



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MÉXICO**



**FACULTAD DE ECONOMÍA**

**“ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LA CONTAMINACIÓN  
ATMOSFÉRICA EN LA ZMVT, 2011-2016. UNA VISIÓN  
PROSPECTIVA”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN ACTUARÍA**

PRESENTAN:

**FABIOLA MARTÍNEZ VÁZQUEZ**

**ALBERTO VILLA MIRÓN**

ASESOR:

**M. EN A. ALEJANDRO ALANÍS CHICO**

REVISORES:

**DR. EN C.E.A. OSVALDO URBANO BECERRIL TORRES**

**DR. EN A. OSVALDO GARCÍA SALGADO**

**TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO**

**SEPTIEMBRE 2017**

## AGRADECIMIENTOS:

Esta parte me parece la más difícil de comenzar y si estoy escribiéndola es porque finalmente el proyecto está concluido, y con ello una etapa muy importante de mi vida.

Es momento de agradecer a todos los que fueron parte de este proceso, las personas más cercanas a mí sabrán que la paciencia fue mi más grande enseñanza en este último paso de la universidad.

Este trabajo es el resultado del trabajo, peleas, discusiones, frustraciones, alegrías, risas y sin duda, una amistad de años. Beto, muchas gracias por aceptar el reto a mi lado, tú y yo sabemos lo difícil o sencillo que fue trabajar juntos, estoy segura de que ninguno de los pensamos que tendríamos tantos contratiempos para poder terminarla. ¿Recuerdas la “promesa” que hicimos? (Pista: que la tesis no terminaría con nuestra amistad), pues aquí seguimos, dando lata como siempre; además, podría asegurar que, si esto no nos separó, nada lo hará.

Gracias Profesor Alanís, por aceptar ser nuestro tutor a pesar de lo ocupado que se encuentra siempre. Gracias por apoyarnos con la metodología, con la redacción y por asesorarnos. Definitivamente sin usted, sin sus clases yo no le tendría el amor que le tengo a los modelos estadísticos, las regresiones, las series de tiempo, definitivamente aprendí mucho de usted.

Quiero agradecer a la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México por facilitarnos las bases de datos con las que se inició esta investigación, mismas que fueron fundamentales para el análisis estadístico que se llevó a cabo.

Gracias a la Universidad Autónoma del Estado de México y mi Facultad de Economía por brindarme las herramientas para ser una profesional competitiva, gracias porque ahí aprendí mucho de mi carrera que tanto amo y que tanto me apasiona.

Papás, muchas gracias por ser los mejores padres que pude haber tenido, gracias por siempre impulsarme a ser una mejor persona, una mejor mujer. Gracias por las libertades que me han dado, sin las cuales yo no sería la mujer responsable e independiente que cada día lucho por ser. Gracias por las oportunidades, por negarme todo lo que no fuese importante, y al mismo tiempo brindarme todas las herramientas necesarias para cumplir mis sueños. Saben que todos mis logros son por y para ustedes.

Papá, gracias por impulsarme a ser una persona más completa, por exigirme a ser mejor cada día, por no dejar que me conforme, por enseñarme con tu ejemplo a luchar por mis sueños y que no hay imposibles si se trabaja duro. Estoy muy orgullosa de ti. Te amo.

Mamá, gracias por ser mi amiga, por escucharme, por estar siempre. Sin duda eres una mamá muy diferente, eres la mamá perfecta para nosotros. Gracias por ser cómplice de mis locuras, de mis sueños, por luchar a mi lado para lograr mis propósitos. Por tu ejemplo de lucha, estoy muy orgullosa de ti. Te amo.

Hermanos (Micko y Edgardo), son lo más bonito que me ha pasado en la vida, sin duda mi vida sin ustedes estaría vacía y triste; son mi complemento, mi alegría eterna. Me han enseñado a vivir de una forma diferente, a disfrutar de las cosas pequeñas. Gracias por estar conmigo, por todo el amor que me dan, por apoyarme, por escucharme y ayudarme en mis locuras. Los amo muchísimo.

Quiero agradecer también a mi “familia grande”, porque haber nacido en una familia tan rara y unida me ha enseñado que, a pesar de todo, tu familia siempre estará ahí, en las buenas y en las malas. Tío Robe y Tío Jorge, son grandes ejemplos de vida, estoy muy orgullosa de ustedes, me hace muy feliz tenerlos como tíos cuasi padres. Tía Lety & tío Ruben, tía Gloria & tío Alfonso y tía Beatriz, gracias por su apoyo, ayuda y cariño. A mis primos y no primos: Jaque, Omar, Jovanny, Flaco, Chucho, Benru, Sandy, Ruth, Carly, Robert, Eli, Luis, Gaby y Dulce; gracias por crecer conmigo, por formar parte tan especial de mi vida, por el cariño y las travesuras juntos. A

mi tía Alicia y tío Apolinar que son como abuelos para mí, por cuidarme, consentirme y quererme mucho. Tía Norma, gracias por escucharme, por estar ahí, por ayudarme siempre que lo he necesitado, por quererme. Tía Adela & tío Armando, gracias por el amor que me tienen, por procurarme y siempre recibirme con los brazos abiertos.

Mamá Angelina, gracias por consentirme siempre, por preocuparte por mí, por todo el amor que nos das a todos, por ayudarnos, cuidarnos, por los baños en temazcal, los atoles y los abrazos.

A mi Tía Magda por estar siempre al pendiente de mí, por apoyarme, por procurarme todo el tiempo. Papá Juan, por ser un abuelito tan chistoso y latoso.

Durante estos 5 años de Universidad, sin duda encontré a las mejores personas, y les agradezco infinitamente, porque no hubiese sido lo mismo sin ustedes. Beto & Aidee gracias por poner los estándares tan altos, por la humildad, el ejemplo de constancia y dedicación, gracias por escucharme, por darme zapecitos cuando lo necesitaba, por darme cariño y apoyo; estoy segura que esta amistad es de por vida. Yare, Steph, Giovanna, gracias por las risas, por las sacadas de clase, por las boberías necesarias en la vida. Dany & Edwin, gracias por la ayuda, el cariño y las pláticas, un placer compartir con ustedes estos años. Carlitos, gracias por los kms. corridos, el viaje final, por las salidas, por aceptar siempre los retos conmigo en la universidad. Fer, gracias por apoyarme siempre durante todo este periodo, por impulsarme, por mostrarme que no hay límites hacia arriba, y que hacia abajo no se puede ir muy lejos si estás luchando, que las caídas son parte del proceso y son necesarias; que aunque a veces las cosas no salen bien, sólo queda seguir luchando hasta lograrlo; me enseñaste que hay retos prioritarios, que hay que verlos a la cara y planearlos; pero sobre todo, que no hay reto más grande que yo y como siempre dijiste “para atrás, ni para tomar impulso”. Almita, gracias por la amistad de años, por ser mi alma gemela, por las locuras, las travesuras, los aprendizajes juntas, y a pesar de la distancia ambas sabemos que seguimos juntas, que siempre estaremos la una para la otra.

During my university, I took the decision to study in a new country for 6 months, completely different culture, language & food... It was a hard transition until I met two amazing persons who became my family in really few time: Dace & Gianni. You changed me, you changed my life for good, I'm a better person because of you. You taught me to enjoy life, I'll be always grateful because of that. Gianni, thanks for taking care of us, thanks for sharing your family & culture with us, for the love, the discussions, for being such an amazing person. Dace, thanks for doing funny, crazy stuff with me, thanks for loving me, and trusting me, thanks for all the shopping, the chocolates, the gossiping, for being just the way you are; thanks for visiting me, for accepting to know more about me, my culture, my family, my friends, my “normal” life; I promise I'll visit you as soon as possible in Latvia, just to know more about you.

Cuando terminas la universidad, es momento de salir al mundo y “enfrentarlo”, en el proceso tuve que tomar decisiones importantes y algunas complicadas, desde elegir la ciudad donde quería trabajar hasta la empresa en la que iniciaría el trayecto. Definitivamente fue un proceso mucho más complicado del que me hubiese gustado, pero afortunadamente encontré a una persona que me ha ayudado a llevar de manera más sencilla este proceso, que me ha enseñado que no tienes que dejar de hacer unas cosas para hacer otras. Víctor, gracias por todo el apoyo en este último paso, por estar, por decir “sí” a todas mis ideas, por vivir tan densamente a mi lado, por complementar mi forma de ver la vida.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que se cruzaron en mi camino durante estos seis años, gracias por aportar o por dejarme enseñanzas a través de caídas.

Fabiola Martínez Vázquez

## Agradecimientos:

Quisiera agradecer a todas las personas que me han brindado su apoyo a lo largo de todos estos años, ha sido un camino largo, pero ha valido la pena, cada logro que he alcanzado también tiene su nombre.

Gracias Ana, Zay, Mar, Alesha, Itzel, Gee, Marco, Paola, Marco y ambas Jesses, por su amistad que ha sido un gran pilar en mi vida desde que los conocí, por inspirarme a crecer siendo parte de sus logros, son estupendos.

A mis amigos de la facultad: Aidee, Perla, Yare, Jorge, Dan, y por supuesto Fabi, que caminamos juntos durante este proceso, ustedes fueron la mejor parte de la facultad, gracias por sus risas, regaños, y vivencias juntos, aprendí mucho de cada uno de ustedes. Particularmente gracias a mi necia compañera de tesis, porque a pesar de las discusiones, las frustraciones y los problemas que surgieron durante la elaboración de este proyecto nuestra amistad sigue siendo igual de fuerte.

A mi familia, que ha sido una gran fuente de inspiración, he aprendido mucho de cada uno de ustedes, es asombroso saber que tengo una familia con la cual se puede contar para lo que sea. Gracias manita por cuidarme cuando era pequeño, siempre lo recordaré con mucho cariño (a pesar de todas las peleas que tuvimos), por escucharme y apoyarme cuando lo necesité, te quiero mucho.

Finalmente, este logro quisiera dedicarlo a la persona que siempre ha estado para apoyarme en todo lo que hago, esa persona que siempre me demostró su cariño, gracias Mamá por ser quien me ha inspirado durante toda mi vida, gracias por todo tu sacrificio, sé que no fue fácil, pero lo lograste, educaste a dos grandes personas, lo que hoy somos es gracias a ti. No hay palabras que expresen lo agradecido que estoy contigo, gracias por todo.

Alberto Villa Mirón

# Índice

<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA</b> .....	<b>5</b>
1.1. Composición del aire .....	5
1.1.1. Aire no contaminado .....	5
1.1.2. Material Particulado .....	7
1.2. Monitoreo de la contaminación atmosférica: IMECA .....	8
1.3. Red de Monitoreo .....	11
1.4. Contaminantes Criterio.....	14
1.4.1. Partículas Suspendidas (PM) .....	14
1.4.2. Ozono (O <sub>3</sub> ) .....	20
1.4.3. Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) .....	23
1.4.4. Bióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ):.....	27
1.4.5. Monóxido de Carbono (CO): .....	30
Conclusiones.....	32
<b>Capítulo 2: CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA (ZMVT)</b> .....	<b>33</b>
2.1. Características de la ZMVT.....	33
2.1.1. Localización .....	33
2.1.2. Orografía y Relieve.....	36
2.1.3. Hidrografía.....	36
2.1.4. Clima .....	37
2.1.5. Meteorología.....	37
2.1.6. Usos de Suelo .....	38
2.1.7. Flora y Fauna .....	38
2.1.8. Dinámica Poblacional:.....	40
2.1.9. Aspectos Socioeconómicos: .....	44
2.2. Monitoreo Atmosférico .....	46
2.3. La calidad del aire en Toluca: .....	49
2.4. Análisis por contaminante. ....	51
2.4.1. PM <sub>10</sub> .....	51
2.4.2. PM <sub>2.5</sub> .....	56
2.4.3. Ozono (O <sub>3</sub> ).....	60

2.4.4. Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) .....	65
2.4.5. Bióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	69
2.4.6. Monóxido de Carbono (CO) .....	73
2.5. Inventario Nacional de Emisiones para la ZMVT .....	78
Conclusiones.....	79
<b>Capítulo 3: CONTRASTE DE LA ZMVT EN CON OTRAS REGIONES DE MÉXICO .....</b>	<b>81</b>
3.1. Inventario Nacional de Emisiones (INEM) .....	81
3.2. PM <sub>10</sub> en México .....	84
3.3. PM <sub>2.5</sub> en México .....	86
3.4. Ozono (O <sub>3</sub> ) en México.....	87
3.5. Bióxido de Asufre (SO <sub>2</sub> ) en México:.....	89
3.6. Bióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) en México: .....	90
3.7. Monoxido de Carbono (CO) en México .....	91
Conclusiones.....	92
<b>Capítulo 4: ESTUDIOS SOBRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA .....</b>	<b>94</b>
4.1. Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá.....	94
4.2. Pronóstico de la Calidad del Aire en el área metropolitana de la Ciudad de México a través del análisis de las series de tiempo de los componentes del IMECA .....	95
4.3. Desarrollo y aplicación de un modelo de pronóstico de calidad de aire (MP <sub>10</sub> ) para Temuco y Padre Las Casas.....	97
4.4. Análisis de ozono y óxidos de nitrógeno mediante técnicas de series de tiempo y regresión lineal. ....	99
4.5. Análisis de dependencia usando regresión lineal múltiple y regresión de componentes principales en contaminantes del aire y parámetros meteorológicos: caso de estudio .....	100
Conclusiones.....	101
<b>Capítulo 5: MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE CONTAMINANTES DEL AIRE EN LA ZMVT.....</b>	<b>102</b>
5.1. Análisis de Regresión .....	102
5.1.1. Estimación por Mínimos Cuadrados .....	104
5.1.2. Pruebas de hipótesis para los parámetros.....	107
5.1.3. Análisis Residual .....	108
5.1.4. Pronóstico .....	109
5.1.5. Modelos de Corrección por el Error: .....	110
5.1.6. Cointegración: .....	112
5.1.7. Test de Raíces Unitarias: .....	114
5.1.8. Integración Estacional:.....	115

5.1.9. Test de cointegración.....	115
5.1.10. Estimación del vector de cointegración:.....	115
5.2. Ajuste de modelos de regresión para los contaminantes de la ZMVT .....	117
5.2.1. PM <sub>10</sub> .....	119
5.2.2. Ozono .....	123
5.2.3. Bióxido de Azufre.....	127
5.2.4. Bióxido de Nitrógeno .....	132
5.2.5. Monóxido de Carbono .....	135
5.3. Propuesta de control vehicular para controlar la contaminación atmosférica. ....	140
Conclusiones.....	144
<b>Conclusiones .....</b>	<b>145</b>
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>146</b>
<b>Índice de Tablas.....</b>	<b>152</b>
<b>Índice de Gráficas .....</b>	<b>153</b>
<b>Índice de Mapas .....</b>	<b>156</b>

## **Introducción**

Uno de los objetivos principales de los países alrededor del mundo es mejorar la calidad de vida de sus habitantes, por lo que explorar alternativas que otorguen un mayor bienestar a su población es una prioridad para todos ellos. La calidad de vida es un concepto que considera una gran cantidad de factores; desde educación hasta bienes materiales, siendo la salud uno de los más importantes, razón por la cual la salud es el tema central de muchas políticas públicas.

Para evitar la aplicación de medidas correctivas con elevados costos sociales es necesario emplear medidas de prevención que beneficien a la sociedad en general. Éstas últimas deben tener en cuenta todos los factores que afectan de manera directa o indirecta la salud.

Es en este punto donde entran las acciones encaminadas al cuidado del medio ambiente, ya que muchos problemas de salud están fuertemente relacionados con las condiciones ambientales. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006), anualmente se podrían evitar trece millones de muertes provocadas por causas ambientales, además de que la prevención del riesgo ambiental podría salvar hasta cuatro millones de muertes de niños al año, sobre todo en países en vías de desarrollo.

Las condiciones del aire son vitales para una buena salud, en promedio, el hombre inhala 7,500 litros de aire diarios (Strauss y Mainwaring, 1990). Específicamente, la contaminación del aire exterior e interior provoca alrededor de siete millones de muertes prematuras, siendo uno de los riesgos sanitarios más grandes del mundo (OMS, 2014).

Es por lo anterior que se considera importante el control y la medición de la contaminación del aire alrededor del mundo, estandarizado a nivel mundial a través de las Directrices sobre la Calidad del Aire creadas por la OMS, estas directrices consideran los contaminantes principales que deterioran la calidad del aire (OMS, 2005).

Tan solo en México, las muertes anuales asociadas este tipo de contaminación, de acuerdo con la OMS, son de aproximadamente 9,300. Por lo que conocer la calidad del aire en el país es un factor fundamental para la toma de decisiones que lleven a acciones preventivas y correctivas, es aquí donde radica la importancia de contar con

indicadores de la calidad del aire, los cuales permitan monitorear la contaminación y tomar decisiones que protejan a la población.

En la República Mexicana existe actualmente una red de monitoreo atmosférico integrada por las 20 ciudades principales de la República, además de 64 ciudades con equipos para la medición de contaminantes atmosféricos. La red es administrada por la Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire del Instituto Nacional de Ecología, la cual, tiene como funciones investigar las fuentes de contaminación y su impacto para la creación de políticas y programas en materia de calidad del aire.

Una de las ciudades que forma parte de esta red de monitoreo atmosférico es Toluca; sin embargo, a pesar de contar con elevados índices de contaminación, comparables con la Ciudad de México, no se han realizado estudios importantes en esta área como se han hecho en la capital de nuestro país, además de que han sido pocas las medidas que se han puesto en marcha en la zona para reducir el problema.

En México se han realizado inventarios de emisiones que son instrumentos de gestión ambiental que permiten identificar a los generadores de emisiones y su aporte de contaminantes a la atmósfera por sector. El último inventario nacional se realizó en 2008, mismo que especifica que el 60% de las emisiones de contaminantes se realizaron por fuentes móviles, categoría en la que se encuentran los vehículos automotor. Específicamente para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, el último Inventario de Emisiones se realizó en 2004 y especifica una emisión por fuentes móviles del 94%.

Es por ello que el desarrollo del presente trabajo se enfocará en la medición del comportamiento de los contaminantes del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) desde enero de 2011 a junio de 2016 con base en información obtenida de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT (RAMA-ZMVT), además de la implementación de modelos de regresión lineal para evaluar el impacto que tendría en los contaminantes una disminución de la cantidad de vehículos que circulan en el área a través de la aplicación de modelos de regresión lineal.

Es a partir del planteamiento anterior donde surgieron las siguientes preguntas de investigación.

- Con base en los resultados ¿Cuál será el contaminante atmosférico con mayor impacto en el Valle de Toluca? ¿Este contaminante muestra patrones de comportamiento que pongan en riesgo la salud de los habitantes?
- ¿Cuál será el comportamiento de los contaminantes para los 6 meses siguientes al periodo analizado?
- ¿Una disminución de la flota vehicular disminuirá de forma importante los niveles de contaminantes en la ZMVT?

