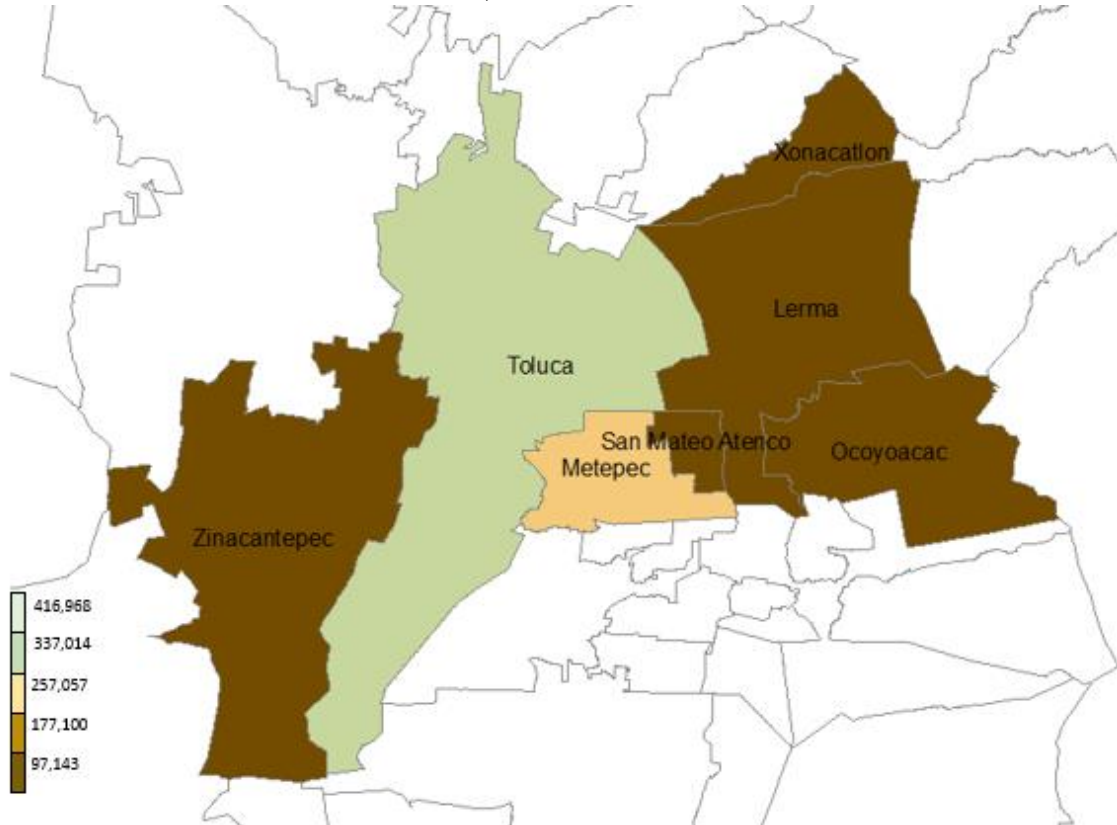
aire dando como resultado variación de la temperatura, reducción de vegetación y recursos naturales (Méndez, et al., 2007). Así mismo las horas pico identificadas de la ZMVT fueron en horarios diurnos de 6:00 a 8:30 horas y 12 a 16:00 horas; mientras que en horarios nocturnos de 18:00 a 20:30 horas (Contreras, 2013).

“La tasa anual de aumento de automotores es de 4.6%, la Ciudad de México registró 10.08 por ciento, y el Edomex, 28.6% (INE, 2006)”

El aumento del flujo vehicular de la ZMVT, no solo implica contaminación del aire, sino que la energía producida a través de los escapes, contribuye a elevar la temperatura ambiente de la ciudad y su periferia; por lo que de acuerdo con Méndez, et al., (2007), las anomalías climáticas se deben principalmente por el cambio del uso de suelo, deforestación, expansión urbana, abatimiento de mantos acuíferos y contaminación atmosférica (Méndez, et al., 2007).

De acuerdo con estudios realizados se estimó que el parque en circulación para el año 2009, en la zona fue de 500,553 vehículos, de los cuales el 61% son vehículos compactos y subcompactos, el 21% son camionetas, y el restante 18% son de tipo pick up; mientras que el índice de motorización fue de 327 vehículos por cada 1,000 habitantes (INECC, 2010).

Figura 1.2 Vehículos registrados en 2016, de los siete municipios para la gestión de la calidad del aire, de la ZMVT



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2016).

Así mismo el sector industrial es una de las principales fuentes de emisión de NO_2 , debido a sus procesos de combustión, y en los últimos años ha ascendido el número de empresas en la ZMVT, el DNUE tiene contabilizadas 7,589 de Industrias Manufactureras, mientras que el Sistema de Información Empresarial Mexicano tiene las siguientes:

Tabla 1.6 Empresas registradas en el SIEM

Municipio	Empresas
Lerma	519
Ocoyoacac	96
San Mateo Atenco	278
Toluca	4,722
Zinacantepec	258
Metepc	1,085
Xonacatlán	83
Total	7,041

Fuente: Elaboración propia con base en (SIEM, 2018).

Por los efectos ambientales y la afectación a la salud humana, es importante disminuir las emisiones de contaminantes, provenientes principalmente del sector transporte y la industria para fortalecer las acciones de protección al ambiente y evitar los efectos del Cambio Climático en la zona, ya que se estima que para el 2030 haya 45% más automóviles circulando en el país y el número de industrias con procesos de combustión aumenten de igual manera (SIEM, 2018).

1.4 Bióxido de Nitrógeno (NO₂)

De acuerdo con Galán & Fernández, (2006), en los últimos 100 años la concentración atmosférica de los NO_x, se ha incrementado significativamente a nivel mundial, debido a la amplia variabilidad de compuestos nitrogenados que existen en la atmósfera, ya que en las capas bajas de la atmósfera el Nitrógeno Oxidado depende de la intensidad de luz Solar, temperatura, emisión de contaminantes y tiempo transcurrido de las emisiones. Es por ello que durante el día, el NO₂, sufre un proceso de reconversión, permitiendo la generación de O₃, mientras que en la noche al existir ausencia de luz Solar, el NO₂ se convierte en Trióxido de Nitrógeno (N₂O₃) que reacciona con el NO₂ para generar Ácido Nítrico (HNO₃) que es quien provoca la lluvia acida (Galán & Fernández, 2006).

Figura 1.3 Implicación del NO₂ en la formación de contaminantes secundarios perjudiciales, en la atmósfera.

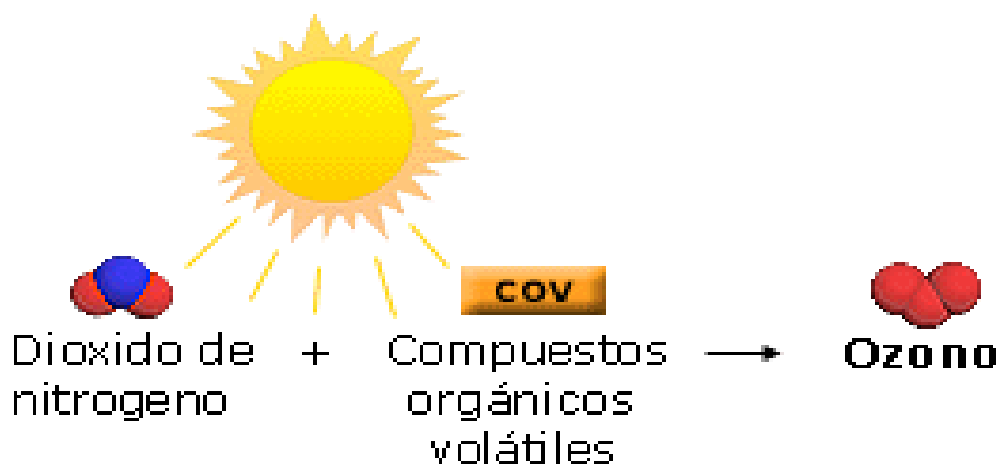


Fuente: (Uherek, 2013)

El NO_2 , es degradado rápidamente en la atmósfera al reaccionar con otras sustancias presentes en el aire, es por eso que respirar altos niveles puede provocar daños a la salud (ATSDR, 2002); por lo que La Agencia de Protección Ambiental (EPA), estableció que la concentración promedio de NO_2 en el aire no debe exceder las 0.053 ppm en un periodo de un año, mientras que la Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA), estableció un límite de 25 ppm de Monóxido de Nitrógeno (NO), en el aire laboral durante una jornada de 8 horas diarias y un límite de 5 ppm para la exposición de NO_2 , en periodos de 15 minutos (ATSDR, 2002).

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental (1999), los principios de todas las tecnologías de control y prevención de contaminación para los NO_2 , se basan en la norma primaria y secundaria para el NO_2 , la cual permite 100 microgramos por m^3 de concentración anual promedio; ya que este gas reacciona en la presencia del aire, luz ultravioleta (UV) y luz solar para formar otros compuestos tóxicos, así mismo reacciona con los radicales libres de la atmósfera sobre los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), provocando que se puedan producir O_3 ininidad de veces (Figura 1.7).

Figura 1.4. Formación de Ozono (O_3)



Fuente: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 2005).

Estas reacciones se presentan principalmente en áreas urbanas, agravándose en climas calientes y secos, debido a la producción de oxidantes dañinos producidos por la Radiación Solar, tales como el NO_2 , el cual es el culpable de la niebla café que se observa en las grandes zonas metropolitanas (Whitten, et al., 2015); así mismo la RS es causante del calentamiento de la atmósfera así como de la química atmosférica, ya que da inicio a los procesos químicos y fotoquímicos de los contaminantes presentes (Cisniega, 2002).

El NO_2 , es un contaminante primario que absorbe Radiación Solar en un rango de 3000-4000 Å, el cual depende de la concentración atmosférica, intensidad de RS y de la longitud de onda a la superficie de la Tierra; ya que es considerado precursor de la formación de contaminantes secundarios como el O_3 , Nitratos, Nitritos, entre otros (Cisniega, 2002).

Los compuestos producidos por los NO_x , llegan a tener un periodo de vida entre 100 y 150 años (UCLM, 2005); es por esto que resulta de vital importancia conocer la concentración de los NO_2 , ya que tienen efectos sobre la salud y el medio ambiente tales como la lluvia ácida que daña los ecosistemas, formación de smog fotoquímico, destrucción de la capa de Ozono; así como tos, dolores de cabeza y desordenes gastrointestinales por la exposición crónica de bajas dosis, que pueden producir hasta la muerte (PRTR España, 2014).

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

“Cada año mueren en el mundo 12.6 millones de personas a causa de la insalubridad del medio ambiente, como es la polución del aire, el agua y el suelo, la exposición a los productos químicos, el Cambio Climático y la radiación ultravioleta, que contribuyen a más de 100 enfermedades o traumatismos” (CEMDA, 2016).

Este capítulo tiene como objetivo definir los conceptos relacionados al Cambio Climático, contaminación atmosférica, efecto invernadero, contaminantes atmosféricos, NO_x, Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), y la RAMA-ZMVT; el cual tiene como finalidad establecer un marco de definiciones para exponer conceptos esenciales, información general y la descripción de procesos relacionados con el estudio del NO₂, representativos para la calidad del aire de la zona de estudio, debido a que en la actualidad no se cuenta con suficiente información del área de estudio en este tema.

Este capítulo se integra por dos partes, en la primera se encuentran las definiciones de conceptos relacionados con los temas mencionados anteriormente y la segunda contiene el epílogo con los principales argumentos y criterios que serán debatidos a lo largo de la tesis.

2.1 Contaminación atmosférica

Se define como la presencia en el aire de toda materia en cualquiera de sus estados físicos, que al actuar en la atmósfera, altere o modifique su composición y condición natural (INE, 2000).

La contaminación atmosférica puede dañar la salud de las personas y afectar a la vida de las plantas y los animales. Así también, produce fenómenos de gran importancia global debido a las transformaciones que se producen por la composición química de la atmósfera, las cuales pueden cambiar el clima, producir lluvia ácida o destruir la capa de Ozono, (Echarri, 2007).

Las sustancias causantes de contaminación atmosférica, pueden incluir casi cualquier compuesto que pueda ser trasladado por el aire en forma de partículas, gotas o gas; los cuales al estar en altas concentraciones pueden causar daños a la salud y al medio ambiente (SEMARNAT, 2007). Los contaminantes que se emiten a la atmósfera pueden ser transportados de un lugar a otro, sin embargo durante el proceso de estabilización sufren transformaciones químicas (aerosoles, nubes,

brumas, gotas, etc.) o físicas, las cuales son arrastrados a la superficie terrestre por lluvia o viento hasta que se eliminan o permaneces en las capas altas de la atmósfera (SEMARNAT, 2007).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), considera la contaminación atmosférica como una de las prioridades mundiales más importantes de la salud, ya que se estimó que la contaminación atmosférica es responsable de 1,4% de todas las muertes en el mundo; teniendo un efecto mayor en países en vías de desarrollo, (Ballester, 2005).

“Cada año mueren en el mundo 12.6 millones de personas a causa de la insalubridad del medio ambiente, como es la polución del aire, el agua y el suelo, la exposición a los productos químicos, el Cambio Climático y la radiación ultravioleta, que contribuyen a más de 100 enfermedades o traumatismos”
(CEMDA, 2016).

2.1.1 Clasificación de la contaminación atmosférica

Los contaminantes atmosféricos se clasifican en dos grupos según su origen y su evolución, dependiendo cuál es su fuente de emisión o si se han formado en la atmósfera.

2.1.1.1 Según su origen

- a) **Natural:** incendios forestales, erupciones volcánicas, tormentas, procesos biológicos o antropogénico (emisiones a la atmósfera por parte de la industria, procesos de combustión en vehículos, etc.).

- b) **Por el tipo de contaminante:** Pueden ser biológicos (salmonela), físicos o químicos (CFC), (Villegas, 1999).

2.1.1.2 Según su evolución

- a) **Contaminantes primarios:** Procedentes directamente de las fuentes de emisión; que daña directamente la vegetación y es irritante para los pulmones (Ayers, 2001).
- b) **Contaminantes secundarios:** Originados en el aire por interacción entre dos o más contaminantes primarios, o por sus reacciones con la atmósfera (Echarri, 2007).

Ambos contaminantes, primarios y secundarios pueden depositarse en la superficie del suelo por precipitación; Por otra parte los países industrializados presentan las mayores emisiones de gases contaminantes, las cuales contribuyen a la contaminación del atmosférica, debido a que se sobrecarga la capacidad del aire para diluir los contaminantes (Linea Verde, 2012).

De acuerdo con Ballester, (2005), el sector transporte es el principal emisor de sustancias contaminantes seguido por la actividad industrial. Por otra parte a escala local pueden ocurrir situaciones imprevistas de contaminación atmosférica asociadas a fenómenos meteorológicos de altas presiones y ausencia de lluvias prolongadas; sin embargo cabe mencionar que en todos los países deben existir límites impuestos a determinados contaminantes que puedan incidir sobre la salud de la población y su bienestar.

2.1.2 Principales contaminantes del aire

La contaminación del aire es un estado en el cual una sustancia se encuentra en exceso respecto a su concentración ambiental normal, la cual degrada la calidad del aire, y tiene efectos en el ecosistema y en la salud humana (Muñoz, 2015).

Los principales contaminantes atmosféricos son:

- Dióxido de Carbono (CO₂)

- Bióxido de Nitrógeno (NO_x)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Dióxido de Azufre (SO₂)
- Ozono (O₃)
- Metano (CH₄)
- Compuestos clorados (CFC's. HCFC's)
- Contaminantes sólidos (polen, polvos)
- Microorganismos (hongos, bacterias) vapores, humos.

Los cuales se describen en la siguiente tabla de acuerdo a su formación, estado físico y fuentes de emisión:

Tabla 2.1. Descripción de los principales contaminantes atmosféricos químicos y sus fuentes

Contaminante	Formación	Estado Físico	Fuentes
Partículas en suspensión (PM): PM₁₀, Humos negros.	Primaria y Secundaria	Sólido, líquido	Vehículos Procesos Industriales
Dióxido de Azufre (SO₂)	Primaria	Gas	Humo de Tabaco Procesos industriales
Bióxido de Nitrógeno (NO₂)	Primaria y Secundaria	Gas	Vehículos Procesos Industriales
Monóxido de Carbono (CO)	Primaria	Gas	Estufas y cocinas de gas Vehículos
Compuestos orgánicos volátiles (COV's)	Primaria, secundaria	Gas	Combustión en interiores Humo de tabaco Combustión de interiores
Plomo (Pb)	Primaria	Sólido (partículas finas)	Vehículos, Industrias
Ozono (O₃)	Secundaria	Gas	Vehículos (secundario a fotoxidación de NO ₂ y COV's)

Fuente: Ballester, 2005.

Los contaminantes del aire se clasifican en primarios o secundarios, dependiendo de su composición física y química, variables meteorológicas, fuente de emisión, actividades humanas, por las interacciones químicas y condiciones de la atmósfera (Arce, 2011).

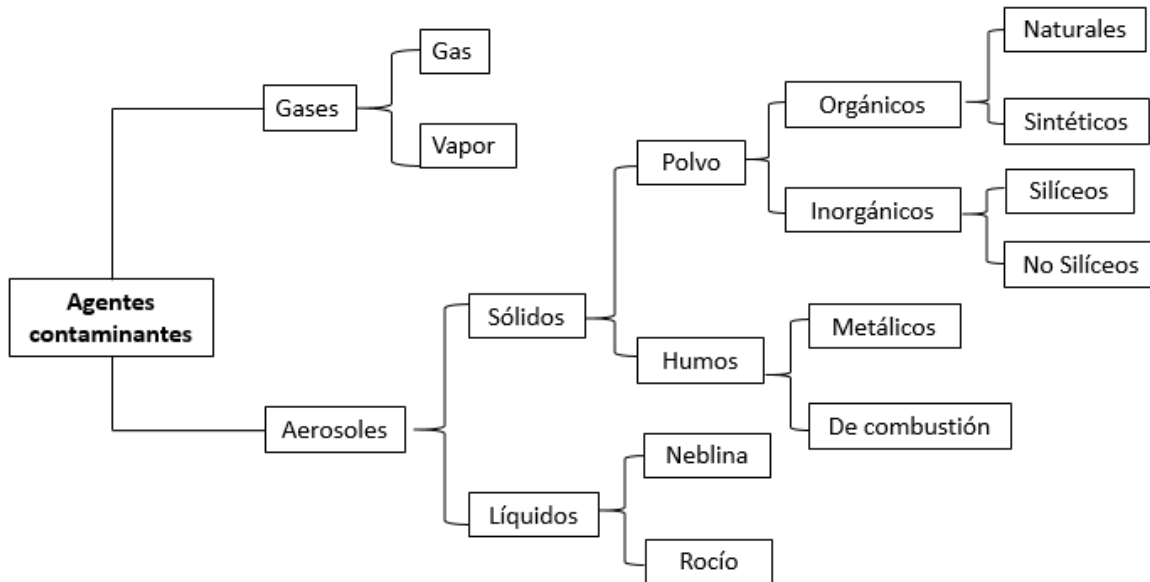
2.1.2.1 Por su origen

- a) Contaminantes primarios:** Se encuentran tal y como fueron emitidos a la atmósfera, como resultado de un proceso natural, estos contaminantes se encuentran en la atmósfera en la misma forma en que fueron emitidos como Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂), tales como materia particulada, Hidrocarburos, Oxidantes fotoquímicos, Asbestos y metales (González & Villafaña, 2003)

- b) Contaminantes secundarios:** Este tipo de contaminantes derivan de reacciones químicas en la atmósfera entre contaminantes primarios con los compuestos que se encuentran en la atmósfera tales como O₃, y los sulfatos. Los oxidantes fotoquímicos que se generan cuando los hidrocarburos volátiles, los NO_x y el Oxígeno son expuestos a la radiación UV produciendo otros compuestos, como el O₃, (Ayers, 2001).

2.1.2.2 Por su estado físico

Figura 2.1. Clasificación de los contaminantes por su estado físico



Fuente: Elaboración propia con base en (Villegas, 1999).

a) **Gases:** Incluyen humos y vapores que no se depositan y que permanecen en la atmósfera (Villegas, 1999).

b) **Partículas:** Partículas sólidas y líquidas (polvo, humo y cenizas), las de mayor tamaño se depositan al poco tiempo, mientras que las partículas más pequeñas pueden mantenerse por periodos largos y ser transportadas por el viento (Muñoz, 2015).

2.1.2.3 Por su composición química

a) **Orgánicos:** contienen Hidrogeno (H) y Carbono (C), que son los hidrocarburos y sus derivados.

b) **Inorgánicos:** no contienen compuestos de C, excepto CO y CO₂, partículas metálicas y NO_x (González & Villafaña, 2003).

2.1.2.4 Fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos

El comportamiento de los contaminantes está relacionado a factores climáticos, topográficos y por la fuente emisora de la cual provienen. El control de los contaminantes atmosféricos debe realizarse desde su origen (González & Villafaña, 2003)

a) Por su movilidad

- **Fuentes fijas:** Instalaciones que tengan como fin llevar a cabo operaciones o procesos industriales, o generen contaminantes a la atmósfera (Ballester, 2005).
- **Fuentes móviles:** Equipo y maquinaria, con motores de combustión, que generen emisiones contaminantes a la atmósfera, las cuales incluyen a los automóviles, camionetas, camiones de carga.

b) Por su distribución espacial

- **Fuentes puntuales:** Fuentes de emisiones contaminantes a la atmósfera, son reportadas a nivel de cada establecimiento, para ser posible monitorear el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad, (industrias de la metalurgia, automotriz, avicultura, producción ganadera) (Muñoz, 2015).
- **Fuentes de área:** Aquellas que incluyen actividades distribuidas en un área determinada, cuyas contribuciones particulares no pueden evaluarse y cuantificarse de forma precisa, (establecimientos comerciales, rellenos sanitarios, gasolina, limpieza, plantas de tratamiento de aguas residuales) (Villegas, 1999).

2.1.3 Efectos de la contaminación atmosférica

Las emisiones de contaminantes a la atmósfera están relacionados con el Cambio Climático, ya que pueden agravar los efectos de la contaminación del aire sobre la salud de los ciudadanos, no sólo indirectamente por el impacto en los fenómenos meteorológicos sino de manera inmediata por los efectos directos de los contaminantes sobre la salud (Ballester, 2005).

“El ser humano requiere aproximadamente más de 14,000 litros de aire al día, por lo cual las perturbaciones en la calidad del mismo repercuten directamente en daños a la salud” (Muñoz, 2015).

En el caso de la contaminación atmosférica por Ozono, las personas que corren más riesgo son las que pasan más tiempo en el exterior o se encuentran realizando un ejercicio intenso (juego, deporte, trabajo), ya que la frecuencia e intensidad respiratoria se incrementan. Los niños constituyen un grupo de riesgo especial debido a que su sistema respiratorio no se encuentra desarrollado completamente, pasan más tiempo en el exterior y respiran más aire por unidad de peso que los adultos (Ballester, 2005).

Por otro lado se ha relacionado el nivel socioeconómico con el grado del impacto de la contaminación atmosférica en la salud; debido a que un mayor número de defunciones por causas respiratorias, es dado en las personas de bajos recursos (González & Villafaña, 2003).

La detección de los efectos del Cambio Climático sobre la salud requiere el establecimiento de un sistema para detectar los efectos tempranos. En nuestro país no existe un sistema de vigilancia epidemiológica de los efectos de la contaminación atmosférica, sin embargo en la actualidad se dispone de diversos programas de monitorización de calidad del aire gestionados a nivel central y, mayoritariamente,

en las comunidades autónomas por los departamentos encargados del medio ambiente. Dichos sistemas no están, integrados con los sistemas de alerta y los servicios de salud pública (Ballester, 2005).

2.1.4 Factores que favorecen la concentración de contaminantes en la ZMVT

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca, se ha convertido en un importante punto de desarrollo económico, debido a la cercanía que se tiene con la Ciudad de México que ha propiciado la expansión de la zona industrial y los municipios que la rodean. Esto ha ocasionado el acelerado crecimiento en los Municipios de Metepec, Lerma, Zinacantepec y San Mateo Atenco, que de acuerdo con SEMARNAT, (2000), ahí se encuentra el 8.5% de la población total del Estado de México.

El aumento de las actividades productivas y concentración de la población en las últimas décadas en la ZMVT, ha provocado el incremento de los servicios de transporte público y privado, ocasionando un mayor consumo de combustible y con esto la degradación de la calidad del aire, debido a que la altitud en la que se asienta es de 2,660 metros sobre el nivel del mar (msnm), lo que determina que el contenido de Oxígeno sea de 23% menos que sobre el nivel del mar (msnm); afectando directa

2.2 El IMECA: Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), es una escala arbitraria, entre 0 y 500 puntos, que permite a la población interpretar el grado de peligrosidad que presenta la atmósfera en un tiempo y lugar dados. El límite considerado satisfactorio para cada los contaminantes atmosféricos, se representa con un valor de 100 puntos, que corresponde al valor que establecen las normas de calidad del aire, ya que a mayor concentración de la establecida, la condición de la atmósfera se considera peligrosa (SMA, 2014).

Figura 2.2. Escala para valores IMECA en la ZMVT.

Intervalos	0-50	51-100	101-150	151-200	201-300
Calidad del aire	Buena	Regular	Mala	Muy Mala	Extremadamente Mala

Fuente: Elaboración propia con base en SMA, 2014.

El IMECA se elabora con información de una red de monitoreo atmosférico, que incluye datos de Ozono (O₃), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Dióxido de azufre (SO₂), Monóxido de carbono (CO), y la fracción respirable (PM₁₀ y PM_{2.5}), de las partículas suspendidas totales (Trejo, 2006).

Estos datos son gran importancia para la protección de la población y para ayudar a las autoridades a tomar decisiones con respecto a la circulación de automóviles y otras fuentes de emisión atmosférica (SMA, 2014).

2.3 Cambio Climático

El Cambio Climático se puede definir como todo cambio que ocurre en el clima a través del tiempo, como resultado de la variabilidad natural o de las actividades antropogénicas, enfocándose al aumento promedio de las temperaturas terrestres y marinas globales; debido a que a pesar que el clima cambia naturalmente, existen claras evidencias que el aumento del calentamiento del planeta en los últimos 50 años, puede ser atribuido a las actividades antropogénicas (SEMARNAT, 2009).

Por otra parte, el Cambio Climático puede alterar el periodo polínico para algunas especies, ocasionando el incremento en los niveles de CO₂, el cual podría afectar la producción de polen (Ballester, 2005).

Algunos de los efectos más significativos del Cambio Climático, es el aumento de temperatura provocando el derretimiento de los casquetes polares, sin embargo, en algunas partes debajo de la capa de hielo del Ártico, se acumula una gran cantidad de Metano, que al derretirse el hielo, escapa a la atmósfera, acrecentando el calentamiento global (Becerra & Mance, 2009).

2.3.1 Efecto Invernadero

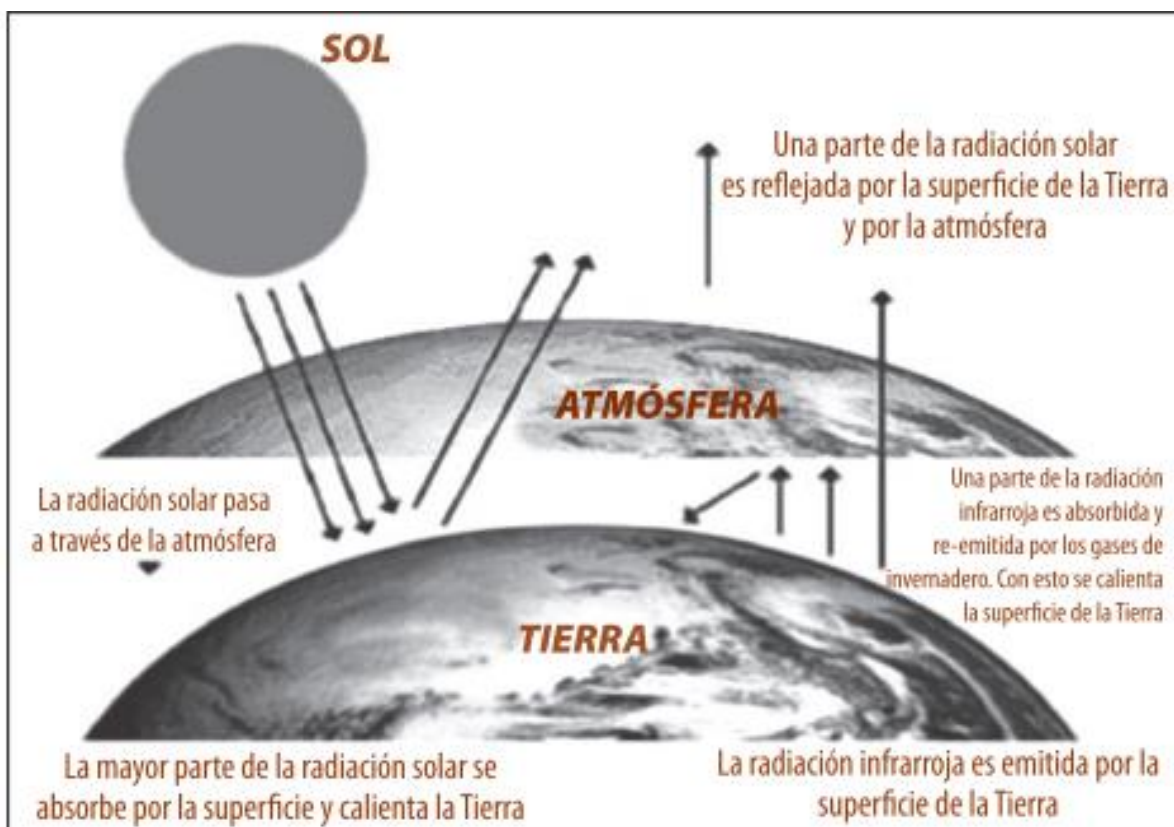
El efecto invernadero es un fenómeno en el cual ciertos gases retienen parte de la energía emitida por la Radiación Solar, por lo tanto se produce un efecto de calentamiento similar al que ocurre en un invernadero, con una elevación de la temperatura (Pérez & Merino, 2009).

De acuerdo con Becerra & Mance, (2009), la energía Solar que alcanza la superficie de la Tierra calienta el suelo y los océanos, los cuales liberan calor en la forma de radiación infrarroja. Los GEI que se encuentran en la atmósfera, como el Dióxido de Carbono, absorben parte de esta radiación producida por la Tierra y la envían en todas las direcciones, que trae como repercusión el calentamiento de la superficie del planeta a la temperatura actual. Así mismo también se encuentran el vapor de

agua, el Óxido de Nitrógeno, el Clorofluorocarbono y el O₃ los cuales a raíz de la Revolución Industrial han incrementado en la atmósfera lo que origina la situación de efecto invernadero (Pérez & Merino, 2009).

Una de las principales consecuencias que trae consigo el derretimiento de los polos es que el hielo, por su color blanco, mitiga el efecto invernadero debido al albedo que posee para poder reflejar los rayos Solares hacia la atmósfera. Ya que al no existir esta capa blanca, la tierra absorbe más calor del sol, que luego regresa a la atmósfera en forma de rayos infrarrojos (Becerra & Mance, 2009).

Figura 2.3. Efecto Invernadero



Fuente: (Becerra & Mance, 2009)

2.4. Radiación Solar

El sol es la principal fuente de energía para todos los procesos en la Tierra, ya que más del 99.9% de la energía que se recibe proviene del Sol, la cual se absorbe y re irradia en forma de calor en todas direcciones por la superficie de la Tierra, suelos, océanos y atmósfera (Inzunza, 2014).

La Radiación Solar es la energía transferida del Sol a la Tierra, que se va transportando a través del espacio en forma de ondas, las cuales van desde las ondas más energéticas, como los rayos gamma, rayos X y ultravioleta (UV), así como de las de menos energéticas, que son los infrarrojos, microondas y las ondas de radio; asimismo es una variable meteorológica que sirve para conocer la cantidad de calor que recibimos del sol en la superficie terrestre, la cual está siendo alterada por el Cambio Climático y la retención de GEI (Portillo, 2017).

Por otra parte, la Radiación Solar tiene un máximo en la región de luz visible la cual está compuesta por varios colores, que al mezclarse forma la luz blanca; cada uno de los colores tiene una longitud de onda específica, que va desde las longitudes de onda más cortas a las más largas; la mayor cantidad de Radiación Solar se concentra en este rango, teniendo 43% luz visible, 49% infrarrojo cercano, 7% ultravioleta 1% restante en otros rangos (Inzunza, 2014).

La Radiación Solar es la principal fuente de energía del planeta, es por ello que el balance entre la energía Solar absorbida y la energía térmica emitida por la superficie de la atmósfera, determina la temperatura promedio (García, 2009).

Los GEI retienen parte de la temperatura que emite la superficie terrestre que regresa a la atmósfera; cada gas tiene una capacidad distinta para absorber Radiación Solar, por lo que mientras más capacidad tenga para absorber Radiación Solar, más calor retendrá y no dejará que vuelva al espacio exterior (Portillo, 2017).

Los NOx, junto con los COV, desempeñan un papel primordial en la formación de Ozono Troposférico, debido a que es un contaminante, que necesita la presencia

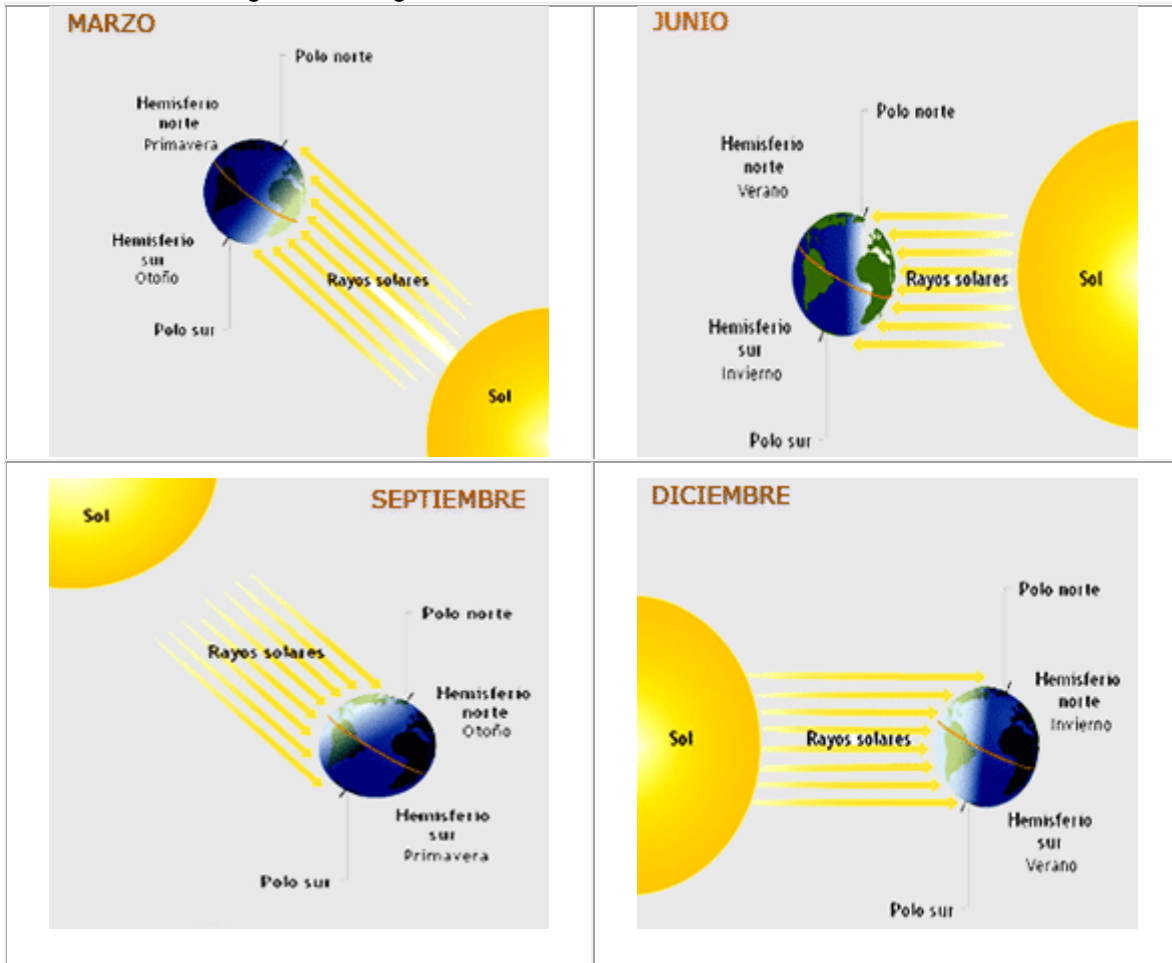
de Radiación Solar; por otra parte la química atmosférica diurna o nocturna del NO₂, se presenta en base a la presencia o no de la luz Solar (Galán & Fernández, 2006).

Los aerosoles atmosféricos, el Ozono, el Bióxido de Nitrógeno y el Dióxido de Azufre también interactúan con la radiación UV mediante procesos de dispersión, reflexión y absorción. El NO₂, absorbe la radiación UV, sufriendo una serie de transformaciones que forma productos tóxicos; tales como el O₃, que a nivel troposférico es un serio contaminante atmosférico, además de ser un gas irritante de las vías respiratorias (Jubel, 2008).

2.4.1 Estaciones del año y la Radiación Solar

Las cuatro estaciones del año de nuestro planeta (verano, otoño, invierno y primavera) son resultado de su forma elíptica y su ángulo de inclinación de 23.5°; ya que debido a que la Tierra esta inclinada, las diferentes latitudes reciben diferentes ángulos del sol durante todo el año (XIRUCA, 2007), es decir, cuando la Radiación Solar incide de manera perpendicular, los rayos solares inciden de manera más directa, ya que recorren menos distancia en la atmósfera y concentran mayor la energía en menor superficie, como ocurre en el solsticio de verano para el Hemisferio Norte, mientras que en el solsticio de invierno la Radiación Solar recibe menos luz directa debido a que la Tierra esta inclinada (XIRUCA, 2007).

Figura 2.4. Ángulos de la Radiación solar durante todo el año



Fuente: (Manzaneque, 2008)

En los equinoccios de primavera y otoño, a mediados de marzo y septiembre, el Hemisferio Norte (HN) y Hemisferio Sur (HS) reciben la misma cantidad de luz, debido a que los rayos solares se encuentran directamente sobre el ecuador ocasionando la disminución en las temperaturas del HN, mientras que en los solsticios de verano e invierno, en junio y diciembre, la luz solar llega de manera directa ya que el HN se encuentra inclinado en dirección al sol (Manzaneque, 2008).

2.5 Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Los GEI, se han generado desde hace miles de millones de años por fuentes naturales (vulcanismo, la vegetación y los océanos); por la actividad biológica (respiración de plantas y animales), y la descomposición de la materia orgánica, (SEMARNAT, 2009). Sin embargo, desde el comienzo de la industria y el uso de los combustibles fósiles (petróleo, gas natural o carbón), los humanos han contribuido a su generación, arrojado a la atmósfera grandes cantidades de GEI e incrementando la concentración GEI en la atmósfera (Ballester, 2005).

Los GEI son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja, emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes; dicha propiedad provoca el efecto invernadero.

En la atmósfera de la Tierra, los principales GEI son el vapor de agua (H_2O), el CO_2 , el N_2O , CH_4 y el O_3 . Sin embargo en la atmósfera existen una serie de GEI, creados por el ser humano, como los Halocarbonos y otras sustancias con contenido de Cloro y Bromo (Benavides & León, 2007).

2.5.1 Clasificación de los GEI

a) GEI Directos:

Contribuyen al efecto invernadero tal como son emitidos a la atmósfera. En este grupo se encuentran: el CO_2 , el N_2O , el CH_4 y los compuestos halogenados (UNAM , 2011).

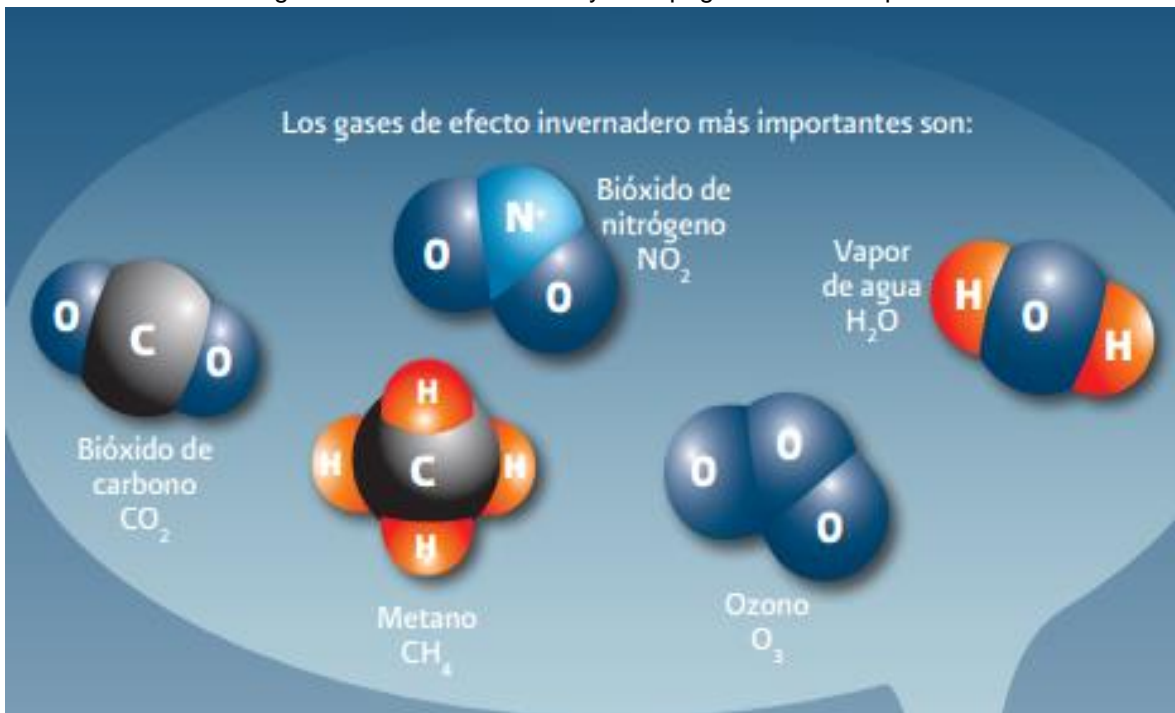
b) GEI Indirectos:

Son precursores de Ozono troposférico, además de contaminantes del aire ambiente de carácter local y en la atmósfera se transforman a gases de efecto

invernadero directo. En este grupo se encuentran: los NOx, los COV diferentes del metano y el Monóxido de Carbono (Benavides & León, 2007).

Asimismo son generados a través de las fuentes antropogénicas, los cuales aumentan el flujo natural de las fuentes naturales de GEI hacia la atmósfera, creando gases dañinos para el ser humano y a los que se les atribuye la contaminación del aire y calentamiento del planeta (Pérez & Merino, 2009).

Figura 2.5. Gases naturales y antropogénicos más importantes



Fuente: (SEMARNAT, 2009).

2.5.2 Principales fuentes antropogénicas de los GEI

Las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O, han aumentado como consecuencia de las actividades humanas, teniendo principalmente el uso de combustibles fósiles, deforestación y degradación de biomasa (SEMARNAT, 2009).

2.5.1.1 Bióxido de Carbono (CO₂)

Es el GEI, que más ha contribuido al calentamiento global, debido a que se produce por el consumo de los combustibles fósiles y la deforestación, que al quemarse o descomponerse, emiten CO₂ (Becerra & Mance, 2009).

2.5.1.2 Metano (CH₄)

Se producen principalmente a consecuencia de diversas actividades agropecuarias, como el cultivo del arroz y la cría del ganado (SEMARNAT, 2009).

2.5.1.3 Óxido Nitroso (N₂O)

Se derivan principalmente del uso de agroquímicos en la agricultura. El N₂O o los fluorocarbonados, por su abundancia relativa en la atmósfera y su incremento exponencial en los últimos cincuenta años explican por qué es el principal responsable del incremento de la temperatura (Becerra & Mance, 2009).

“Dado que los GEI son uno de los factores más importantes para controlar la temperatura de la atmósfera, es fácil entender por qué un incremento de su concentración puede alterar el flujo natural de energía. A mayor cantidad de GEI, mayor será la cantidad de calor que se absorba y la superficie del planeta alcanzará una temperatura más alta. Es decir, se reduce la eficiencia con la cual la Tierra reemite la energía recibida al espacio. Cualquier proceso que altere tal balance, ya sea por cambios en la radiación recibida o reemitida, o en su distribución en la Tierra, se reflejará, tarde o temprano, como cambios en el clima” (SEMARNAT, 2009).

2.6 Óxidos de Nitrógeno (NOx)

El NOx es un término genérico que hace referencia a un grupo de gases muy reactivos que contienen Nitrógeno y Oxígeno en diversas proporciones, tales como el NO y el NO₂, que se presentan en la Troposfera de la Tierra (Benavides & León, 2007).

El Nitrógeno molecular diatómico (N₂), es un gas relativamente inerte que compone alrededor del 80% del aire que respiramos. Los NOx pueden reaccionar ya sea para agotar o para incrementar las concentraciones de O₃. El N₂O, el NO, y el NO₂ son los NOx más abundantes en el aire (EPA, 1999).

Los NOx, más importantes toxicológicamente son el NO y NO₂, debido a que son contaminantes que por sí mismos no representan un problema para la salud; pero una vez que reaccionan con la luz Solar, producen compuestos tóxicos, especialmente si están presentes los hidrocarburos, provocando efectos en la contaminación y la destrucción de la capa de Ozono en la estratósfera (UNAM , 2011).

El N₂O, es inofensivo en la troposfera, su principal entrada es a través de reacciones fotoquímicas en la estratosfera que favorecen la producción de Ozono estratosférico, así como por sus efectos de acidificación directa, porque controlan la

concentración de radicales Hidroxilo (OH) en la atmósfera, además de ser moléculas muy reactivas que controlan la oxidación de los GEI (Benavides & León, 2007).

Por otra parte el NO₂, es un tipo de molécula contaminante de tipo primario (que proviene directamente de la fuente de emisión); es un gas fuertemente tóxico de color pardo rojizo, que posee una vida media de días, y su origen se basa en la presencia del Nitrógeno del aire en los procesos de combustión y de forma natural en erupciones volcánicas e incendios forestales (PRTR España, 2014). Posee una gran trascendencia en la formación del Smog Fotoquímico, influyendo en la formación de otros contaminantes secundarios como el O₃. Este gas reacciona con el agua para formar Ácido Nítrico, precipitando en forma de lluvia ácida, que puede dañar los árboles (PRTR España, 2014).

“Los óxidos de nitrógeno (NO_x) pueden presentarse en niveles significativos en ambientes exteriores e interiores. Existen, a nivel atmosférico, una amplia variabilidad de compuestos nitrogenados” (Galán & Fernández, 2006).

El NO, una vez liberado a la atmósfera es oxidado rápidamente por el O₃ para generar NO₂, el cual interviene en el ciclo de formación del Ozono troposférico; asimismo es constituyente esencial del smog fotoquímico, debido a que en las ciudades los niveles de NO son más elevados que los de NO₂ y las concentraciones de O₃ son siempre inferiores en las áreas urbanas, donde predominan los procesos de destrucción del O₃. Por el contrario, en la periferia de las ciudades o en áreas rurales alejadas de las fuentes contaminantes las concentraciones de NO₂ son superiores a las de NO, favoreciéndose la formación de O₃ (CRANA, 2013).

2.6.1. Propiedades de los NOx

- El estado de oxidación que el Nitrógeno adquiere en los diferentes óxidos les confiere propiedades químicas particulares (CRANA, 2013).
- El N_2O , tiene propiedades narcóticas, por lo que encuentra aplicaciones en odontología, industria alimenticia y en inyectar dicho gas en los motores convencionales o en algunos cohetes para lograr un incremento de la potencia de los mismos (Departamento de Ingeniería Química, 2005).
- El NO_2 es un potente agente oxidante y actúa como comburente frente a materiales combustibles. Se disuelve en muchos compuestos orgánicos (sulfuro de carbono, hidrocarburos halogenados, etc.) y reacciona con el agua dando una mezcla de ácidos Nítrico y Nitroso. A elevadas temperaturas se descompone en NO y oxígeno, pudiendo reaccionar de forma violenta con riesgo de inflamación y/o explosión con compuestos tales como: boro, óxido de cloro, hidrocarburos, fosfina, olefinas, nitrobenzeno, amoníaco, sulfuro de carbono, hidrocarburos halogenados, Etc. (CRANA, 2013).
- El tetra óxido de di Nitrógeno (N_2O_4), es un dímero del NO_2 , es un poderoso oxidante, altamente tóxico y corrosivo (EPA, 1999).
- NO, además de su papel contaminante en la atmósfera, participa en procesos que permiten la supervivencia de los organismos, tales como la regulación de la presión sanguínea, el desarrollo del sistema nervioso central, la transmisión nerviosa en los procesos de aprendizaje y memoria, y la activación de la respuesta inmune. Por otra parte también sirve como conservante (CRANA, 2013).

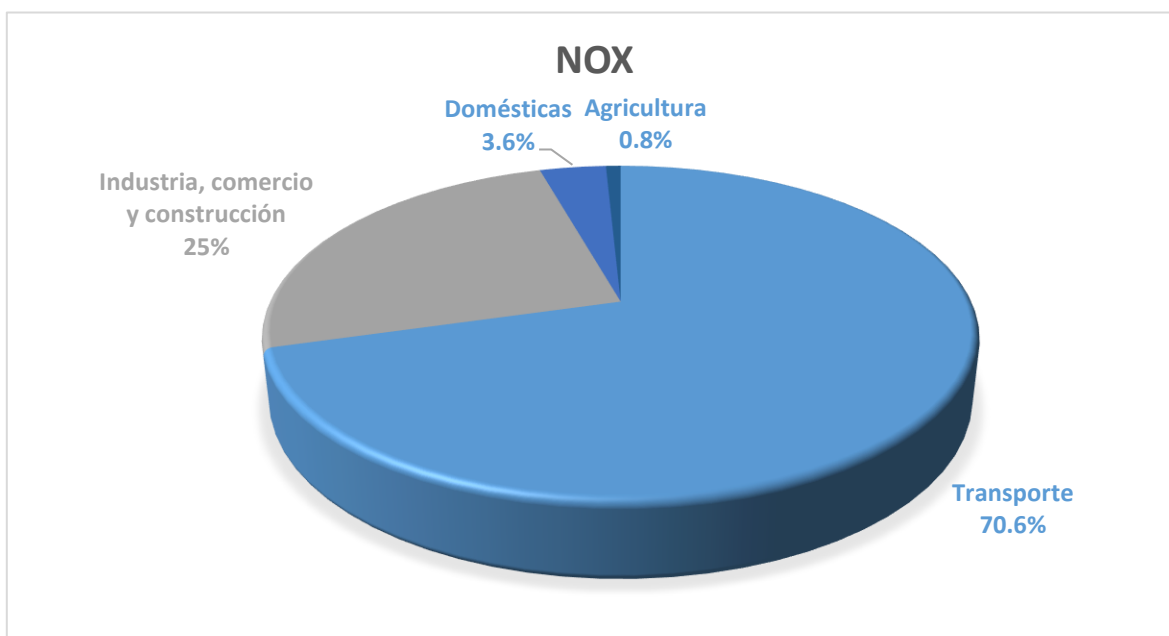
Los NOx se dividen en dos grupos, en los naturales que son causados principalmente por incendios forestales, erupciones volcánicas, metabolismo microbiano a partir de fertilizantes del suelo y rayos.

Y los de origen antropogénico que abarcan básicamente los procesos industriales, la quema de combustibles fósiles y chimeneas, (UCLM, 2005).

2.6.2 Ambientes exteriores

2.6.2.1 Fuentes antropogénicas: procesos industriales y actividades humanas.

Figura 2.6. Origen antropogénico de los NOx por sectores



Fuente: Elaboración propia con base en (Departamento de Ingeniería Química, 2005)

2.6.2.2 Fuentes naturales: Procesos de quema de la biomasa (combustibles fósiles), océanos, suelo y procesos implicados con la luz Solar (*Galán & Fernández, 2006*).

2.6.3 Ambientes interiores

Son los lugares de producción de emisiones de contaminantes atmosféricos, tales como: focos en hogares, oficinas y medios de transporte; sin embargo las emisiones exteriores pueden infiltrarse en estos ambientes interiores, a través de procesos de

cambios de aire, por lo que resulta fundamental el conocimiento y control de estas fuentes de emisión (Galán & Fernández, 2006).

2.6.4 Química atmosférica NOx

El NO₂ se puede diferenciar entre el día y la noche, esto debido a que la forma predominante del Nitrógeno Oxidado en las capas bajas de la atmósfera, depende de la intensidad de la luz Solar, temperatura, emisión de contaminantes y tiempo transcurrido de dichas emisiones (Galán & Fernández, 2006).

2.6.4.1 NOx durante el Día

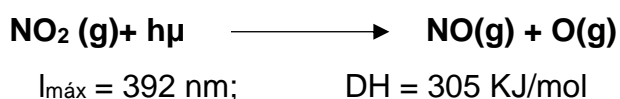
La contaminación fotoquímica se refiere a la contaminación procedente de las reacciones de los hidrocarburos y los Óxidos de Nitrógeno, estimuladas por la luz Solar intensa y el incremento de la temperatura. El O₃ es considerado el componente más tóxico de esta mezcla debido a que el NO₂ sufre un proceso de reconversión a Monóxido de Nitrógeno, permitiendo la generación de Ozono (Galán & Fernández, 2006); ocasionado por la radiación ultravioleta del sol sobre los NOx, en presencia de COV y otros contaminantes (Ballester, 2005).

El compendio de reacciones, que desarrollan los NOx durante el día, una vez que se encuentran en la atmósfera, constituye al ciclo fotolítico del NO₂; las cuales son endotérmicas y absorben energía de la luz Solar, con longitudes de onda por debajo de 400 nm en la región ultravioleta (Galán & Fernández, 2006).

2.6.4.1.1 Ciclo Fotolítico del NO₂

- El NO₂ absorbe energía en forma de radiación ultravioleta procedente del sol (Verne, 2011).

La energía absorbida rompe la molécula de NO₂ para dar moléculas de NO y átomos de O que son muy reactivos:

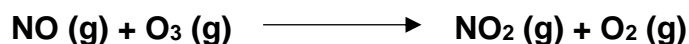


- Los átomos de oxígeno producidos reaccionan con las moléculas de Oxígeno atmosférico (O₂) obteniéndose O₃ (Verne, 2011):



M= es una molécula necesaria para disipar la energía

- El Ozono reacciona con las moléculas de NO para dar NO₂ y O₂ completándose así el ciclo (Verne, 2011).



Los hidrocarburos existentes en la atmósfera, ocasionan un desequilibrio en el ciclo fotolítico del NO₂, debido a que el NO se transforma en NO₂ con mayor rapidez de lo que el NO₂ se disocia en NO y O; dando lugar a un incremento en la concentración ambiental de ozono (Verne, 2011).

Por otra parte, durante el día también se lleva a cabo la reacción de los NO_x, con radicales HO_x (OH y HO₂) produciéndose la generación de Ácido Nítrico (HNO₃), Ácido Peroxinitrico (HO₂NO₂) y Ácido Nitroso (HONO) (Galán & Fernández, 2006).

- La reacción de OH con NO₂ para formar HNO₃, desempeña el control de los niveles de NO_x.

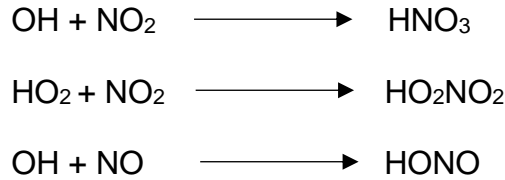
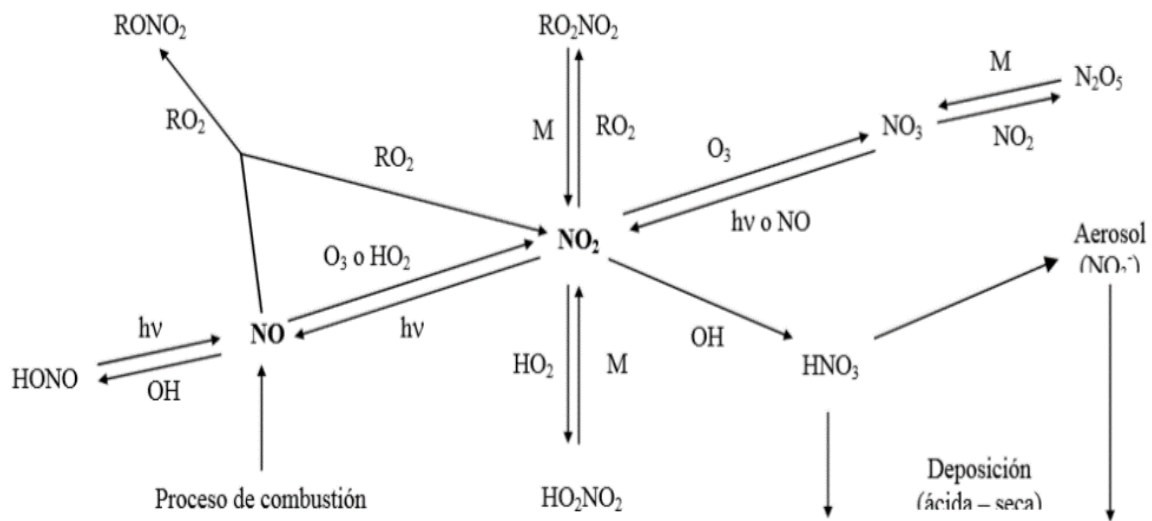


Figura 2.7 Reacciones de los NO_x durante el día.



Fuente: (Galán & Fernández, 2006).

2.6.2.2 NO_x durante la Noche

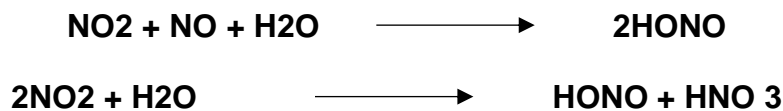
A pesar que la mayoría de las reacciones de los NO_x, se llevan a cabo durante el día por la presencia de luz Solar, existen procesos oxidativos que ocurren durante la noche, que son capaces de generar contaminantes secundarios tales como H₂O₂.

El NO₂, al tener ausencia de luz Solar, no sufre el proceso de fotólisis, por lo que se convierte lentamente en Trióxido de Nitrógeno, quien a su vez reacciona con el NO₂, para generas Ácido Nítrico, que es el principal componente de la lluvia Ácida (Galán & Fernández, 2006).

Por lo tanto el NO_2 , en el ciclo nocturno, reacciona con el NO_3 para generar Pentóxido de Dinitrógeno (N_2O_5), el cuál reacciona con agua para generar HNO_3 (Verne, 2011).



De igual manera, mediante la reacción de agua con NO_2 , se forma HNO_3 y Ácido Nitroso (Verne, 2011)



La oxidación de los NO_x , sucede durante el día, y mediante la hidrólisis durante la noche, sin olvidar que los NO_x , son muy importantes en la formación de los radicales libres (Galán & Fernández, 2006).

2.6.5 Formaciones de NO_x

Las fuentes de mayor producción de NO_x , son las industrias de energía y el transporte, debido a la combustión de los vehículos y las instalaciones de las industrias, por lo que se tienen dos mecanismos diferentes de formación que se presentan a continuación (INECC, 2009).

2.6.5.1 NOx de combustibles

- A partir de la conversión del Nitrógeno ligado químicamente en el combustible.
- Los emitidos desde el carbón, equivalen del 80 al 90%, mientras que para el petróleo, la participación del NOx del combustible puede ser menor del 50%.
- Las emisiones de NOx, desde fuentes móviles son relacionadas a la mezcla aire/combustible.