Siguiendo con esta línea, se sospecha que, de acuerdo al incremento de la actividad en la región, los niveles de contaminación han seguido una tendencia alcista a lo largo de los años y continuará este comportamiento en los 6 meses posteriores al periodo analizado, registrando el material particulado los mayores niveles.

Así mismo, se conjetura que una disminución de la flota vehicular reducirá los niveles de todos los contaminantes atmosféricos en la ZMVT.

Por lo tanto, para determinar si las hipótesis planteadas son ciertas, se busca estimar un modelo de regresión lineal para cada uno de los contaminantes atmosféricos, el cual permita cuantificar el impacto que tiene la flota vehicular existente en la región.

Por otra parte, se presentará un contexto más amplio de la situación analizando los contaminantes y su comportamiento en el territorio, además de la realización un comparativo con otras regiones del país. Por otra parte, se examinará bibliografía existente con el fin de encontrar estudios similares al presente trabajo.

En relación con el objetivo mencionado anteriormente, la estructura capitular permitirá abordarlo de forma clara y ordenada, por lo que antes de realizar cualquier análisis, el “Capítulo 1: Introducción al estudio de la contaminación atmosférica” permitirá conocer la red de monitoreo existente en el país, así como las características de los contaminantes que se estudiarán en el presente trabajo.

Una vez presentados los conocimientos generales del tema central de la investigación, el “Capítulo 2: Contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)” presentará el comportamiento de los contaminantes en esta área. La comparación de la situación con respecto a otros territorios se realizará en el “Capítulo 3: Contraste de la ZMVT con otras regiones de México”.

Una vez cubierto el análisis del comportamiento, se considerarán algunos de los estudios existentes en este tema durante el “Capítulo 4: Estudios sobre contaminación atmosférica” con el fin de el “Capítulo 5: Modelación y simulación de contaminantes del aire en la ZMVT”.

## **Capítulo 1: INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA**

Para contextualizar el tema de la contaminación atmosférica, es indispensable tener claro qué es el aire; según Strauss y Mainwaring (1990:9) “el aire es una mezcla de gases que rodean la Tierra en una capa relativamente delgada”, el 95% del aire se concentra en los primeros 20 kilómetros sobre el nivel del mar y se va desvaneciendo de manera gradual hacia el espacio. La parte más baja de la capa compuesta por esta mezcla de gases, es la tropósfera, misma que mide aproximadamente 8 kilómetros en los polos, y alrededor de 16 en el ecuador.

El hombre realiza sus actividades en los primeros dos kilómetros de esta capa, por lo que todos los contaminantes generados por las actividades humanas se filtran en la tropósfera donde se mezclan y se transportan con el resto de los gases. La causa principal de la contaminación del aire es la combustión, que hasta el momento es indispensable para el ser humano.

Los contaminantes del aire se clasifican en primarios y secundarios, los primarios corresponden a procesos naturales, mientras que los contaminantes secundarios son resultado de las actividades humanas (proceso conocido como antropogénico).

### **1.1. Composición del aire**

Al determinar la composición del aire, hay que tener en cuenta que ésta variará de acuerdo a las condiciones propias del lugar en el que se está evaluando; es por esto que se parte de las estimaciones del aire no contaminado.

#### **1.1.1. Aire no contaminado**

El aire no contaminado se daría en caso de que el ser humano no realizara actividades en la tierra, por lo que resulta imposible saber con exactitud cómo se comportarían los componentes del mismo. Sin embargo, se cuentan con estimaciones acerca de la posible composición del aire no contaminado; el aire seco no contaminado está compuesto principalmente por nitrógeno (78.07%) y oxígeno (20.96%).

En la *Tabla 1.1* se muestran los componentes del aire seco no contaminado, expresado en partes por millón (ppm) y las concentraciones de los mismos en

microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) a  $25^\circ\text{C}$  y 760 milímetros de mercurio (mm Hg) de presión (a la altura del mar).

**Tabla 1.1. Composición gaseosa del aire seco no contaminado**

Componente	Símbolo químico	ppm (volumen)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Nitrógeno	$\text{N}_2$	780,000	$8.95 \times 10^8$
Oxígeno	$\text{O}_2$	209,400	$2.74 \times 10^8$
Argón	Ar	9300	$1.52 \times 10^7$
Dióxido de carbono	$\text{CO}_2$	315	$5.67 \times 10^5$
Neón	Ne	18	$1.49 \times 10^4$
Helio	He	5.2	$8.50 \times 10^2$
Metano	$\text{CH}_4$	1.0-1.2	$6.56-7.87 \times 10^2$
Criptón	Kr	1.0	$3.43 \times 10^3$
Óxido Nitroso	$\text{N}_2\text{O}$	0.5	$9.00 \times 10^2$
Hidrógeno	$\text{H}_2$	0.5	$4.13 \times 10^1$
Xenón	Xe	0.08	$4.29 \times 10^2$
Vapores Orgánicos	-	0.02	-

Fuente: Boubel R. et. al. (1994).

La atmósfera real cuenta con más componentes como agua, líquidos orgánicos y material particulado suspendido. Cuando las moléculas de vapor están arriba de su temperatura de condensación están presentes como moléculas de gas permanentes en el aire, el vapor principal en el ambiente es el vapor de agua. Cuando está presente en cantidades considerables afecta las concentraciones de los componentes que se mencionaron en la *Tabla 1.1.*, por lo que es importante mencionar el comportamiento del aire cuando hay humedad.

**Tabla 1.2. Composición gaseosa del aire humedo no contaminado**

Componente	Símbolo químico	ppm (volumen)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Nitrógeno	$\text{N}_2$	756,500	$8.67 \times 10^8$
Agua	$\text{H}_2\text{O}$	202,900	$2.65 \times 10^8$
Oxígeno	$\text{O}_2$	31,200	$2.30 \times 10^7$
Argón	Ar	9,000	$1.47 \times 10^7$
Dióxido de carbono	$\text{CO}_2$	305	$5.49 \times 10^5$
Neón	Ne	17.4	$1.44 \times 10^4$
Helio	He	5.0	$8.25 \times 10^2$
Metano	$\text{CH}_4$	0.97 - 1.16	$6.35 - 7.63 \times 10^2$
Criptón	Kr	0.97	$3.32 \times 10^3$
Óxido Nitroso	$\text{N}_2\text{O}$	0.49	$8.73 \times 10^2$
Hidrógeno	H	0.49	$4.00 \times 10^1$
Xenón	Xe	0.08	$4.17 \times 10^2$
Vapores Orgánicos	-	0.02	-

Fuente: Boubel R. et. al. (1994).

Además de los gases mencionados en la *Tabla 1.1.* y *1.2.* existen otros gases en concentraciones muy pequeñas, estos gases no son químicamente inertes, tienen algún grado de interacción con la biósfera y entre ellos mismos; sin embargo, su tiempo de permanencia en la atmósfera es limitado, además de que sus concentraciones no son constantes en el tiempo.

**Tabla 1.3. Gases reactivos en la atmósfera**

Componente	Símbolo químico	Porcentaje de concentración
Monóxido de Carbono	CO	0.1
Metano	CH <sub>4</sub>	1.4
Hidrocarburos (salvo el metano)	'HC'	0.02
Óxido Nítrico	NO	0.2 - 2.0 x 10 <sup>-3</sup>
Dióxido de Nitrógeno	NO <sub>2</sub>	0.5 - 4.0 x 10 <sup>-3</sup>
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	6 - 20 x 10 <sup>-3</sup>
Dióxido de Azufre	SO <sub>2</sub>	0.03 - 1.2 x 10 <sup>-3</sup>
Ozono	O <sub>3</sub>	0 - 0.05

Fuente: Strauss y Mainwaring (1990).

Los gases reactivos de la *Tabla 1.3.* son los que se consideran contaminantes cuando sus concentraciones son mayores a los mencionados en dicha tabla, los gases más importantes son el *dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)*, *óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>)*, *monóxido de carbono (CO)* e hidrocarburos (salvo el metano).

### 1.1.2. Material Particulado

Además de los gases mencionados en las *Tablas 1.1., 1.2. y 1.3.*, existe el material particulado que no se incluye en estas debido a que los gases son moléculas individuales mientras que el material particulado es una mezcla de varias moléculas (idénticas o no idénticas). Algunas de estas moléculas reaccionan químicamente con los gases presentes en la atmósfera, otras se adhieren cuando colisionan por sus fuerzas de cohesión (aglomeración), creando moléculas más grandes.

Una vez que las moléculas cohesionan, el peso de las mismas no permite que se queden suspendidas en el aire, siendo inevitable su caída al suelo, lo que se conoce como sedimentación. Otra forma en la que se sedimentan es a través de la lluvia, nieve, niebla, aguanieve y granizo. Asimismo, este material puede ser retenido al impactarse con superficies sólidas, como son la vegetación, las construcciones y el suelo.

En su mayoría, el material particulado está compuesto por polen, hongos, bacterias, algas, moho, desechos humanos y animales, restos de rocas, cenizas, etcétera.

## **1.2. Monitoreo de la contaminación atmosférica: IMECA**

Es importante llevar un control y administración de la calidad del aire, para lo que se requiere del establecimiento de sistemas de monitoreo y herramientas matemáticas que generen información clara y confiable para la población en general. Los resultados de este monitoreo son utilizados por dependencias gubernamentales responsables de la vigilancia de la contaminación del aire con el objetivo de mantener la calidad del mismo dentro de las normas permitidas, garantizando así la protección a la salud y el bienestar de la población.

La Dirección General de Saneamiento Atmosférico de la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente fue la primera en desarrollar un índice con fines informativos sobre la calidad del aire, el cual fue denominado *Índice Mexicano de Calidad del Aire (IMEXCA)*, el cual comenzó a emitir información el 6 de diciembre de 1977 (Trejo, 2006). Se basaba en el Pollutant Standard Index (PSI) utilizado en Estados Unidos; se ocuparon las normas estadounidenses debido a que para este año no existían Normas Oficiales de calidad del aire en México.

El IMEXCA sólo generaba una línea recta entre los valores de 100 y 500, por lo que en 1985 se modificó la línea recta por funciones linealmente segmentadas con puntos de quiebre asociados a la salud de la población y se le denominó *Índice metropolitano de la calidad del aire (IMECA)*.

El cálculo del IMECA fue complicado al principio debido a la falta de una metodología estándar, por lo que en el Distrito Federal se creó la Norma Ambiental para el Distrito Federal (NADF-009-AIRE-2006), publicada el 26 de noviembre de 2006 en la Gaceta Oficial del Distrito Federal, en la que se establece el objetivo del IMECA, métodos de cálculo y diversas especificaciones.

El objetivo principal del IMECA de acuerdo con la NADF-009-AIRE-2006 es “*informar a la población de manera clara, oportuna y continua, sobre los niveles de contaminación atmosférica, los probables daños a la salud que ocasiona y las medidas de protección que puede tomar*”.

El cálculo del IMECA transforma e integra los datos de 5 contaminantes conocidos como contaminantes criterio: dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y partículas suspendidas (PM); con el fin de obtener valores independientes adimensionales, de los cuales reporta el valor máximo. Este indicador considera una escala entre cero y 500 clasificada por colores y rangos, el valor de 100 corresponde al valor indicado por la Norma Oficial Mexicana para cada uno de los contaminantes (NOM-020-SSA1-2014, NOM-021-SSA1-1993, NOM-022-SSA1-2010, NOM-023-SSA1-1993, NOM-025-SSA1-2014), los valores menores a 100 son satisfactorios y con un bajo riesgo para la salud, mientras que los valores superiores a 100 implican riesgo para la salud (SIMAT, 2016).

Los contaminantes O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y CO se expresarán en partes por millón (ppm), entretanto que las concentraciones del material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) en microgramos por metro cúbico (µg/m<sup>3</sup>). Las mediciones de estos se realizan en condiciones locales de presión y temperatura (NADF-009-AIRE-2006:5.2.1).

El índice se divide en cinco categorías, que indican el nivel de riesgo a la salud asociado a la escala mencionada, cada categoría está representada mediante un color como se expresa en la *Tabla 1.4*.

**Tabla 1.4. Clasificación del IMECA**

Categoría / Color	Intervalo	Mensaje	Significado	Recomendaciones
BUENA Verde	0-50	Sin riesgo	Calidad del aire satisfactoria, existe poco o ningún riesgo para la salud.	Se puede realizar cualquier actividad al aire libre.
REGULAR Amarillo	51-100	Aceptable	Calidad del aire aceptable. En el caso de algunos contaminantes, las personas que son inusualmente sensibles, pueden presentar síntomas moderados.	Las personas que son extremadamente sensibles a la contaminación deben considerar limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MALA Naranja	101-150	Dañina a la salud de los grupos sensibles	Quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. El público en general no suele ser afectado.	Niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben limitar los esfuerzos prolongados al aire libre.
MUY MALA Rojo	151-200	Dañina a la salud	Todos pueden experimentar efectos en la salud; quienes pertenecen a los grupos sensibles pueden experimentar efectos graves en la salud.	Niños, adultos mayores, personas que realizan actividad física intensa o con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deben evitar el esfuerzo prolongado al aire libre. La población en general debe limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.

Categoría / Color	Intervalo	Mensaje	Significado	Recomendaciones
EXTREMADAMENTE MALA  Morado	>200	Muy dañina a la salud	Representa una condición de emergencia. Toda la población tiene probabilidades de ser afectada.	La población en general debe suspender los esfuerzos al aire libre.

Fuente: SIMAT (2016)

Se crearon Normas Oficiales Mexicanas (NOM) para cada contaminante criterio con el objetivo principal de establecer los límites permisibles de concentración de los contaminantes para cuidar la salud de la población.

Los intervalos de concentración para asignar los colores se obtuvieron basándose en los límites establecidos en las NOM mencionadas en la página anterior y se expresan en la *Tabla 1.5*.

**Tabla 1.5.: Intervalos de concentración para asignación de colores**

IMECA	O <sub>3</sub> [ppm] (20)	NO <sub>2</sub> [ppm] (23)	SO <sub>2</sub> [ppm] (22)	CO [ppm] (21)	PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] (25)	PM <sub>2.5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ] (25)
0-50	0.000 - 0.070	0.000 - 0.105	0.000 - 0.065	0.00 - 5.50	0 - 40	0 - 12
51-100	0.071 - 0.095	0.106 - 0.210	0.066 - 0.130	5.51 - 11.00	41 - 75	12.1 - 45
101-150	0.096 - 0.154	0.211 - 0.315	0.131 - 0.195	11.01 - 16.50	76 - 214	45.1 - 97.4
151-200	0.155 - 0.204	0.316 - 0.420	0.196 - 0.260	16.51 - 22.00	215 - 354	97.5 - 150.4
>200	> 0.204	> 0.420	> 0.260	> 22.00	> 354	> 150.4

Fuente: NADF-009-AIRE-2006 (2006).

La última actualización en los límites de concentración permisibles para el SO<sub>2</sub> se realizó en 2010, para el O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> fue en 2014; mientras que el CO y el NO<sub>2</sub> no han tenido actualizaciones. En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) estos cambios entraron en vigor a partir del 18 de octubre de 2014.

Para definir los rangos se toma en cuenta los límites a largo y corto plazo establecidos por las NOM y se les asigna el valor del indicador de 50 y 100 respectivamente, por ejemplo: la NOM-020-SSA1-2014 establece un límite de concentración promedio de ocho horas de 0.07 ppm para el ozono, valor al que se le asigna el 50; mientras que el límite de la concentración promedio horario es de 0.095 y se le asignó el valor de 100. El valor 200 corresponde al valor alerta propuesto por la United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), y el valor 150 corresponde al valor medio entre los valores que corresponden a 100 y 200 puntos (SIMAT).

En la NADF-009-AIRE-2006 también se estableció el algoritmo para la conversión de la concentración de los contaminantes al IMECA, el cual requiere transformar

información y representarla de manera espacial, lo que se complica en la mayoría de las ciudades del país que cuentan con sistema de monitoreo (exceptuando la Ciudad de México), por lo que se han tenido que hacer algunas variaciones para seguir reportando diariamente el índice (SEMARNAT).

### **1.3. Red de Monitoreo**

Con el objetivo de tener herramientas de análisis sobre la calidad del aire, es decir, conocer la concentración y dinámica de los contaminantes atmosféricos; se establecieron estaciones y redes de monitoreo atmosférico en algunas zonas metropolitanas y poblaciones del país.

Con la información proporcionada por estas estaciones y redes de monitoreo se han realizado cuatro almanaques en los que se analiza el comportamiento de los contaminantes en un periodo determinado, además de que dan a conocer si las redes de monitoreo atmosférico han estado funcionando correctamente.

De acuerdo al estudio de la SEMARNAT “El medio ambiente en México, 2013-2014”, en el año 2012, 84 zonas metropolitanas y poblaciones contaban con equipos de monitoreo atmosférico instalados, sin embargo, algunos de estos equipos no proporcionan información de calidad, el último almanaque de datos y tendencias del aire, publicado en 2009, sólo pudo realizar el análisis para 18 ciudades que tenían información sobre los contaminantes del aire de al menos tres años consecutivos, nueve localidades para cinco años, y solo tres entidades con información de al menos 15 años (Monterrey, Guadalajara y Valle de México). Aunado a que existen más de 30 localidades con poblaciones mayores a los cien mil habitantes que no cuentan con ningún equipo de monitoreo.

La red de monitoreo que cuenta con más información a través de los años es la ubicada en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), ésta cuenta con 26 estaciones de monitoreo automático (EMA), 2 estaciones de monitoreo manuales, 8 mixtas y 2 unidades móviles (SEMARNAT, 2016).

Las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey, Toluca y las ciudades de Tijuana, Mexicali y Ciudad Juárez cuentan con redes de monitoreo importantes, ya que tienen registros desde mediados de los noventa, aunque en algunos casos como Toluca, los registros no son continuos a través de los años (SEMARNAT, 2016).

Existen otras ciudades con equipos de monitoreo que se enfocan en uno o varios contaminantes de importancia local como Apizaco y Huamantla (Tlaxcala), San Miguel de Allende (Guanajuato), Ajacuba y Tepetitlan (Hidalgo), entre otras (SEMARNAT, 2016).

El último análisis sobre contaminación del aire a nivel nacional se realizó en el Almanaque de datos y tendencias del aire (INE-SEMARNAT, 2011), en el que se presentó un análisis sobre los indicadores representativos de la situación de la calidad del aire en la que se encontraba cada una de las ciudades o zonas metropolitanas, permitiendo hacer comparaciones entre ciudades con características similares, además de mostrar las tendencias de los últimos años para las mismas.