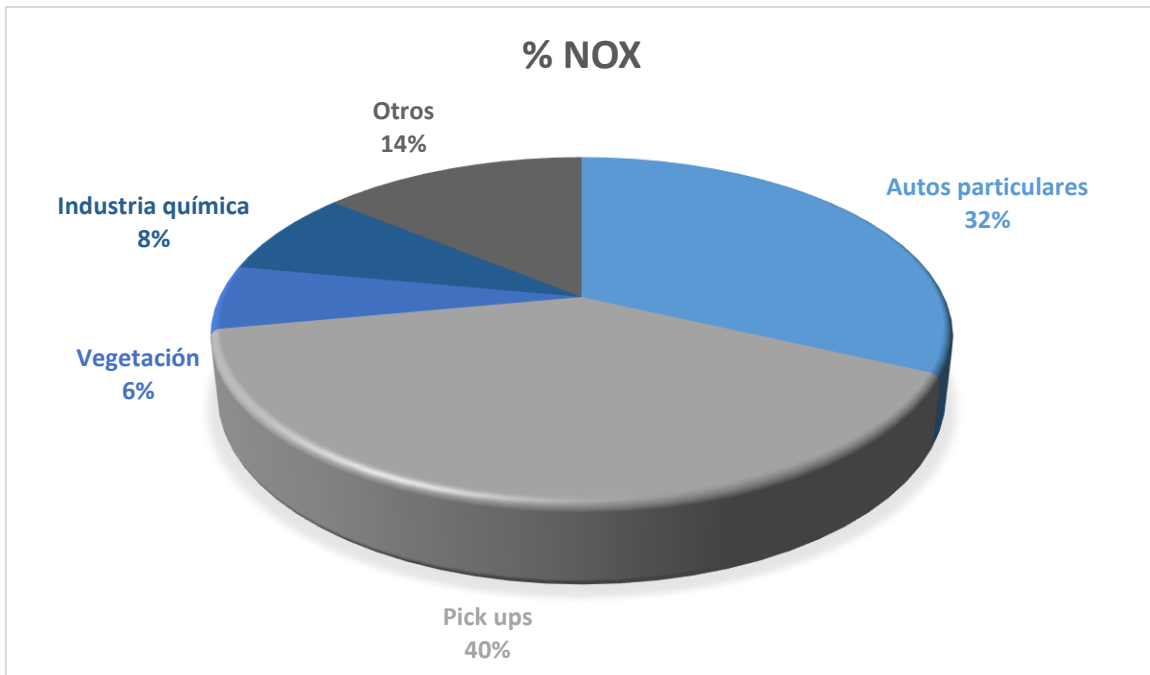
2.6.5.2 NOx térmico

- A partir de la fijación del Nitrógeno atmosférico (Nitrógeno que compone el aire) en los procesos de combustión.
- El NOx térmico contribuye con menos del 20% y depende de la temperatura de la combustión, excesos de aire y altas temperaturas.

2.6.6 Mediciones

En la ZMVT las fuentes emisoras de NOx, corresponden principalmente el sector transporte tanto privado y público que aportan el 71.8%, seguidos por la producción de químicos y artículos de plástico con un 7.9%, después tenemos las emisiones provenientes de actividades fotoquímicas de la vegetación que aportan el 6%, mientras que las otras fuentes contribuyen con el 14.3%, las cuales son representadas en la siguiente gráfica (SMA, 2007).

Figura 2.8 Contribución porcentual de NOx por sector

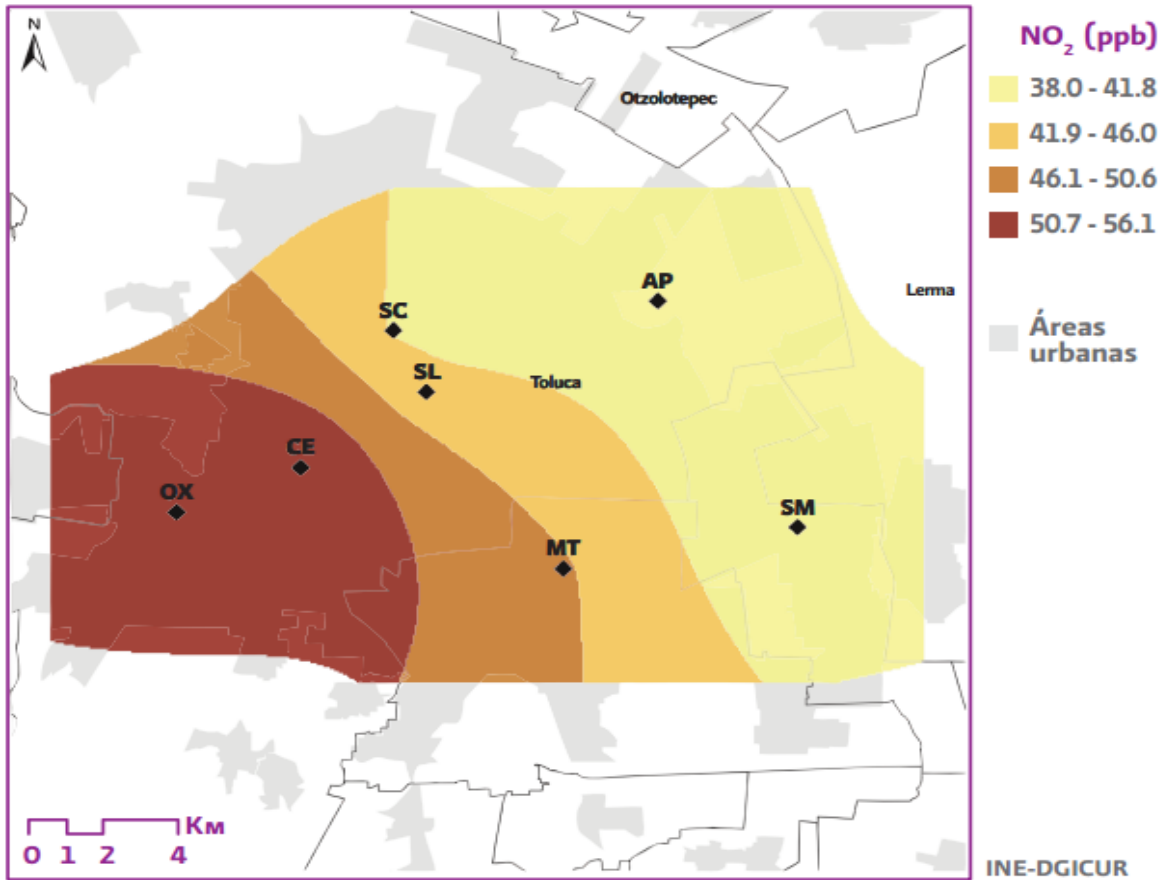


Fuente: Elaboración propia con base en, (SMA, 2007).

En el periodo de 2000–2009, las emisiones de NOx solo registraron cuatro días con concentraciones superiores a la norma que permite 0.21 ppm; tres de éstas se registraron en la estación Toluca-Centro (CE) en los años 2000, 2002 y 2004, y una en Metepec (MT) durante el año 2000 y a partir de 2005, existieron aproximaciones a la norma, sin embargo la mayor parte de los días fueron de buena calidad, sin embargo la falta de información hace desconfiable el análisis de las tendencias (INECC, 2009).

Sin embargo de acuerdo con el INECC, (2009), las concentraciones más altas de los NOx, se registran en la zona centro, especialmente cerca de las estaciones Toluca Centro (CE) y Oxtotitlán (Ox), y a medida que avanza hacia el este disminuyen paulatinamente las concentraciones (Ver Figura 2.).

Figura 2.9 Representación espacial del promedio de las concentraciones máximas diarias.



Fuente: Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas 2000-2009 (INECC, 2009).

Es por los efectos ambientales y a la salud humana la importancia de disminuir las emisiones de NO₂, provenientes principalmente de los vehículos y la industria para fortalecer las acciones de protección al ambiente y evitar los efectos del Cambio Climático en la zona de estudio (INECC, 2009).

Tabla 2.2 Número de días fuera de norma, por contaminantes y por año

Contaminante	1994	1995	1996
Ozono (O ₃)	3	5	49
Bióxido de Nitrógeno (NO ₂)	3	2	10
Partículas Suspensas Totales	-	3	3
Bióxido de Azufre	0	0	0
Monóxido de Carbono	0	0	0

Fuente: Elaboración propia con base en Programa Aire Limpio, (SEMARNAT, 2000).

Lo que arrojó que el NO₂, es el segundo contaminante más importante, ya que en los últimos años ha rebasado la norma 15 días, mientras que en 1996 alcanzó el máximo histórico con una concentración de 122 puntos IMECAS en el mes de Enero (SEMARNAT, 2000).

2.6.7. Efectos en la salud

Las principales emisiones de NO₂, son producidas por el sector transporte, debido a las reacciones de combustión de los vehículos y en las instalaciones de combustión de las grandes industrias; en altas concentraciones, producen problemas respiratorios sobre la salud humana, problemas de crecimiento en plantas y vegetales, afectando a sus tejidos (Departamento de Ingeniería Química, 2005).

Los NO_x son sustancias corrosivas para la piel y el tracto respiratorio, provocando enrojecimiento y quemaduras cutáneas graves, La inhalación en elevadas concentraciones y durante un corto periodo de tiempo, puede originar un edema pulmonar, cuyos efectos no se observan hasta pasadas unas horas, agravándose con el esfuerzo físico. Una exposición prolongada puede afectar al sistema inmune

y a los pulmones, dando lugar a una menor resistencia frente a infecciones y causar cambios irreversibles en los tejidos pulmonares (PRTR España, 2014).

“Diversos estudios epidemiológicos muestran que la exposición aguda a NO₂, puede provocar lesiones en las vías respiratorias y en los pulmones, ocasionando una reducción de la capacidad pulmonar y una mayor sensibilidad a los alérgenos. En el caso de exposiciones prolongadas se observan cambios irreversibles en la estructura y función de los pulmones, especialmente en los niños y en las personas que padecen alguna patología respiratoria (CRANA, 2013)”.

2.6.8 Efectos en el medio ambiente

Los NO_x son unos de los causantes del aumento en el efecto invernadero por dos motivos, el aumento de la concentración de gas en nuestra atmósfera, y las características de la molécula al absorber mayor cantidad de Radiación Solar (Departamento de Ingeniería Química, 2005).

Por otra parte el NO₂, se oxida fácilmente en el vapor de agua de las nubes para formar Ácido Nítrico (HNO₃), uno de los principales constituyentes de la lluvia ácida. Éste ácido es de poder oxidante y altamente corrosivo (CRANA, 2013).

El N₂O, contribuye al calentamiento global y a la variabilidad de la temperatura, debido a que absorbe la radiación infrarroja de longitud de onda larga para retener el calor que irradia la Tierra, así mismo la lluvia ácida provocada por este contaminante afecta seriamente los ecosistemas y algunos sectores de la economía, indicando la necesidad de reducir las emisiones de NO_x. (EPA, 1999). Es un gas con potente efecto invernadero, siendo considerado, a pesar de su baja concentración en la atmósfera, el tercer gas que más contribuye al calentamiento global debido a su largo tiempo de residencia en la atmósfera y a su gran capacidad para absorber energía que es unas 300 veces superior a la del CO₂, (CRANA, 2013).

2.6.9 Smog fotoquímico

El alto nivel de congestión vehicular es una de las principales causas de la formación del smog fotoquímico formada cuando NOx y los Hidrocarburos (RH) liberados experimentan una serie de reacciones activadas por la luz ultravioleta (UV) que provienen del sol (Cisniega, 2002).

2.7 Red Automática de Monitoreo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA-ZMVT)

En 1975 se iniciaron las actividades de monitoreo atmosférico en la ciudad de Toluca, solo para las Partículas Suspendidas Totales (PST); y fue hasta 1987, que se incorporaron las mediciones de NOx y Bióxido de Azufre (SMA, 2014). Sin embargo, la RAMA-ZMVT, inició operaciones en sus 7 estaciones hasta 1993, siendo administrada por la Secretaría de Medio Ambiente (SMA), del gobierno del estado con la finalidad de ser un programa de vigilancia atmosférica (SEMARNAT, 2007).

2.7.1 Objetivos de la RAMA-ZMVT

- I. “Evaluar la calidad del aire en una zona establecida, mediante la generación de indicadores de la calidad del aire (SMA, 2014).*
- II. Crear las medidas necesarias para controlar la contaminación (SMA, 2014).*
- III. Observar la tendencia de los contaminantes a lo largo del tiempo (SMA, 2014).*
- IV. Evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire y brindar información en caso de situaciones de alerta, alarma y emergencia (SMA, 2014).*

- V. *Obtener una base de datos para planear la distribución del suelo y del transporte (SMA, 2014).*
- VI. *Conocer el impacto que ejercen ciertos contaminantes sobre la población.*
- VII. *Proporcionar datos para el desarrollo y la validación de modelos (SMA, 2014).*
- VIII. *“Desarrollar estrategias de control para prevenir problemas por contaminación, o bien, eliminarlos” (SMA, 2014).*

2.7.2 Esquema de la RAMA-ZMVT

Para la vigilancia de la calidad del aire, la RAMA-ZMVT, consideras aspectos esenciales para lograr proporcionar datos confiables y representativos de la zona de estudio, es por ello que se integra y desarrolla de la siguiente manera:

- **Zona de estudio:** de acuerdo a los objetivos del programa, la topografía y el clima del sitio (SMA, 2014).
- **Clima:** tomando en cuenta la presión, temperatura, precipitación pluvial, velocidad y dirección del viento.
- **Sitio del muestreo:** ubicación representativa, datos con uso de vida útil a largo plazo, suministros de energía eléctrica seguros (SMA, 2014).
- **Inventario de emisiones:** fuentes de emisión de las zona de estudio, tipo de contaminante, número y tamaño de cada una.
- **Métodos de análisis:** metodologías basadas en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) (SMA, 2014).

2.7.3 Estaciones de Monitoreo de la RAMA-ZMVT

La RAMA-ZMVT está integrada por un centro de control y siete estaciones remotas de monitoreo fijas, de las cuales tres están ubicadas en la zona norte, dos en la sur

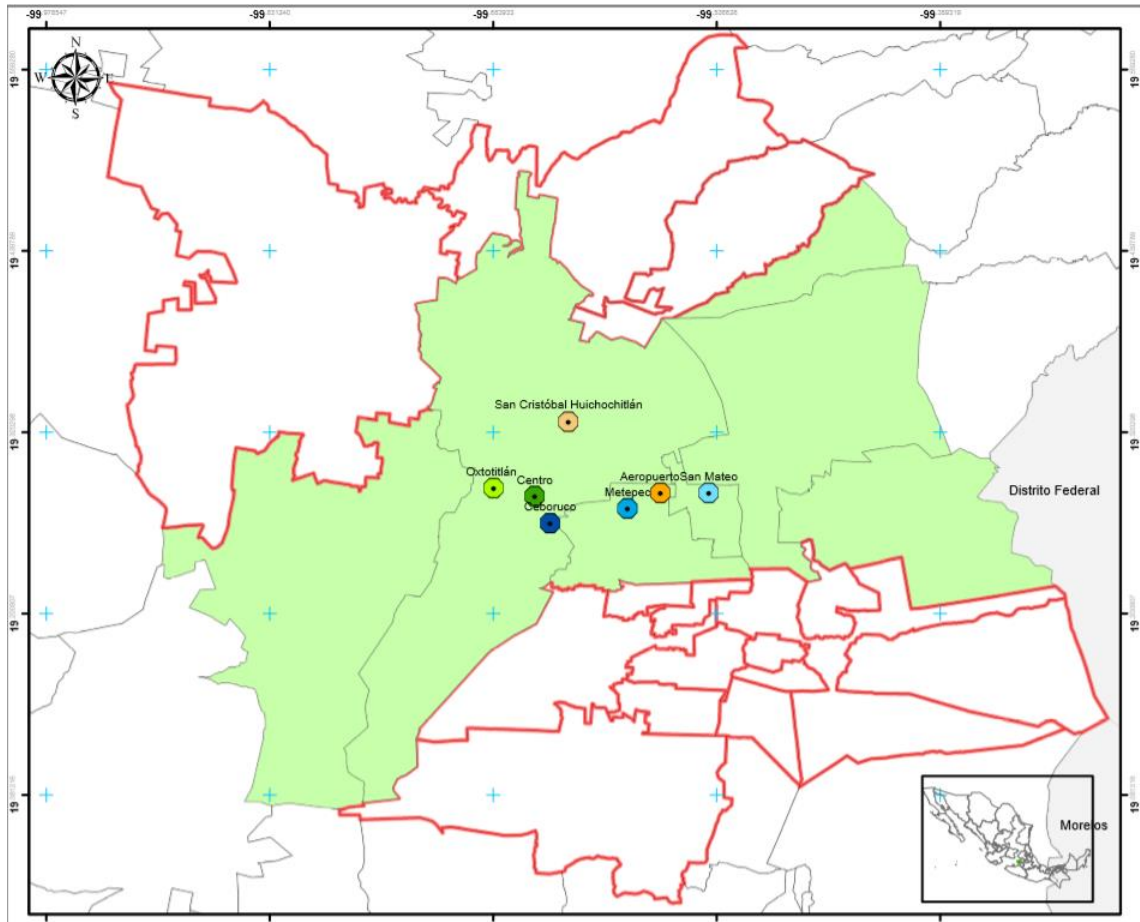
y dos en la parte central de la ZMVT; además de una unidad móvil de monitoreo que opera las 24 horas, durante todo el año por lo que la generación de datos es constante y en tiempo real, por otra parte está integrada por tres subsistemas operativos (SMA, 2012):

- a) Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).
- b) Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA).
- c) Red Meteorológica (RETMET).

Las estaciones de la RAMA-ZMVT, se dividen en tres secciones dentro de la ZMVT, tal como se muestran a continuación (SEMARNAT, 2007):

- **Zona Centro:** Toluca Centro y Oxtotitlán
- **Zona Norte:** Aeropuerto y San Cristóbal Huichochitlán
- **Zona Sur:** Metepec, Ceboruco y San Mateo Atenco

Figura 2.9.1 Estaciones de medición de la RAMA-ZMVT



Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO, 2015.

CAPÍTULO 3.

MARCO

CONTEXTUAL

“Diversos estudios epidemiológicos muestran que la exposición aguda a NO₂, puede provocar lesiones en las vías respiratorias y afectación cardiológica, ocasionando una reducción de la capacidad pulmonar y una mayor sensibilidad a los alérgenos, sin embargo el Bióxido de Nitrógeno lo respiramos todos (CRANA, 2013)”.

Este capítulo tiene como objetivo describir las características topográficas, socioeconómicas y naturales de la zona de estudio, en donde se encuentran distribuidas las estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA-ZMVT, con la finalidad de reunir un contexto de la zona de estudio para poder analizar y comprender el comportamiento del Bióxido de Nitrógeno.

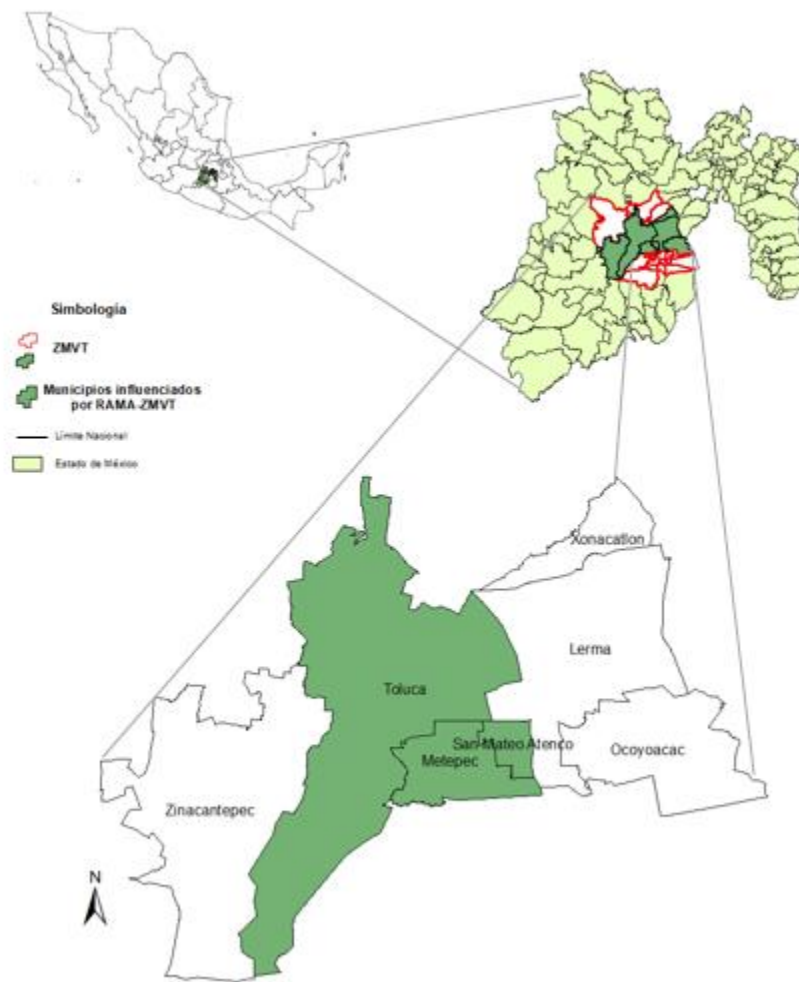
Sin embargo, a pesar que el objetivo inicial era analizar el comportamiento del NO_2 en toda la ZMVT; se observó que debido a la distribución de las estaciones de la RAMA-ZMVT, su área de influencia solo es representativa para tres municipios, por lo que, los datos obtenidos no logran cubrir la extensión de la ZMVT, ni de los municipios que contribuyen significativamente en la contaminación atmosférica; es por ello que solo se elabora, el análisis derivado de los datos de las estaciones de monitoreo atmosférico donde influye la RAMA-ZMVT.

Este capítulo se integra por dos partes, en la primera se encuentran la localización, actividades económicas, clima y vegetación de la zona de estudio y la segunda contiene el epílogo con el análisis de las características más importantes que serán argumentados a lo largo de la tesis.

3.1 Localización

La ZMVT, se localiza en la parte central del Estado de México, su altura media es de 2650 msnm. Sus coordenadas externas corresponde a los 19° 27' y 19° 03' para latitud Norte y los 99° 54' y 99° 19' longitud Oeste; las cuales se pueden apreciar en la siguiente figura (SEMARNAT, 2007).

Figura 3.1. Mapa de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

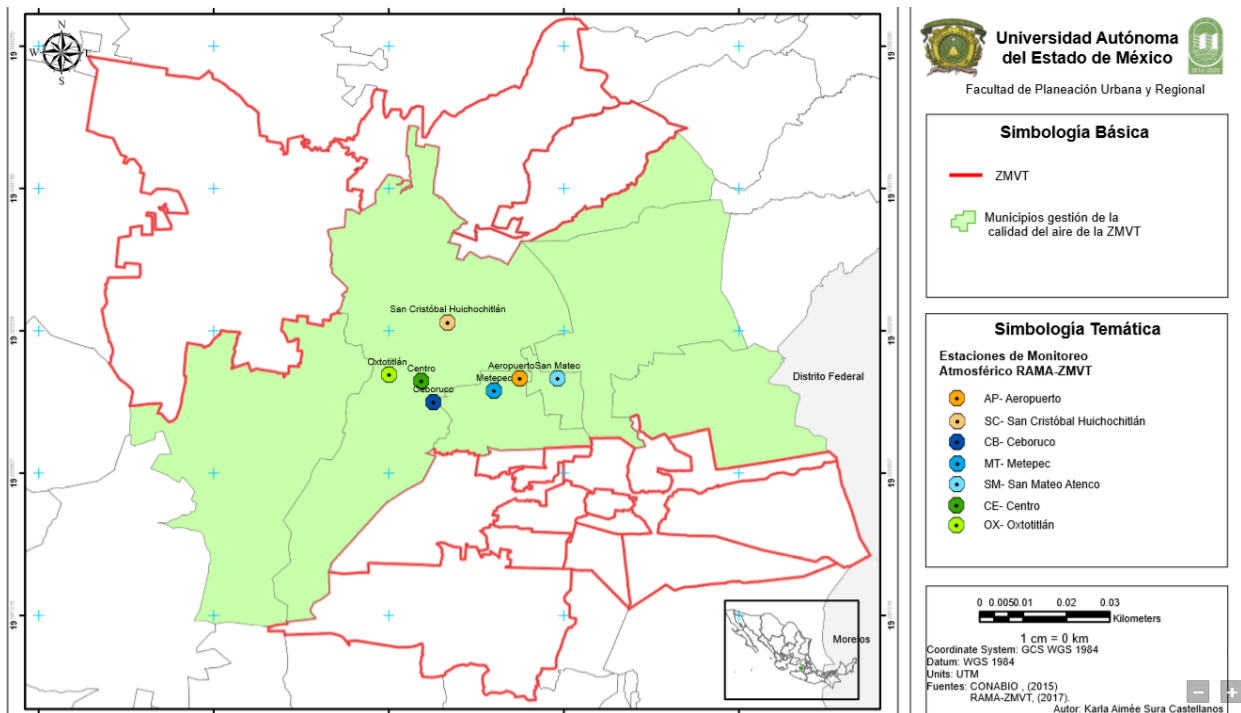


Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2017).

La ZMVT está conformada por 22 municipios los cuales abarcan una superficie de 2,669.78 km², que corresponde al 11.9% del territorio estatal, siendo la quinta zona metropolitana más grande del país (SMA, 2007).

La presente investigación solo toma en cuenta las áreas de influencia, si bien, para la gestión de la calidad del aire se consideran 7 municipios los cuales son: Lerma, Metepec, San Mateo Atenco, Toluca, Ocoyoacac, Xonacatlán y Zinacantepec; debido a que contribuyen significativamente en la contaminación atmosférica por su dinámica e interacción socioeconómica; los cuales abarcan 1,208.6 km² que corresponde al 45.2% del territorio total de la ZMVT (SEMARNAT, 2007). Como se observa en la figura 3.2. en estos municipios se encuentran las estaciones de la RAMA-ZMVT.

Figura 3.2 Ubicación de las estaciones de la RAMA-ZMVT



Fuente: Elaboración propia con base en CONABIO, 2015.

3.3 Actividades económicas

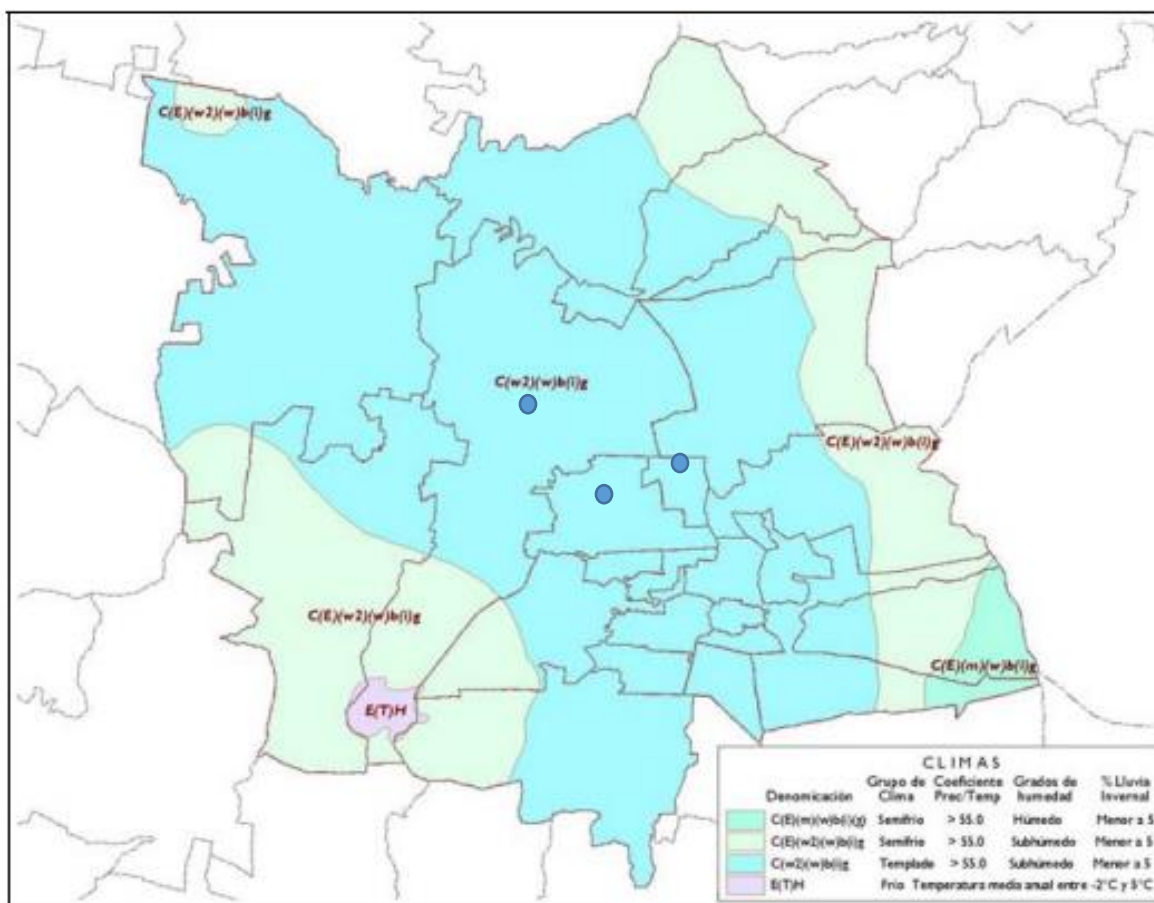
La zona de estudio, ha tenido una transformación paulatina al pasar de ser una economía rural a una economía industrial y de servicios; en donde las actividades primarias continúan siendo desplazadas, mientras las actividades terciarias predominan en gran medida (INEGI, 2010).

Las actividades industriales, comerciales y de servicios que se presentan en la zona de influencia de la RAMA-ZMVT, tiene un gran impacto en efectos ambientales, debido a las emisiones a la atmósfera de gases contaminantes, provenientes de la industria, gasolineras, combustión en la industria química y alimentaria, en hoteles, baños públicos y restaurantes, los cuales contribuyen al deterioro de la calidad del aire por la ausencia de sistemas de control de emisiones, o bien, la falta de un sistema de administración ambiental (SMA, 2012).

3.5 Clima

De acuerdo con la SMA, (2007), la clasificación climática de Köppen, modificada por E, García, en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, se presentan tres tipos de clima: templado, semifrío y frío; sin embargo el clima predominante para la zona de estudio es el templado subhúmedo.

Figura 3.3 Tipos de clima de la ZMVT, identificando los municipios influenciados por la RAMA-ZMVT.



Fuente: Elaboración propia con base en (SMA, 2007).

3.5.1 Meteorología

En los municipios influenciados por la RAMA-ZMVT, se presentan tres épocas climatológicas debido a la regularidad del tiempo atmosférico, las cuales se presentan a continuación:

- **Época seca-fría**

Se presenta, con la temperatura promedio mensual más baja durante el año, comprende los meses de noviembre a febrero con un rango de entre 9° y 14° C., está relacionado con las temperaturas bajo cero, heladas y nevadas en forma ocasional (SMA, 2007).

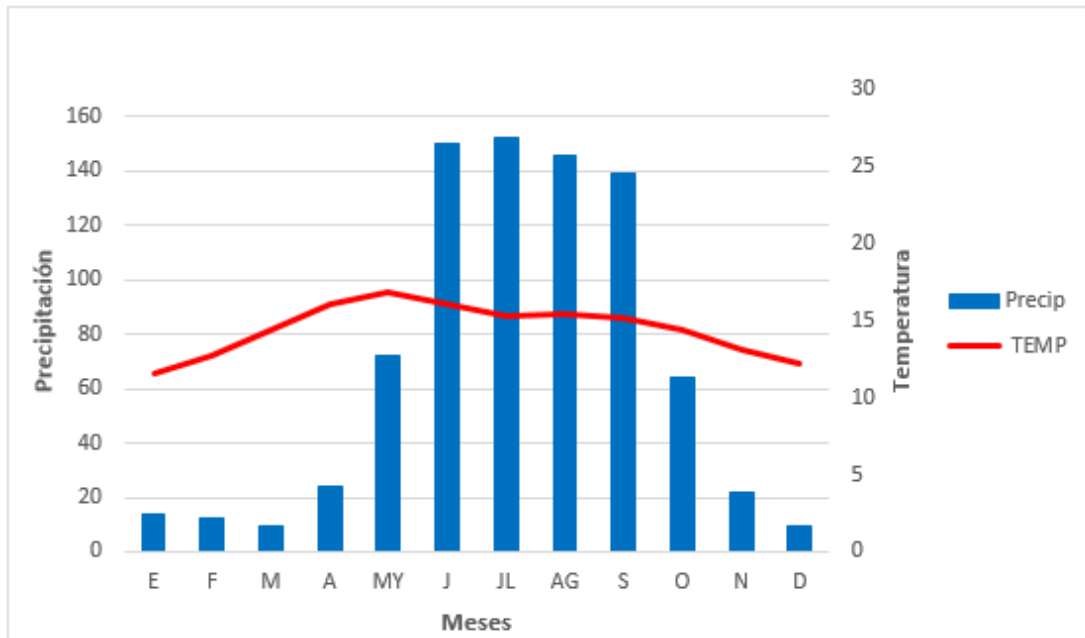
- **Época seca-cálida**

Comprende los meses de marzo a mayo, donde se presenta un aumento en la temperatura hasta llegar a los 17° C, siendo la temperatura media máxima en la zona a lo largo del año. La precipitación pluvial es poco significativa en comparación con los siguientes meses (SEMARNAT, 2007).

- **Época de lluvia**

Se caracteriza por la presencia de precipitaciones con un rango de entre 130 a 170 milímetros, en los meses de junio a octubre; Además existe una disminución de la temperatura para mantenerse entre los 11° y 17° C, (SMA, 2007).

Figura 3.4 Climograma de la zona de influencia de la RAMA-ZMVT.



Fuente: Elaboración propia con base en estaciones meteorológicas (CONAGUA, 2010).

3.6 Dinámica de vientos

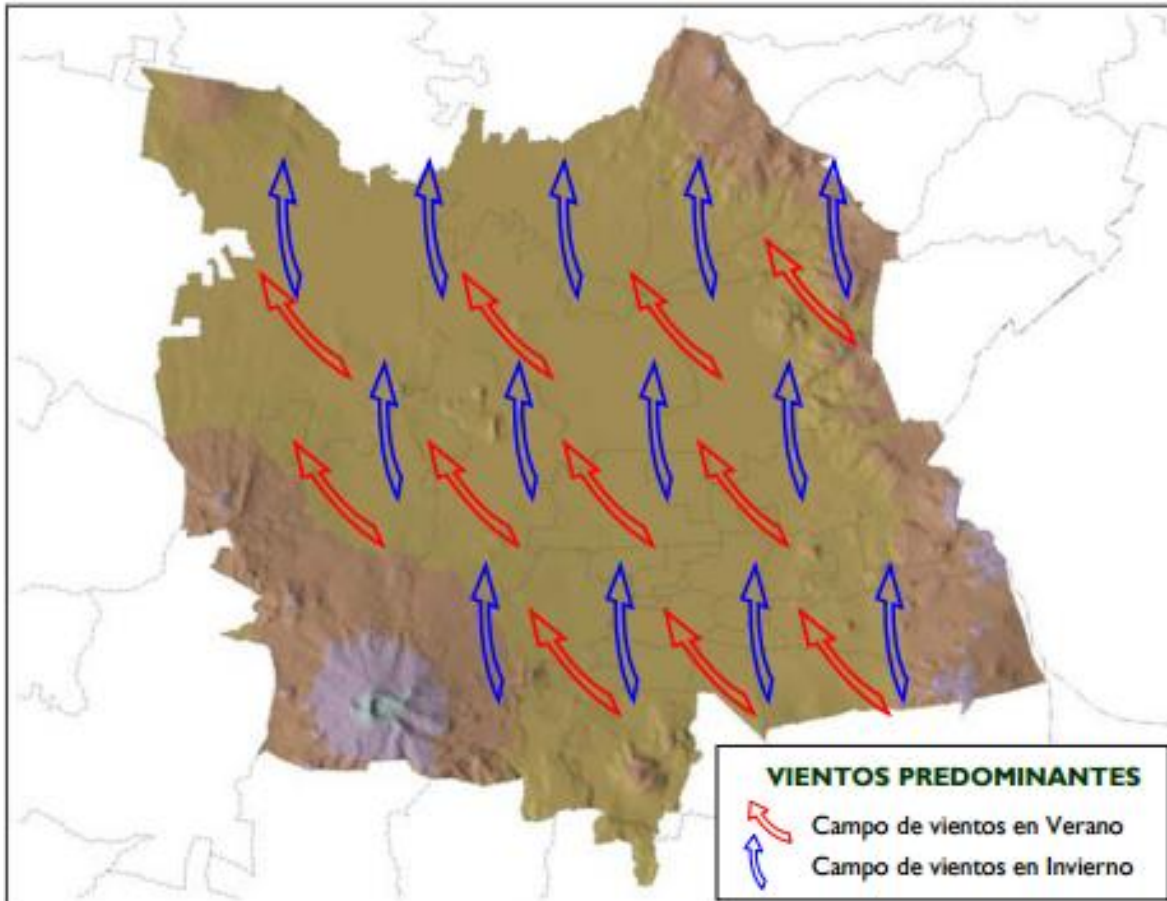
La zona de estudio se encuentra bajo influencia de sistemas meteorológicos tropicales en la época de lluvias debido a la ubicación geográfica en la que se encuentra; lo que ocasiona el paso continuo de ciclones tropicales que aportan la humedad más importante en forma de lluvias abundantes y nublados, lo cual contribuye a la remoción de los contaminantes presentes en la atmósfera (SMA, 2012).

De acuerdo con la SMA, (2007), el desplazamiento de frentes fríos y masas de aire polar predominan en la época seca-fría, y cuando estos son intensos se presentan anticiclónicos (tiempo atmosférico estable y seco) que pueden generar inversiones térmicas, originando condiciones desfavorables para la dispersión de los contaminantes.

La dinámica de los vientos que se lleva a cabo en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca es debido a que a diferencia de otras zonas metropolitanas, no se encuentra encerrada completamente por barreras naturales, lo cual favorece la

circulación del viento y su ventilación se ve favorecida la mayor parte del año, así como en los siete municipios de estudio para la gestión de la calidad del aire (SMA, 2012).

Figura 3.5 Vientos predominantes de la ZMVT



Fuente: (SMA, 2007).

CAPÍTULO 4.

MARCO JURÍDICO

“La calidad del aire ha sido un indicador de cumplimiento de derechos como el derecho al medio ambiente sano y el derecho a la salud en el marco de la Organización de Estado Americanos. México es el segundo país con mayor número de decesos por consecuencia de contaminación del aire en toda América Latina, (CEMDA, 2016)”.

Este capítulo presenta las leyes y normas aplicables para el control, emisión y evaluación del NO₂, con la finalidad de conocer el funcionamiento de la ley respecto a su posible o no cumplimiento, además de los factores que lo hacen posible, así como las instituciones encargadas de su acatamiento en los municipios de la ZMVT.

Dicho capítulo se integra de dos secciones, en la primera se presenta la relación de las leyes en el ámbito internacional, nacional, federal y municipal además de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), y en la segunda sección el epílogo en donde se reúnen los juicios necesarios para realizar un análisis en materia legal de las leyes y normas que rigen y controlan las emisiones del NO₂ en los diferentes niveles de gobierno.

4.1 Ámbito Internacional

4.1.1 Derechos Humanos y la calidad del aire

El término calidad del aire, en el marco de la gestión ambiental se refiere al estado del aire que rodea a los seres humanos. Por lo tanto, se debe garantizar el desarrollo normal de las funciones vitales que hacen posible la vida. Es por ello que la calidad del aire juega un papel fundamental en el cumplimiento de los derechos humanos, ya que es un elemento indispensable para la vida humana, donde la buena o mala calidad del aire incide de manera directa en el cumplimiento de los derechos (Unidas, 2006).

4.1.1.1 El derecho a la vida

La Organización Mundial de la Salud (OMS), y el PNUMA, han destacado que la contaminación del aire es una de las áreas que es necesario atender para combatir causas fundamentales de mortalidad y morbilidad a nivel mundial, ya que afirman que para 2008, la mortalidad estimada atribuible a la contaminación del aire ambiental en ciudades ascendía a 1.34 millones de muertes (CEMDA, 2016).

4.1.1.2 Derecho a la salud

El derecho a la salud es un derecho internacionalmente reconocido desde 1948 en distintos tratados internacionales. El Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, establece que los estados reconocen el derecho de toda persona a disfrutar del nivel más alto de salud física y mental (CEMDA, 2016).

El derecho a la salud comprende un amplio conjunto de factores que pueden contribuir a una vida sana; uno de estos factores es contar con un medio ambiente saludable, el cual establece al aire como elemento básico para el medio ambiente, por lo que resulta un factor determinante de la salud; es por ello que su buena o mala calidad trasciende directamente en el cumplimiento de este derecho (Unidas, 2006).

4.1.1.3 El derecho a un medioambiente sano.

Inició con la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, conocida también como la Cumbre de la Tierra; El cual cuenta con 27 principios de contenido que establecen criterios para la protección al ambiente (Unidas, 2002).

Sin embargo surgieron otros resultados de esta conferencia, en tema del aire de las cuales destacan las siguientes:

- ✓ La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)
- ✓ El Protocolo de Kioto de la CMNUCC de 1977
- ✓ Los Objetivos de Desarrollo del Milenio del 2000
- ✓ El Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes del 2000.

Tabla 4.1. Comparación de las Directrices de la OMS sobre calidad del aire y las NOM en México y Estados Unidos

Contaminante Clave NOM	Especificación NOM	Actualización	OMS	EEUU. EPA
Bióxido de Nitrógeno (NO ₂) NOM-023 SSA1-1993	0.21 ppm en una hora una vez al año	23 de Diciembre de 1994	0.2 ppm máximo 1 hora 0.04 ppm promedio anual	0.053 ppm promedio trianual del percentil 99 0.053 ppm promedio anual

Fuente: Elaboración propia con base en (CEMDA, 2016).

4.2 Ámbito nacional

El marco legal señala distintas instituciones responsables del diseño, planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de la vigilancia de las políticas públicas en materia de calidad del aire. A nivel federal, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), es la primera que se encarga de fomentar la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales y bienes y servicios ambientales, con el fin de propiciar su aprovechamiento y desarrollo sustentable (CEMDA, 2016).

Tabla 4.2. Instituciones responsables de la vigilancia de las políticas públicas en materia de calidad del aire

Instituciones	Objeto
SEMARNAT a través de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. (RETC). Y el Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM), DGCARETC	Planeación de la política e implementación
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)	Institución de investigación
Gobiernos de las entidades federativas	Planeación local
Ministerios de medio ambiente	Implementación

Fuente: Elaboración propia con base en (CEMDA, 2016).

De acuerdo con la OMS, en México se producen cerca 9 mil 300 muertes al año asociadas con la contaminación del aire; así mismo el Sistema Nacional de Información en Salud mexicano indica que la mortalidad por enfermedades respiratorias es la tercera causa de muerte en niños y niñas de 0 a 4 años. En este sector de la población ocurren el 90% de las muertes por infección respiratoria aguda (IRA), y el 60% de la mortalidad por asma (CEMDA, 2016).

A nivel nacional, el derecho a la vida se ha incorporado al sistema jurídico, mediante el Artículo 4° constitucional y reglamentado a través de la Ley General de Salud, publicada en 1984, la cual tiene entre sus objetivos el bienestar físico y mental de la persona, para contribuir al ejercicio pleno de sus capacidades así como la prolongación y mejoramiento de la calidad de la vida humana.

4.2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM)

Dentro de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, se integran artículos que se basan específicamente en materia de calidad del aire; tales como el Artículo 26°, el cual menciona que el Estado debe organizar un sistema de planeación democrática de Desarrollo Nacional mediante mecanismos de participación social, para incorporarlas al plan y los programas de desarrollo (SEGOB, 2016); así como un Plan Nacional de Desarrollo (PND), al que se sujeten de manera obligatoria los programas de la Administración Pública Federal (SEGOB, 2016).

El PND 2013-2018, busca fortalecer la política nacional del cuidado al medio ambiente para transitar hacia una economía competitiva sustentable y de bajo Carbono, el cual tiene como líneas de acción contribuir a mejorar la calidad del aire mediante combustibles más eficientes, programas de movilidad sustentable y la eliminación de los apoyos a los usuarios de combustibles fósiles, así como lograr un mejor monitoreo de la calidad del aire mediante mayor calidad de los sistemas de monitoreo existentes y una cobertura más amplia de ciudades (CEMDA, 2016).

El Artículo 27° de la CPEUM, menciona que se deberán dictar las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico; así mismo corresponde también a la Nación el aprovechamiento de los combustibles nucleares para la generación de energía nuclear y la regulación de sus aplicaciones en otros propósitos. El uso de la energía nuclear sólo podrá tener fines pacíficos (SEGOB, 2016).

Por otra parte el Artículo 4° de la CPEUM, menciona que se debe contar con un medio ambiente sano, el cual es reconocido como derecho humano; es por ello que en el 2011, la reforma constitucional señaló un cambio significativo para México, debido a que dentro del Marco Jurídico Nacional se establece que los estándares

internacionales basados en los derechos humanos, se deberán cumplir a nivel Nacional; derivado de ello, surgen una serie de obligaciones para la calidad del aire; las cuales se fundamenta a través de la CPEUM y los tratados internacionales mencionados anteriormente; Sin embargo la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), su Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica y la Ley General de Salud se encargan de las leyes secundarias (CEMDA, 2016).

4.2.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

La LGEEPA, tiene como objetivo formular la política ambiental nacional en materia de atmósfera así como la prevención y control de la contaminación del aire. Por otra parte se encarga de las competencias y coordinación de las autoridades a nivel federal, estatal y municipal.

En los Capítulos I y II, se establece que los contaminantes de la atmósfera, de fuente artificial, natural, fijas o móviles, deberán ser reducidas y controladas, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico (CEMDA, 2016).

Así mismo en los artículos 1°, 7° y 8°, se establece que la LGEEPA debe prevenir y controlar la contaminación del aire, agua y suelo, la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas industriales así como la vigilancia del cumplimiento de las NOM, expedidas por la Federación; que se ejecutan a través de la Dirección General de Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (DGCARETC), (FAO, 2000).

La LGEEPA y a Ley General de Salud (LGS), trabajan en conjunto para la creación NOM, como instrumentos para al cumplimiento del derecho al medio ambiente sano y protección a la salud (DOF, 2007).

Las NOM, existentes en materia de calidad del aire, son aprobadas por el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario y expedidas por la Secretaría de Salud; Estas establecen los criterios para evaluar la calidad del aire y determinan el valor permisible para la concentración de contaminantes, los cuales son: O₃, el Monóxido de Carbono (CO), Bióxido de Azufre (SO₂), NO₂, PM10 y plomo (Pb), (CEMDA, 2016).

Sin embargo, las NOM expedidas por la SEMARNAT, son aprobadas por el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, debido a que establecen los métodos de medición para la concentración de los contaminantes criterio, los procedimientos para los equipos de medición, establecen los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de contaminantes provenientes de fuentes fijas (refinerías, fábricas, plantas de producción, estaciones de servicio y autoconsumo de gasolina, etc.) y de fuentes móviles (el escape de vehículos automotores pesados, motocicletas, que usen gasolina, Diésel, gas natural u otros combustibles alternos), (SEGOB, 2016).

4.3 Ámbito municipal

La calidad del aire de los municipios representativos de la ZMVT, es regulada por las Normas Oficiales Mexicanas, las cuales son establecidas por la federación, en respuesta a la necesidad de vivir en un ambiente limpio.

Los programas creados para la gestión del aire en la ZMVT, son iniciativa del Gobierno del Estado de México (GEM), para cumplir dichas las normas, conjunto de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México (SMA), el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de la Secretaría de Medio Ambiente (INECC), Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), las autoridades municipales y de otras dependencias estatales y federales.

4.3.1 Aire limpio: para el Valle de Toluca 2007-2011

El programa incorpora la información actualizada y disponible respecto al inventario de emisiones y el monitoreo de calidad del aire, así como estudios realizados en México con relación al valor económico de los efectos de la contaminación en la salud. Así también, presenta un mecanismo de evaluación y seguimiento de objetivos y metas; sin embargo para su cumplimiento es necesario ser examinado para constatar su eficacia, y se evaluara para determinar la conveniencia de rediseñar, reforzar o incluir otras medidas (SEMARNAT, 2007).

Cuenta con seis estrategias generales enfocadas principalmente en:

- Abatimiento de la erosión.
- Emisión de partículas.
- Eficiencia de los vehículos y del transporte público.
- Cumplimiento de la normatividad ambiental mediante programas de producción más limpia.
- Gestión ambiental rentable.
- Fortalecimiento de la planeación ambiental y urbana.

Dichas estrategias, tiene como objetivo disminuir las emisiones contaminantes, contribuyendo con ello a la protección de la salud de la población de la ZMVT, (SEMARNAT, 2007).

De acuerdo con la SEMARNAT (2007), en la ZMVT, se representa la mayor demanda energética por gasolina, debido al incremento del parque vehicular y al congestionamiento vial. Sin embargo, las mejoras que se realizan en la calidad de los combustibles y las nuevas tecnologías, modifican la calidad del aire; por lo que se tienen que considerar en las políticas ambientales para prevenir y controlar las emisiones de estas actividades socioeconómicas.

Tabla 4.3. Inventario de emisiones de fuentes puntuales para los NOx, en el Valle de Toluca

Subsectores de la industria manufacturera	Ton/año
	NOx
Productos alimenticios, bebidas y tabaco	135.3
Textiles, prendas de vestir e industria del cuero	26.9
Producción de papel, productos de papel, imprentas y editoriales	3.7
Sustancias químicas y artículos de plástico y hule	1,335.5
Productos minerales no metálicos	148
Industrias metálicas básicas	8.3
Productos metálicos, maquinaria y equipo	168
Otras industrias manufactureras	
Total	1,692.9

Fuente: (SEMARNAT, 2007).

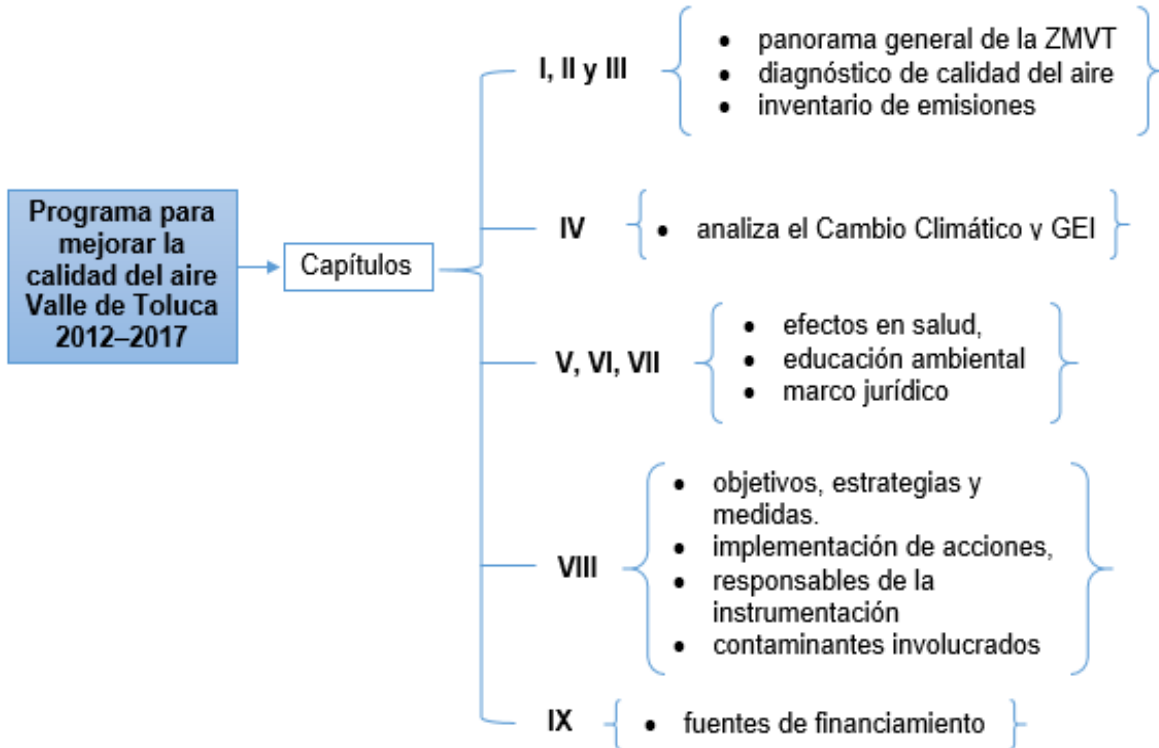
El subsector de sustancias químicas y artículos de plástico y de hule, es el que más contribuye con las emisiones de NOx. El monitoreo atmosférico proporciona información acerca del estado del aire y representa una herramienta fundamental para la gestión de la calidad del aire. Es por ello que la red de monitoreo atmosférico debe ser validada mediante planes y programas de aseguramiento y control de calidad y procesada estadísticamente para la obtención de indicadores que permitan evaluar la calidad del aire en una zona específica (SEMARNAT, 2007).

4.3.2 Programa para mejorar la calidad del aire Valle de Toluca 2012–2017

El programa incorpora la información más reciente y disponible de los inventarios de emisiones, el monitoreo de calidad del aire, así como los efectos en salud por la contaminación; además se integró un comité núcleo en los que participaron grupos de trabajo representados por las autoridades federal, estatal y municipales de los

rubros de salud y medio ambiente; sector académico; asociaciones; organizaciones no gubernamentales e institutos de investigación (SMA, 2012).

Figura 4.1 Integración del Programa para mejorar la calidad del aire Valle de Toluca 2012–2017



Fuente: Elaboración propia con base en (SMA, 2012)

Durante la vigencia del programa las dependencias federales, estatales y municipales se harán cargo del seguimiento y la evaluación del cumplimiento, lo que permitan la reducción de emisiones contaminantes; por otra parte se determinara si es necesario reforzar las acciones para su cumplimiento, con el fin de alcanzar el objetivo del programa; y así mejorar la política en materia ambiental, que permita mejorar la calidad del aire y proteger la salud de la población (SMA, 2012).

4.4 Normas Oficiales Mexicanas (NOM)

4.4.1 NOM-085-SEMARNAT-2011,

Contaminación atmosférica-niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición.

La Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, regula la contaminación atmosférica de niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición.

Esta norma establece los niveles máximos permisibles de emisión de humo, partículas, Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azufre (SO₂), y NO_x, de los equipos de combustión de calentamiento indirecto que utilizan combustibles convencionales o sus mezclas, con el fin de proteger la calidad del aire (SEMARNAT, 2012).

La medición de las emisiones de los NO_x, debe realizarse periódicamente y bajo los límites normados, así como con los métodos adecuados que se establecen dentro de la norma, los cuales se muestran a continuación. Sin embargo si se requiere utilizar un método alternativo se necesita la autorización de la Secretaría (SEMARNAT, 2012).

Tabla 4.4. Niveles máximos permisibles de emisión de Óxidos de Nitrógeno, ppm, en los equipos existentes a la entrada en vigor de la NOM

Capacidad térmica nominal del equipo gj/h	Tipo de combustible	Humo # de mancha	Partículas, mg/m3			Óxidos de Nitrógeno, ppm		
			ZVM	ZC	RP	ZVM	ZC	RP
Mayor de 0.53 a 5.3 (Mayor de 15 a 150 CC)	Líquido	3	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Gaseoso	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Mayor de 5.3 a 42.4 (Mayor de 150 a 1 200 CC)	Líquido	NA	75	350	450	190	190	375
	Gaseoso		NA	NA	NA	190	190	375
Mayor de 42.4 a 106 (Mayor de 1 200 a 3 000 CC)	Líquido	NA	60	300	400	110	110	375
	Gaseoso		NA	NA	NA	110	110	375
Mayor de 106 a 530 (Mayor de 3 000 a 15 000 CC)	Sólido y Líquido	NA	60	250	350	110	110	375
	Gaseoso		NA	NA	NA	110	110	375
Mayor de 530 (Más de 15 000 CC)	Sólido y Líquido	NA	60	250	350	110	110	375
	Gaseoso		NA	NA	NA	110	110	375

Fuente: Elaboración propia con base en NOM-085-SEMARNAT-2011.

ZVM: zona del valle de México; ZC: zonas críticas; RP: resto del país; NA: no aplica.

4.4.2 NOM-023-SSA1-1993,

Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al Bióxido de Nitrógeno (NO₂). Valor normado para la concentración de Bióxido de Nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población.

Esta norma se evalúa mediante un valor normado para la concentración de NO₂, como medida de protección a la salud de la población. El cual es emitido principalmente por los procesos de combustión, siendo ésta la fuente más importante de su emisión a la atmósfera; El NO₂ es un contaminante primario y potencialmente dañino para el medio ambiente, además de ser uno de los precursores del Ozono (DOF, 1994).

Dentro de la NOM-023-SSA1-1993, se establece el valor máximo permisible para la concentración de NO₂, en el aire de todo el territorio mexicano; el cual es aplicable en las políticas de saneamiento ambiental referente a la salud humana, actividades o situaciones ambientales que causen o puedan causar riesgos o daños a la salud de las personas y para la contaminación ambiental que se origine por este contaminante (DOF, 1994).

Esta norma es complementada con la NOM-CCAM-004-ECOL/1993, en la cual se establecen los métodos de medición para fijar las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno en el aire y los procedimientos para los equipos de medición.

La concentración que se establece en esta NOM, para el NO₂, no debe rebasar el límite máximo normado de 0.21 ppm, lo que es equivalente a 210 µg/m³, en una hora una vez al año, como protección a la salud de la población (DOF, 1994).

4.4.3 NOM-037-ECOL-1993,

Establece los métodos de medición para determinar la concentración de Bióxido de Nitrógeno en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-037-ECOL-1993, que establece los métodos de medición para determinar la concentración de Bióxido de Nitrógeno en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición; la evaluación de la calidad del aire en los asentamientos humanos, necesita que los equipos, estaciones y sistemas de monitoreo, apliquen métodos confiables y homogéneos para la medición de cada contaminante (SEMARNAT, 2003).

El método de referencia para determinar la concentración de Bióxido de Nitrógeno en el aire ambiente, es el de quimioluminiscencia en fase gaseosa, el cual permite medir la concentración de NO_2 , de forma indirecta, por la determinación de la intensidad de la luz a longitudes de onda superiores a 600 nanómetros (nm), que resulta de la reacción de quimioluminiscencia del Óxido Nítrico (NO) con el Ozono (O_3) (SEMARNAT, 2003). Las mediciones se realizan en forma continua mediante el uso de procesos automatizados, y reportan los valores al público; las concentraciones se calculan en partes por millón (ppm), en promedios por minuto, reportándose el valor máximo del día. Sin embargo las mediciones de NO se pueden hacer de manera conjunta, utilizando NOM-037-ECOL-1993 sistema dual o en forma cíclica, con el mismo sistema, siempre y cuando la duración del ciclo no sea mayor de un minuto (SEMARNAT, 2003).

Por otra parte, la Secretaría de Desarrollo Social por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, es la autoridad para vigilar el cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana y su incumplimiento será sancionado por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, su Reglamento en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera (SEMARNAT, 2003).

4.4.4 NOM-EM-167-SEMARNAT-2016

Establece los niveles de emisión de contaminantes para los vehículos automotores que circulan en la Ciudad de México, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala; los métodos de prueba para la certificación de dichos niveles y las especificaciones de los equipos que se utilicen para dicha certificación, así como las especificaciones para los equipos tecnológicos que se utilicen para la medición de emisiones por vía remota y para la realización de dicha medición.