La información sobre las ciudades que se incluyeron en este almanaque está en la siguiente tabla:

**Tabla 1.6. Contaminantes por Ciudad**

Grupo	Zona metropolitana / ciudad	Población	Contaminantes reportados	Periodo de reporte	Fuente
Grupo 1: zonas metropolitanas grandes	1. Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)	29 millones	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2000-2009 PM <sub>2.5</sub> desde 2003	Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno Federal
	2. Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG)	4.4 millones	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2000-2009	Secretaría del Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable del Estado de Jalisco
	3. Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM)	4.1 millones	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2000-2009 PM <sub>2.5</sub> desde 2003	Secretaría de Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Nuevo León
Grupo 2: zonas metropolitanas y ciudades medianas	4. Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT)	1.8 millones	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2000-2010 PM <sub>10</sub> a 2009	Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México
	5. Puebla	1.5 millones	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2000-2009	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Puebla
	6. Tijuana	1.5 millones	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2000-2008 PM <sub>10</sub> a 2009	California Air Resources Board. Secretaría de Protección al Ambiente del Estado de Baja California
	7. León	1.4 millones	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2006-2009	Instituto de Ecología de Guanajuato. Universidad Tecnológica de León.

Grupo	Zona metropolitana / ciudad	Población	Contaminantes reportados	Periodo de reporte	Fuente
	8. Zona Metropolitana de Ciudad Juárez (ZM-Juárez)	1.3 millones	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO	2000-2009	Texas Commission for Environmental Quality. Dirección de Ecología y Protección Civil del Municipio de Juárez
Grupo 3: zonas metropolitanas y ciudades pequeñas	9. San Luis Potosí	772 mil	O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2006-2009	Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental del Estado de San Luis Potosí
	10. Zona Metropolitana de Mexicali (ZM-Mexicali)	936 mil	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2000-2008 PM <sub>10</sub> a 2009	California Air Resources Board. Secretaría de Protección al Ambiente del Estado de Baja California
	11. Durango, Dgo.	582 mil	PM <sub>10</sub>	2006-2008	Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango
Grupo 4: ciudades con menos de 550 mil habitantes	12. Irapuato	529 mil	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2006-2009	Instituto de Ecología de Guanajuato. Patronato para la Calidad del Aire de Irapuato A.C.
	13. Gómez Palacio y Lerdo	469 mil	PM <sub>10</sub>	2006-2009	Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango
	14. Celaya	468 mil	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2006-2009	Instituto de Ecología de Guanajuato. Patronato para la Calidad del Aire de Salamanca A.C.
	15. Salamanca	260 mil	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2006-2009 SO <sub>2</sub> desde 2000	Instituto de Ecología de Guanajuato. Patronato para la Calidad del Aire de Salamanca A.C.
	16. Silao	173 mil	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2006-2009	Instituto de Ecología de Guanajuato. Universidad Tecnológica de León.
	17. Tecate	101 mil	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO y NO <sub>2</sub>	2006-2008 PM <sub>10</sub> a 2009	California Air Resources Board. Secretaría de Protección al Ambiente del Estado de Baja California
	18. Rosarito	90 mil	PM <sub>10</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	2006-2008 PM <sub>10</sub> a 2009	California Air Resources Board. Secretaría de Protección al Ambiente del Estado de Baja California

Fuente: INE-SEMARNAT (2011).

En el Informe de la Subsecretaria de Gestión para la Protección Ambiental 2010-2012 (SEMARNAT,2012) se establece que en 2011 y 2012 se incrementaron en México 39 estaciones de monitoreo atmosférico, por lo que al término de 2012 se contaban con 155 estaciones.

#### **1.4. Contaminantes Criterio**

Para culminar con el presente capítulo y con el objetivo de dar un mayor contexto, se abordarán cada contaminante de manera más amplia, mencionando sus principales características, la forma en la que se mide, así como su normativa vigente.

##### **1.4.1. Partículas Suspendidas (PM)**

Las Partículas Suspendidas (PM) se forman por diversos componentes con características físicas y químicas variadas, pueden ser formadas por material sólido o líquido con tamaño en un intervalo de 0.005 microgramos ( $\mu\text{m}$ ) a 100 $\mu\text{m}$ . Cuando las PM son emitidas directamente a la atmósfera se conocen como primarias, si éstas se forman por la transformación de emisiones gaseosas son conocidas como secundarias (óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles).

###### **1.4.1.1. Causas**

Debido a que las PM están presentes en ambientes urbanos y rurales la composición de éstas varía en cada entidad. Esta composición depende de las diversas fuentes de dónde provengan y sus características químicas.

Las partículas de combustión se generan en época seca por incendios forestales; a lo largo del año la quema de combustibles fósiles en automóviles y en la industria genera gases que se condensan en forma de partículas líquidas. El viento también ayuda a la existencia de PM debido a la suspensión de polvo de suelos erosionados.

###### **1.4.1.2. Efectos**

La diversidad de las características del material particulado ha complicado la realización de un análisis estándar del daño potencial a la salud que tienen las PM en todo el mundo, la toxicidad de estas partículas depende completamente de sus características físicas y químicas.

Sin embargo, el estudio “Air Pollution, Airway inflammation, and lung function in a cohort study of Mexico City schoolchildren” encontró que los efectos más comunes son

la enfermedad pulmonar obstructiva (EPOC), agudización de los síntomas de asmáticos, mortalidad en pacientes con enfermedades cardiovasculares, diabetes mellitus, aumento del riesgo de infarto al miocardio, inflamación a los pulmones, inflamación sistémica, disfunción endotelial y vascular, desarrollo de aterosclerosis y cáncer de pulmón. La OMS estima que la exposición a PM con origen antropogénico reduce la esperanza media de las personas en 8.6 meses (OMS, 2006).

La Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC, 2013) mencionó que existe evidencia para relacionar el cáncer en los humanos con la exposición del material particulado, por lo que las PM fueron catalogadas como cancerígena del Grupo 1 (NOM-025-SSA1-1993, 2014).

El estudio “Exposición elemental al carbono y función pulmonar”, realizado en la Ciudad de México reportó un incremento en la mortalidad cuando se incrementa la exposición a estas partículas. El estudio “Relación entre consultas de emergencia por enfermedades respiratorias y la contaminación del aire en Ciudad Juárez” encontró que las muertes totales diarias se incrementan en un 4% con un aumento de  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{10}$ , el estudio “Air Pollution and heart rate variability among the elderly in Mexico City” realizado en personas mayores de 65 años se observó un aumento de 1.6% en las muertes diarias por cada incremento de  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{2.5}$ ; además de que se notó que un incremento de  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{PM}_{10}$  aumentó en 8% la sintomatología de vías respiratorias en niños con asma de 5 a 13 años (NOM-025-SSA1-1993, 1994).

El Estudio de Salud y Contaminación del Aire en Latinoamérica (ESCALA) del año 2012 encontró diversos efectos provocados por estas partículas, entre los que destacan el aumento de la mortalidad general (Romieu et. al., 2012). Específicamente la mortalidad respiratoria incrementó en 0.77%, 1.15% por causas cardiopulmonares, 0.88% por causas cardiovasculares, 1.32% en accidentes cerebrovasculares y un 2.44% en las causadas por enfermedad pulmonar obstructiva crónica en personas mayores de 65 años (NOM-025-SSA1-2014, 2014).

Para tener un control sobre las PM se han clasificado de acuerdo a su diámetro aerodinámico, ya que éste determina la probabilidad de que entren a través del tracto respiratorio y se depositen en diversas partes de las vías respiratorias, con esta clasificación también se puede saber el tiempo que estarán suspendidas en la atmósfera, además de los efectos en la salud que tendrá el material particulado en función de su

tamaño. En un principio autoridades regulatorias de Estados Unidos y Europa, establecieron regulaciones basadas en la medición de las partículas totales (TSP, por sus siglas en inglés), conforme se realizaron más estudios se llegó a la necesidad de realizar las regulaciones para partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor a 10 micras ( $PM_{10}$ ), y partículas con diámetro menor a 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ ).

#### 1.4.1.3. $PM_{10}$

Incluye a todas las partículas que son lo suficientemente pequeñas para penetrar en la región torácica del tracto respiratorio. Estas partículas surgen al desintegrarse de partículas más grandes; generalmente provienen de la remoción de la tierra, evaporación del agua de mar o de factores biológicos como el polen, virus o bacterias.

Cuando las  $PM_{10}$  absorben agentes microbiológicos (virus, bacterias, hongos, etcétera), transportan estos hasta los pulmones provocando efectos directos en el aparato respiratorio, por lo que son las partículas más perjudiciales para la salud.

#### 1.4.1.4. $PM_{2.5}$

Son más pequeñas que las  $PM_{10}$ , por lo que se les conoce como la “fracción fina” de las  $PM_{10}$ . Éstas pueden depositarse en conductos más finos del tracto respiratorio y en los alveolos. Se forman principalmente por gases, y materiales provenientes de la combustión; además de formarse en un proceso conocido como “coagulación”, es decir, partículas pequeñas consecuencia de reacciones químicas en la atmósfera se van adhiriendo a otras partículas (OMS,2006).

No se ha encontrado un nivel por debajo del cual no se vea afectada la salud de la población al estar expuesta a estas partículas, por lo que la OMS emitió valores recomendados con la intención de que los países adopten límites de concentración lo más bajos posibles en sus ciudades para proteger la salud de sus ciudadanos, sobre todo para los grupos más vulnerables de la población.

Se les insta a los países a establecer un plan para mantener estos niveles, en caso de ser un país que tiene niveles más elevados de los requeridos el plan es gradual, cumpliendo objetivos intermedios hasta llegar a los límites recomendados. Estos objetivos intermedios permiten reducir el número de muertes relacionadas con la contaminación en un 15% (OMS, 2006)

En la *Tabla 1.7.* se muestran los valores recomendados:

**Tabla 1.7. Valores de PM recomendados por la OMS**

Valores fijados en las directrices	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
Promedio anual	10 µg/m <sup>3</sup>	20 µg/m <sup>3</sup>
Promedio en 24 horas	25 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>

Fuente: OMS (2006).

#### 1.4.1.5. Normativa

México ha establecido límites máximos permisibles de contaminantes en el aire en las normas oficiales mexicanas (NOM), para este contaminante se estableció la primera en 1993 y una actualización en 2014, además de una NOM específica para establecer los métodos de medición, calibración, entre otros aspectos de los aparatos de monitoreo, mismas que se presentan en la *Tabla 1.8*. Al realizar estas NOM se contó con la participación de secretarías como la de salud, del medio ambiente y recursos naturales y de energía.

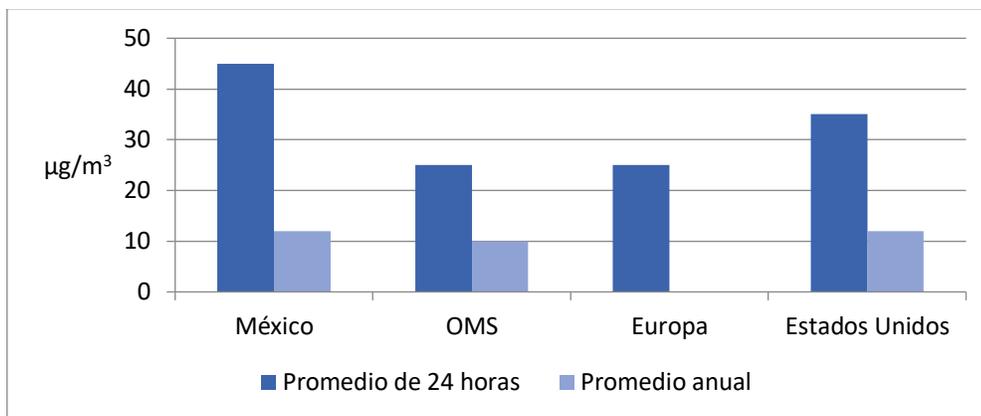
**Tabla 1.8. Normativa mexicana para PM**

Norma	Entrada en vigor	Objetivo	Valor límite permisible para la concentración de:		
			Partículas suspendidas totales PST	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
NOM-025-SSA1-1993	Dic-94	Establecer los valores de concentración máxima de PST, PM <sub>10</sub> Y PM <sub>2.5</sub> en el aire para protección de la población	Promedio 24 horas: 210 µg/m <sup>3</sup>	Promedio de 24 horas: 120 µg/m <sup>3</sup> Promedio anual: 50 µg/m <sup>3</sup>	Promedio de 24 horas: 65 µg/m <sup>3</sup> Promedio anual: 15 µg/m <sup>3</sup>
NOM-025-SSA1-2014	Ago-14	Establecer los valores de concentración máxima de PM <sub>10</sub> Y PM <sub>2.5</sub> en el aire para protección de la población	N/A	Promedio de 24 horas: 75 µg/m <sup>3</sup> Promedio anual: 40 µg/m <sup>3</sup>	Promedio de 24 horas: 45 µg/m <sup>3</sup> Promedio anual: 12 µg/m <sup>3</sup>
NOM-035-ECOL-1993 NOM-035-SEMARNAT-1993	Oct-93	Complementar la NOM-025-SSA1-1993. Establecer los métodos de medición para determinar la concentración de PST y calibración de los equipos de medición.			
Especificaciones	Se cumple con los valores normados de 24 horas para PST, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> cuando el valor del percentil 98 es menor a los valores señalados en esta tabla.				
	Se requiere un mínimo de 75% de muestras para los valores normados de 24 horas (18 registros)				
	Se requiere un mínimo de 75% de muestras de 24 horas válidas en cada uno de los cuatro trimestres del año.				
	Los valores normados del promedio anual para PM <sub>10</sub> Y PM <sub>2.5</sub> son válidos cuando se calculan de acuerdo con lo establecido por la NOM-025-SSA1-1993 en el apartado 5.4.5.2.				

Fuente: NOM-025-SSA1-2014 (2014)

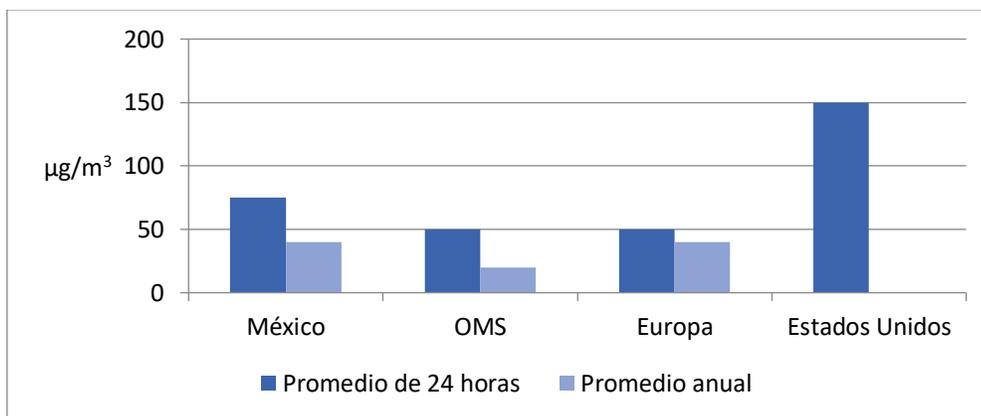
Las siguientes gráficas muestran los valores establecidos en la Unión Europea, Estados Unidos, México, así como las recomendaciones hechas por la OMS.

**Gráfica 1.1. Límites establecidos para PM<sub>2.5</sub>**



Fuente: OMS (2016a); USEPA (2016); European Commission (2016).

**Gráfica 1.2. Límites establecidos para PM<sub>10</sub>.**



Fuente: OMS (2016a); USEPA (2016); European Commission (2016).

Como podemos observar en la *Gráfica 1.1.*, los valores límites máximos promedio de 24 horas para el PM<sub>2.5</sub> en México son 80% más altos que los recomendados por la OMS y el promedio anual un 20% más alto.

En la *Gráfica 1.2.*, correspondiente al PM<sub>10</sub>, podemos observar que Estados Unidos tiene su valor límite promedio para 24 horas muy alto en comparación con el recomendado por la OMS. México también estableció valores más elevados, para el promedio de 24 horas se estableció 50% más alto que el recomendado por la institución, mientras que para el anual fue un 100% más alto.

#### 1.1.1.6. Medición

En México, estas partículas se miden con equipo automático o manual, existen regiones como la ZMVM que miden las partículas con ambos tipos de monitoreo. La *Tabla 1.9.* expresa las regiones donde se maneja cada tipo de monitoreo.

**Tabla 1.9. Tipo de monitoreo para PM<sub>10</sub>**

Monitoreo Automático (concentración horarias)		Monitoreo Manual (concentraciones integradas de 24 horas)	
ZMG	Silao	ZM-Juárez	Tecate
ZMM	Salamanca	ZM-Mexicali	Rosarito
ZMVT	Irapuato	Tijuana	ZMVM
León	Celaya	Durango	Gómez Palacio y Lerdo
Puebla	ZMVM		

Fuente: INE-SEMARNAT (2011).

El método que utiliza la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) en la evaluación de la concentración de las partículas suspendidas es la Atenuación por Radiación Beta. Este método está certificado por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (USEPA).

Esta técnica utiliza los electrones de alta energía (rayos beta) emitidos por el carbono 14 que es el elemento radioactivo utilizado. Estos rayos transitan a través de un punto en una cinta de fibra de vidrio limpia, donde son detectados y medidos por un detector de centelleo sensible para realizar una lectura cero (también denominada peso cero).

Una vez hecho lo anterior la cinta avanza hasta la boca de la muestra donde una cantidad precisa de aire-polvo es succionada a través de ésta durante una hora, la succión impregna la cinta del aire-polvo. Posteriormente la cinta regresa a la fuente de radiación beta y se toma una nueva lectura de la radiación (menor a la lectura cero). La diferencia en las medidas permite determinar la masa de las partículas de la muestra.

Posteriormente, se determina la concentración de particulado en el aire, es necesario convertir esta medición al IMECA, de tal manera que informe a la población el riesgo de la concentración de este contaminante en el momento. En el Estado de México se creó una Norma Técnica Estatal Ambiental (NTEA-007-SMA-DS-2006) para establecer los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire en la región, publicada el 5 de marzo del 2007 en la Gaceta del Gobierno del Estado de México.

El Método del cálculo del IMECA y los intervalos de concentración para la asignación de colores son los mismos que los establecidos por la NADF-009-AIRE-2006.

Los algoritmos utilizados para realizar esta conversión para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> son los siguientes:

**Tabla 1.10. Algoritmo para el cálculo de PM<sub>10</sub>**

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentración (µg/m <sup>3</sup> )	Ecuaciones
0 – 50	0 – 40	$I(PM_{10}) = 1.25 \times C(PM_{10})$
51 – 100	41 - 75	$I(PM_{10}) = 1.44 \times (C(PM_{10}) - 41) + 51$
101 – 150	76 – 214	$I(PM_{10}) = 0.355 \times (C(PM_{10}) - 76) + 101$
151 – 200	215 – 354	$I(PM_{10}) = 0.353 \times (C(PM_{10}) - 215) + 151$
> 200	>354	$I(PM_{10}) = 0.567 \times C(PM_{10})$

Fuente: RAMA-ZMVT, (2014).