Esta norma establece los niveles de emisión de contaminantes para los vehículos automotores que circulan en la Ciudad de México, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala; así como los métodos para la certificación de dichos niveles, además de las especificaciones para los equipos tecnológicos que se utilicen para la medición de emisiones (SEMARNAT, 2016).

Los límites máximos permisibles de emisión establecidos son para los hidrocarburos, Monóxido de Carbono, Oxígeno y Óxidos de Nitrógeno, así como también existen los límites relacionados al coeficiente de absorción de luz, partículas y al porcentaje de opacidad provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina y diésel (SEMARNAT, 2016).

Tabla. 4.5 Límites máximos permisibles de emisión de NO₂, para vehículos que utilizan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y diésel

Estándar de durabilidad a 80,000 km			
Estándar	Clase	NOx g/km	
		Gasolina, gas L.P. y gas natural	Diésel
A	VP	0.25	0.62
	CL1 y VU		
	CL2 y VU	0.44	0.62
	CL3 y VU		
	CL4 y VU		
B	VP	0.249	
	CL1 y VU		
	CL2 y VU		
	CL3 y VU		
	CL4 y VU		

Fuente: (SEMARNAT, 2016).

Estándar A. Límites máximos permisibles para vehículos año modelo 2006 y hasta 2009.

Estándar B. Límites máximos permisibles para vehículos año modelo 2007 y posteriores.

4.5 NOM-041-SEMARNAT-2015

Establece los límites máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.

Esta norma fue publicada en el año 2007 y estableció los siguientes valores para la emisión de contaminantes criterios de los modelos automovilísticos de 1990 y preliminares:

- HC 150 ppm,
- CO de 1,5% de concentración
- O₂ de 3% de concentración
- NOx 2 500 ppm (SEMARNAT, 2015).

Y para modelos posteriores, los valores son:

- HC de 100 ppm
- CO de 1% de concentración
- O₂ de 3% de concentración
- NO_x de 1 500 ppm (SEMARNAT, 2015).

Se considera la aplicación de la norma a nivel nacional, lo que permite la medición y control de NO_x, ya que es el precursor del Ozono, lo que conlleva a tener beneficios ambientales y en la salud humana a nivel nacional. Además proporciona un gran beneficio, debido a que se obtendrá información sobre el registro de la emisión de NO_x de las fuentes móviles, los cuales podrán ser registrados en el Inventario General de Emisión a la Atmósfera y el Inventario de GEI, (SEMARNAT, 2015).

Tabla 4.6 Límites máximos permisibles de emisiones de NO_x, del método dinámico

Año – Modelo vehicular	Óxidos de Nitrógeno (NO_x, ppm)	Factor Lambda Max.
1990 y Anteriores	2500	1,05
1991 y Posteriores	1500	1,05

Fuente: (SEMARNAT, 2015).

Las mediciones se llevan a cabo por Centros de Verificación Vehicular y la sanción por la violación de la norma a cargo de la LGEEPA y su reglamento, además de otros departamentos jurídicos que llegaran a aplicar (SEMARNAT, 2015).

4.4.6 NOM de los Óxidos de Nitrógeno (NOx)

Tabla 4.7 NOM más relevantes de los Nox

No.	NOM	Objetivo
1	NOM-023-SSA1-1993	Valor máximo permisible de 0.21 ppm, en una hora una vez al año para la concentración de NO ₂ , en el aire de todo el territorio mexicano; aplicable en las políticas de saneamiento ambiental referente a la salud humana y para la contaminación ambiental (DOF, 1994).
2	NOM-037-ECOL-1993	Métodos de medición para determinar la concentración de NO ₂ en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición (SEMARNAT, 2003).
3	NOM-085-SEMARNAT-2011	Niveles máximos permisibles de emisión de humo, partículas de NO _x , de los equipos de combustión de calentamiento indirecto que utilizan combustibles convencionales o sus mezclas, con el fin de proteger la calidad del aire (SEMARNAT, 2012).
4	NOM-EM-167-SEMARNAT-2016	Niveles de emisión de contaminantes como los NO _x , para vehículos automotores que circulan en el Estado de México; además de los métodos para la certificación de los niveles y las especificaciones para los equipos para la medición de emisiones (SEMARNAT, 2016).
5	NOM-041-SEMARNAT-2015	Límites máximos permisibles de emisión de NO _x , aplicable a nivel nacional, provenientes del escape de los vehículos que usan gasolina, por parte de los centros de verificación vehicular (SEMARNAT, 2015).

Fuente: (DOF, 1994); (DOF, 1994); (SEMARNAT, 2012); (SEMARNAT, 2016); (SEMARNAT, 2015).

CAPÍTULO 5.

RESULTADOS Y

OBSERVACIONES

“La mayor parte del material particulado y gaseoso que contamina el aire, es producido por la actividad humana y proviene principalmente de los centros urbanos e industriales (CEPIS, 2005)”.

Este capítulo tiene la finalidad de presentar un análisis cuantitativo sobre los resultados del comportamiento del NO₂, en el periodo 2011–2016; mediante promedios anuales, mensuales y diarios; lo cual se llevara a cabo empleando datos de tipo cuantitativo, procedentes de bases de datos generadas a partir de la RAMA-ZMVT.

Este capítulo está integrado por tres apartados generales; el primero muestra el comportamiento del NO₂, por medio de gráficas en las cuales se puede observar el aumento que han tenido las concentraciones de manera anual, así como las horas del día y los meses donde se presentan las concentraciones más elevadas. El segundo apartado presenta una correlación de variables cuantitativas entre el Bióxido de Nitrógeno y la Radiación Solar, para encontrar la influencia que existe entre ellas; lo cual permitirá comprobar o negar la hipótesis de la investigación. Y por último en el tercer apartado se presenta el epílogo del capítulo donde se muestran los datos más relevantes.

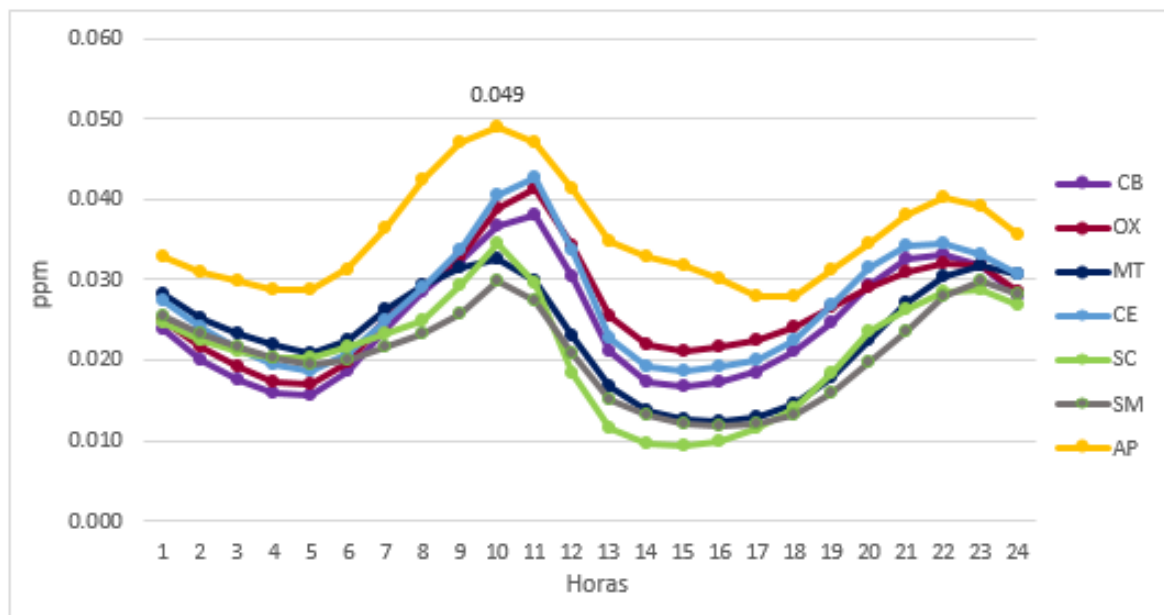
5.1 Bióxido de Nitrógeno (NO₂)

5.1.1 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico, hora en todas las estaciones de la RAMA

5.1.1.1 Concentraciones del NO₂, por estación de monitoreo atmosférico y hora, en todas las estaciones de la RAMA en el año 2011

Se observa en la gráfica 5.1.1.1 que las concentraciones presentan dos elevaciones notorias en horarios establecidos entre las 7:00 – 12:00 horas y 20:00 - 24:00 horas, presentando una concentración promedio máxima de 0.049ppm; siendo la estación Aeropuerto la que presenta las mayores concentraciones.

Gráfica 5.1.1.1 Concentración de NO₂, por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2011.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2011.

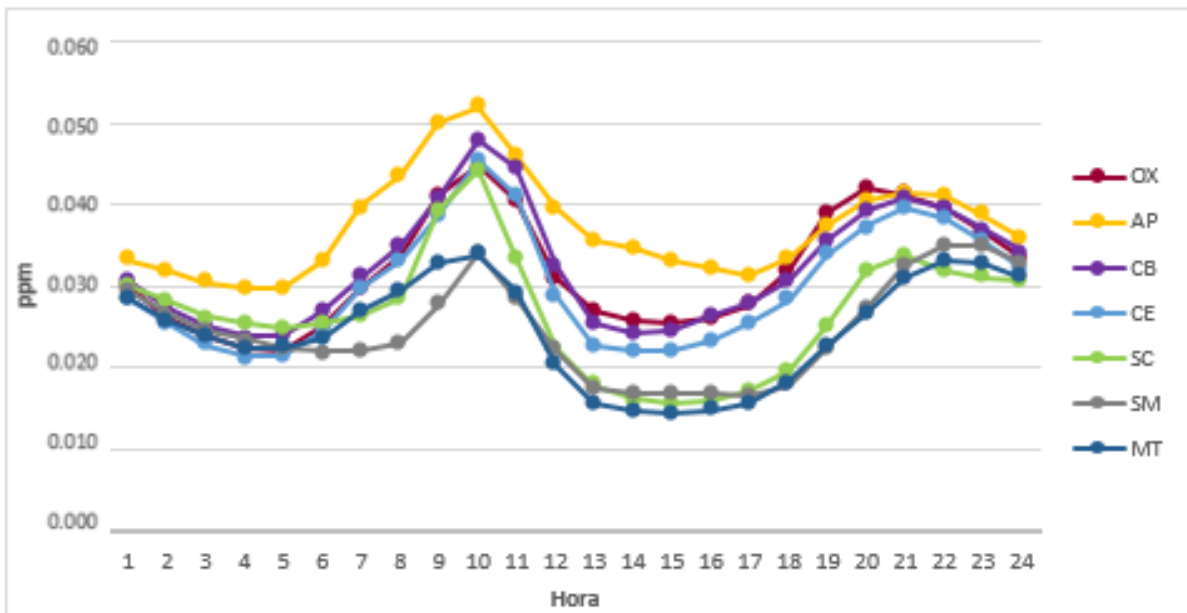
Las concentraciones, presentan un incremento después de las horas pico para el tránsito vehicular tanto en el en horario diurno a las 8:00 horas, como del nocturno 20:00 horas (Contreras, 2013). Sin embargo a pesar que la estación Aeropuerto

presenta la mayor concentración, no rebasa el límite máximo permisible de 0.21 ppm, en una hora, una vez al año, establecido en la NOM-023-SSA1-1993.

5.1.1.2 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico y hora, en todas las estaciones de la RAMA en el año 2012

Las mayores concentraciones que se presentaron en este año fueron dos, la primera en el horario diurno de 7:00 hrs a 12:00 hrs. y la segunda en el nocturno de 19:00 hrs. a 24:00 hrs. con una concentración máxima de 0.053 ppm.

Gráfica 5.1.1.2 Concentración de NO₂, por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2012.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2012.

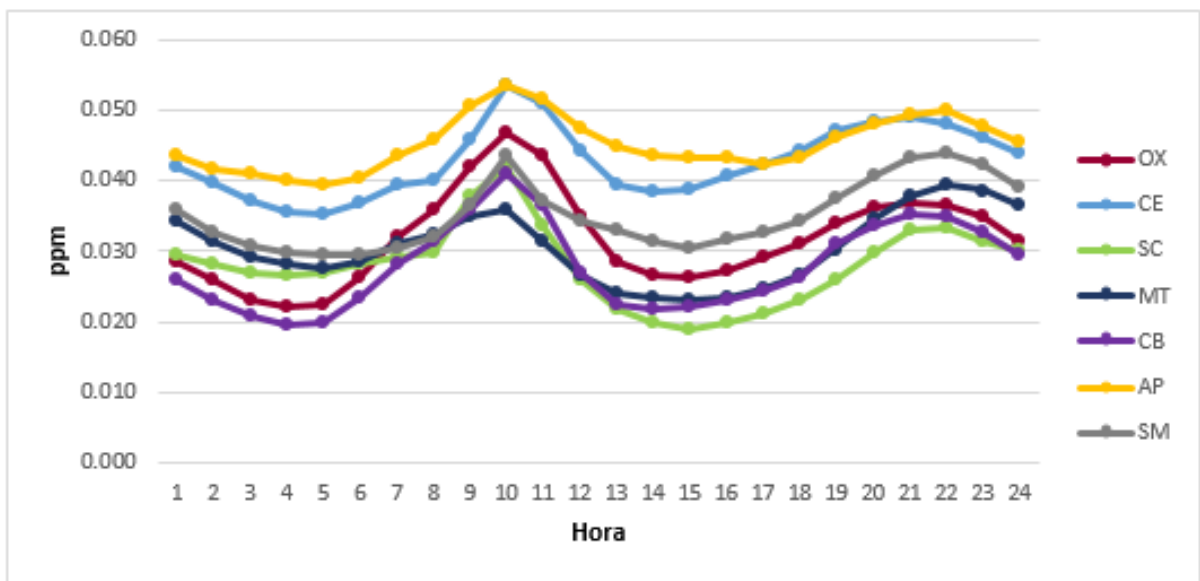
En comparación con los datos del año 2011, se tuvo un incremento en todas las estaciones, sin embargo la estación Aeropuerto, mantuvo las mayores concentraciones, incrementándose en el momento que la radación Solar inicia, y disminuyendo por las tardes debido a que el NO₂, sufre un proceso de reconversión, permitiendo la generación de Ozono, con base en Galán & Fernández, 2006; por lo que el segundo pico de la gráfica 5.1.1.2 se le atribuye a la combustión de los

automóviles, los cuales mantienen el límite máximo permisible de 0.21 ppm, en una hora, una vez al año, establecido en la NOM-023-SSA1-1993.

5.1.1.3 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico y hora en todas las estaciones de la RAMA en el año 2013

Se puede observar en la gráfica 5.1.1.3 que las estaciones de la RAMA, presentan un comportamiento de concentraciones similar entre ellas; sin embargo entre las 8:00–12:00 horas y 21:00-24:00 horas, se presentan la concentración máxima promedio de 0.054ppm., siendo la estación Aeropuerto y Centro las que presenta las mayores concentraciones.

Gráfica 5.1.1.3 Concentración de NO₂, por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2013.



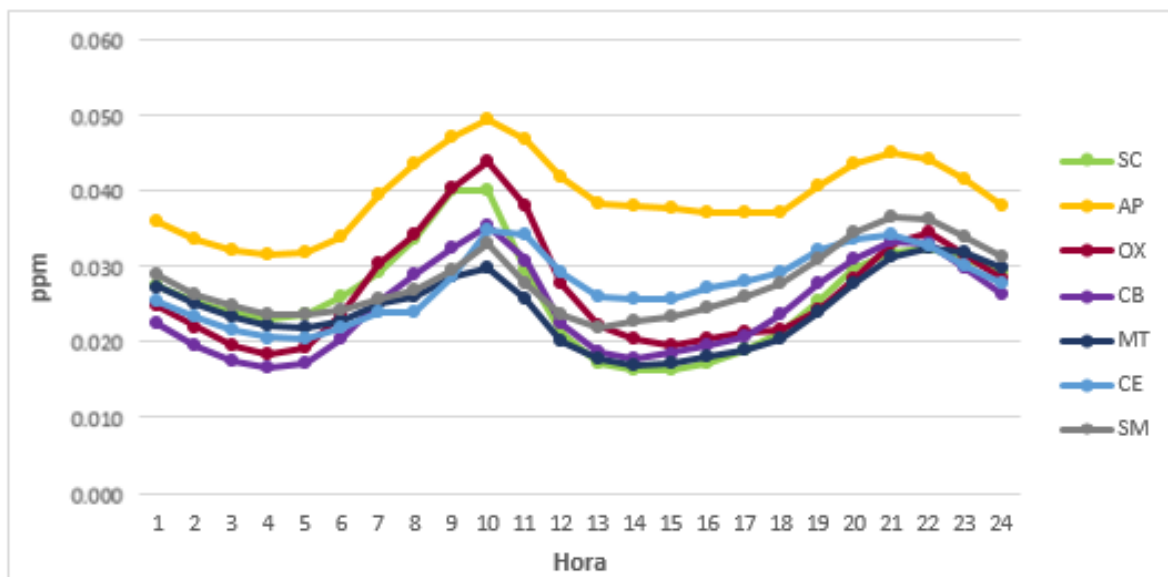
Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2013.

De acuerdo con los años anteriores se puede observar la gráfica 5.1.1.3 que para el 2013, existe un aumento continuo de las concentraciones en todas las estaciones, sin embargo la estación CE, en especial tuvo un aumento drástico alcanzando a la estación AP, por lo que de acuerdo con (Contreras, 2013) se atribuye al aumento de congestión vial en las horas pico de la ciudad de Toluca, debido a que la circulación se vuelve lenta por el aumento del transporte público y automóviles particulares.

5.1.1.4 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico y hora en todas las estaciones de la RAMA en el año 2014

En la gráfica 5.1.1.4 que se muestra a continuación, se puede observar que la estación AP continua siendo la que presenta las mayores concentraciones de NO₂ mostrando una ligera disminución por la tarde. Asimismo la estación CE tuvo una deducción mayor, en relación con el promedio del año 2013: Sin embargo para todas las estaciones siguen permaneciendo dos elevaciones evidentes en horario diurno de 7:00 a 12:00 hrs. y nocturno de 19:00 a 23:00 hrs.

Gráfica 5.1.1.4 Concentración de NO₂, por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2014.



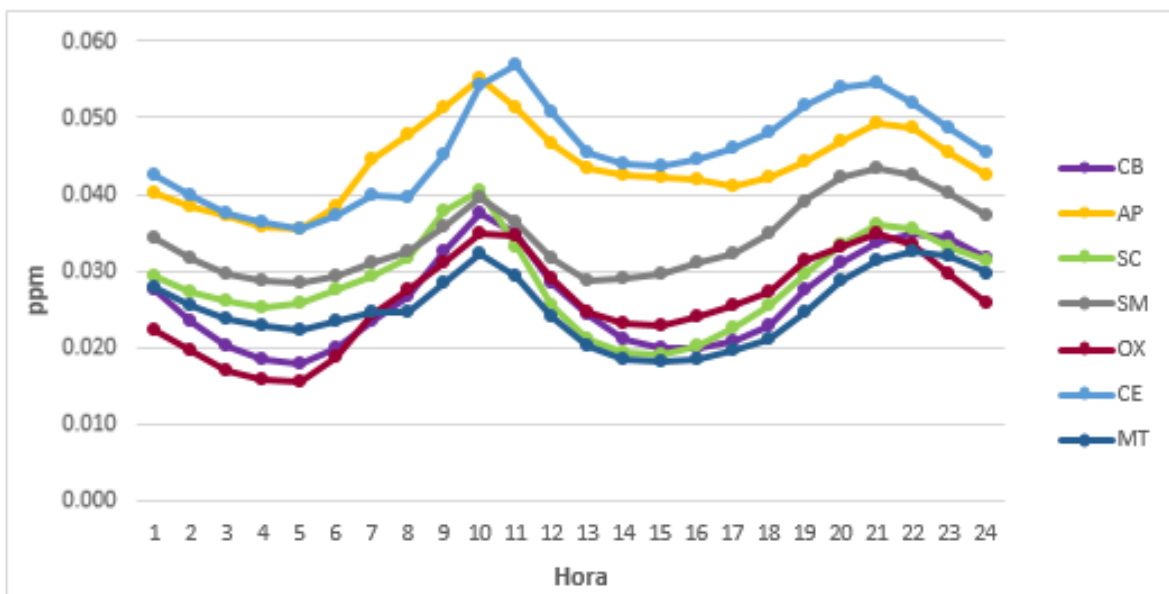
Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2014.

Los datos de la gráfica 5.1.1.4 muestran que la concentración máxima fue de 0.05ppm, sin embargo los valores de todas las estaciones disminuyeron en relación con los tres años anteriores, y se encuentran dentro del límite máximo permisible de 0.21 ppm, en una hora, una vez al año, establecido en la NOM-023-SSA1-1993.

5.1.1.5 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico y hora en todas las estaciones de la RAMA en el año 2015

Las mayores concentraciones de NO₂ que se presentaron para en este año, fueron en el horario diurno a las 11:00 hrs. con 0.058ppm y en el nocturno a las 21:00 hrs. con una concentración máxima de 0.055 ppm.; los cuales se presentan en el mismo rango de horas de los años anteriores, además de continuar el aumento de todas las estaciones, pero en especial para la estación CE la cual tuvo un aumento de 0.023 ppm en un año, por lo que se convirtió en la más distintiva del año 2015.

Gráfica 5.1.1.5 Concentración de NO₂, por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2015.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2015.

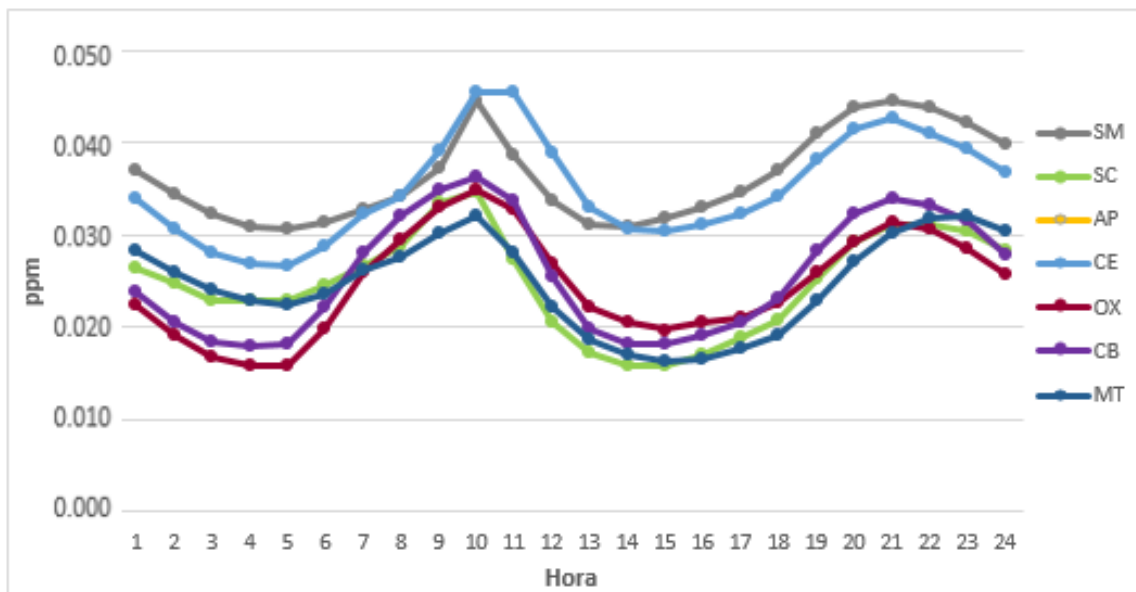
A pesar que las concentraciones de NO₂ aumentaron notoriamente desde el inicio del periodo de estudio, los valores máximos que presentan las estaciones AP y CE se encuentran dentro del límite máximo permisible de 0.21 ppm, en una hora, una vez al año, establecido en la NOM-023-SSA1-1993. Por otra parte de acuerdo con

(Galán & Fernández, 2006) el aumento matutino se atribuye al incremento de Radiación Solar debido a que el NO₂, es un contaminante que absorbe la radiación UV, por lo que depende de la presencia o no de luz Solar; mientras que por la noche se adjudica al sector transporte (Contreras, 2013).

5.1.1.6 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico y hora, en todas las estaciones de la RAMA en el año 2016

En la gráfica 5.1.1.6 que se muestra a continuación, se puede observar que al igual que el año 2015, la estación CE, presenta la mayor concentración con 0.46ppm, seguida por SM con 0.45ppm, la cual presentó un aumento evidente, ya que desde 2013 no presentaba valores mayores a 0.035ppm. Por otra parte continúan dos elevaciones notorias en horario diurno de 8:00 a 12:00 hrs. y nocturno de 19:00 a 24:00 hrs.

Gráfica 5.1.1.6 Concentración de NO₂, por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2016.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2016.

La estación AP no presenta valores porque fue desconectada; luego entonces debido a que era de gran importancia por sus altas concentraciones de NO₂ para esta investigación, el promedio anual se verá afectado; ya que en años anteriores

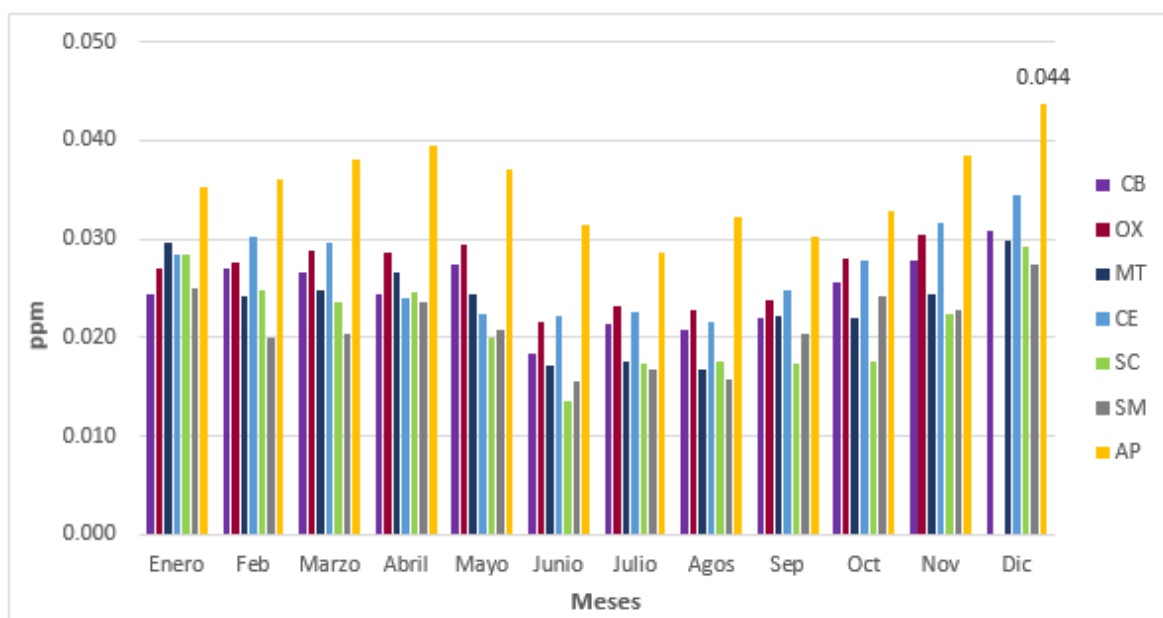
tuvo valores de 0.058ppm, siendo la máxima concentración presentada por todas las estaciones. Por otra parte el aumento de 0.010ppm que presento la estación San Mateo se adjudica a la expansión industrial y comercial de la ZMVT, que trae consigo un aumento en el parque vehicular causando mayor emisiones de NO₂, lo que contribuye a la contaminación del aire. (SEMARNAT, 2000).

5.1.2 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA

5.1.2.1 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2011

Se puede observar en la gráfica 5.1.2.1, que las concentraciones aumentan paulatinamente de noviembre a mayo, presentándose un valor máximo para 2011 de 0.044ppm en el mes de diciembre y de 0.040ppm en abril. La estación Aeropuerto es en donde se presenta el valor máximo de NO₂, mientras que San Cristóbal registra la menor concentración con 0.014ppm.

Gráfica 5.1.2.1 Concentración de NO₂, por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2011.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2011.

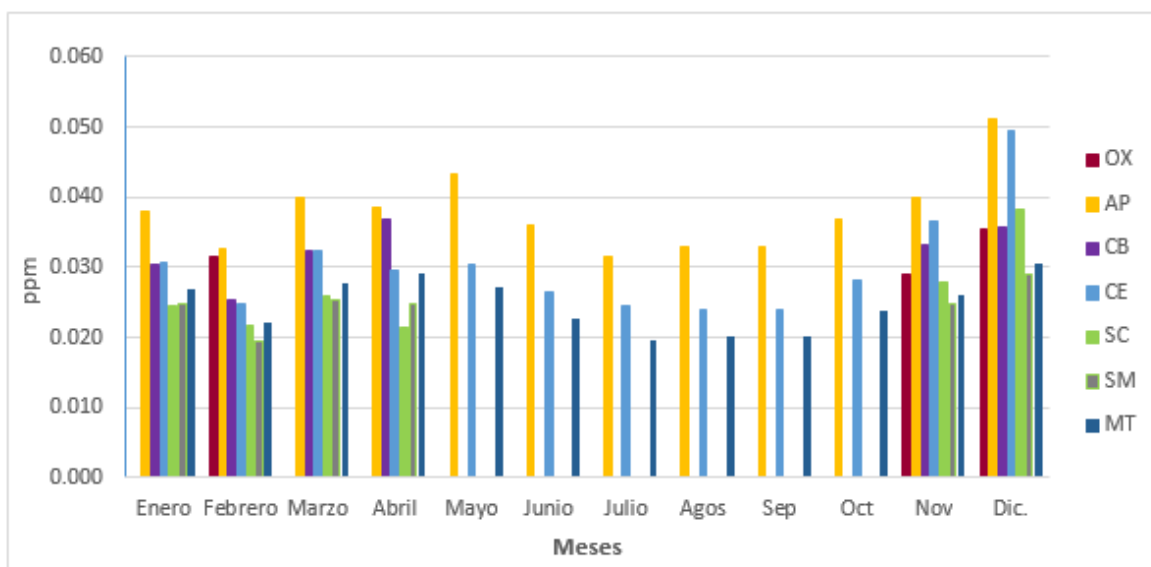
Las mayores concentraciones que van de las 0.030ppm a los 0.044ppm se tienen en primavera e invierno, y debido a que en estos meses también se presentan los mayores valores de la Radiación Solar (Manzaneque, 2008), la combinación de

ambas variables es proporcional al aumento del efecto invernadero, ya que el NO_2 tiene la capacidad de absorber mayor cantidad de Radiación Solar y producir compuestos tóxicos al reaccionar con la luz pudiendo provocar una mala calidad del aire (EPA, 1999), sin embargo el límite máximo permisible de 0.21 ppm, en una hora, una vez al año, establecido en la NOM-023-SSA1-1993, no fue rebasado.