**Tabla 1.11. Algoritmo para el cálculo de PM<sub>2.5</sub>**

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentración (µg/m <sup>3</sup> )	Ecuaciones
0 – 50	0 – 12	$I(PM_{2.5}) = 4.17 \times C(PM_{2.5})$
51 – 100	12.1 - 45	$I(PM_{2.5}) = 1.49 \times (C(PM_{2.5}) - 12.1) + 51$
101 – 150	45.1 - 97.4	$I(PM_{2.5}) = 0.94 \times (C(PM_{2.5}) - 45.1) + 101$
97.5 -	97.5 - 150.4	$I(PM_{2.5}) = 0.93 \times (C(PM_{2.5}) - 97.5) + 151$
> 200	>150.4	$I(PM_{2.5}) = 1.335 \times C(PM_{2.5})$

Fuente: RAMA-ZMVT, (2014).

### 1.4.2. Ozono (O<sub>3</sub>)

Este gas se encuentra naturalmente en la parte más alta de la atmósfera denominada estratósfera, a una altitud de aproximadamente 20 km, donde forma la capa de ozono, la cual protege de la radiación perjudicial a la superficie de la tierra. Sin embargo, cuando se encuentra en los niveles bajos de la atmósfera se considera un contaminante y se le conoce como ozono troposférico, es uno de los principales componentes de la niebla tóxica.

#### 1.4.2.1. Causas

El ozono es un contaminante secundario ya que es producto de reacciones que ocurren en la atmósfera y no es emitido directamente, su formación está ligada a sustancias como el bióxido de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles (COV), principalmente el metano; y los compuestos orgánicos insaturados. Su concentración

se ve afectada también por factores meteorológicos, entre ellos la luz solar, por lo que se registran niveles de ozono más elevados cuando hay más sol.

#### 1.4.2.2. Efectos

En cuanto a sus efectos en la salud destacan la reducción de la función pulmonar, la inflamación de las vías aéreas, la distensión pulmonar, resistencia de las vías aéreas y aumento de la permeabilidad broncoalveolar; también se ha encontrado que la exposición al O<sub>3</sub> incide en una mayor susceptibilidad ante agentes biológicos patógenos, incrementando el índice de enfermedades pulmonares infecciosas (Gutiérrez et. al., 1997).

Entre sus efectos extrapulmonares destacan la irritación de ojos, nariz y garganta, tos, dolor de pecho, agotamiento, malestar, náuseas, descenso de la frecuencia cardíaca y en la media de la presión arterial, así como alteraciones en las glándulas paratiroides, tiroides y adrenales (Gutiérrez et. al., 1997).

Además éste contaminante se relaciona con el desarrollo de aterosclerosis, de asma y de edema pulmonar, siendo el último causa de muerte.

En México, el estudio "Ozone exposure and daily mortality in Mexico City: a time-series analysis" mostró un aumento en los síntomas oculares y respiratorios entre la población al rebasar las 0.281 ppm de ozono. El estudio "Mortalidad y partículas finas en el ambiente en el suroeste de la Ciudad de México" (Borja-Aburto et. al., 1998) realizado en México ha mostrado daños severos de la mucosa del aparato respiratorio.

Una de las consecuencias provocadas por el O<sub>3</sub> en las plantas es la destrucción de la clorofila reduciendo la tasa de fotosíntesis, afectando la respiración de las mismas, esto disminuye las ramificaciones de algunas plantas, (Strauss y Mainwaring, 1990), por lo que se puede concluir que el ozono cambia la composición forestal. En zonas de cultivo el ozono puede provocar una disminución de los mismos.

El O<sub>3</sub> es objeto de mayor preocupación en Europa, estudios en esta región han dado como resultado que con un aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> la mortalidad diaria aumenta un 0.3% y la mortalidad por cardiopatías en un 0.4% (OMS, 2006).

Para disminuir los efectos nocivos del ozono, la OMS recomienda que los límites máximos de este contaminante sean de 100 µg/m<sup>3</sup> para la concentración del promedio móvil de 8 horas; en caso de no cumplir con estos límites, la misma organización

recomienda la implementación de un plan para disminuir este indicador lo mas pronto posible.

### 1.4.2.3. Normativa

Como antes mencionamos, en México se han establecido normas que establecen valores límites permisibles de concentración de los contaminantes, con el objetivo de mantener la salud de la población. Según la NOM-020-SSA1-2014, gracias a estas políticas públicas se ha podido reducir las concentraciones promedio del ozono en el Valle de México en un 33% de manera continua en el periodo 1992-2010.

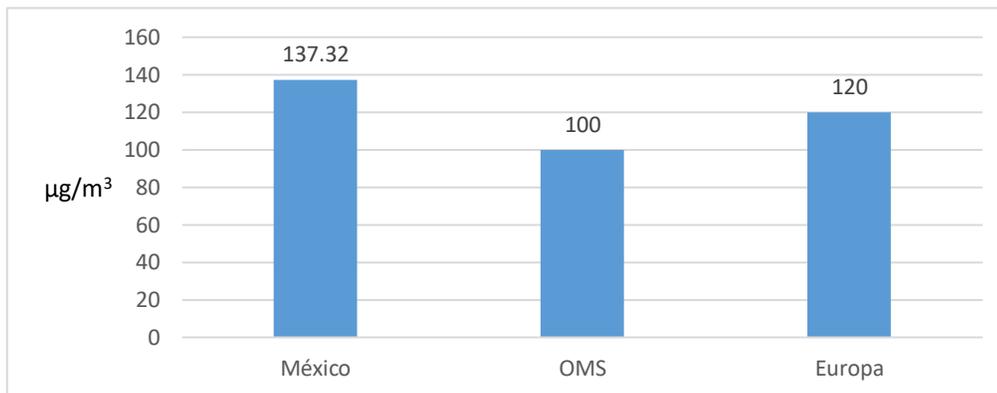
**Tabla 1.12. Normativa mexicana para O<sub>3</sub>**

Norma	Entrada en vigor	Objetivo	Valor límite permisible para la concentración de Ozono:	
			Concentración promedio de ocho horas	Concentración promedio horario
NOM-020-SSA1-1993	Oct-2002	Establecer los valores límites permisibles de concentración de ozono en el aire ambiente para la protección de la salud humana.	0.08 ppm	0.110 ppm
NOM-020-SSA1-2014	Ag-2014	Establecer los valores límites permisibles de concentración de ozono en el aire ambiente para la protección de la salud humana; así como los criterios para su evaluación.	0.07 ppm	0.095 ppm
NOM-036-ECOL-1993	Oct-93	Establecer los métodos de medición para determinar la concentración de Ozono (fotometría ultravioleta) y los procedimientos de calibración de los equipos de medición.		
Especificaciones	El valor del promedio horario será válido con al menos 75% de cálculos de la hora (45 minutos)			
	El valor del promedio de ocho horas será válido con al menos 75% de cálculos del día (6 horas con concentraciones horarias)			

Fuente: NOM-020-SSA1-2014 (2014).

La siguiente gráfica muestra los valores promedio de 8 horas establecidos en México en comparación con la OMS y Europa, se puede apreciar que los niveles exigidos en México son mas laxos que los de Europa y la OMS.

**Gráfica 1.3. Límites establecidos para O<sub>3</sub>. Promedio móvil de 8 horas**



Fuente: OMS (2016a); European Comission (2016).

#### 1.4.2.4. Medición

La técnica utilizada para cuantificar la concentración de O<sub>3</sub> es la Espectrometría de Absorción en el Ultravioleta, la cual se basa en la capacidad del ozono para absorber la radiación ultravioleta.

El método consiste en atravesar un haz de luz ultravioleta a través de una cámara de muestreo vacía para medir la intensidad de la luz, posteriormente se llena la cámara con la muestra de aire y se vuelve a emitir la luz ultravioleta, finalmente se mide nuevamente la intensidad de la luz. La diferencia entre las mediciones permite calcular la concentración de ozono en la muestra (RAMA-ZMVT, 2014).

Al igual que el material particulado, la concentración de ozono se informa a la población mediante el IMECA; para el caso de este contaminante el IMECA se calcula con las siguientes ecuaciones.

**Tabla 1.13. Algoritmo para el cálculo de Ozono O<sub>3</sub>**

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentración (ppm)	Ecuaciones
0 – 50	0.000 - 0.070	$I(O_3) = 714.29 \times C(O_3)$
51 – 100	0.071 – 0.095	$I(O_3) = 2041.67 \times (C(O_3) - 0.071) + 51$
101 - 150	0.096-0.154	$I(O_3) = 844.83 \times (C(O_3) - 0.096) + 101$
151 - 200	0.155-0.204	$I(O_3) = 1000 \times (C(O_3) - 0.155) + 151$
> 200	>0.204	$I(O_3) = (982.5 \times C(O_3))$

Fuente: RAMA-ZMVT, (2014).

#### 1.4.3. Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)

El bióxido de Azufre es un gas incoloro soluble en agua, que al oxidarse puede formar trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) y iones de sulfato ( $\text{SO}_4$ ), estos últimos forman sales inorgánicas y ácido sulfúrico.

El  $\text{SO}_2$  es precursor de la lluvia ácida y las PM: cuando el  $\text{SO}_2$  se encuentra con el radical oxhidrilo (OH), Oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y Agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) se forma ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), el cual es un ácido fuerte que puede modificar el PH del agua de la lluvia formando lluvia ácida; cuando el  $\text{SO}_2$  reacciona con gases como el amonio se forman PM.

#### 1.4.3.1. Causas

Durante la Revolución Industrial, en la segunda mitad del siglo XVIII, la quema de combustibles fósiles, sobre todo carbón y combustibles ricos en azufre, se convirtió en la principal fuente energética para los seres humanos, a partir de entonces las Partículas Menores y el bióxido de azufre se han convertido en los principales componentes de la contaminación atmosférica en gran parte del mundo.

Las principales fuentes emisoras de  $\text{SO}_2$  son la quema de combustibles fósiles en hogares, industria y los vehículos, sobre todo si utilizan diesel como combustible, siendo estos más importantes que los volcanes, que son la principal fuente emisora natural.

#### 1.4.3.2. Efectos

Como con los otros contaminantes, es difícil saber si los efectos negativos en la salud se deben únicamente al  $\text{SO}_2$  o a la mezcla de contaminantes en el aire. En condiciones de reposo este compuesto se absorbe casi completamente por las secreciones respiratorias. Sin embargo, cuando se realiza actividad física la eliminación de  $\text{SO}_2$  de las vías respiratorias se ve afectada, ya que existe una tendencia a la respiración vía oral y no es absorbido por las mucosas respiratorias. El  $\text{SO}_2$  se asocia principalmente con la humedad de las mucosas conjuntival y respiratoria, genera irritación e inflamación aguda o crónica en las vías respiratorias.

El  $\text{SO}_2$  es un contaminante que impacta negativamente a la salud incluso cuando se encuentra en bajas concentraciones, por lo que la OMS recomienda como límite máximo para la concentración promedio de 24 horas el valor de  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.008 ppm), y un máximo de  $500\mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.188 ppm) para el promedio de diez minutos, no existe recomendación para valores máximos como promedios anuales ya que la OMS considera que si se cumple el límite promedio de 24 horas se asegura que durante el año, el promedio muestre concentraciones bajas. Se insta a los países que no cumplen con estos

límites, realizar planes para cumplir con los objetivos intermedios, a fin de lograr el límite recomendado lo más pronto posible (OMS, 2005).

Por otro lado, los efectos de este contaminante sobre la vegetación son más tóxicos debido a la alta solubilidad de este gas. Una vez que el SO<sub>2</sub> penetra al tejido intercelular reacciona con el agua creando iones sulfito que provocan oscurecimiento de las hojas, seguido de una degradación interna de la estructura celular y la reseca; si la planta es dañada lo suficiente, ésta muere. Entre las plantas más susceptibles a daños por este contaminante son el trigo, alfalfa, trébol, frijol, lechuga y árboles frutales (Strauss y Mainwaring, 1990). También se ha demostrado que el SO<sub>2</sub> es un inhibidor del crecimiento forestal.

#### 1.4.3.3. Normativa

En México se han establecido los valores límites permisibles en las NOM, la primera se dio a conocer en 1994. Sin embargo, esta norma tenía límites muy relajados, por lo que en 2010 se realizó una actualización con el objetivo de acercarse más a los valores establecidos por la OMS.

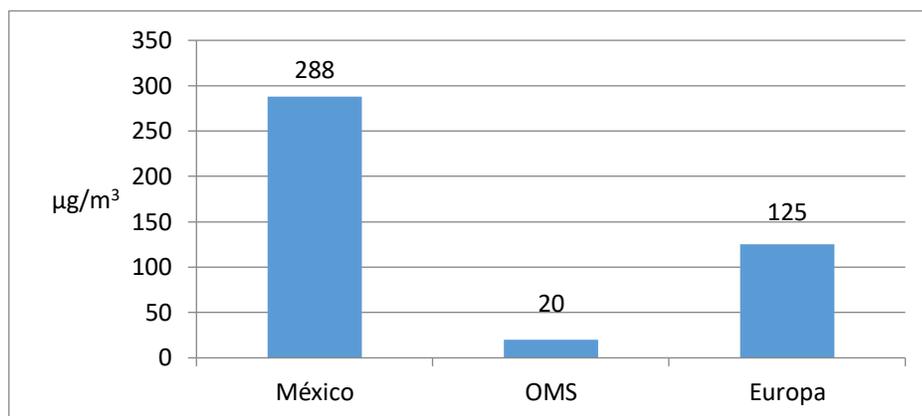
En la siguiente tabla se muestran las Normas Oficiales Mexicanas que están relacionadas con la contaminación del bioxido de azufre en el aire.

**Tabla 1.14. Normativa mexicana para SO<sub>2</sub>**

Norma	Entrada en vigor	Objetivo	Valor límite permisible para la concentración de SO <sub>2</sub> :	
			Concentración límite máximo 24 horas	Concentración promedio anual
NOM-022-SSA1-1993	Dic-1994	Establecer los valores límites permisibles de concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente para la protección de la salud humana.	0.13 ppm 341 µg/m <sup>3</sup>	0.03 ppm 79 µg/m <sup>3</sup>
NOM-022-SSA1-2010	Jun-2010	Establecer los valores límites permisibles de concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente para la protección de la salud humana; así como los criterios para su evaluación.	0.110 ppm 288 µg/m <sup>3</sup>	0.025 ppm 66 µg/m <sup>3</sup>
NOM-038-ECOL-1993 NOM-CCAM-005-ECOL/1993	Oct-1993	Establecer los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre (fluorescencia ultravioleta) y los procedimientos de calibración de los equipos de medición.		
Especificaciones	La concentración máxima para 24 horas será válida con al menos 75% de cálculos de las 24 horas del día (18 valores)			
	El valor del promedio anual será válido con al menos 75% de cálculos del año calendario			

Fuente: NOM-022-SSA1-2010 (2010).

**Gráfica 1.4. Límites establecidos para SO<sub>2</sub>. Promedio de 24 horas**



Fuente: OMS (2016a); European Commission (2016).

Como se puede observar en la *Gráfica 1.4.*, el valor límite máximo de la concentración promedio de 24 horas de México es 14.4 veces más alto que el recomendado por la OMS, y es 2.3 veces mayor que el valor establecido en Europa desde el 2005, el valor límite máximo que tiene Europa es el valor intermedio recomendado por la OMS.

#### 1.4.3.4. Medición

Para poder cuantificar la concentración de SO<sub>2</sub> en el aire, el método que se utiliza es la Fluorescencia Pulsante en el Ultravioleta, que utiliza la capacidad fluorescente que tienen las moléculas de este compuesto cuando son expuestas a luz ultravioleta. Sus moléculas brillan cuando se apaga la luz ultravioleta que las iluminaba, a mayor intensidad de la luz que emiten, mayor es la concentración de este contaminante en la muestra.

La muestra de aire es irradiada con fotones con longitud de onda de 214 nm; en respuesta, las moléculas de SO<sub>2</sub> emiten un foton de 330 nm (que se encuentra en el rango de la luz ultravioleta). Sin embargo, existen compuestos que responden de manera similar a la luz UV, y algunos como el naftaleno y el óxido de nitrógeno lo hacen un intervalo espectral similar al del SO<sub>2</sub>, por lo que se eliminan de la muestra con una membrana de difusión antes de realizar la medición (RAMA-ZMVT, 2014).

A diferencia del material particulado y el ozono, el IMECA de este contaminante se calcula mediante una ecuación, misma que se expresa a continuación.

**Tabla 1.15. Algoritmo para el cálculo de Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)**

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentración (ppm)	Ecuaciones
0 - 50	0.000 - 0.065	$I[SO_2]=C[SO_2]*100/0.11$
51 - 100	0.066 – 0.130	
101 - 150	0.131-0.195	
151 - 200	0.196-0.260	
> 200	>0.260	

Fuente: RAMA-ZMVT, (2014).

#### 1.4.4. Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>):

Entre los diferentes óxidos de nitrógeno el dióxido de nitrógeno es el gas con más efectos negativos en la salud, éste tiene un color café rojizo y un olor penetrante, que al reaccionar con agua forma ácido nítrico y óxido nítrico; el ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) disminuye el PH del agua de lluvia, ayudando a la precipitación de lluvia ácida.

##### 1.4.4.1. Causas

Las causas principales del NO<sub>2</sub> son naturales (volcanes, bacterias, etcétera) y antropogénicas, causadas por el hombre como la combustión para generar calor, electricidad y transporte, principalmente en la quema de combustibles fósiles en motores a gasolina.

##### 1.4.4.2. Efectos

La importancia de este gas en cuanto a la contaminación ambiental radica en que es un contaminante primario que puede causar daños directos a los seres vivos y juega un papel fundamental en el cambio climático, además de daños indirectos ya que es precursor del ozono.

El NO<sub>2</sub> al estar presente en la atmósfera absorbe luz solar, disminuyendo la visibilidad. La fotólisis del NO<sub>2</sub> inicia la reacción fotoquímica para la formación de ozono troposferico, lo que determina la concentración de ozono, además de ayudar a la formación de nitratos que contribuyen a la formación de lluvia ácida, así como sulfatos y compuestos orgánicos que forman las PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

Al igual que con el SO<sub>2</sub>, es difícil saber cuáles son los efectos negativos a la salud específicos provocados por el NO<sub>2</sub>. Sus efectos negativos en la salud están relacionados con otros contaminantes del aire, como las PM<sub>10</sub>, el benceno, el óxido nítrico, entre otros.

Por lo que el NO<sub>2</sub> se ha vuelto un buen indicador en la presencia de estos contaminantes, que combinados provienen generalmente de vehículos.

Existen asociaciones entre el aumento de síntomas de bronquitis en niños asmáticos y el aumento en los niveles anuales de NO<sub>2</sub>, además de impactos adversos en la salud de niños que viven cerca de vialidades con altas emisiones derivadas de los vehículos (OMS, 2006).

Altas concentraciones de este contaminante pueden producir complicaciones en la vista debido a la irritación y aumento de la secreción lagrimal; por otro lado también puede producir edema y fibrosis pulmonar (Gobierno del Estado de México, 2012).