5.1.2.2 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2012

En la gráfica 5.1.2.2 se muestra que la estación Aeropuerto y Centro presentan las mayores concentraciones de todo el año con un valor promedio máximo de 0.052 ppm, el cual se presenta en el mes de diciembre que corresponde al invierno, sin embargo de junio a octubre disminuyen las concentraciones de NO₂ en todas las estaciones, presentando valores menores a 0.020ppm, a excepción de AP y CE que mantienen los mayores valores, por encima de los 0.035ppm.

Gráfica 5.1.2.2 Concentración de NO₂, por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2012.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2012.

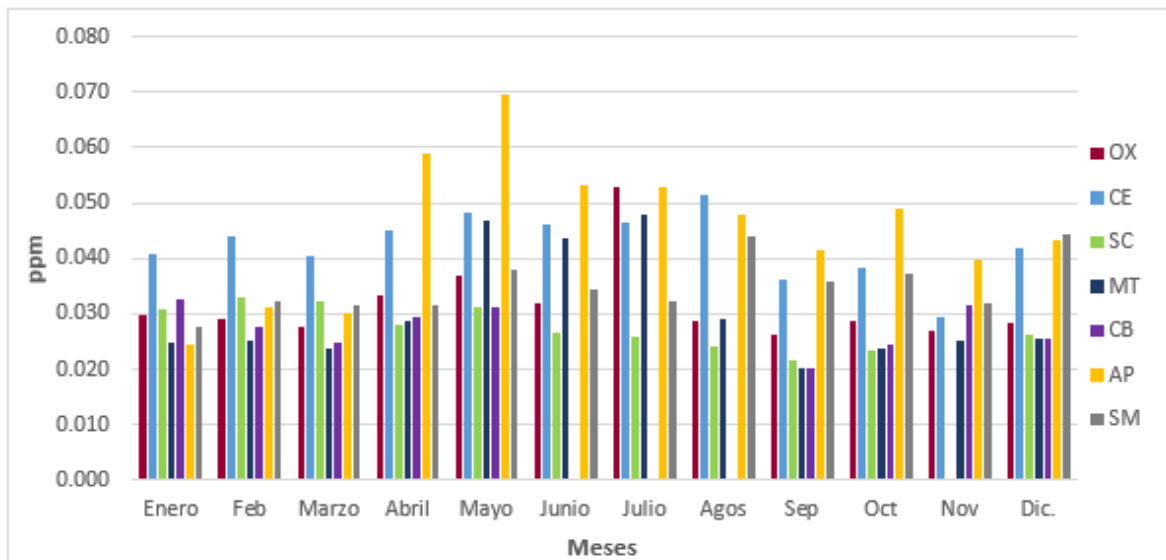
Las mayores concentraciones de NO₂, aumentan en los meses de diciembre a mayo, superando sus valores del año anterior de 0.035ppm y 0.045ppm, y aunque los valores se encuentren dentro de los límites permisibles de la NOM-023-SSA1-1993 de 0.21 ppm, en una hora, una vez al año, el aumento y las altas concentraciones que se presentan en estos meses son proporcionales al aumento del efecto invernadero, ya que el NO₂ tiene la capacidad de absorber mayor cantidad de Radiación Solar y producir compuestos tóxicos como el Ozono, al reaccionar con

la luz (EPA, 1999). Por otra parte se observa que en estos meses la RAMA-T solo registró datos de las estaciones AP, CE y MT.

5.1.2.3 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2013

Se observa en la gráfica 5.1.2.3, que a lo largo de todo el año las concentraciones son constantes durante todos los meses, sin embargo en el mes de mayo se presentó un aumento significativo en relación con los años anteriores, llegando a los 0.070 ppm, el cual es el mayor valor registrado de los dos años anteriores, ya que anteriormente se tuvieron 0.039ppm en 2011 y 0.044ppm en 2012, por lo que podría ser la mayor concentración de todo el periodo, ya que aumento 0.026ppm del año anterior.

Gráfica 5.1.2.3 Concentración de NO₂, por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2013.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2013.

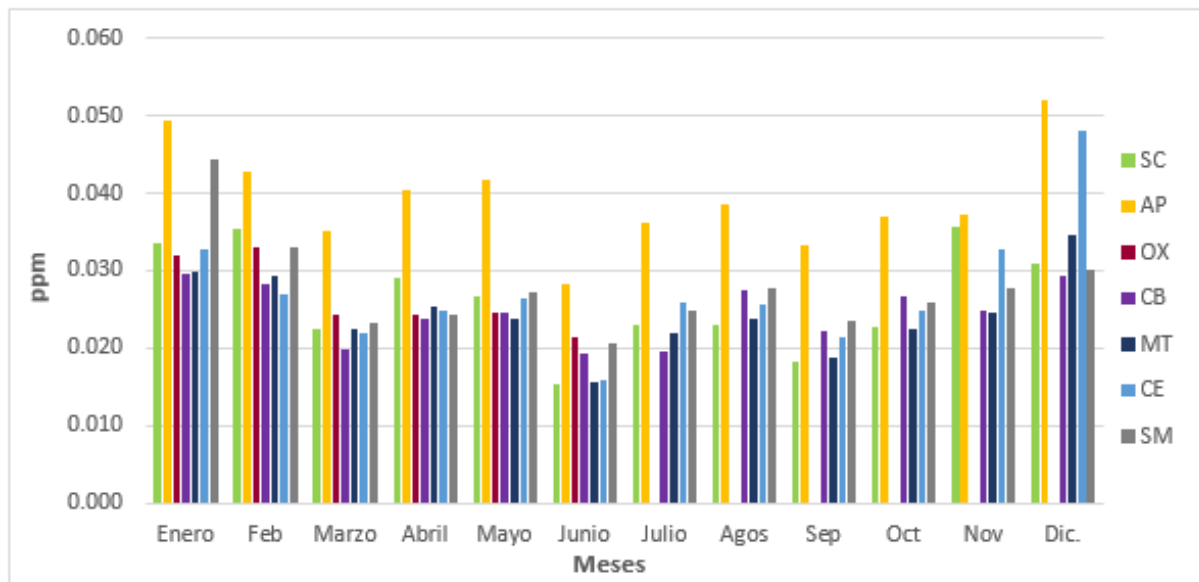
En la gráfica 5.1.2.3 se observa que a diferencia de los años anteriores donde las mayores concentraciones se presentaban de noviembre a mayo, en este año, el aumento de las concentraciones se presenta de mayo a octubre, al igual que la época de lluvias de la ZMVT, que de acuerdo con (CRANA, 2013) las

concentraciones de NO_2 , deberían de disminuir al diluirse con el agua, porque el Bióxido de Nitrógeno es un gas que reacciona con el agua dando una mezcla de Ácido Nítrico y Nitroso que provocan la lluvia ácida; por lo que es posible que el aumento de las concentraciones en estos meses sea por el aumento de emisiones de la zona industrial y la congestión vial que se presenta cerca de la estación AP donde se registran los mayores valores. Por otra parte a pesar que se presentó un gran aumento de las concentraciones, no superaron el límite máximo permisible de 0.021ppm, en una hora, una vez al año, establecido en la NOM-023-SSA1-1993.

5.1.2.4 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2014

Las mayores concentraciones de este año al igual que en el 2011 y 2012 se presentaron en diciembre con valores mayores a las 0.050ppm, asimismo enero tuvo un valor promedio de 0.049 ppm, lo cual presenta un aumento de más de 0.010ppm para este mes desde el 2011. Por otra parte los meses con menores concentraciones por debajo de los 0.040ppm son de junio a noviembre.

Gráfica 5.1.2.4 Concentración de NO₂, por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2014.



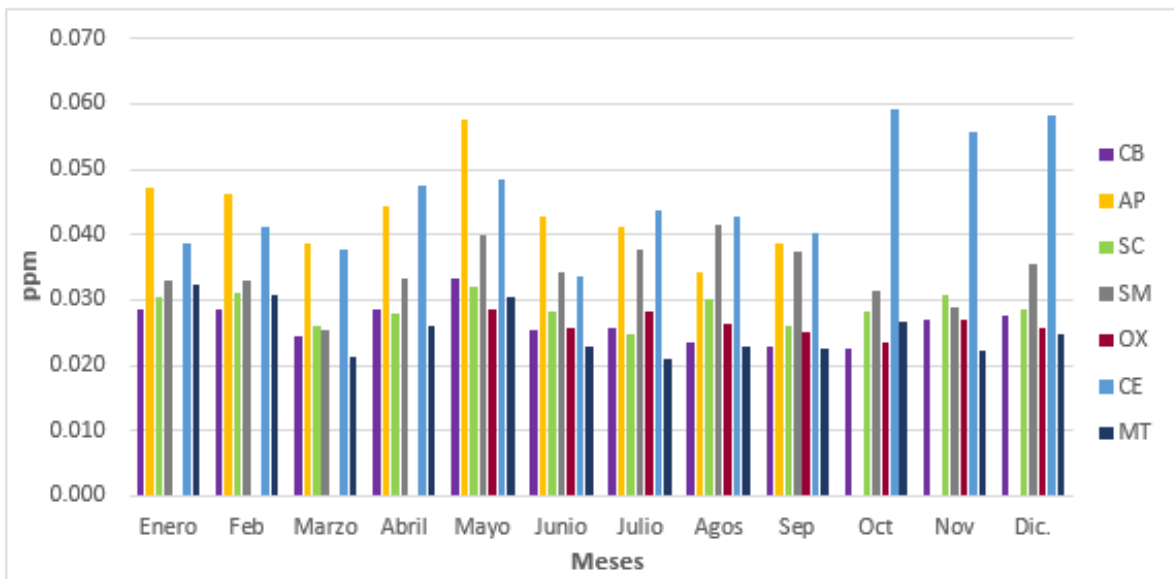
Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2014.

En la gráfica 5.1.2.4, se observa que de la misma manera que en el resto del periodo 2011-2016, la estación Aeropuerto es la que presenta las mayores concentraciones, posiblemente debido al aumento de emisiones de las zonas industriales y constante paso vehicular de la zona y el arrastre de los contaminantes por el viento puede ocasionar una mala calidad del aire con consecuencias ambientales y a la salud de la población (SEMARNAT, 2007).

5.1.2.5 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2015

Se puede observar en la gráfica 5.1.2.5 que las mayores concentraciones de NO₂ para este año se presentaron en mayo con 0.057ppm, octubre 0.059ppm, noviembre 0.056ppm y diciembre con 0.058ppm, teniendo un promedio máximo de 0.59 ppm de la estación CE, la cual ha presentado un aumento de más de 0.010ppm en relación a los años anteriores, superando a la estación AP la cual tuvo las mayores concentraciones desde 2011.

Gráfica 5.1.2.5 Concentración de NO₂, por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2015.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2015.

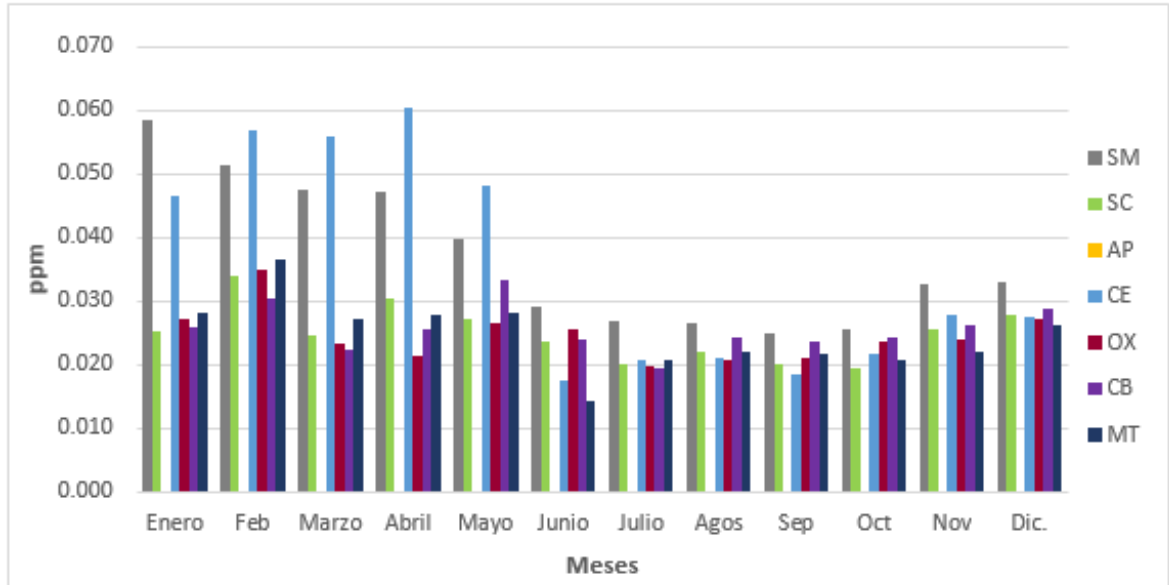
En relación con los años anteriores se puede observar gráfica 5.1.2.5, que en el 2011 se registraban concentraciones de NO₂ por debajo de las 0.015ppm, mientras que para este año la concentración mínima fue de 0.020ppm, lo que nos indica un aumento general desde el inicio del periodo; que posiblemente se puede atribuir a que la ZMVT, se ha convertido en un importante punto de desarrollo económico, propiciando la expansión de la zona industrial y el acelerando crecimiento en los municipios de Metepec, Lerma, Zinacantepec y San Mateo Atenco (SEMARNAT,

2000); que de acuerdo con las gráficas las estaciones de estos municipios (SM, CB y MT), han ido aumentando sus valores más de 0.015ppm desde el inicio del periodo.

5.1.2.6 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno por meses, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2016

En la gráfica 5.1.2.6, que se presenta a continuación se observa que a diferencia de los años anteriores donde el aumento de las concentraciones se presentó de manera constante durante todos los meses, en este año se aprecia que los mayores valores son solo de enero a mayo con una máxima de 0.060ppm en marzo, mientras que de junio a diciembre no se superan las 0.035ppm. Sin embargo a pesar que disminuyeron las concentraciones de NO₂ la estación Centro tuvo en cinco meses valores por encima de las 0.040ppm, y San Mateo por primera vez en todo el periodo obtuvo concentraciones mayores a 0.050ppm en dos meses, teniendo un aumento máximo de 0.032ppm desde el 2011.

Gráfica 5.1.2.6 Concentración de NO₂, por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2016.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2016.

Se puede observar que en la gráfica 5.1.2.6, a partir de octubre del año anterior, la estación Aeropuerto no presenta datos de las concentraciones de NO₂, ya que

actualmente no está disponible, y debido a que durante todo el periodo en el que se obtuvieron datos presentó las mayores concentraciones, alcanzando en 2013 las 0.070ppm, valor máximo y que no fue superado por ninguna estación durante todo el periodo, y debido a su aumento paulatino que se observó desde 2011; probablemente con el paso de los años este valor sea superado, por lo que no contar con los datos de la estación AP es una importante pérdida para futuros estudios de la calidad del aire, referentes al Bióxido de Nitrógeno y otros contaminantes atmosféricos, debido a la relevancia de la ubicación donde se encontraba la estación.

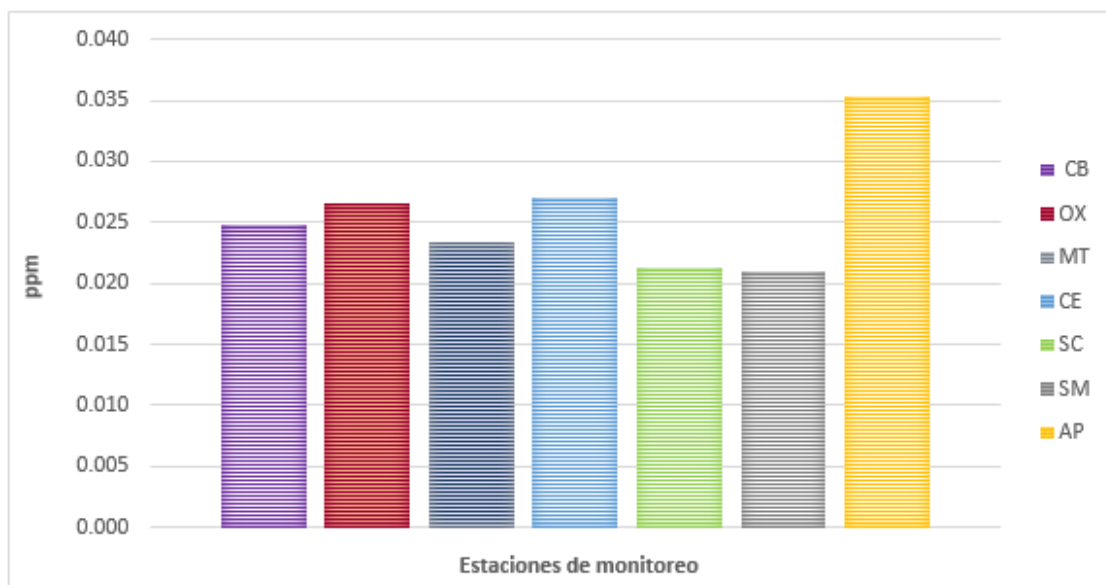
Por otra parte a pesar que en ningún momento se superó el valor máximo permisible para la concentración de NO₂, en el aire de 0.21 ppm, en una hora una vez al año establecido por la NOM-023-SSA1-1993, si se observa que de acuerdo a las gráficas de todo el periodo, cada año las concentraciones aumentaron considerablemente por encima de las 0.030ppm.

5.1.3 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA

5.1.3.1 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2011

Puede observarse en la gráfica 5.1.3.1 que la Estación Aeropuerto, presenta las concentraciones más elevadas de las estaciones de la RAMA con 0.036ppm, seguidos por la Estación Centro con 0.027ppm y Oxtotitlán 0.026ppm, mientras que la Estación San Cristóbal y San Mateo presenta los menores valores con 0.023 ppm.

Gráfica 5.1.3.1 Concentración de NO₂, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2011.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2011.

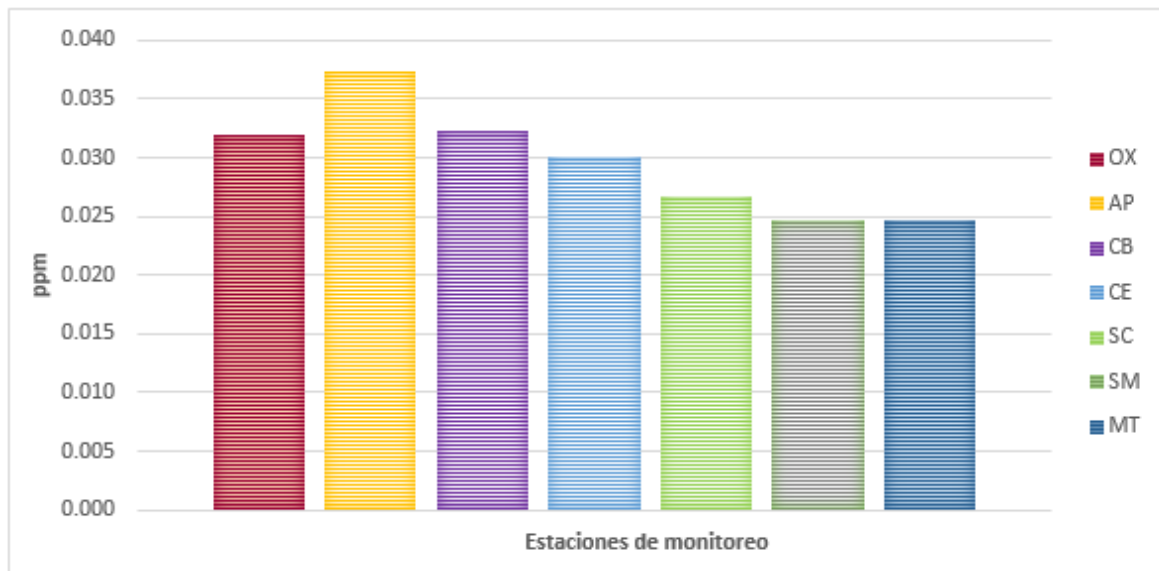
Como ya fue mencionado anteriormente en la estación Aeropuerto se presentan las mayores concentraciones de todo el año, lo que probablemente se deba por su ubicación cercana a zonas industriales y por la constante circulación de

automóviles, sin embargo el NO₂ también depende de factores como la temperatura, emisión de contaminantes o tiempo transcurrido de las emisiones (ATSDR, 2002).

5.1.3.2 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2012

En la gráfica 5.1.3.2, puede observarse un aumento de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, ya que la menor concentración había sido de 0.021ppm por SM y SC para el 2011, mientras que en este año aumentaron 0.07ppm, asimismo aunque Aeropuerto presentó un incremento, se mantiene constante en sus concentraciones con 0.037ppm, siendo está la máxima concentración del año.

Gráfica 5.1.3.2 Concentración de NO₂, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2012.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2012.

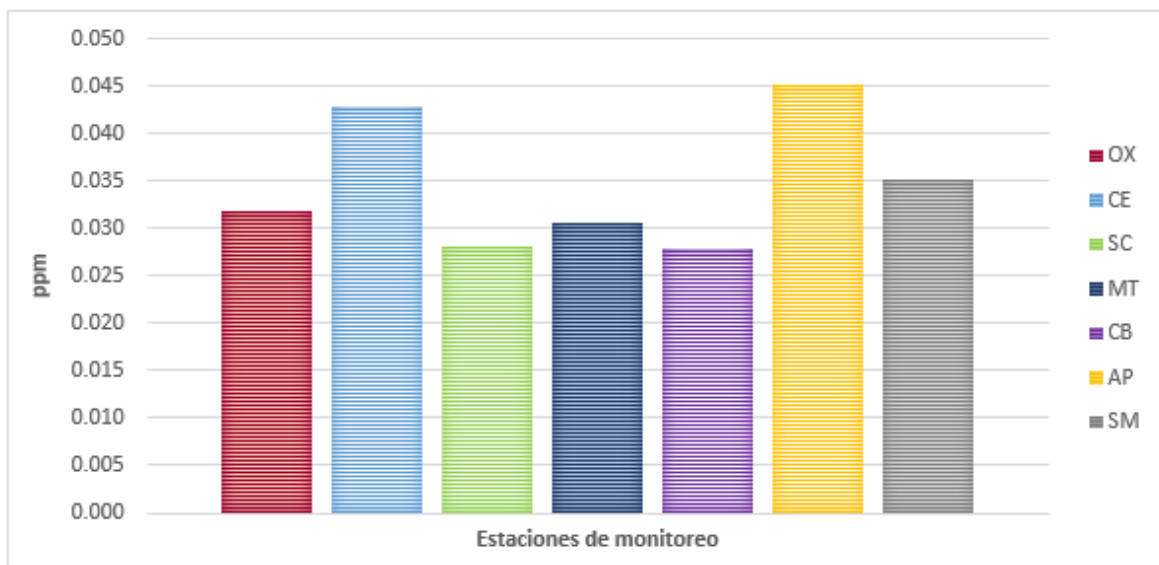
El aumento de las concentraciones de NO₂, derivado de las estaciones de la RAMA-T para este año, podrían ser debido a que en la última década las actividades productivas y la concentración de la población, provocó el incremento de los servicios de transporte público y privado, ocasionando un mayor consumo de combustible pudiendo ocasionar la degradación de la calidad del aire por el aumento de emisión de contaminantes a la atmósfera (SMA, 2007). Sin embargo todas las

concentraciones registradas, no superaron el límite máximo permisible de 0.21ppm, en una hora, una vez al año, establecido en la NOM-023-SSA1-1993.

5.1.3.3 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2013

De acuerdo a la gráfica 5.1.3.3, las estaciones presentan un aumento en comparación del año anterior, siendo para la estación Aeropuerto de 0.013ppm, Centro con 0.012ppm y San Mateo con un incremento de 0.010 ppm, asimismo San Mateo y San Cristóbal registran las concentraciones más bajas con 0.027ppm.

Gráfica 5.1.3.3 Concentración de NO₂, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2013.



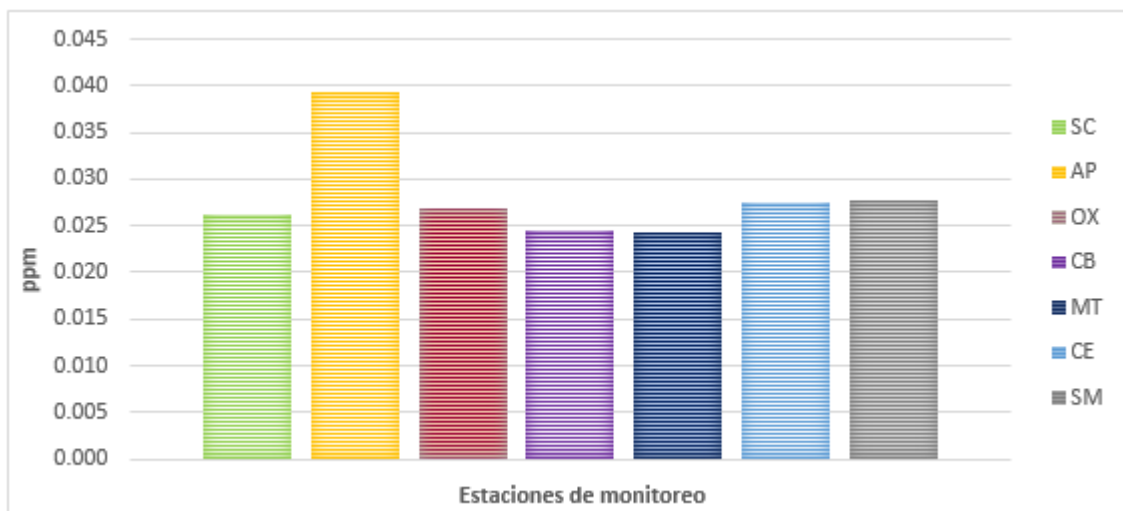
Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2013.

Debido a que las principales fuentes emisoras de NO₂, corresponden al sector transporte tanto privado como público, los cuales aportan el 71.8% del total de este gas (INECC, 2009); se puede decir que probablemente en las estaciones AP, CE y SM, donde hubo un aumento en las concentraciones, sea por un aumento del parque vehicular, lo cual es congruente ya que es ahí donde se encuentran las zonas comerciales más concurridas de la ZMVT, propiciando que exista mayor circulación hacia estas áreas (SMA, 2007).

5.1.3.4 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2014

Se observa en la gráfica 5.1.3.4, que en este año las concentraciones disminuyeron de 0.05 a 0.013ppm en la mayoría de las estaciones, sin embargo aunque la estación Aeropuerto, registro 0.06ppm menores al 2013, sigue manteniendo las máximas concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, alcanzando para este año 0.039 ppm.

Gráfica 5.1.3.4 Concentración de NO₂, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2014.



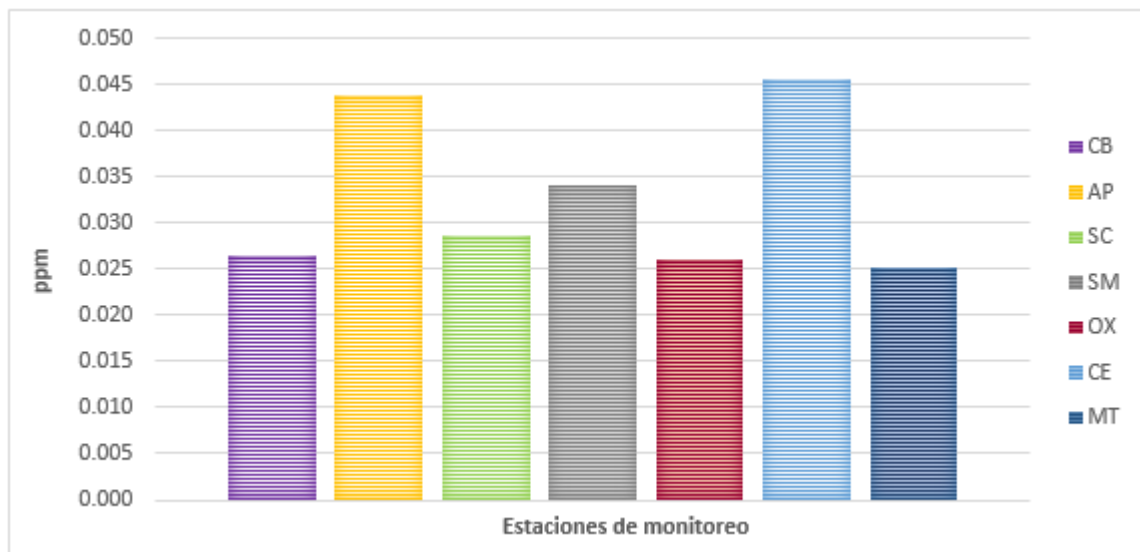
Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2014.

Por otra parte se puede observar en la gráfica 5.1.3.4, que a excepción de la estación AP, las concentraciones para las demás estaciones se mantienen constantes entre las 0.024ppm y 0.027ppm, siendo este año el que registra las menores concentraciones de los tres años pasados. Las concentraciones de NO₂ del 2014, no superaron el límite máximo permisible de 0.21ppm, en una hora, una vez al año, establecido en la NOM-023-SSA1-1993.