El NO<sub>2</sub> es altamente soluble y puede convertirse en nitrito al disolverse en agua, cuando existen buenas condiciones de luz el nitrito se convierte en amoníaco, que es un nutriente para las plantas. Sin embargo, cuando existe baja iluminación, no se puede llevar a cabo la reacción y el nitrito afecta a las plantas, específicamente a las hojas. El NO<sub>2</sub> se considera menos tóxico que el SO<sub>2</sub> gracias a su posibilidad de convertirse en amoníaco (Strauss y Mainwaring, 1990).

La OMS ha emitido recomendaciones para el NO<sub>2</sub> con límite máximo el valor de 200µg/m<sup>3</sup> (0.106 ppm) para la concentración promedio de una hora (OMS, 2005)

#### 1.4.4.3. Normativa

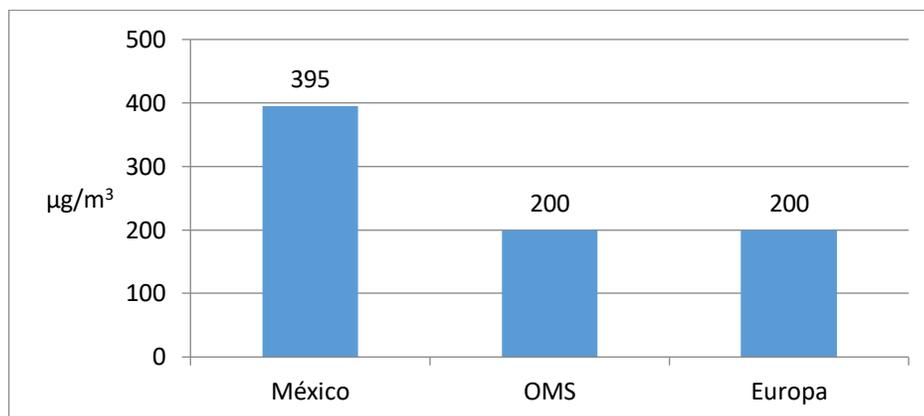
Las normas oficiales mexicanas en las que se han establecido los lineamientos relacionados con el bioxido de nitrógeno se muestran en la tabla siguiente, esta norma no ha sufrido cambios desde su creación en 1994.

**Tabla 1.16. Normativa mexicana para NO<sub>2</sub>**

Norma	Entrada en vigor	Objetivo	Valor límite permisible para la concentración de NO <sub>2</sub> :
			Concentración límite media horaria
NOM-023-SSA1-1993	Dic-1994	Establecer los valores límites permisibles de concentración de bioxido de nitrógeno en el aire ambiente.	0.21 ppm 395 µg/m <sup>3</sup>
NOM-037-SEMARNAT-1993	Oct-1993	Establecer los métodos de medición para determinar la concentración de bioxido de nitrógeno (quimioluminiscencia en fase gaseosa) y los procedimientos de calibración de los equipos de medición.	

Fuente: NOM-023-SSA1-1993 (1994).

**Gráfica 1.5. Límites establecidos para NO<sub>2</sub>. Promedio horario**



Fuente: OMS (2016a); European Commission (2016).

En la gráfica podemos observar que el valor límite promedio de una hora en México es un 97.5% superior que el valor recomendado por la OMS y el establecido en las normas Europeas.

#### 1.4.4.4. Medición

La técnica empleada para cuantificar la concentración de NO<sub>2</sub> en el aire es la Quimioluminiscencia, que es un método que permite producir luz a través de una reacción química.

El NO<sub>2</sub> no es quimioluminiscente, por lo que para poder medir su luminiscencia es necesario convertirlo primero en NO a través de un convertidor catalítico de molibdeno (a una temperatura de 315 °C). Debido a que la muestra de aire también contiene NO, inicialmente se mide la quimioluminiscencia sin pasar la muestra por el convertidor; de esta manera se cuantifica el NO presente en la muestra original, posteriormente se pasa por el convertidor catalítico y se cuantifica de nuevo la quimioluminiscencia. La diferencia entre ambas mediciones corresponde a la concentración de NO<sub>2</sub>, que se transformo en óxido nítrico (RAMA-ZMVT, 2014).

Una vez obtenida la concentración de NO<sub>2</sub>, se convierte esta medición al IMECA mediante las siguientes ecuaciones.

**Tabla 1.17. Algoritmo para el cálculo de NO<sub>2</sub>**

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentración (ppm)	Ecuaciones
0 - 50	0 - 0.105	$I[NO_2]=C[NO_2]*50/0.105$
51 - 100	0.106 – 0.210	$I[NO_2]=1.058+C[NO_2]*49/0.104$
101 - 150	0.211 – 0.315	$I[NO_2]=1.587+C[NO_2]*49/0.104$
151 - 200	0.316 – 0.420	$I[NO_2]=2.115+C[NO_2]*49/0.104$
> 200	> 0.420	$I[NO_2]=C[NO_2]*201/0.421$

Fuente: RAMA-ZMVT (2014).

#### **1.4.5. Monóxido de Carbono (CO):**

El CO es un gas que no presenta color ni olor (incolore e inodoro), proveniente de los procesos de combustión.

##### **1.4.5.1. Causas**

Las principales fuentes de emisión de este contaminante son los transportes; entre las causas naturales está la descomposición de materia orgánica, la cual genera metano el cual posteriormente se oxida generando CO. Al mismo tiempo, es posible encontrar CO dentro de lugares cerrados como consecuencia de la combustión incompleta de madera, carbón y demás combustibles domésticos.

##### **1.4.5.2. Efectos**

Los efectos del monóxido de carbono se conocen mejor que los del resto de los contaminantes producidos por el uso de combustibles porque tiene efectos directos en el sistema cardiorespiratorio.

El CO es mortal en altas concentraciones, ya que este gas se enlaza a la hemoglobina disminuyendo el transporte del oxígeno al cuerpo (Gutiérrez et. al., 1997). Los principales efectos del CO en la salud se encuentran el agravamiento de enfermedades cardiovasculares, disminución en la coordinación motora, fatiga, falta de concentración, dolores de cabeza, confusión, náuseas y mareos. Personas con arterias coronarias arterioscleróticas son más sensibles a pequeñas exposiciones de este contaminante.

El estudio “Monóxido de Carbono: Asociación de una comunidad” (Hexter y Goldsmith, 1971), encontró que existe una correlación positiva entre la presencia del CO y la mortalidad diaria en el Condado de Los Angeles.

En el 2000 la OMS publicó unas guías sobre la calidad del aire, en las que emitió una recomendación para el promedio móvil de ocho horas de un límite máximo de 10,000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (OMS, 2005).

### 1.4.5.3. Normativa

La normativa que rige la concentración de CO se muestra en la siguiente tabla:

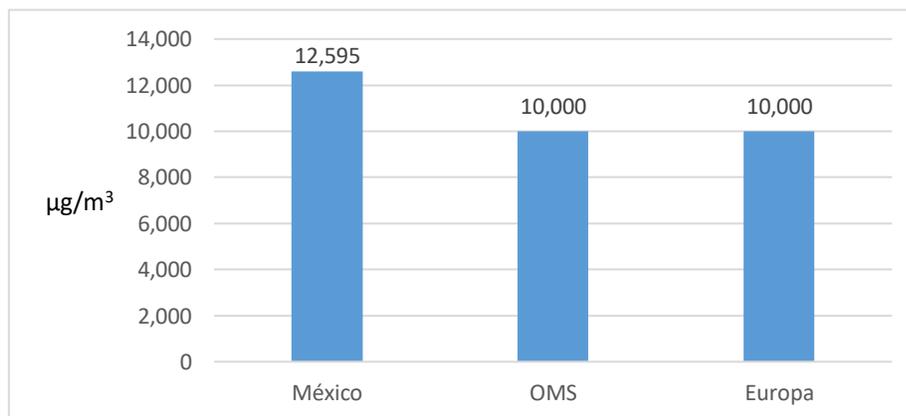
**Tabla 1.18. Normativa mexicana para CO**

Norma	Entrada en vigor	Objetivo	Valor límite permisible para la concentración de CO:
			Concentración promedio móvil de 8 horas
NOM-021-SSA1-1993	Ago-1994	Establecer los valores límites permisibles de concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente.	11 ppm 12,595 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NOM-034-ECOL-1993	Oct-1993	Establecer los métodos de medición para determinar la concentración de monóxido de carbono (absorción en el infrarrojo) y los procedimientos de calibración de los equipos de medición.	

Fuente: NOM-021-SSA1-1993 (1994).

El límite máximo de 10,000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (OMS) es nuevamente más estricto que el que exige la norma mexicana.

**Gráfica 1.6. Límites establecidos para CO. Promedio móvil de 8 horas**



Fuente: OMS (2016a); European Commission (2016).

En México el límite considerado por la ley para el promedio móvil de ocho horas es de 12,595  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (11 ppm). Como ocurre con el resto de los contaminantes, la normativa mexicana es menos estricta a la Europea, y que la recomendación de la OMS para el 2005 (10,000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Los límites de la NOM son 26% más altos que los establecidos por la OMS y Europa.

#### 1.4.5.4. Medición

Para poder cuantificar la concentración de CO en el aire se utiliza una técnica denominada Espectrometría de Absorción en el Infrarojo o Correlación en el Infrarojo.

Esta metodología se basa en la capacidad que tiene el CO para retener luz, y consiste en colocar la muestra de aire en una cámara, se hace traspasar luz infrarroja a través de esta y se mide la intensidad del lado opuesto; en otra cámara con aire libre de CO se realiza la misma medición. Finalmente la diferencia entre ambas mediciones corresponde a la concentración de CO en el aire (RAMA-ZMVT, 2014).

Al igual que el resto de los contaminantes, la concentración de CO se convierte al IMECA para su difusión y comparación, el IMECA para CO se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

**Tabla 1.19. Algoritmo para el cálculo de CO**

Intervalo del IMECA	Intervalo de concentración (ppm)	Ecuaciones
0 - 50	0 - 5.50	$I[CO]=C[CO]*50/5.50$
51 - 100	5.51 - 11.00	$I[CO]=1.82+C[CO]*49/5.49$
101 - 150	11.01 - 16.50	$I[CO]=2.73+C[CO]*49/5.49$
151 - 200	16,51 - 22.00	$I[CO]=3.64+C[CO]*49/5.49$
>200	>22.00	$I[CO]=C[CO]*201/22.01$

Fuente: RAMA-ZMVT (2014)

## Conclusiones

El presente capítulo permitió conocer las generalidades de aquellos elementos que son considerados como contaminantes atmosféricos, desde las causas que los provocan y sus efectos a la salud, hasta la normativa vigente para estos y la forma de medición de su concentración en la atmósfera; no sin antes conocer la Red de Monitoreo Atmosférico; que es un elemento indispensable para el monitoreo de la calidad del aire, y que proporciona la información necesaria para que los contaminantes puedan ser estudiados.

Una vez que se presentó cada uno de los contaminantes criterio, y para continuar con los objetivos del presente trabajo, el siguiente capítulo proporcionará una evaluación de cada uno de estos dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, con el fin de realizar un diagnóstico de la contaminación atmosférica en la región.

## **Capítulo 2: CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE TOLUCA (ZMVT)**

Una zona metropolitana es un conjunto de municipios que cuentan con una ciudad de al menos 50 mil habitantes cuyas actividades económicas rebasan su área original, incorporando al área más municipios (directa o indirectamente); estos municipios mantienen un alto grado de integración socioeconómica (SEDESOL et. al., 2005).

En el caso específico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca la ciudad de Toluca tiene un alto grado de influencia con los municipios que se encuentran en la zona centro del Estado de México debido a la concentración de la población y de las actividades económicas, educativas, culturales, sociales y de servicios que hay en la ciudad.

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca es la segunda Zona Metropolitana con mayor número de pobladores en el Estado de México, además de estar dentro de las grandes ciudades de México de acuerdo al Sistema Nacional de Ciudades.

### **2.1. Características de la ZMVT**

Antes de abordar el tema de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), y con el fin de tener un contexto más amplio de este territorio, es necesario delimitar esta región, así como mencionar las características que la definen.

#### **2.1.1. Localización**

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se encuentra ubicada en el centro del Estado de México, es la quinta conurbación más importante de México. Se encuentra entre los paralelos 18°59'07" y 19°34'47" de la latitud norte y los meridianos 99°38'22" y 99°56'13" de longitud oeste con respecto al meridiano de Greenwich (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, 2012)

Existen diferentes puntos de vista para delimitar las zonas metropolitanas, para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca existen principalmente dos formas diferentes para delimitarla, la primera es la utilizada por los Consejos Nacional y Estatal de Población, el

INEGI y la SEDESOL, en la cual se contemplan 15 municipios del Estado de México, con una superficie de 2,203.2km<sup>2</sup>.

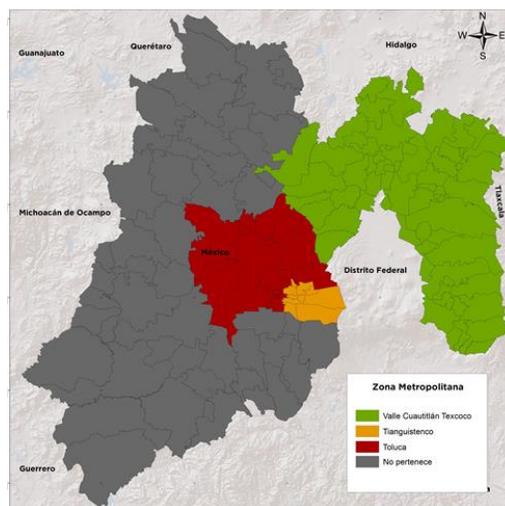
En 2014 contaba con una población de 2,152,150 habitantes en la zona, tuvo una tasa de crecimiento anual de 2.2% del año 2000 al 2010, los quince municipios se nombran en la siguiente tabla:

**Tabla 2.1. Municipios de la ZMVT (COESPO)**

Municipios	
1. Almoloya de Juárez	2. Calimaya
3. Chapultepec	4. Lerma
5. Metepec	6. Mexicaltzingo
7. Ocoyoacac	8. Otzolotepec
9. Rayón	10. San Antonio la Isla
11. San Mateo Atenco	12. Temoaya
13. Toluca	14. Xonacatlán
15. Zinacantepec	

Fuente: COESPO (2014)

**Mapa 2.1. Municipios de la ZMVT (COESPO)**



Fuente: COESPO (2014).

Esta estructura se utilizó para realizar programas, planes, análisis y diagnósticos federales, estatales y de zona hasta antes del 2009.

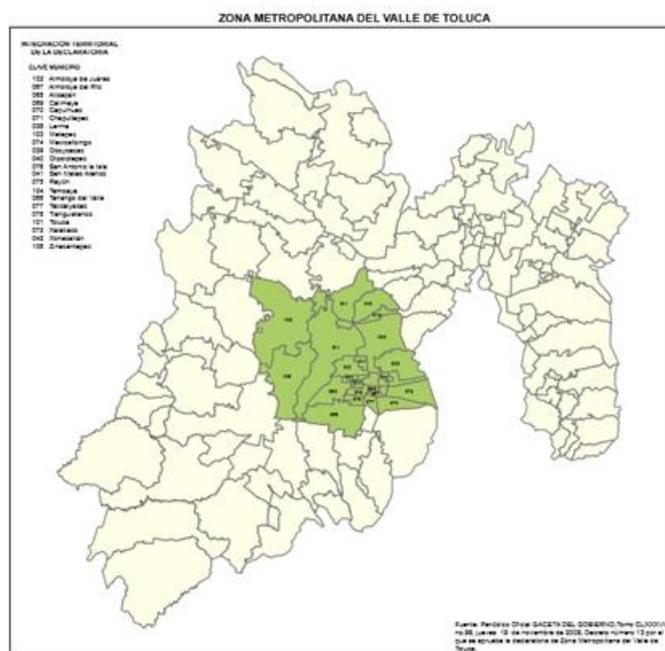
En 2009 se estableció que la ZMVT contaría con 22 municipios para la coordinación de planes, programas y acciones a nivel federal y estatal (DOF, 2009), para fines de este proyecto ocuparemos esta delimitación. Estos 22 municipios se enlistan en la *Tabla 2.2*.

**Tabla 2.2. Municipios de la ZMVT (DOF 2009)**

Municipios	
1. Almoloya de Juárez	2. Almoloya del Río
3. Atizapan	4. Calimaya
5. Capulhuac	6. Chapultepec
7. Lerma	8. Metepec
9. Mexicaltzingo	10. Ocoyoacac
11. Oztolotepec	12. Rayón
13. San Antonio la Isla	14. San Mateo Atenco
15. Temoaya	16. Tenango del Valle
17. Texcalyacac	18. Tlanguistenco
19. Toluca	20. Xalatlaco
21. Xonacatlán	22. Zinacantepec

Fuente: DOF (2009).

**Mapa 2.2. Municipios de la ZMVT (DOF 2009)**



Fuente: Observatorio del Estado de México (2009)

Estos 22 municipios tienen una superficie de 2,669.6 km<sup>2</sup>, superficie que representa el 11.9% del territorio del Estado, y la altitud promedio de esta zona es de 2,610 metros.

La ZMVT comprende 2 regiones, la Zona Metropolitana Conurbada de Toluca que comprende los 9 municipios más desarrollados, con la mayor población y la mayor problemática; y la Periferia Regional Metropolitana que contiene el resto de los municipios.

### **2.1.2. Orografía y Relieve**

La ZMVT está compuesta por una planicie que se encuentra entre los 2600 y los 2800 metros sobre el nivel del mar, rodeada por sierras y volcanes entre los 3000 y 4680 msnm (Gobierno del Estado de México, 2005), mismos que afectan la dinámica del viento en el Valle de Toluca.

De acuerdo a la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México (2012), entre las principales elevaciones de la región se encuentran:

- Sierra Nevado de Toluca (Suroeste)
- Sierra de las Cruces (Este)
- Sierra de Ocoyotepec (Este);
- Sierra de Monte Alto (Noreste)
- Sierra Matlazinca (Sur).

El Nevado de Toluca es la elevación que más afecta la dinámica del viento del valle; seguido por elevaciones menores que afectan la dirección del viento como el cerro la Calera y el volcán Gordo ubicados en el municipio de Zinacantepec (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, 2012).

### **2.1.3. Hidrografía**

La red hidrológica de una población está integrada por afluentes naturales como ríos, manantiales y arroyos, en conjunto con la infraestructura hidráulica.

Conforme lo menciona la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México (2012), los principales componentes de la red hidrológica del Valle de Toluca son:

- Presa Ignacio Ramírez (Almoloya de Juárez)
- Río Lerma (Almoloya del Río)
- Río Acalotli y San Juan (Capulhuac)
- Arroyo La Cañada del Huevito (Chapultepec)
- Salto del Agua, Flor de Gallo, San Mateo, Río Seco y Peralta (Lerma)
- Región hidrológica Lerma-Chapala Santiago (Otzolotepec)
- Río Xicualtenco, mejor conocido como Verdiguel (Toluca)

Cabe aclarar que la región hidrológica Lerma-Chapala Santiago es una de las más grandes e importantes del país, compuesta por tres ríos: el Solanos, Mayorazgo y Arroyo Zarco. En la zona también existen arroyos con corriente en épocas de lluvia; y 12

manantiales en Temoaya y Tenango (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, 2012).

#### 2.1.4. Clima

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, la cual fue modificada por E. García, en el Valle de Toluca se tienen tres tipos de clima: templado húmedo, semifrío subhúmedo y frío (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, 2012). La mayoría de los municipios que integran el Valle de Toluca se encuentran dentro del clima templado húmedo. El clima semifrío puede ser de dos tipos: el primero es el subhúmedo, presente en las zonas con más altitud como el Nevado de Toluca y las Sierras de Monte Alto y las Cruces y el segundo es el húmedo que está presente únicamente en una parte de Xalatlaco. Por último, el clima frío prevalece en las zonas altas del Nevado de Toluca.

La región presenta lluvias promedio anuales de 844.33 milímetros y una temperatura promedio anual es de 12 °C, mientras que la mínima promedio es de 5.9 °C, y se presenta en el mes de enero (Gobierno del Estado de México, 2005).

En la ZMVT existen tres épocas climatológicas, se muestran en la *Tabla 2.3*.

**Tabla 2.3. Épocas climatológicas en la ZMVT**

Época	Meses	Comportamiento
Seca-Fría	Noviembre-Febrero	Época con la menor temperatura promedio mensual, de 9° a 11°C. Heladas presentes en los alrededores del valle que se asocian a las bajas temperaturas presentes en estos meses. Se observan nevadas en los puntos con más altitud por temperaturas bajo cero.
Seca-Cálida	Marzo-Mayo	Temperatura Máxima de 15°C, con lluvias menores a los 40mm de precipitación.
Lluvias	Junio-Octubre	Temperatura promedio entre los 11° y 13°C, abundantes precipitaciones con registros de entre 160mm y 210mm.

Fuente: Elaboración del autor con datos de: Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México (2012).

#### 2.1.5. Meteorología

El Valle de Toluca está bajo sistemas meteorológicos tropicales debido a que se encuentra en la parte central del país. Durante la época de lluvias es bastante común el paso de ondas y ciclones tropicales por esta zona, provocando abundantes lluvias y nublados, colaborando a la disminución de contaminantes en la atmósfera. En la época

seca-fría predominan los frentes fríos y las masas de aire polar, cuando éstos son intensos se puede generar inversiones térmicas (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, 2012) que consisten en que las capas bajas de aire se enfrían y evitan que éste se mezcle verticalmente con el aire cálido de las capas superiores; lo anterior impide la dispersión de los contaminantes ya que son atrapados en las capas cercanas al suelo.

Según registros de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (2012) la entrada de viento más predominante en el Valle de Toluca es por el sur y el sureste.

#### **2.1.6. Usos de Suelo**

Es importante considerar los tipos de suelo que existen en una población al estudiar la contaminación del aire ya que los suelos que pueden erosionarse a través del viento son fuentes de emisión de partículas. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) clasificó el suelo en 38 clases, de las cuales 8 están presentes en el Valle de Toluca; de éstos, 5 son susceptibles a la erosión eólica.

De acuerdo a la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, los tipos de suelos susceptibles a erosión eólica presentes en la región son:

- Feozem (zonas de acumulación de materiales con poca pendiente)
- Andosol (zonas altas del Valle de Toluca)
- Cambisol (pequeñas partes de Temoaya, Otzolotepec y Xonacatlán)
- Regosol (Nevado de Toluca)
- Leptosol (suroeste de Tianguistenco)

La ZMVT es, en su mayoría, una zona rural, en algunos municipios como Atizapán, Chapultepec, San Antonio La Isla y Rayón la superficie destinada para la agricultura es del 70%; en Zinacantepec, Ocoyoacac y Xalatlaco el 43% del territorio es destinado para esta actividad primaria. En total el 63.3% de la superficie del Valle de Toluca es de uso agrícola (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, 2012).

#### **2.1.7. Flora y Fauna**

En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca existe una amplia masa forestal en la que se encuentran bosques de encino, pino, oyamel, pastizales de alta montaña, bosque en zonas perturbadas, coníferas y vegetación frutal y acuática (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, 2012). Las principales zonas forestales son el

Parque Nacional Miguel Hidalgo (La Marquesa), la reserva ecológica estatal “Parque Otomí-Mexica” y el Parque Nevado de Toluca.

Los bosques de encino han sido los más afectados por la actividad humana, sobrepastoreo, incendios, plagas, tala y los asentamientos humanos; los bosques de oyamel y pino también se han visto afectados de manera importante por quemas, tala y explotación de recursos no maderables. Por su parte los pastizales de alta montaña son utilizados para la ganadería.

La fauna presente en esta región está compuesta por conejos, ardillas, ratas comunes, zorrillos, gatos monteses, águilas, liebres, tlacuaches, armadillos, venados cola blanca, tigrillos, coyotes, teporingos, liebres, comadrejas, tuzas, tejones, hurones, correcaminos y mapaches (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, 2012).

En la ZMVT existen doce áreas naturales protegidas estatales y federales. A nivel federal, en la ZMVT se encuentra uno de los 67 parques nacionales protegidos y dos de las 37 áreas de protección de fauna y flora. En cuanto a las áreas protegidas estatales se encuentran dos áreas naturales protegidas (53.03% del total estatal), cuatro parques estatales (22.29% del total estatal) y dos santuarios de agua y forestales (4.06% del total estatal).

Las 12 áreas naturales protegidas se describen en la tabla 2.4:

**Tabla 2.4. Áreas naturales protegidas en la ZMVT**

Área Protegida	Municipios	Tipo	Categoría y Fecha de Decreto	Extensión (has)
Parque Nacional Nevado de Toluca	Almoloya de Juárez, Tenango del Valle, Toluca y Zinacantepec	Federal	Parque Nacional 25/01/1936 Área de Protección de Flora y Fauna 01/10/2013	53,590.67
Parque Municipal de Recreación Popular “Laguna de Chignahuapan”	Almoloya del Río	Estatal	Áreas Naturales Protegidas en el Estado de México 08/07/1978	77.32
Parque Estatal “Tollocan - Calimaya”	Calimaya y Toluca	Estatal	Parque Estatal 29/10/2016	159.22
Parque Ecológico Turístico y Recreativo Zempoala La Bufa (Parque Otomí-Mexica)	Capulhuac, Oztolotepec, Temoaya y Xonacatlán	Estatal	Parque Estatal 07/04/2009	105,844.1
Área de Protección de Flora y Fauna “Ciénegas de Lerma”	Almoloya del Río, Capulhuac, Lerma, San Mateo Atenco, y Texcalyacac	Federal	Áreas de Protección de Flora y Fauna 27/11/2002	3,023.95

Área Protegida	Municipios	Tipo	Categoría y Fecha de Decreto	Extensión (has)
Parque Municipal de Recreación Popular El Calvario	Metepec	Estatad	Áreas Naturales Protegidas en el Estado de México 20/07/1988	21.17
Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla “La Marquesa”	Huixquilucan, Coajimalpa, Ocoyoacac y CDMX	Federal	Parque Nacional 18/09/1936	1,889.96
Parque Estatal denominado “Santuario del Agua y Forestal Subcuenca Tributaria Río Mayorazgo-Temoaya”	Lerma, Oztolotepec, Temoaya, Nicolás Romero, Isidro Fabela y Xonacatlán	Estatad	Parque Estatal 12/05/2006	25,220.33
Santuario del Agua y Forestal Subcuenca Tributaria Presa Antonio Álzate	Temoaya, Jiquipilco, Toluca y Almoloya de Juárez	Estatad	Santuarios del Agua y Forestales 12/05/2006	11,529.83
Alameda Poniente, San José La Pila	Toluca	Estatad	Parque Estatal 20/01/1993	176.33
Sierra Morelos	Toluca y Zinacantepec	Estatad	Parque Estatal 29/07/1976	1,255.09
Parque Estatal “Santuario del Agua y Forestal Subcuenca Tributaria Río San Lorenzo”	Lerma, Ocoyoacac y Huixquilucan	Estatad	Santuarios del Agua y Forestales 12/05/2006	12,657.94

Fuente: Elaboración del autor con datos de CEPANAF (2014) y CONANP (2012)

### 2.1.8. Dinámica Poblacional:

La ZMVT pasó de tener una población de 356 mil 754 habitantes en 1950 a 2 millones 373 mil 347 habitantes en 2015; en 65 años la población de la zona incrementó en un 665%. En la década del 2000 a 2010 la ZMVT presentó una tasa de crecimiento poblacional de 2.2%, mayor a la estatal de 1.4% (SEDESOL et. al., 2012).

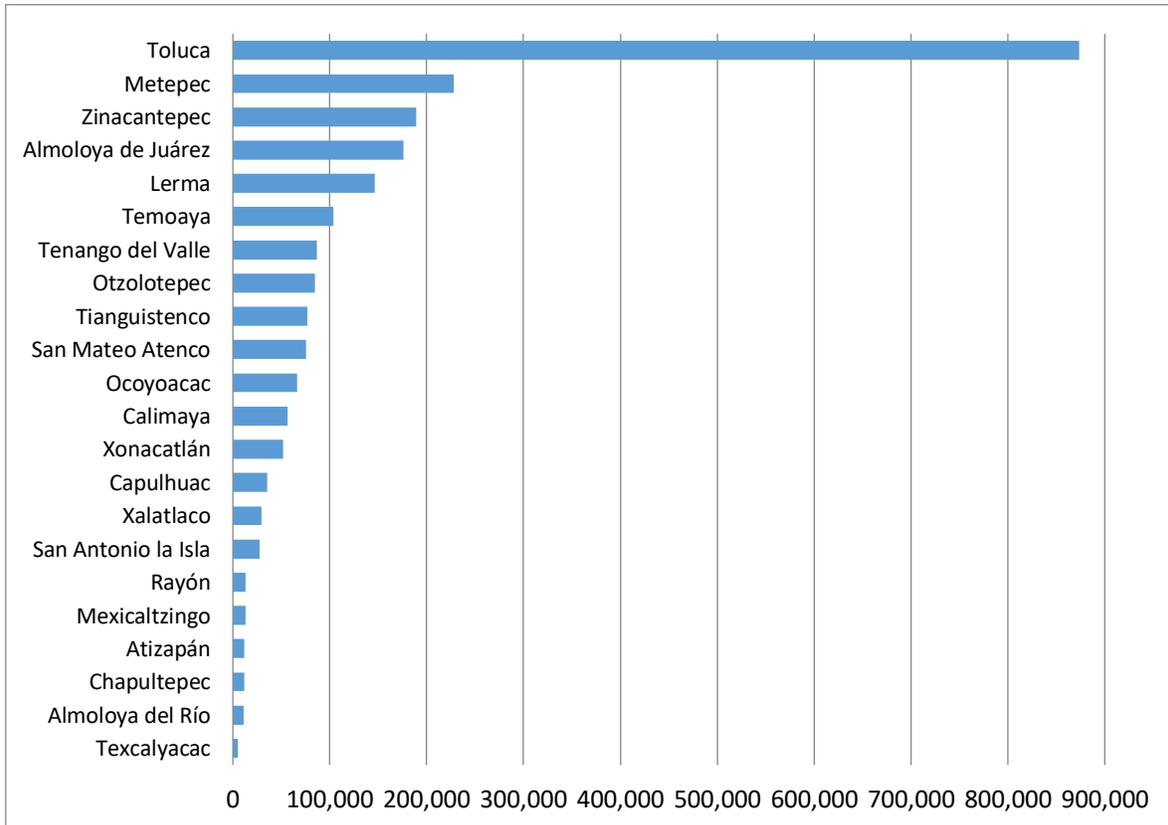
**Gráfica 2.1. Población del Estado de México**



Fuente: Elaboración del autor con datos del COESPO (2014)

Toluca es el municipio más poblado con más de 870 mil habitantes, seguido por Metepec, Zinacantepec, Almoloya de Juárez, Lerma y Temoaya que cuentan con una población de entre 100 mil y 300 mil personas; los 16 municipios restantes de la ZMVT tienen menos de 100 mil habitantes. Se estima que para 2017 se cuente con una población de 2 millones 444 mil 743 habitantes, siendo Toluca el municipio con más población, superando los 900 mil habitantes (COESPO, 2014).

**Gráfica 2.2. Población total en la ZMVT (2015)**

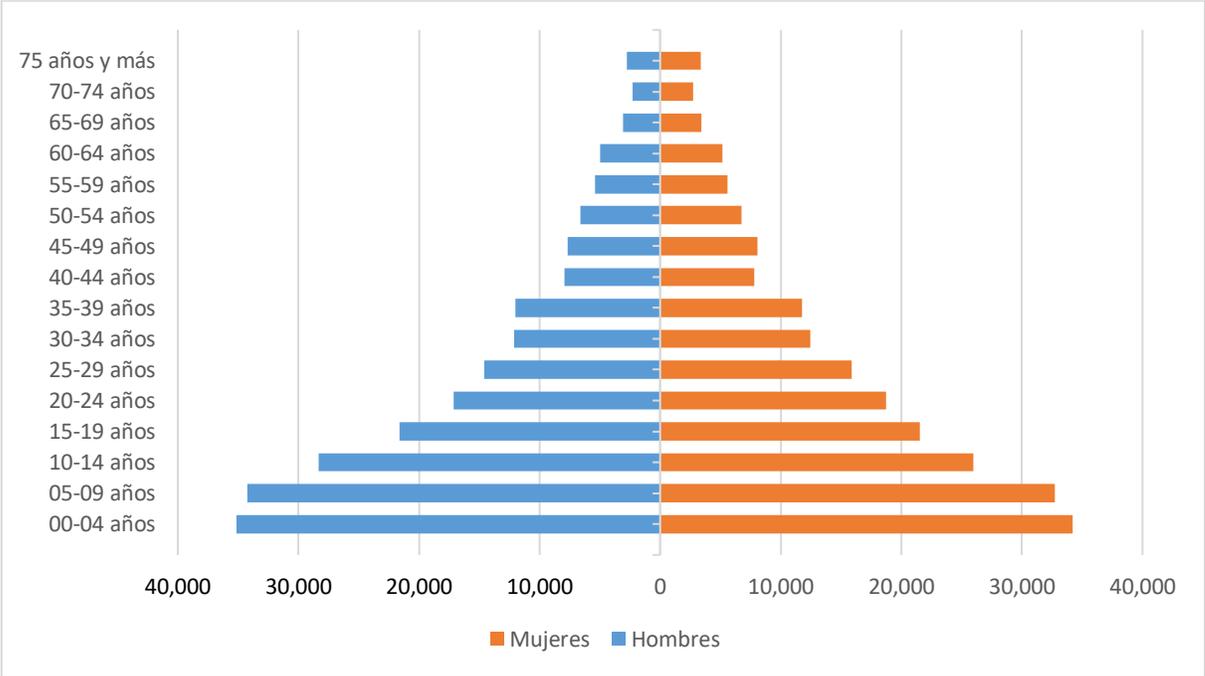


Fuente: Elaboración del autor con datos de INEGI (2016)

Los municipios con mayor dinámica poblacional a 2010 fueron San Antonio la Isla, Chapultepec, Rayón, Jalatlaco, Zinacantepec y Oztolotepec, todos con tasas de crecimiento arriba del 3%. San Antonio la Isla es un caso de crecimiento poblacional alarmante, ya que en la década del 2000-2010 incrementó su población en más del 100% (COESPO, 2014)

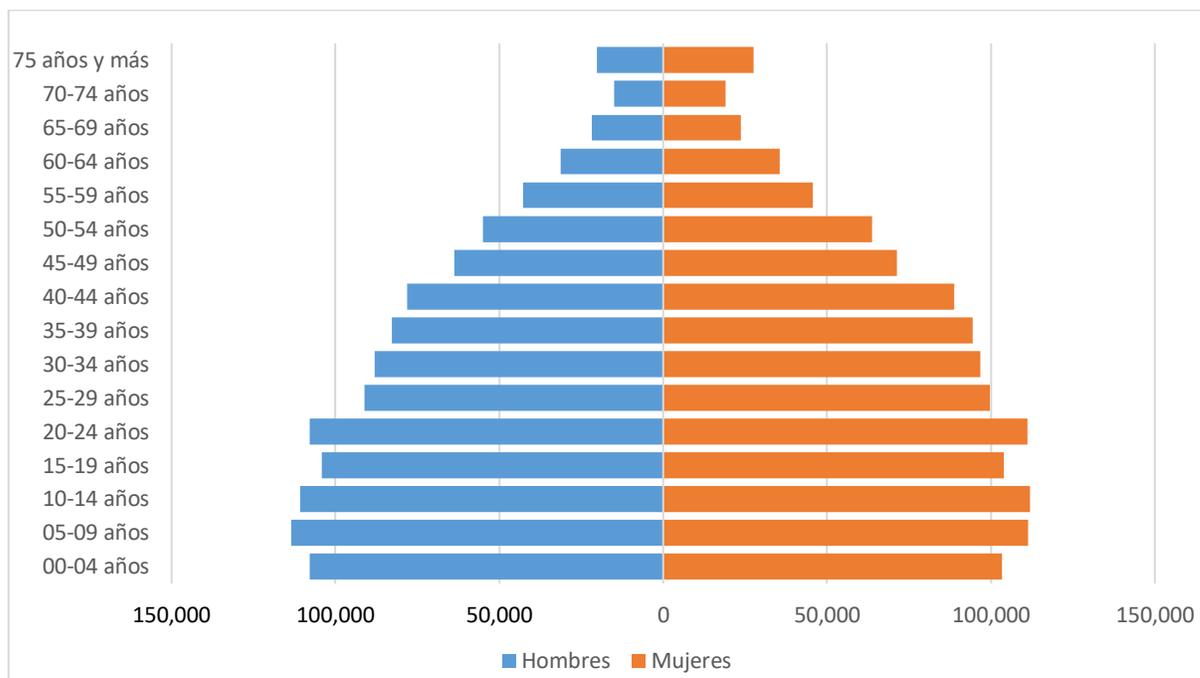
De los años sesenta a la fecha la estructura de la población ha cambiado significativamente (obsérvese *Gráfica 2.3.*), la pirámide poblacional se encontraba más cargada hacia las edades menores, se contaba con una población muy joven debido a altos niveles de natalidad, la cantidad total de población adulta era muy parecida a la infantil, mientras que la población adulta mayor era muy poca debido a la baja esperanza de vida de la época.

**Gráfica 2.3. Distribución de la población de la ZMVT por edad quinquenal, 1960**



Fuente: Elaboración del autor con datos de INEGI (1962)

**Gráfica 2.4. Distribución de la población de la ZMVT por edad quinquenal, 2015**



Fuente: Elaboración del autor con datos de INEGI (2016)

Para el 2015 la mayoría de la población se encontraba en edades entre los 15 y 59 años, la ZMVT aún se encuentra viviendo el “*Bono Demográfico*”; es decir, cuenta con una fuerza laboral que no había tenido en épocas anteriores. Sin embargo, la pirámide se contrae para las edades más jóvenes debido al descenso de la tasa de natalidad, aunado al descenso de la tasa de mortalidad. Lo cual se traduce en una cantidad mayor de adultos mayores que gente en edad laboral para los próximos años, fenómeno conocido como *envejecimiento demográfico*, lo que afectará la economía y los tipos de servicios que se necesitarán en la zona, además de que los adultos mayores son más vulnerables a la contaminación del aire.