5.1.3.5 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2015

Las mayores concentraciones para este periodo se obtuvieron en la estación Centro alcanzando un promedio anual de 0.46 ppm mientras que la estación Metepec al igual que algunos años anteriores, registró la menor concentración con 0.025 ppm, sin embargo aunque existió un aumento significativo no se superó el límite máximo permisible de 0.021ppm, en una hora, una vez al año, establecido en la NOM-023-SSA1-1993.

Gráfica 5.1.3.5 Concentración de NO₂, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2015.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2015

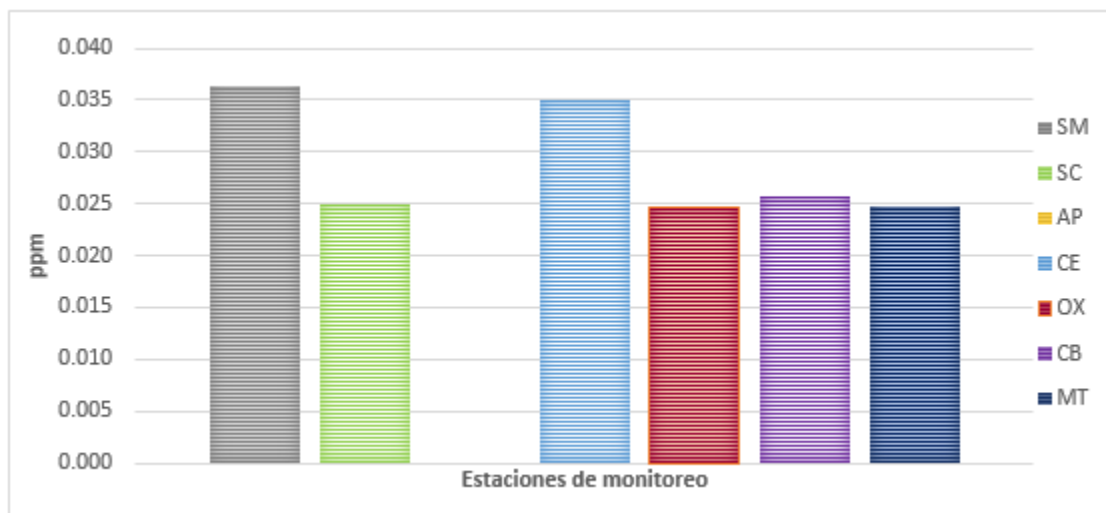
A pesar que en los primeros tres años del periodo se observó un aumento paulatino en las concentraciones de NO₂, el 2014 tuvo un descenso de las concentraciones de 0.05 a 0.013ppm, en la mayoría de las estaciones, sin embargo para este año, las concentraciones aumentaron superando evidentemente las concentraciones del año anterior, presentándose un aumento de 0.019ppm en la estación CE, con un promedio máximo de 0.46 ppm; un valor incluso mayor que la estación Aeropuerto

la cual registró 0.044ppm, y debido a que AP había presentado las mayores concentraciones del periodo, el aumento de la estación CE representa una zona importante para el monitoreo de NO₂ en relación con la calidad del aire de la ZMVT.

5.1.3.6 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, de todas las estaciones de la RAMA en el año 2016

Se observa que en la gráfica 5.1.3.6, la estación San Mateo presenta las mayores concentraciones con 0.036 ppm, seguido por la estación Centro con 0.035 ppm, las cuales tuvieron un aumento constante en los cinco años anteriores, sin embargo a comparación de otros años las demás estaciones se encuentran entre los 0.024 y 0.026 ppm.

Gráfica 5.1.3.6 Concentración de NO₂, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el año 2016.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA, 2016.

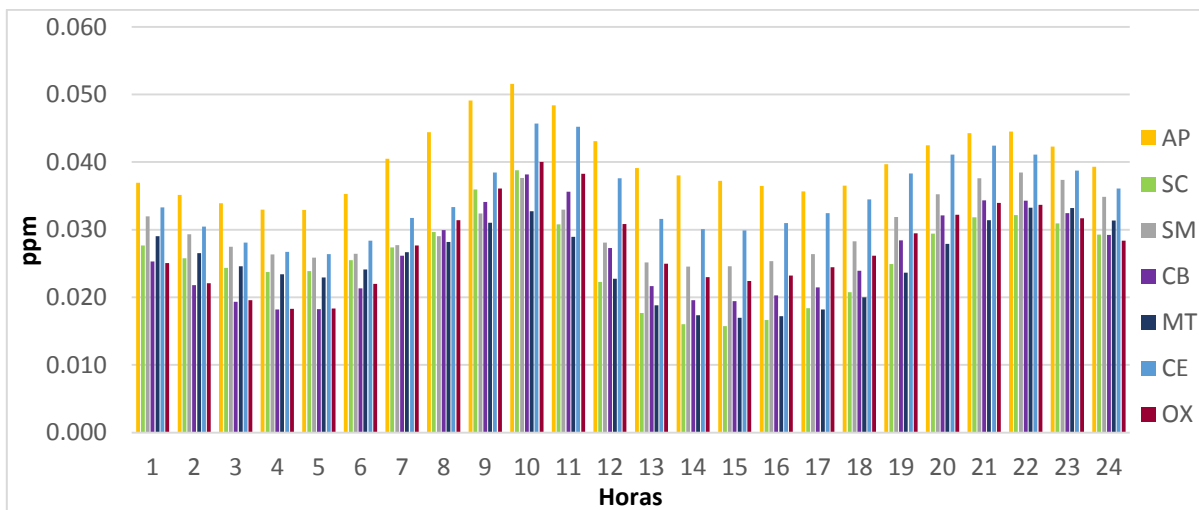
El aumento continuo de la estación San Mateo se podría adjudicar al crecimiento poblacional que existe por las nuevas zonas comerciales, y por la expansión del parque industrial, ya que en un año logró ser la segunda estación con las mayores concentraciones de NO₂, asimismo como se puede observar en las gráficas de todo el periodo las concentraciones de todas las estaciones han incrementado año tras año. Por otra parte la estación Aeropuerto en los años anteriores, registró los mayores valores y es posible que para este año también los obtuviera, sin embargo se encuentra deshabilitada, lo cual tiene un gran impacto para los estudios de contaminantes debido a la importancia de la ubicación en la que se encuentra.

5.1.4 Resultados de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, por estación de monitoreo atmosférico, año y hora en el periodo 2011-2016

5.1.4.1 Concentraciones de NO₂, por horas, de todas la estaciones de la RAMA, en el periodo 2011-2016

Las mayores concentraciones de NO₂, para el periodo 2011-2016 se registraron principalmente en dos horarios, entre las 07:00 a 12:00 horas y las 19:00 a 23:00 horas, siendo la estación Aeropuerto la que presenta las mayores concentraciones con un promedio máximo de 0.052ppm, a las 10:00 horas y de 0.045ppm a las 22:00 horas, mientras que las menores concentraciones se presentaron de las 4:00 a 5:00 horas con 0.033ppm y a las 17:00 horas con 0.038ppm, siendo Metepec la estación que presentó las menores concentraciones.

Gráfica 5.1.4.1 Concentración de NO₂, por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2011-2016.

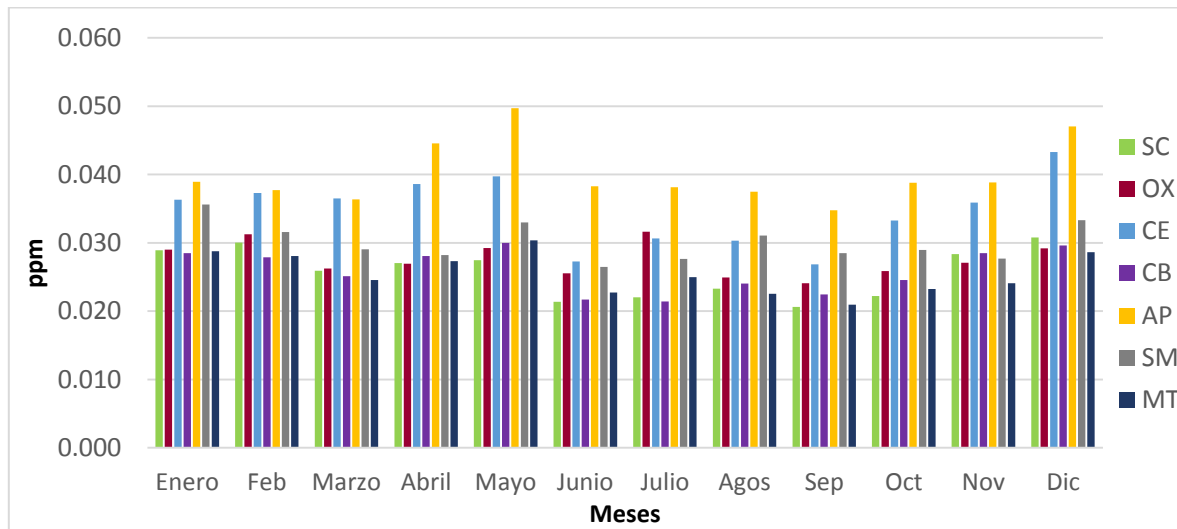
A pesar que los valores máximo oscilan entre los 0.045 a 0.052ppm durante todo el periodo, en ningún momento se rebasaron los límites máximos permisibles de

0.21ppm, en una hora, una vez al año, establecido en la NOM-023-SSA1-1993. Por otra parte es importante mencionar que se observa que las concentraciones aumentan después de la hora pico de la ciudad de la ZMVT, identificadas en horarios diurnos de 6:00 a 8:30 horas y en horarios nocturnos de 18:00 a 20:30 horas (Contreras, 2013), por lo que se puede decir que el comportamiento del NO₂, se encuentra de manera constante a lo largo del día con mayores concentraciones en dos horarios definidos, haciendo que sea un contaminante que se encuentra con altas concentraciones 11 horas al día, lo cual si sigue el patrón de aumento año tras año, podría causar riesgos ambientales y a la salud de la población, así como precursor de una mala calidad del aire.

5.1.4.2 Concentraciones de NOx por meses, de todas la estaciones de la RAMA, en el periodo 2011-2016

El análisis del periodo de 2011 a 2016, en la gráfica 5.1.4.2 muestra que las mayores concentraciones que van de 0.028 a 0.049ppm se presentan en abril, mayo y diciembre; y los niveles más bajos de junio a noviembre, con valores entre las 0.020 a 0.029 ppm; siendo la estación Aeropuerto quien registró las con mayores concentraciones durante el periodo, con un valor máximo de 0.049ppm en el mes de mayo; aun cuando dicha estación fue deshabilitada en el último año del periodo.

Gráfica 5.1.4.2 Concentración de NO₂, por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2011-2016.

Las concentraciones de NO₂, comienzan a elevarse en los meses de primavera, disminuyendo en época de lluvias probablemente gracias a la dispersión de los contaminantes, sin embargo iniciando la época invernal, las concentraciones comienzan a elevarse teniendo un valor de 0.046 ppm en el mes de diciembre (INE, 2006).

El aumento de las concentraciones del NO₂, se puede asociar al efecto invernadero que sufre la ZMVT, así como a la disminución de la velocidad del viento que puede observarse en la siguiente gráfica:

Tabla 5.1. Promedio de la Velocidad del Viento, por meses, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.

	Meses											
	Enero	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio km/hr	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.1

Fuente: Elaboración propia con base en la RAMA,2011-2016.

A pesar que la deducción del promedio en la velocidad del viento es poca para el mes de diciembre, es uno de los factores que afecta la buena dispersión de contaminantes; ya que la dirección de los vientos juega un papel muy importante para la dispersión de NO₂ en la atmósfera, debido a que si una zona cuenta con dirección del viento constante, está estara expuesta consecutivamente a niveles altos de contaminación (Venegas & Mazzeo, 2016), como pudiera suceder en el caso de la estación AP, la cual registra un promedio de 1.6 km/hr, mientras que la estación MT obtuvo un promedio de 1.0 km/hr, debido posiblemente a que la dirección del viento es variable, lo que ocasiona que las concentraciones de NO₂, sean menores.

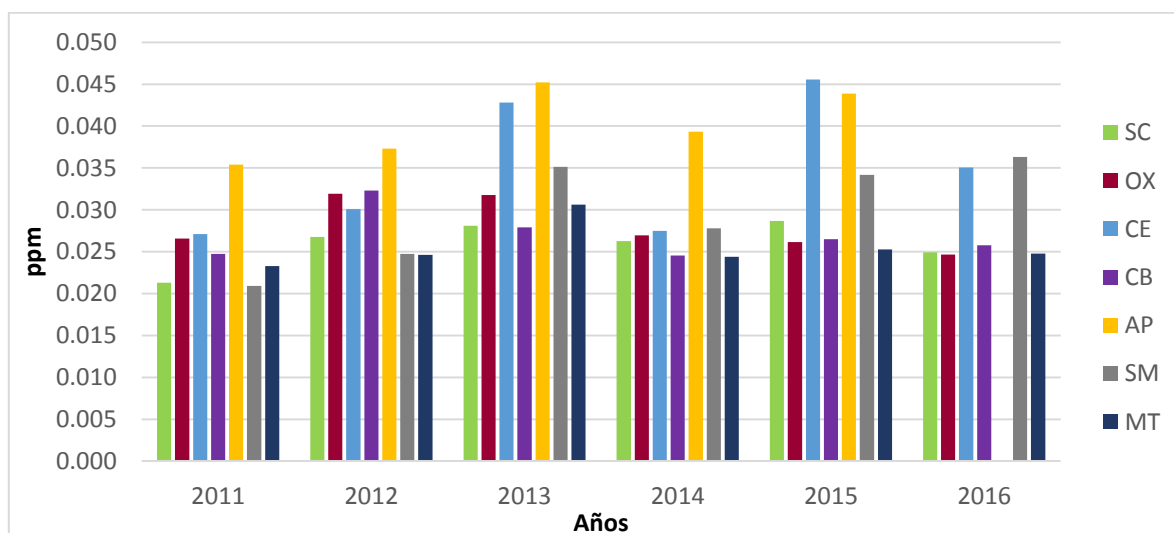
Sin embargo la cercanía de la fuente de emisión, también es un factor relevante en la concentración de contaminantes (Venegas & Mazzeo, 2016), y se cree que probablemente el aumento en la estación AP y CE en los meses de Abril y Mayo, en el cual se tienen el mejor promedio de velocidad del viento, es ocasionada por la cercanía de la zonas industriales y la congestión vehicular que se presentan, por lo que las concentraciones de contaminantes no tienen gran dispersión.

Por otra parte el aumento en el mes de diciembre también se justifica, posiblemente y de acuerdo a la literatura debido a las condiciones climáticas que se presenta en este mes, que pueden ocasionar que las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, tengan que transportarse por distancias mas largas debido a la disminución de luz solar, lo que ocasiona que su tiempo de vida en la atmósfera aumente, y que existan mayores reacciones con otros contaminantes y se produzcan contaminantes secundarios como lo es el Ozono de manera más lenta (Santiago, 2015).

5.1.4.3 Concentraciones de NO₂, de todas la estaciones de la RAMA, en el periodo 2011-2016

Se puede observar en la gráfica 5.1.4.3, que en el 2015, se tuvieron las concentraciones más elevadas de todo el periodo, con un valor máximo de 0.046 ppm registrados en la estación Centro, seguidas por la estación Aeropuerto con 0.044ppm; asimismo la estación San Mateo representa una de las estaciones con más importancia, debido a que tuvo un aumento constante durante todo el periodo, con 0.016ppm más en 2016 que en 2011, mientras que la estación Centro logro registrar hasta un aumento de 0.019ppm en 2015 en relación con el primer año de todo el periodo.

Gráfica 5.1.4.3 Concentración de NO₂, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2011-2016.

Las concentraciones de NO₂, han tenido un aumento constante durante todo el periodo en la mayoría de las estaciones, sin embargo en 2014 se observó una disminución notoria en todas las estaciones, a excepción de Aeropuerto, la cual ha

ido creciendo año tras año, debido posiblemente a la cercanía y expansión de los parques industriales en los últimos 5 años, además del aumento de la población de la ciudad de Toluca, así como el constante parque vehicular, sin embargo a pesar que las concentraciones no rebasan los límites máximos permisibles de 0.21ppm, en una hora, una vez al año, establecido en la NOM-023-SSA1-1993; si se observa que las estaciones aumentan cada año, llegando a tener altas concentraciones en estaciones tales como AP, CE y SM; haciendo énfasis que a partir del 2016 la estación AP no se encuentra disponible, lo cual representa un impacto para estudios y conocimiento de la calidad del aire de la ZMVT.

5.2 Relación de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno y la Radiación Solar como precursor del Ozono.

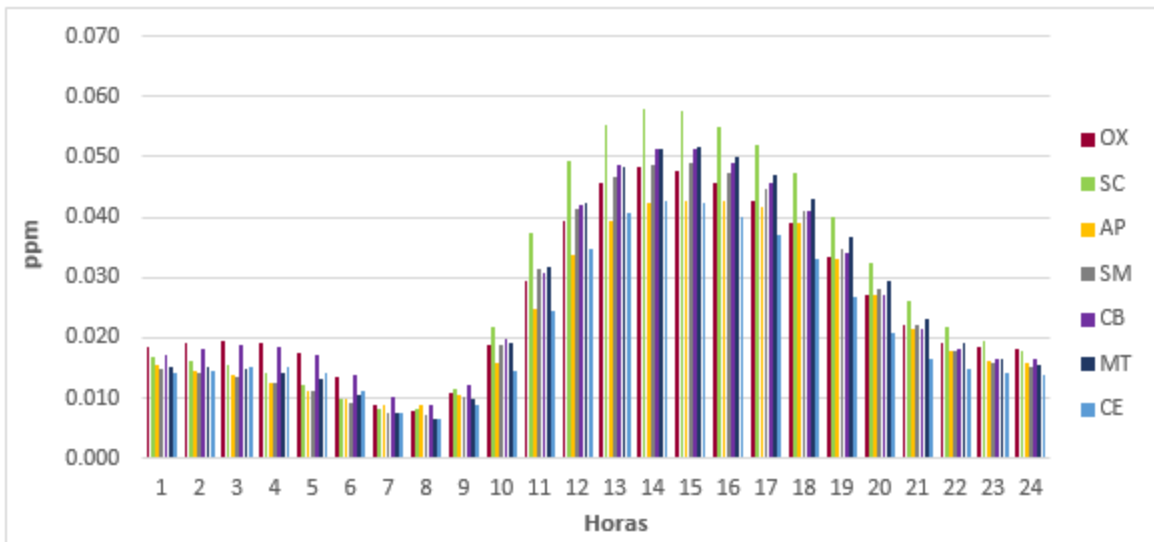
De acuerdo con los resultados de la investigación se observó que la Radiación Solar y el Bióxido de Nitrógeno, son un factor que influye en la formación de O_3 ; es por ello que adicional al análisis del NO_2 , se analizara la correlación del comportamiento del NO_2 y la Radiación Solar como precursor del Ozono, en el periodo 2011–2016; datos RAMA-ZMVT, para conocer si existe una relación directa en el aumento de la concentración de NO_2 y el O_3 .

La correlación entre variables se llevara a cabo empleando datos de tipo cuantitativo, mediante bases de datos generadas a partir de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT, con las que se desarrollara un análisis comparativo diacrónico que consiste en una asociación de variables y una correlación lineal simple.

Las estaciones de la RAMA-ZMVT, que se tomaran en cuenta para este estudio serán cuatro, las cuales son: Centro, Aeropuerto, San Cristóbal Huichochitlán y Metepec, ya que estas estaciones son las únicas que registran valores de Radiación Solar (SEMARNAT, 2007).

Debido a que el NO_2 , es un contaminante que absorbe la radiación UV, y depende de la presencia o no de luz Solar; este gas sufre un proceso de reconversión durante el día, (Galán & Fernández, 2006), permitiendo la generación de O_3 , mientras que en la noche al existir ausencia de luz Solar, el NO_2 se convierte en N_2O_3 , justificando con esta referencia la relación entre estas variables (Galán & Fernández, 2006).

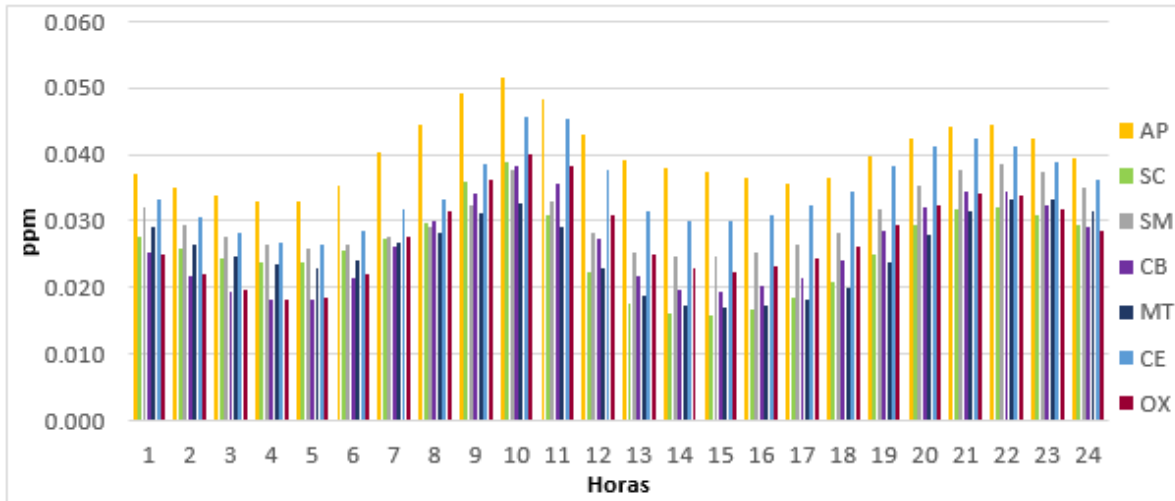
Gráfica 5.2.1 Concentración de O₃, por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2011-2016.

Se observa en la gráfica 5.2.1, que las mayores concentraciones de Ozono se presentan de las 11:00 a 19:00 horas, cuando se cuenta con presencia de Radiación Solar, teniendo un promedio máximo de 0.058ppm en la estación SC; mientras que por las noches las concentraciones disminuyen por debajo de las 0.020ppm en todas las estaciones.

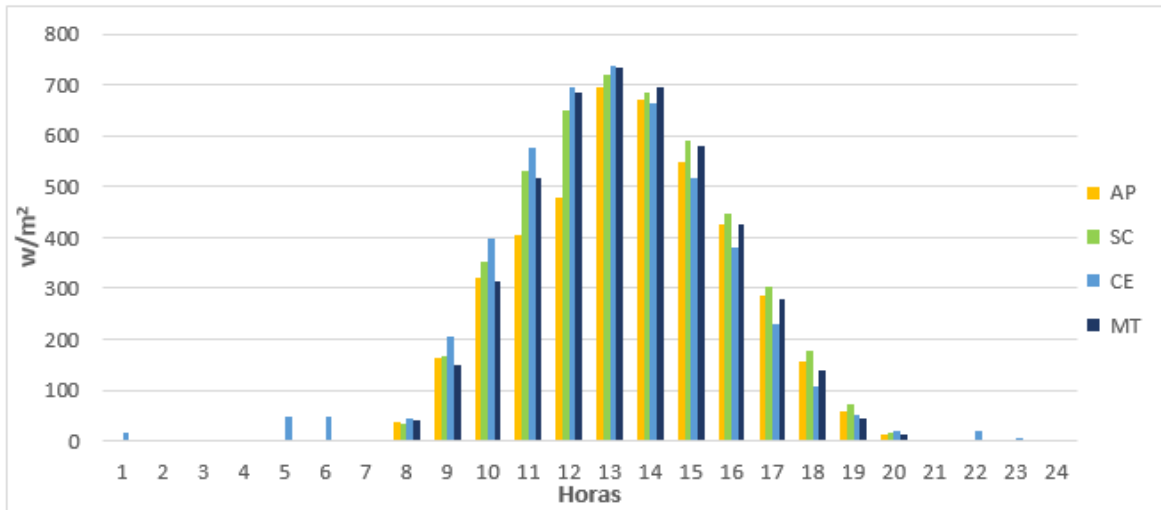
Gráfica 5.2.2 Concentración de NO₂, por horas, de todas las estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2011-2016.

Las mayores concentraciones de NO₂, durante todo el periodo se registraron principalmente en dos horarios, entre las 07:00 a 12:00 horas y las 19:00 a 1:00 horas, siendo la estación AP, CE y SM la que presenta las mayores concentraciones con un promedio máximo de 0.030 a 0.052 ppm, mientras que las menores concentraciones van de 0.015 a 0.020 ppm.

Gráfica 5.2.3 Concentración de Radiación Solar, por horas, de cuatro estaciones de la RAMA-ZMVT en el periodo 2011–2016.



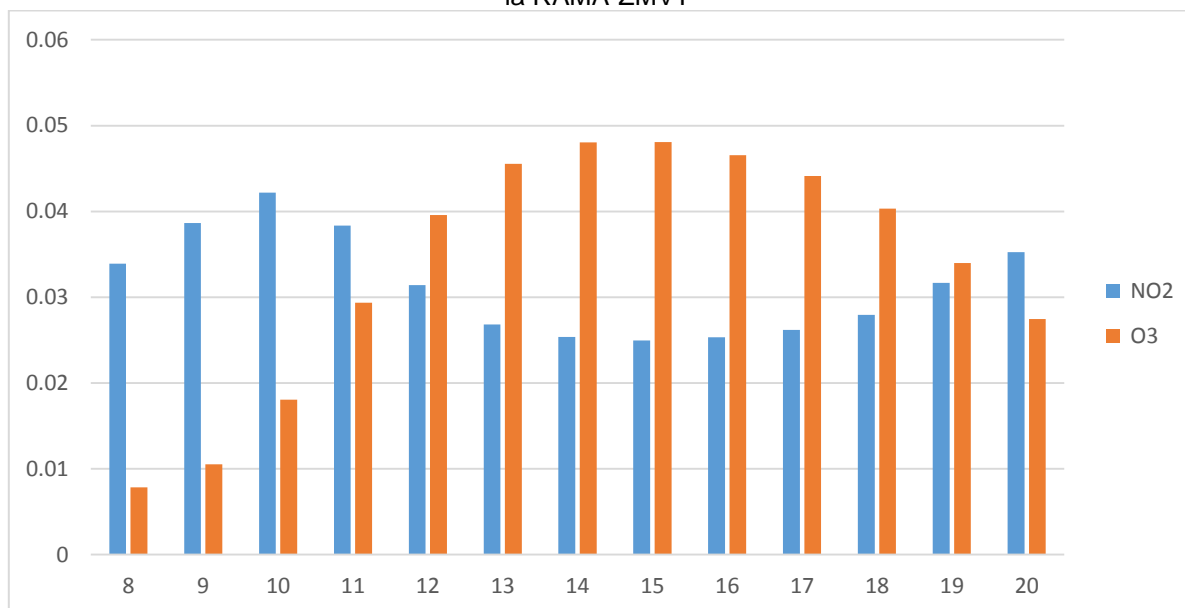
Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2011-2016.

Se observa en la gráfica 5.2.3, que los mayores valores registrados para la Radiación Solar se presentan de las 10:00 a 16:00 horas, siendo a las 13:00 su valor promedio máximo con 733 w/m²; asimismo como puede apreciarse todas las estaciones presentan valores similares.

5.2.1 Asociación entre variables

Se pretende mostrar cómo influye la Radiación Solar y el NO₂ en la formación de O₃, ya que de acuerdo con la bibliografía cuando aumente una variable la otra debe disminuir; y debido a que las horas promedio donde se tiene presencia de Radiación Solar en la ZMVT durante el periodo 2011-2016, es de las 8:00 a las 20:00 horas; la asociación entre variables se realizara en dicho horario; por lo que la siguiente gráfica muestra la forma en que este procesos se desarrollan a lo largo del día.

Gráfica 5.2.1.1 Asociación entre variables, NO₂ y O₃ en el periodo 2011–2016, en las estaciones de la RAMA-ZMVT



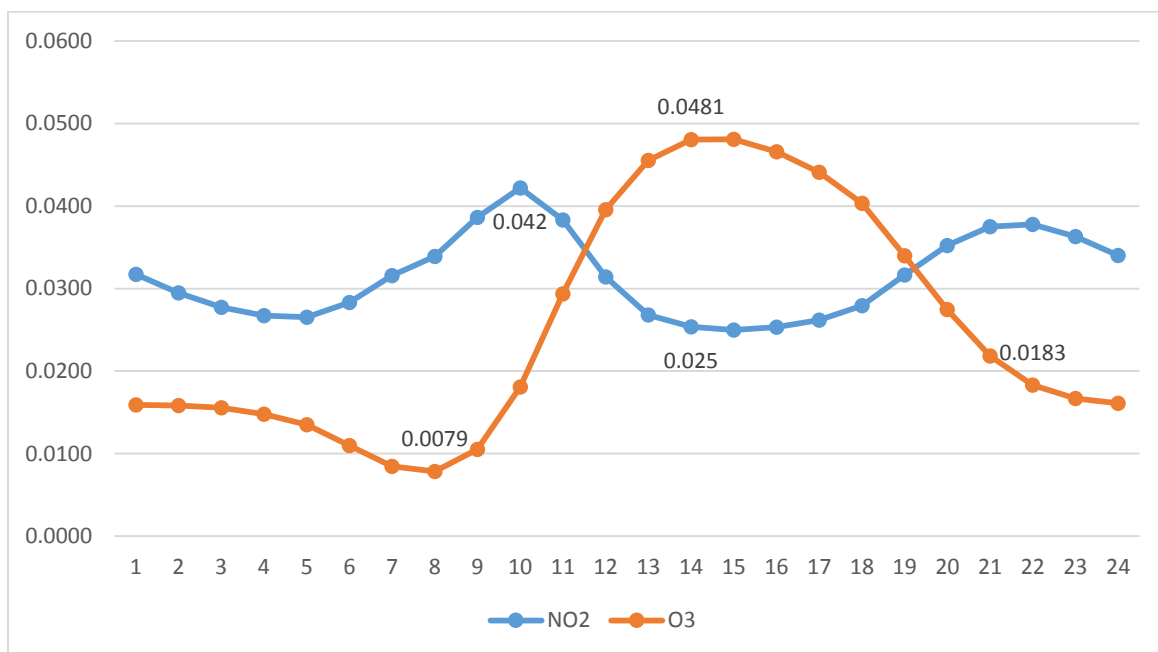
Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2011-2016.