La contaminación del aire afecta sobre todo a personas que se encuentran entre los 0 y 13 años y los adultos con más de 65 años, ya que su sistema inmunológico es más débil que el del resto de la población. De acuerdo con la Encuesta Intercensal 2015, en el Valle de Toluca existían un estimado de 786 mil 279 individuos en el grupo de mayor susceptibilidad, lo que representaba el 33.54% del total de la población (INEGI, 2016)

La migración es también una de las variables más importantes para explicar la dinámica poblacional de la ZMVT. La Ciudad de México tiene una influencia económica y laboral en los estados que la rodean; la movilidad poblacional del Estado de México y

por ende la de la ZMVT responde en gran medida a las necesidades poblacionales y laborales de la Ciudad de México.

El 90% de la población originaria de la ZMVT que se mueve a laborar a otra entidad se va a la Ciudad de México, mientras que de la población que se va a laborar a otro país más del 90% elige Estados Unidos. En el año 2000 por cada individuo residente de la Ciudad de México realizando sus actividades en la ZMVT había tres residentes de la ZMVT realizando sus actividades en la Ciudad de México. Toluca, Metepec y Capulhuac son los municipios de la ZMVT que tienen más residentes laborando en la Ciudad de México (COESPO, 2012). La ZMVT también recibe trabajadores municipios no metropolitanos como Tenancingo, Villa Victoria, Jocotitlán, entre otros.

#### **2.1.9. Aspectos Socioeconómicos:**

Entre los municipios de la ZMVT hay municipios en condiciones de extrema pobreza con carencia de servicios en regiones agrícolas y municipios de alto ingreso per cápita y servicios de alta calidad (como Metepec).

En la ZMVT la población económicamente activa es del 49.9%, de los cuales 3.4% se encuentran en actividades primarias, 35.9% realizan actividades secundarias y un 56.8% actividades terciarias (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, 2012), es importante recalcar que el porcentaje de la población que realiza actividades primarias es cada vez menor, contrario a lo que sucede con el sector terciario. Entre los municipios que más se caracterizan por las actividades secundarias y terciarias está Toluca, Metepec y Lerma, siendo este último el principal generador de este tipo de empleos en la zona.

Las ramas económicas en las que se especializa la región son: textiles y prendas, industria de la madera y muebles, papel, minerales, comercio al mayoreo, servicios de alquiler de bienes muebles, restaurantes y hoteles y servicios de reparación y mantenimiento (Gobierno del Estado de México, 2005).

Las actividades primarias de la zona suelen ser perjudiciales para la calidad del aire por la emisión de partículas que estas generan. La agricultura temporal es la predominante en la entidad, seguida por la agricultura de riego; esta actividad se realiza principalmente en el tipo de suelo Feozem (suelo de fácil erosión), que al ser utilizado para la agricultura emite una gran cantidad de partículas al aire. La ganadería en el Valle de Toluca se realiza principalmente en áreas forestales, en las que es común encontrarse

con incendios de pastizales provocados (actividad que beneficia en cierta medida el pastoreo de los rebaños), emitiendo grandes cantidades de partículas durante la combustión y la posterior erosión del suelo.

Las actividades secundarias se componen en un 93.9% por microindustrias, 3.1% por pequeñas industrias, 2.5% medianas industrias y 0.5% por grandes industrias. El 76% de los habitantes del Valle de Toluca laboran en las micro, pequeñas y medianas empresas. El mayor asentamiento de unidades económicas de la ZMVT está ubicado en Toluca, con el 30.49% de la planta industrial total (COESPO, 2012)

La ZMVT ha evolucionado rápidamente de una zona rural a una urbana, impulsando el sector terciario, las principales actividades terciarias que se realizan en esta zona son el comercio al por menor de alimentos, bebidas, tabaco, manejo de desechos, servicio de alojamiento temporal y preparación de alimentos y bebidas. Los municipios con más comercios (en ese orden) son Metepec, Toluca, Almoloya de Juárez, Lerma y Zinacantepec; y los municipios con más servicios son Toluca, Metepec, Almoloya de Juárez y Zinacantepec.

Las actividades secundarias y terciarias se caracterizan por tener un gran impacto en el medio ambiente debido a las actividades propias de su industria. En México no existe un sistema de administración ambiental que garantice el ahorro de materias primas y energía; y los sistemas de control de emisiones son escasos. Las empresas más pequeñas son las que menos se preocupan por crear procesos que dañen lo menos posible al medio ambiente, o no tienen los recursos necesarios para implementar programas que eviten la contaminación; mientras que las grandes empresas al tener una vinculación fuerte con las tendencias internacionales se han percatado que el cuidado del medio ambiente puede representar una fuente de ahorro y mayor competitividad; sin embargo, el medio ambiente sigue sin ser una de sus mayores prioridades.

En cuanto a vías de comunicación, la Zona Metropolitana del Valle de Toluca cuenta con un Aeropuerto Internacional con capacidad para brindar servicio a ocho millones de pasajeros, por su capacidad es la quinta terminal aérea a nivel nacional. Cuenta, además, con una amplia red de autopistas que conectan a la entidad con la Zona Metropolitana del Valle de México, Hidalgo, Guerrero, Michoacán y Querétaro; además de vialidades que conectan a la zona metropolitana entre sí como la Vía Toluca-Metepec-

Tenango, la Avenida Solidaridad las Torres, la Vía Alfredo del Mazo, el Boulevard Isidro Fabela, la Calzada del Pacífico, entre otras.

## 2.2. Monitoreo Atmosférico

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca cuenta con una Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) que mide, registra y procesa los niveles de los contaminantes atmosféricos Criterio. Esta Red es operada por la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica que pertenece a la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.

La Red de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca ha pasado por un largo periodo de adecuación y mejora desde sus inicios; la tabla 2.5 muestra los principales sucesos en la historia de esta red.

**Tabla 2.5. Historia de la RAMA-ZMVT**

Año	Evento
1975	Se establece una red manual con 5 estaciones que monitoreaba Partículas Suspendidas Totales (PST).
1987	En colaboración con la Facultad de Química de la UAEMex se modificaron 3 estaciones para monitorear óxidos de nitrógeno y el bióxido de azufre por vía húmeda.
1992	Se equipa la Red de Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).
1993	Inicia operaciones la RAMA y se designa a la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México como administradora de la red.
2003	La red se incorpora al SINAICA, donde transmite información en tiempo casi real.
2010	Renovación completa de la Red, se incorpora la estación Ceboruco y se reubica la estación del centro de Toluca.

Fuente: Elaboración del autor con datos de la RAMA-ZMVT (2014).

En la actualidad a Red se divide en dos, la Red de Monitoreo Atmosférico y la Red Meteorológica, cuenta además con un Centro de Control y una unidad móvil de monitoreo. La primera está integrada por siete estaciones remotas, con equipo necesario para realizar mediciones de los contaminantes que son consecuencia de las principales actividades y usos de suelo de la entidad en la que se encuentran. Cuatro de las redes están ubicadas en la ciudad de Toluca, dos en Metepec y la última en San Mateo Atenco.

Gracias a que se cuenta con equipo automático la red trabaja las 24 horas del día, todos los días del año; el comportamiento de los contaminantes criterio se informa a través del índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).

La Red Meteorológica se enfoca en dar los parámetros meteorológicos en los cuales se dispersan y desplazan los contaminantes atmosféricos en el tiempo. Esta red cuenta con siete torres meteorológicas que envían automáticamente datos al Centro de Control.

Finalmente, la unidad móvil de monitoreo se compone por analizadores automáticos de la calidad del aire y sensores meteorológicos. Esta unidad se usa cuando se requiere conocer el comportamiento de los contaminantes en alguna región en específico.

La *Tabla 2.6.* muestra la ubicación de las 7 estaciones de monitoreo y la zona donde se encuentran, así como las claves con las que se identifican.

**Tabla 2.6. Estaciones de monitoreo de la ZMVT**

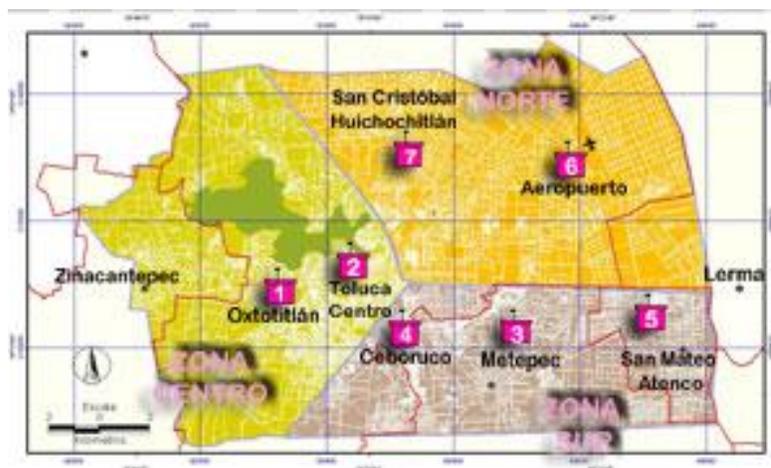
#	Clave	Ubicación	Zona	Ubicación Física
1	OX	Oxtotitlán	Centro	Dentro de la escuela Primaria “Carmen Serdán”. Calle Lago Caimanero no. 500, esq. Laguna de la Asunción. Col. Nueva Oxtotitlán, Toluca, México. C.P. 50100
2	CE	Toluca Centro	Centro	Dentro del Gimnasio “Profr. Guillermo Ortega Vargas” de la UAEMex. Calle Venustiano Carranza esq. Mariano Matamoros no 100, Col. Universidad, Toluca, México. C.P. 50130
3	MT	Metepec	Sur	Calle Manzana no. 20, entre las calles Manuel J. Clouthier y calle Mango, Col. Izcalli Cuauhtémoc V. Metepec, México. C.P. 52176
4	SL	San Lorenzo Tepatlán (hasta 2010)	Norte	Dentro de la escuela secundaria “José Vasconcelos”. Av. Independencia No. 14, San Lorenzo Tepatlán, Toluca, México.
4	CB	Ceboruco (a partir de 2011)	Sur	Dentro de la Preparatoria No. 5 “Dr. Ángel María Garibay” de la UAEMex. Km 2.5 carretera a San Felipe Tlalmimilolpán esq. Ceboruco, Col. Azteca, Toluca, México. C.P. 50640
5	SM	San Mateo Atenco	Sur	Dentro de las instalaciones del tanque elevado de OPDAPAS. Av. Hacienda de Tres Marías no. 260, Fraccionamiento Santa Elena, San Mateo Atenco, México. C.P. 52100
6	AP	Aeropuerto (hasta 2015)	Norte	Dentro del Centro Nacional de Capacitación y Adiestramiento de la Cruz Roja Mexicana. Calle Enefino Arevalo Alanís s/n, esq. Boulevard Miguel Alemán, Parque Industrial Exportec II, San Pedro Totoltepec, Toluca, México. C.P. 54080
7	SC	San Cristóbal Huichochitlán	Norte	Dentro de la escuela Primaria “Manuel Hinojosa Giles” Calle Paseo de la Luz s/n, esq. Manuel Hinojosa Giles, San Cristóbal Huichochitlán, Toluca, México. C.P. 50100
	UM	Unidad Móvil	N/A	

#	Clave	Ubicación	Zona	Ubicación Física
	CC	Centro de Control	N/A	Conjunto SEDAGRO Edificio "C", Planta Baja, Puerta 101, Colonia Ex Rancho San Lorenzo, Metepec, México.

**Nota:** En la Secretaría del Medio Ambiente se informó que la estación Aeropuerto se dejó de utilizar en 2016 debido a la emisión de información poco confiable; sin embargo, no hay información pública que lo confirme.

Fuente: RAMA-ZMVT (2014).

### Mapa 2.3. Localización de las estaciones de monitoreo



Fuente: RAMA-ZMVT (2014).

Todas las estaciones miden seis contaminantes: Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), Monóxido de Carbono (CO), Ozono (O<sub>3</sub>), Partículas Suspensas Menores a 10 Micras (PM<sub>10</sub>) y Partículas Suspensas Menores a 2.5 Micras (PM<sub>2.5</sub>).

Por su parte, la red meteorológica se enfoca en medir parámetros meteorológicos como la temperatura ambiente, la humedad relativa, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, radiación solar total y precipitación pluvial (RAMA-ZMVT, 2014).

En la *Tabla 2.7.* se muestran los factores meteorológicos que miden las estaciones de monitoreo:

**Tabla 2.7. Variables que miden las estaciones de monitoreo**

Factor meteorológico	Clave de la estación de monitoreo						
	AP	SC	CE	OX	CB	MT	SM
Velocidad del viento	X	X	X	X	X	X	X
Dirección del viento	X	X	X	X	X	X	X
Humedad relativa	X	X	X	X	X	X	X
Temperatura	X	X	X	X	X	X	X
Presión Atmosférica	X		X			X	
Precipitación	X	X	X	X	X	X	X
Radiación Solar	X		X			X	

Fuente: RAMA-ZMVT (2014).

El 5 de marzo del 2007 se publicó en la Gaceta del Gobierno del Estado de México la Norma Técnica Estatal Ambiental que establece los requisitos para elaborar el IMECA en los municipios conurbados de las Zonas Metropolitanas de los Valles de México y Toluca (NTEA-007-SMA-DS-2006).

En la NTEA-007-SMA-DS-2006 se establece que el IMECA se obtendrá a partir de concentraciones promedio de una hora para el  $O_3$  y el  $NO_2$ , en el caso del  $SO_2$  se utilizará el promedio móvil de 24 horas, para el CO se ocupará el promedio móvil de 8 horas y para las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  el promedio móvil de 24 horas. En todos los casos se considera el dato como válido siempre que el promedio se realice con al menos el 75% de la información del periodo en el que se realiza el cálculo.

### **2.3. La calidad del aire en Toluca:**

Desde que se instaló la Red de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca se han realizado diversos diagnósticos sobre la calidad del aire, sin embargo, los primeros años de funcionamiento de la RAMA-ZMVT se contó con poca información, lo que impidió realizar análisis confiables, por lo que decidimos aunar nuestros resultados a los resultados de los dos últimos diagnósticos existentes. El primer análisis fue realizado a nivel federal en el Cuarto Almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas, realizado por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales; y el segundo fue un análisis específico para la ZMVT en el Programa para Mejorar la Calidad del Aire Valle de Toluca 2012-1017 (Proaire) realizado por la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México.

Para el periodo 2000-2009 la red de monitoreo atmosférico en Toluca tuvo un desempeño mínimo aceptable, se registraron datos hasta el primer semestre de 2008 de  $O_3$ , CO,  $NO_2$ ,  $SO_2$ . Durante este periodo los principales problemas de calidad del aire fueron altas concentraciones de  $PM_{10}$  y  $O_3$  (INE-SEMARNAT, 2011).

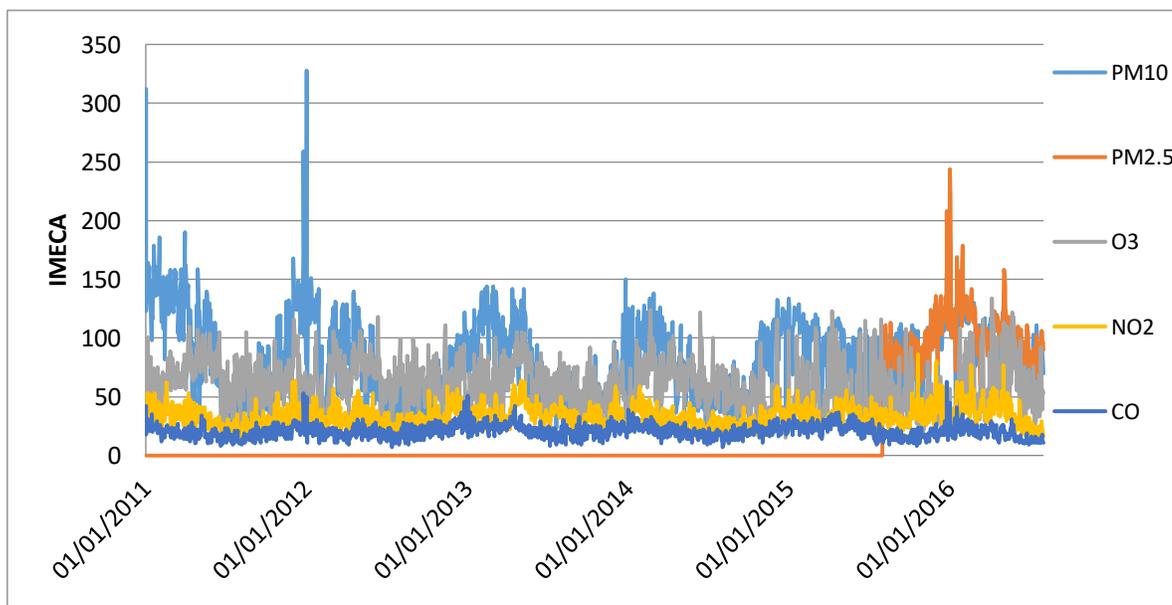
En el año 2011, la ZMVT presentó problemas de calidad del aire, el conflicto más grave fue por las  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , seguido por el  $O_3$ ; el  $NO_2$  sólo presentó problemas de forma ocasional; mientras que el  $SO_2$  y el CO no registraron valores fuera de la norma durante la operación de la red de monitoreo (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, 2012).

De 2011 a Julio de 2016 el contaminante que más problemas causó en la ZMVT es el  $PM_{10}$  (como se observa en la *Gráfica 2.5.*), en relación a este contaminante la calidad del aire fue regular un 41.73% de los días, mala un 35.21%, y buena sólo un 21.23% de los días.

El contaminante que le sigue en problemática es el  $PM_{2.5}$ , el IMECA de este contaminante comenzó a emitirse a partir de agosto del 2015, debido a que se encontraba en un proceso de validación; durante el año 2016, el 45% de los días han tenido una calidad regular, 51.91% mala calidad, 2.18% mala calidad, tres días de extremadamente mala calidad, no se cuentan con días de buena calidad del aire para este contaminante.

Para el  $O_3$  se han tenido un 60.27% de días de calidad regular, 35.85% días de buena calidad y sólo un 3.87% de calidad regular. Los contaminantes que tienen arriba de un 94% de días de buena calidad son el  $NO_2$  y el  $CO$ , mientras que el  $SO_2$  no representa un problema para la calidad del aire de la ZMVT ya que todos los días se ha presentado buena calidad.