De acuerdo con la gráfica 5.2.1.1, se observa una asociación proporcional negativa, debido a que cuando el NO₂ aumenta el O₃ disminuye, a excepción de las 19:00 horas que se atribuye a la disminución de Radiación Solar; mientras que las demás horas se le puede atribuir al aumento de la Radiación Solar, ya que coinciden sus valores máximos con el proceso de reconversión que sufre el NO₂ durante el día.

5.2.2 Correlación lineal simple

La correlación lineal simple resultante de la gráfica, indica que existe una alta correlación entre ambas variables, en la ZMVT, en el periodo 2011 a 2016 de 7:00 a 19:00 horas. Es por ello que dicha correlación se realizó mediante dos instrumentos metodológicos, el primero de forma manual, basándose en el Coeficiente de correlación lineal de Pearson y el segundo mediante Microsoft Excel, esto con el fin de obtener mayor veracidad en el resultado.

Gráfica 5.2.2.1 Correlación entre variables, NO₂ y O₃, en el periodo 2011-2016, en las estaciones de la RAMA-ZMVT



Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de la RAMA,2011-2016.

5.2.2.1 Coeficiente de correlación lineal de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson, es un índice de fácil interpretación que mide el grado de correspondencia entre distintas variables relacionadas linealmente; por lo que se pueden obtener una relación positiva o negativa. (Pearson, 2017).

Una correlación positiva es cuando entre dos variables X e Y, en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra, mientras que una correlación negativa es cuando en la medida que aumenta una variable disminuye la otra (Pearson, 2017).

“La correlación no implica causalidad. La causalidad es un juicio de valor que requiere más información que un simple valor cuantitativo de un coeficiente de correlación (Pearson, 2017).”

- a) La fórmula manual para la correlación lineal simple entre el Bióxido de Nitrógeno (X) y el Ozono (Y), se basa en restar el valor más alto Y, al valor más bajo X, y al resultado se le restan 100 puntos, representándose con la siguiente formula: $Y-X-100$ donde 100 es igual al 100% de correlación. De acuerdo con la gráfica 5.2.2.1 la aplicación de la formula se muestra a continuación:

$$X \sum N_2O = 0.025$$

$$Y \sum \text{Radiación Solar} = 0.048$$

$$[(0.048 - 0.025) - 100] = -99.97$$

Coeficiente de Correlación = 99.7%

- a) Por otra parte al introducir la fórmula del coeficiente de correlación de Pearson, en el programa Microsoft Excel el resultado obtenido fue de **84.5%**

De acuerdo con las gráficas anteriores presentadas, es posible demostrar que existe una alta correlación entre ambas variables, para la relación del NO₂ y la Radiación Solar como precursor del Ozono.

El resultado obtenido del coeficiente de correlación de Pearson arrojó un valor de **84.5%** por lo que es posible demostrar que existe una alta correlación entre ambas variables, ya que a pesar que en algunas horas las variables se encuentran alejadas; en el momento que inician y disminuyen los valores de Radiación Solar, ambas variables se encuentran.

Por otra parte el porcentaje restante se justifica con otras variables del cual depende el NO₂, tales como temperatura, emisión de contaminantes, tiempo transcurrido de las emisiones, además que el Bióxido de Nitrógeno es degradado rápidamente en la atmósfera al reaccionar con otras sustancias presentes en el aire (ATSDR, 2002).

CONCLUSIONES

Con base en los resultados del análisis anual de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno durante todo el periodo, se observó un aumento paulatino del inicio al final del periodo; a pesar que del año 2011 al 2013 se registraron aumentos notorios, para el 2014 los valores se redujeron, aumentando de nuevo hasta el 2015 y superando los valores del 2013 y decreciendo para 2016.

Por otra parte a mediados del 2015 la estación AP se encuentra deshabilitada, lo que generó un gran impacto en esta investigación, ya que está estación registró las mayores concentraciones de NO_2 durante todo el periodo, asimismo debido a que se encuentra rodeada de grandes parques industriales de la ZMVT, y posiblemente en una de las avenidas con mayor parque vehicular.

Los resultados del análisis mensual de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno arrojaron que las mayores concentraciones se presentan en los meses de Abril, Mayo y Diciembre, los cuales de igual manera registran los valores máximos de Radiación Solar, lo cual resulta contraproducente ya que puede ocasionar una mala calidad del aire con consecuencias ambientales y a la salud de la población

Por otra parte en época de lluvias las concentraciones de NO_2 fueron menores a lo esperado, ya que presentó una disminución notoria, a pesar que este gas reacciona con el agua para formar Ácido Nítrico, precipitando en forma de lluvia ácida, es por ello, importante señalar que la dinámica de vientos presente en la ZMVT juega un papel muy importante en la dispersión y circulación del Bióxido de Nitrógeno, la cual nos ayuda con el control de las zonas de mayor contribución de contaminación atmosférica del área de estudio, como lo son la Estación Aeropuerto y Centro.

Además de lo mencionado anteriormente, el análisis mensual también presentó un aumento de las concentraciones de Bióxido de Nitrógeno en el mes de diciembre, que se logra observar en las concentraciones de NO_2 de la Estación AP y CE, que aumentan en esta fecha de forma evidente; sin embargo este aumento puede ser debido al Efecto Invernadero, dado que el Bióxido de Nitrógeno retienen parte de la energía emitida por la Radiación Solar, produciendo un efecto de calentamiento; además de ser precursor de la formación de contaminantes secundarios como el

Ozono (O_3), Nitratos, Nitritos; así como la disminución de la velocidad del viento que se presenta en este mes, el cuál es uno de los factores que afecta la buena dispersión de contaminantes, ocasionando que su tiempo de vida en la atmósfera aumente.

Durante todo el periodo de estudio la estación AP fue la que registró las mayores concentraciones de NO_2 , sin embargo a pesar que fue deshabilitada a mediados del 2015, de acuerdo a los resultados, es posible que cada año sus concentraciones aumenten y ya hayan sido superadas, debido a la zona en la que se encuentra; mientras que la Estación Centro (CE) ocupó el segundo lugar en registrar las máximas concentraciones de NO_2 , presentando un aumento evidente en los últimos años.

En el análisis realizado de los promedios por hora de las bases de datos de la RAMA-ZMVT, presentó un aumento máximo de concentraciones de NO_2 , en horario diurno de 7:00 a 13:00 horas y en horario nocturno de 19:00 a 24:00 horas.

Por lo que se puede confirmar la propuesta inicial de la hipótesis, en donde se estableció que las mayores concentraciones de Bióxido de Nitrógeno, se presentarían en horarios matutinos de acuerdo a la RAMA-ZMVT, en el periodo 2011–2016, sin embargo se obtuvieron resultados inesperados, ya que además de presentar las mayores concentraciones por la mañana, también se obtuvieron por la noche, teniendo una relación causal del 88%.

En el horario matutino el aumento de las concentraciones de NO_2 , se dio después de la hora pico que se establece de 6:00 a 8:00 hrs, lo que se atribuye a la gran emisión de este gas proveniente de la combustión de transporte público y privado, sin embargo uno de los aspectos más sobresalientes que se observó fue que a medida que va aumentando la Radiación Solar el NO_2 aumenta; el cual al encontrarse con Partículas Sólidas Disueltas generan una reconversión formando

O₃, lo que ocasiona que el NO₂ disminuya en las horas de valores máximos de la Radiación Solar; es por ello que en la hora con valor máximo de Radiación Solar y en el descenso de NO₂, se comienzan a generar los valores máximos del Ozono.

Por otra parte las mayores concentraciones de NO₂ y Radiación Solar son proporcionales al aumento del efecto invernadero, ya que el NO₂ tiene la capacidad de absorber mayor cantidad de Radiación Solar y producir compuestos tóxicos como el Ozono, al reaccionar con la luz (EPA, 1999).

Se tiene el conocimiento que, en las noches al existir ausencia de luz Solar, el NO₂ se convierte en Trióxido de Nitrógeno (N₂O₃), que reacciona con el NO₂ para generar Ácido Nítrico (HNO₃), que es quien provoca la lluvia acida; es por ello que debido a esta transformación el NO₂ debería disminuir después de las 19:00 horas, donde la Radiación Solar disminuye, sin embargo las concentraciones de NO₂ tienen su segundo pico de las 19:00 a 24:00 horas con un valor máximo a las 22:00 horas, lo que se atribuye a la hora pico nocturna del tránsito vehicular de la ZMVT, que se presenta de las 18:00 a 20:00 horas, además de las emisiones de las industrias que pueden observarse después de las 20:00 horas, las cuales son captadas por la estación Aeropuerto (AP) que se encuentra rodeada de parques industriales.

Por último se presenta el análisis de los resultados de la causalidad entre las concentraciones de NO₂ y Radiación Solar como precursores de O₃, la cual se apoya en que el NO₂, es un contaminante que absorbe la Radiación UV para formar otros compuestos tóxicos, así mismo reacciona con los radicales libres de la atmósfera sobre los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), provocando que se puedan producir Ozono ininidad de veces.

La cual dio como resultado que existe una alta correlación del 58.9% entre ambas variables para el periodo 2011 a 2016, en la zona de estudio.

De acuerdo con los datos, la hipótesis acerca si el Bióxido de Nitrógeno y la Radiación Solar, tiene una relación directa en la producción de O₃, en la zona de estudio, en el periodo 2011–2016, se probó al **58.9%**, lo que confirma que existe una relación entre las variables de las 7:00 a las 19:00 horas en relación a los datos de la RAMA-ZMVT, lo que representa que es un factor que influye en la contaminación atmosférica.

Sin embargo a pesar que durante todo el periodo nunca se superaron los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-023-SSA1-1993, para el NO₂, el cual establece que no debe de rebasarse el límite máximo normado de 0.21 ppm, lo que es equivalente a 395 µg/m³, en una hora una vez al año, como protección a la salud de la población, es importante mencionar los límites establecidos por organizaciones internacionales como lo es la OMS la cual establece 200 µg/m³ máximo en una hora que equivalen a 0.10 ppm, por otra parte la Agencia de Protección Ambiental (EPA), estableció que la concentración promedio de Bióxido de Nitrógeno en el aire no debe exceder las 0.053 ppm en un periodo de un año, esto derivado de estudios que demuestran un riesgo para la salud en concentraciones mayores a los valores establecidos (ATSDR, 2002); como puede apreciarse los valores internacionales establecidos superan por mucho la NOM que regula nuestro país, los cuales se superarían si nos rigiera este valor; es por ello que es necesario realizar una investigación para conocer si la NOM-023-SSA1-1993, maneja límites en donde no pone en riesgo a la población o si debe de actualizarse de acuerdo a las instituciones internacionales, tomando en cuenta que las concentraciones de este gas aumentan año tras año.

La finalidad de esta investigación, fue explicar la trascendencia del estudio del NO₂, debido a los efectos en la salud y medio ambiente al encontrarse en altas concentraciones; así como conocer las zonas con principales fuentes de emisión de Bióxido de Nitrógeno permitiendo comprender los distintos procesos de reconversión que puede sufrir en relación con las condiciones de la zona de estudio.

RECOMENDACIONES

Derivado de la investigación, se presentan recomendaciones con las que se pretende lograr una mejora en estudios posteriores, así como mejorar las herramientas de medición actuales:

En primera instancia, debido a la disparidad en las normas internacionales con las nacionales, se recomienda actualizar la NOM-023-SSA1-1993 de acuerdo a las instituciones internacionales como la OMS o EPA, tomando en cuenta que las concentraciones de este gas aumentan año tras año.

Por otra parte se exhorta a promover investigaciones referentes al NO₂, y tener en cuenta su medición, así como una cultura de prevención a través de programas de alerta temprana para mejorar la calidad del aire; asimismo informar a la población sobre los riesgos a los que se enfrentan al estar expuestos a este contaminante, las consecuencias medioambientales, y las medidas de atención en condiciones de contingencia atmosférica por Bióxido de Nitrógeno.

Y para finalizar, se recomienda realizar la instalación de más estaciones de monitoreo de la RAMA-ZMVT en diferentes municipios, para que se logre informar la calidad del aire de una mayor área, así como el mantenimiento de equipos para disminuir medición de datos invadidos.

A pesar de que se obtuvieron resultados que no se esperaban y existen diversas cuestiones por resolver o investigar, ahora se conoce más sobre el comportamiento del Bióxido de Nitrógeno con base en a los datos de la RAMA-ZMVT, así como el camino al que nos dirigimos si no se crean medidas o una cultura de prevención a través de programas de alerta temprana para mejorar la calidad del aire, que informe a la población sobre los riesgos a los que se enfrentan al estar expuestos a este contaminante, las consecuencias medioambientales, y las medidas de atención en condiciones de contingencia atmosférica por Bióxido de Nitrógeno. Es por ello que las dudas podrían ser resueltas es estudios realizados más adelante, debido a que la contaminación atmosférica es un tema que nunca terminara de investigarse.

Cabe hacer mención que de acuerdo con Milpa, (2018), se logra observar que las estaciones de la RAMA-ZMVT, con mayores concentraciones de O₃, fueron SC, CB y SM; las cuales además de AP, presentaron las mayores concentraciones al igual que el NO₂. Sin embargo para el caso del O₃, los límites máximos permisibles establecidos para México se superaron todos los años del periodo, en todas las estaciones de la RAMA-ZMVT, llegando a tener en 2015, más de 140 días con concentraciones excedentes a la NOM-020-SSA1-2014 en la estación AP, la cual en el mismo año también presentó concentraciones muy elevadas de NO₂; por lo cual se recomienda poner suma atención a este contaminante.

Bibliografía

- Arce, W. D., 2011. *Representación Espacial por Interpolación con Kriging de los contaminantes criterio para analizar la situación de la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*. Toluca: UAEMex.
- ATSDR, 2002. Óxidos de Nitrógeno (monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, etc.). *División de Toxicología ToxFAQs*, I(43), p. 2.
- Ayers, M., 2001. *Manual de control de la calidad del aire*. Primera ed. Hidalgo: Mc Graw-Hill.
- Ballester, F., 2005. Contaminación Atmosférica, Cambio Climático y Salud. *Revista Española de Salud Pública*, LXXIX(2), pp. 159-175.
- Becerra, M. R. & Mance, H., 2009. *Cambio climático: lo que esta en juego*. Primera ed. Bogotá: Foro Nacional Ambiental.
- Benavides & León, 2007. Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático.. *IDEAM*, Volumen I, p. 99.
- Blogger, F., 2015. *¡Cuidemos el planeta!*. [En línea]
Available at: <http://cuidemos-el-planeta.blogspot.mx/2010/11/que-es-el-smog-fotoquimico.html>
[Último acceso: 30 Mayo 2017].
- Bonn, G., 2003. *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide*. Primera ed. Copenhagen: Regional Office for Europe.
- CEMDA, 2016. *Los Derechos Humanos y la Calidad del Aire en México*. Primera ed. México: The William and Flora Hewlett Foundation.
- CENICA, 1996. *Primer Informe sobre la Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas 1996*. Primera ed. México: SEMARNAP.
- CENICA, 1997. *Segundo Informe de Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas 1997*. Primera ed. México: Dirección de Análisis de Datos Ambientales de la Dirección General de Gestión e Información Ambiental del Instituto Nacional Ecología.
- CEPIS, 2005. *Curso de orientación para el control de la contaminación del aire*. [En línea]
Available at: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_orientacion/index.html
[Último acceso: 18 Octubre 2016].
- Cisniega, D. G., 2002. Contaminación del aire urbano: Efectos de la Radiación Solar. *FEMISCA*, Volumen XVIII, pp. 1-4.
- CMNUCC, 2015. *Aprobación del Acuerdo de París*. Primera ed. París: Naciones Unidas.
- CNMA, 1998. *Protocolo de Kyoto*, Chile : Convención Marco de las Naciones Unidad sobre el Cambio.
- CONAGUA, 2010. *Normales Climatológicas*. [En línea]
Available at: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>
[Último acceso: 27 Junio 2018].
- Conde, C., 2006. *México y el cambio climático global*. Primera ed. México: UNAM.
- Conde, C., 2006. *México y el cambio climático global..* Primera ed. México: UNAM.
- Contreras, R., 2013. *La planeación inadecuada del transporte público de Toluca. Caso de estudio la empresa ATZUZI, SA. DE CV.*. Primera ed. Toluca: UAEMex.
- CRANA, 2013. *Óxidos de nitrógeno (NOX = NO + NO2)*. [En línea]
Available at: http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion_3/axidos-nitrigeno-nox-no2
[Último acceso: 6 Diciembre 2016].

Departamento de Ingeniería Química, 2005. Eliminación de NO_x. *UCLM*, I(2), p. 34.

Díaz Cordero, G., 2012. El Cambio Climático. *Ciencia y Sociedad*, XXXVII(2), pp. 227-240.

DOF, 1994. *NOM-023-SSA1-1993*. [En línea]
Available at: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/023ssa13.html>
[Último acceso: 1 Septiembre 2016].

DOF, 2007. *Ley General de Salud*. [En línea]
Available at:
http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/legis/lgs/LEY_GENERAL_DE_SALUD.pdf
[Último acceso: 14 Marzo 2017].

Echarri, L., 2007. *Contaminación de la atmósfera*. [En línea]
Available at:
[file:///C:/Users/Meme/Downloads/Tema%207%20Contaminacion%20atmosferica%2007%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Meme/Downloads/Tema%207%20Contaminacion%20atmosferica%2007%20(1).pdf)
[Último acceso: 5 Diciembre 2016].

Eduardo, C., 2012. *Las 10 aglomeraciones más pobladas de América Latina*. [En línea]
Available at: <http://www.taringa.net/post/info/15141985/Las-10-aglomeraciones-mas-pobladas-de-America-Latina.html>
[Último acceso: 19 Octubre 2016].

EPA, 1999. *Óxidos de Nitrógeno (Nox), ¿Porqué y Cómo se controlan?*. primera ed. Carolina: CICA .

FAO, 2000. *Capítulo 8. Legislación ambiental*. [En línea]
Available at: <http://www.fao.org/wairdocs/LEAD/X6372S/x6372s09.htm>
[Último acceso: 2 Enero 2017].

Flores, y otros, 2010. Estimación del riesgo a la exposición de partículas suspendidas en el Valle de Toluca. *Ciencia Ergo Sum*, XVII(1), pp. 72-80.

Galán & Fernández, 2006. Implicación de los NO_x en la Química Atmosférica. *Revista electrónica de Medio Ambiente UCM*, I(2), p. 14.

García, V., 2009. *Estudio sobre la variabilidad de la irradiancia solar superficial UV como factor externo del cambio climático*. Primera ed. México: UNAM.

GEM, 2012. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de Toluca (2012-2017)*. Primera ed. Toluca : SMA.

Geoambiental, F., 2013. *Dióxido de nitrógeno NO₂*. [En línea]
Available at: <http://www.saludgeoambiental.org/dioxido-nitrogeno-no2>
[Último acceso: 19 Agosto 2017].

González, M. A. & Villafaña, L., 2003. *Principios básicos de contaminación ambiental*. Primera ed. Toluca: UAEMex.

Hernández, S., 2010. *Metodología de la Investigación*. Quinta ed. México: Mc Graw Hill Educación.

Hinojos, A. M. G., 2004 . *Diagnóstico del clima organizacional y propensión a cambio en la Facultad de Medicina Veterinaria Zootécnica de la Universidad Autónoma del Estado de México*. Primera ed. Toluca: UAEMex.

Hurtado & Mesa, 2015. Cambio Climático y Variabilidad Espacio – Temporal de la Precipitación en Colombia. *EIA*, XII(24), pp. 131-150.

INE, 2000. *Gestión de la Calidad del Aire en México*. Primera ed. México: SEMARNAT.

INE, 2006. *Inventario Nacional de emisiones de Gases de Efecto Invernadero*. Primera ed. México: SEMARNAT.

INECC, 2009. *Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009)*. Cuarta ed. México: INEEC.

INECC, 2010. *ESTUDIO DE EMISIONES Y ACTIVIDAD VEHICULAR EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO..* Primera ed. México: SEMARNAT.

INEGI, 2010. *Censo de Población y vivienda 2010*. [En línea]
Available at: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/>
[Último acceso: 11 Noviembre 2016].

INEGI, 2016. *Sistema Estatal y Municipal de Bases de Datos*. [En línea]
Available at:
<http://sc.inegi.org.mx/cobdem/resultados.jsp?w=62&Backidhecho=98&Backconstem=96&constembd=028&tm=%27Backidhecho:2,Backconstem:2,constembd:3%27>
[Último acceso: 28 Junio 2018].

INEGI, 2017. *Marco Geoestadístico Nacional*. [En línea]
Available at:
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx
[Último acceso: 22 Agosto 2018].

Inzunza, J., 2014. *Radiación Solar*. Primera ed. Chile: UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN.

IPCC, 2008. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis..* Primera ed. Ginebra, Suiza: Pachauri.

Jubel, M., 2008. *Iiquimica*. [En línea]
Available at: <http://iiquimica.blogspot.mx/2010/02/efectos-de-la-contaminacion-del-aire.html>
[Último acceso: 3 Septiembre 2017].

Lacasaña, Aguilar & Romieu, 1999. Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina. *Salud Pública de México*, XLI(3), pp. 203-215.

Linea Verde, 2012. *Los contaminantes Atmosféricos*. [En línea]
Available at: <http://www.lineaverdemunicipal.com/consejos-ambientales/los-contaminantes-atmosfericos.pdf>
[Último acceso: 5 Diciembre 2016].

Manzanque, J., 2008. *El planeta Tierra*. [En línea]
Available at:
http://almez.pntic.mec.es/~jmac0005/ESO_Geo/TIERRA/Html/Movimientos_c.htm
[Último acceso: 14 Noviembre 2018].

Martínez & Fernández, 2004. *Cambio climático: una visión desde México*. Primera ed. México: Ine.

Martínez, G., Dorantes, O. & Jaime, A., 2010. *Inafed*. [En línea]
Available at:
<http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15076a.html>
[Último acceso: 27 Junio 2018].

Méndez, Madrigal, D. & González, 2007. Isla de calor en Toluca, México. *Ciencia ergo sum*, XIV(3), pp. 307-316.

Milpa, L., 2018. *Correlación entre la variabilidad de la temperatura y las concentraciones de Ozono a partir de los datos de la RAMA-ZMVT, 2011-2016*. primera ed. Toluca: UAEMex.

Moragues, J. A., 1997. *Manual de tecnologías de medición de concentración de gases y material particulado en chimeneas y atmósfera*. Primera ed. México: Secretaría de Desarrollo Sustentable y Política Ambiental.

Muñoz, H. E. S., 2015. *Comportamiento Espacial de las partículas suspendidas PM 10 y estrategias de gestión ambiental del aire en la Zona Metropolitana de Toluca, México.*. Toluca: UAEMex.

NOM-023-SSA1-1993, 1994. *Diario Oficial de la Federación*. [En línea] Available at: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/023ssa13.html> [Último acceso: 1 Septiembre 2016].

Pearson, 2017. *Coefficiente de correlación lineal de Pearson*. [En línea] Available at: <https://personal.us.es/vararey/adatos2/correlacion.pdf> [Último acceso: 24 Octubre 2017].

Pérez, J. & Merino, M., 2009. *Efecto invernadero*. [En línea] Available at: <https://definicion.de/efecto-invernadero/> [Último acceso: 7 Noviembre 2017].

Piedra, I., 2016. *Índice de Desempeño Ambiental (EPIYALE)*. [En línea] Available at: <http://caelum.ucv.ve/bitstream/123456789/15868/1/Clase%206%20EPI%20YALE%20Isidro%20Piedra.pdf> [Último acceso: 27 Septiembre 2017].

Portillo, G., 2017. *Meteorologiaenred*. [En línea] Available at: <https://www.meteorologiaenred.com/la-radiacion-solar.html> [Último acceso: 22 Octubre 2017].

PRTR España, 2014. Descripción de Indicadores. *Agricultura, Alimentación y Medio ambiente*, XVI(1), pp. 4-8.

Santiago, 2015. *emol.Tecnología*. [En línea] Available at: <http://www.emol.com/noticias/tecnologia/2015/02/20/704629/cientificos-estudian-que-ocurre-con-la-contaminacion-ambiental-en-invierno.html> [Último acceso: 17 Junio 2018].

SEDESU, 2016. *Bióxido de nitrógeno - NO2*. [En línea] Available at: <http://www.queretaro.gob.mx/sedesu/contenido.aspx?q=0P7NpIeTMwwWQGJ1I0u/5cRXuHV7FI64EnS5x9y2uIw=> [Último acceso: 18 Agosto 2017].

SEGOB, 2016. *Leyes y Reglamentos Federales*. [En línea] Available at: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/leyes.php> [Último acceso: 14 Marzo 2017].

SEMARNAT, 1997. *Programa para el Valle de Toluca 1997 - 2000*. Primera ed. México, DF: Gobierno del Estado de México .

SEMARNAT, 2000. *Aire Limpio Programa para el Valle de Toluca*. Primera ed. Toluca: SEMARNAT.

SEMARNAT, 2003. *Nom-037-ECOL-1993*. [En línea] Available at: <http://www.nl.gob.mx/servicios/normas-ambientales-de-calidad-del-aire> [Último acceso: 5 Enero 2017].

SEMARNAT, 2007. *Aire Limpio: Programa para el Valle de Toluca 2007-2011*. Primera ed. Toluca: Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.

SEMARNAT, 2009. *Cambio Climatico Ciencia, evidencia y acciones*. Primera ed. Talpan: SEMARNAT.

SEMARNAT, 2012. *NORMA Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011*. [En línea] Available at: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6661/1/nom-085-semarnat-2011.pdf> [Último acceso: 25 Agosto 2016].

SEMARNAT, 2013. *Calidad del aire: una práctica de vida*. Primera ed. CDMX: SEMARNAT.

SEMARNAT, 2015. *NOM-041-SEMARNAT-2015*. [En línea] Available at: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/7251/1/nom-041-semarnat-2015.pdf> [Último acceso: 5 Enero 2017].

SEMARNAT, 2016. *NOM-EM-167-SEMARNAT-2016*. [En línea] Available at: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5440157&fecha=07/06/2016 [Último acceso: 5 Enero 2017].

SEMARNAT, 2016. *NOM-EM-167-SEMARNAT-2016*. [En línea] Available at: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5440157&fecha=07/06/2016 [Último acceso: aGOSTO 30 2016].

SIEM, 2018. *Empresas registradas*. [En línea] Available at: <https://www.siem.gob.mx/siem/portal/estadisticas/xmun.asp?edo=15> [Último acceso: 28 Junio 2018].

SMA , 1990. *Programa Integral contra la contaminación atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Primera ed. México: Gobierno del Estado de México .

SMA, 2007. *Aire Limpio: Programa para el Valle de Toluca 2007-2011*. Primera ed. Tlalnepantla: Gobierno del Estado de Mexico.

SMA, 2007. *Aire Limpio: Programa para el Valle de Toluca 2007-2011*. Primera ed. México: Gobierno del Estado de México.

SMA, 2007. *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2004*. Primera ed. Estado de México: Gobierno del Estado de México.

SMA, 2012. *Programa para Mejorar la Calidad del Aire Valle de Toluca 2012 - 2017*. Primera ed. Metepec: Gobierno del Estado de México.

SMA, 2014. *Red Automática de Monitoreo Atmosferico de la ZMVT*. [En línea] Available at: <http://rama.edomex.gob.mx/contaminacion-atmosferica/imeca> [Último acceso: 4 Diciembre 2016].

SMA, 2014. *Red Automática de Monitoreo Atmósferico de la ZMVT*. [En línea] Available at: <http://rama.edomex.gob.mx/estaciones> [Último acceso: 23 Noviembre 2016].

Trejo, R., 2006. El IMECA: Indicador del Grado de Contaminación de la Atmósfera. *Conciencia Tecnológica*, I(31), pp. 50-53.

UCLM, 2005. Eliminación de NOx. *Departamento de Ingenieria Quimica*, I(2), p. 34.

Uherek, D. E., 2013. *Óxidos de nitrógeno - Formación e Importancia*. [En línea] Available at: http://klimat.czn.uj.edu.pl/enid/3_Ozono_y_oxidoss_de_nitrogeno/_NOx_2xa.html [Último acceso: 19 Octubre 2016].

UNAM , 2011. Efectos de la contaminación y destrucción de la Capa de Ozono de laEstratosfera. *Química I, Agua y Oxígeno*, I(1), p. 2.

UNEP, 2015. *Cambio Climático*. [En línea]
Available at: <http://www.pnuma.org/AcercaPNUMA.php>
[Último acceso: 19 Octubre 2016].

Unidas, N., 2002. *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. [En línea]
Available at: <http://www.un.org/spanish/conferences/wssd/unced.html>
[Último acceso: 15 Marzo 2017].

Unidas, N., 2006. *Los principales tratados internacionales de derechos humanos*. [En línea]
Available at: <http://www.ohchr.org/Documents/Publications/CoreTreatiessp.pdf>
[Último acceso: 15 Marzo 2017].

Venegas, L. & Mazzeo, N., 2016. *La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmósfera*. Primera ed. Argentina: Universidad Tecnológica.

Verne, J., 2011. *100cia Química*. [En línea]
Available at: <http://www.100ciaquimica.net/temas/tema12/punto4.htm>
[Último acceso: 28 Marzo 2018].

Villegas, P., 1999. *researchgate*. [En línea]
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/31723010_Evaluacion_y_control_de_la_contaminacion_FA_Villegas_Posada_prol_de_Daniel_Vidart
[Último acceso: 19 Septiembre 2016].

Whitten, W., Davis, E., Peck, M. & Stanley, G., 2015. *Química*. Octava ed. s.l.:CENGAGE Learning.

XIRUCA, 2007. *Radiación solar y estaciones*. [En línea]
Available at: <http://www.xiruca.com/articulos/meteorologia-radiacion-solar-y-estaciones#sthash.Tx57Izic.dpbs>
[Último acceso: 14 Noviembre 2018].