**Gráfica 2.5. Contaminantes en IMECA**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

## 2.4. Análisis por contaminante.

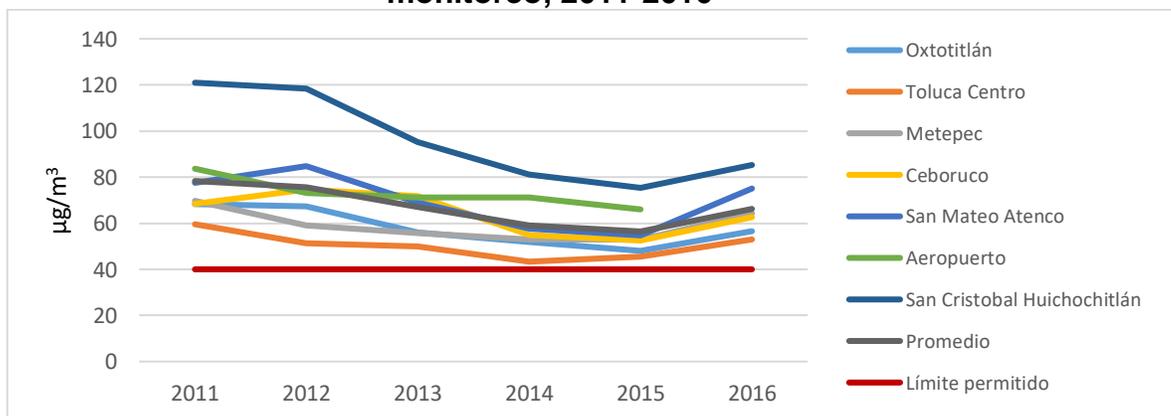
En esta sección se analizará el comportamiento en la ZMVT de los cinco contaminantes presentados en el capítulo anterior; este estudio considera el análisis por estación de monitoreo, el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire, así como una revisión del comportamiento horario, mensual y anual.

### 2.4.1. PM<sub>10</sub>

Para el periodo 2000-2009 no se cumplió la norma para el promedio anual de 24 horas de PM<sub>10</sub> en la ZMVT, exceptuando la estación Aeropuerto (AP) en 2002 y Metepec (MT) en 2009. La estación que presentó concentraciones más bajas fue la estación Oxtotitlan (OX), mientras que la estación San Cristóbal (SC) registró concentraciones dos e incluso tres veces más elevadas de las aceptadas por la norma, la emisión de este contaminante se presenta en su mayoría por la erosión de la tierra, siendo importante recalcar que la zona de San Cristóbal es un área semirural caracterizada por avenidas de terracería, además de un flujo vehicular dominado por el transporte público y de carga (INE-SEMARNAT, 2011).

Como se puede ver en la *Gráfica 2.6.*, todas las estaciones están por arriba del valor límite de concentración promedio anual para el periodo 2011-2016, la estación de San Cristóbal Huichochitlán (SC) es la que presenta valores de entre dos y tres veces más altos que la norma, seguido por San Mateo Atenco (SM), Aeropuerto (AP) Y Ceboruco (CB).

**Gráfica 2.6. Promedio anual de la concentración de PM<sub>10</sub> en las estaciones de monitoreo, 2011-2016**

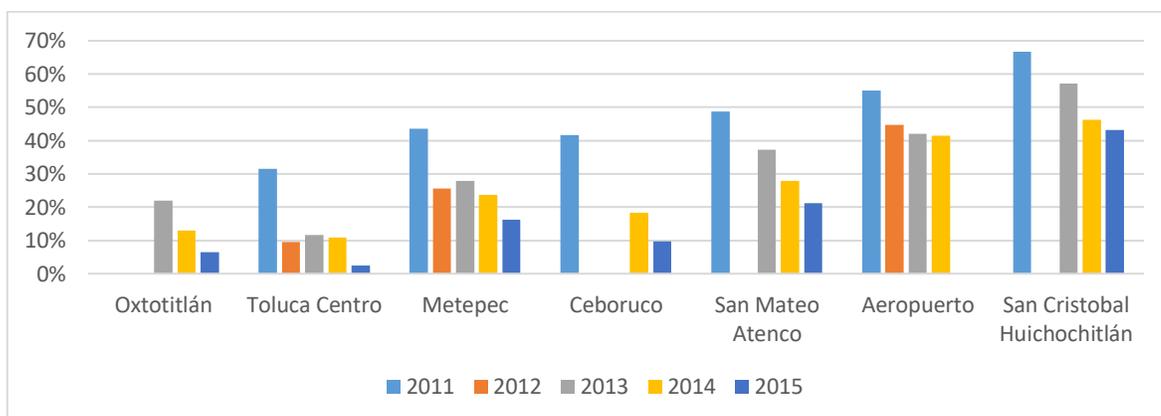


Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En la *Gráfica 2.7* se expresa el Índice Porcentual de Excedencias que expresa la cantidad de veces que el contaminante excede la norma en términos relativos. Para este indicador se consideró un mínimo de 75% de datos válidos como indica la NOM (NOM-020-SSA1-2014, NOM-021-SSA1-1993, NOM-022-SSA1-2010, NOM-023-SSA1-1993, NOM-025-SSA1-2014).

En el gráfico se observa que a través de los años la estación que ha excedido más veces el valor límite establecido para el promedio de 24 horas es San Cristóbal Huichochitlán, seguido por la estación aeropuerto y San Mateo Atenco. También se puede apreciar una disminución importante de la cantidad de veces que se excedió el límite establecido en cada una de las estaciones de 2011 a 2016.

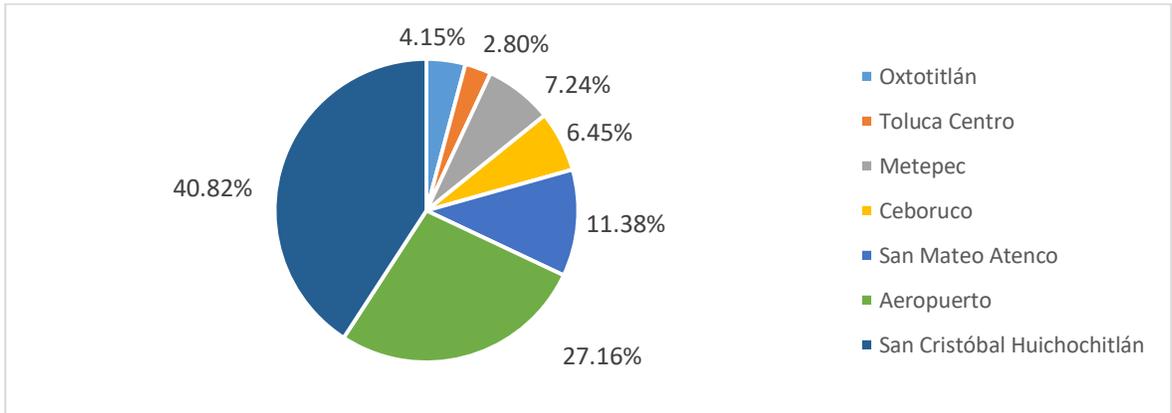
**Gráfica 2.7. IPE para el límite de 24 horas de PM<sub>10</sub> por estación de monitoreo, 2011-2015**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Las estaciones en las que se registran los niveles máximos de PM<sub>10</sub> son San Cristóbal (SC), Aeropuerto (AP), y San Mateo (SM), con un 40.82%, 27.16% y 11.38% de las veces respectivamente, concentrando casi el 80% de los valores máximos para este indicador. De forma contraria la estación Toluca-Centro es la que registra un menor porcentaje en cuanto a los valores máximos de PM<sub>10</sub>.

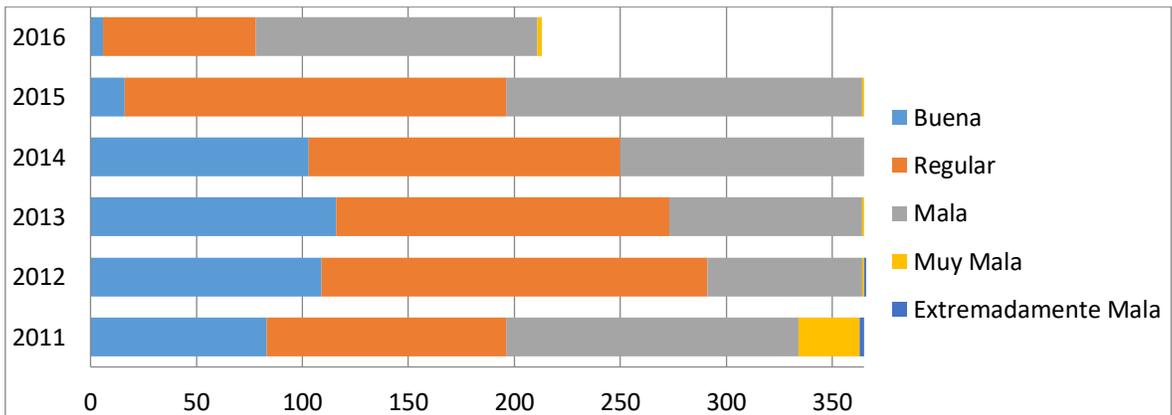
**Gráfica 2.8. Distribución porcentual de los niveles máximos de PM<sub>10</sub> en las estaciones de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En base al IMECA, la cantidad de días de calidad mala y regular han ido aumentando conforme pasan los años en la ZMVT; los días de buena calidad del aire han disminuido de forma drástica, de tener 103 días de calidad buena en 2014, en 2015 sólo fueron 16, y en 2016 se tienen registrados 6 días de buena calidad del aire hasta finales de Julio.

**Gráfica 2.9. IMECA para PM<sub>10</sub>**



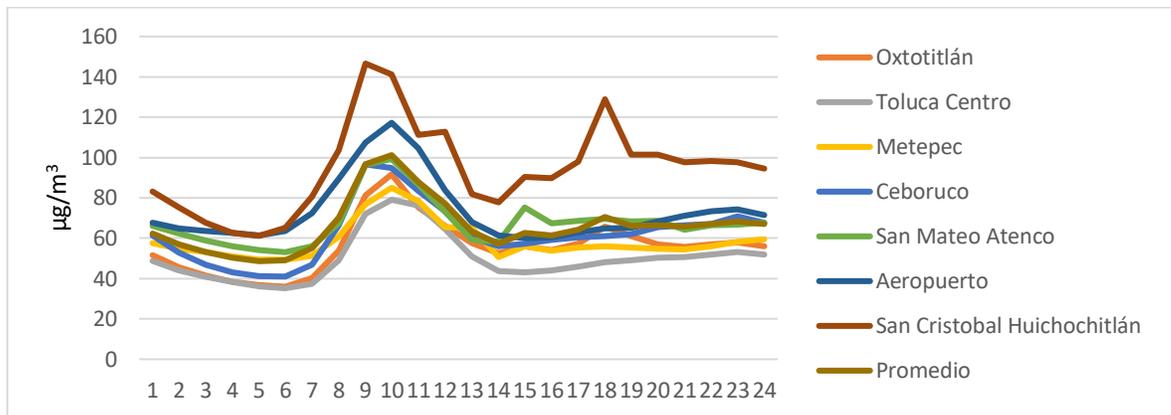
Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En cuanto a su comportamiento horario, la concentración del PM<sub>10</sub> comienza a elevarse a las 7:00 horas, alcanzando su punto más alto entre las 8:00 y 10:00 horas que es cuando la población de la ZMVT comienza con sus actividades diarias, la presencia de autos y camiones de pasajeros aumenta considerablemente en estas horas debido a

las horas de entrada en escuelas y empresas. Es importante resaltar que a las 10:00 horas todas las estaciones rebasan el valor límite permitido para 24 horas ( $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Es importante recalcar el comportamiento de la estación de San Cristóbal Huichochitlán, ya que a las 18:00 horas tiene un repunte considerable en los niveles de contaminación por  $\text{PM}_{10}$ .

**Gráfica 2.10. Promedio horario de la concentración de  $\text{PM}_{10}$  en las estaciones de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

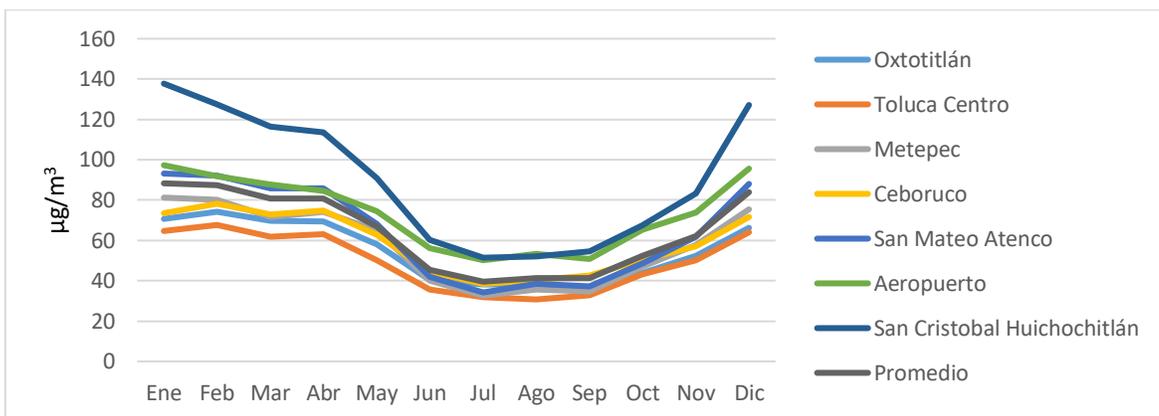
El factor temporal es clave en el comportamiento del contaminante, ya que en la temporada seca-fría se presenta la mayor concentración del contaminante del año debido a que las condiciones meteorológicas son desfavorable para la dispersión de este contaminante; la temporada seca-caliente presenta las concentraciones intermedias del año debido a que esta época se caracteriza por tener vientos de mayor intensidad los cuales esparcen el material particulado; finalmente la temporada de lluvias presenta la concentración menor del año, las fuertes lluvias generan un fenómeno conocido como “lavado atmosférico”, en el que el agua arrastra los contaminantes depositándolos en el suelo.

Lo anterior se muestra claramente en la *Gráfica 2.11.*, en donde los meses de junio a septiembre presentan una disminución radical en la concentración de  $\text{PM}_{10}$  debido a la lluvia que se presenta estos meses. Y en la época seca fría que es cuando dejan de caer precipitaciones, la concentración de este contaminante regresa a sus valores originales.

La zona norte de la ZMVT es históricamente la más afectada por las  $\text{PM}_{10}$  (estación SC); en 2011 el 82% de los días de la temporada seca-fría se registraron concentraciones

por arriba de los límites permitidos para periodos de 24 horas en toda la ZMVT, mientras que para la época seca-caliente fueron el 73% de los días (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, 2012).

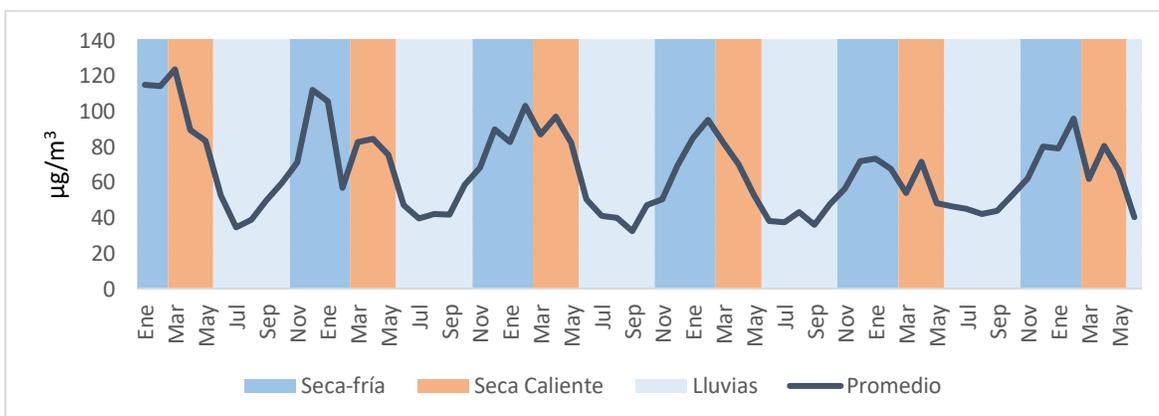
**Gráfica 2.11. Promedio Mensual de la concentración de PM<sub>10</sub> por estación de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En la *Gráfica 2.12.* se observa la estacionalidad del contaminante en la ZMVT a lo largo de los años; como se había mencionado, los valores más altos se encuentran en su mayoría entre la época seca fría y seca caliente, mientras que los niveles más bajos se encuentran en la temporada de lluvias. En este gráfico también se logra apreciar que la variación que ha tenido la concentración mensual ha disminuido a lo largo de los años, repuntando ligeramente a finales de 2015 y principios de 2016.

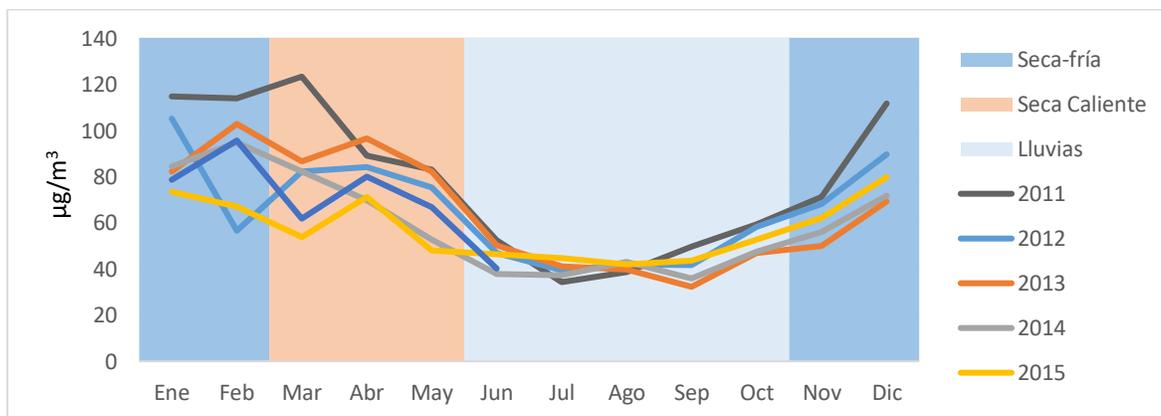
**Gráfica 2.12. Promedio mensual de la concentración PM<sub>10</sub>, 2011-2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

La *Gráfica 2.13.* muestra que en los primeros meses del año varía mucho el comportamiento de la concentración de este contaminante, esto se debe a que en esos meses se tiene algunas lluvias esporádicas que no ocurren todos los años, además de la variación anual de los vientos en la zona.

**Gráfica 2.13. Promedio mensual de la concentración de PM<sub>10</sub> por año, 2011-2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Como antes se mencionó, las PM<sub>10</sub> son el contaminante que más afecta a la ZMVT, siendo la estación SC la que más ha causado problemas a lo largo de los años, en 2015 y 2016 se han presentado concentraciones muy altas, dando como resultado para 2016 133 días malos, 72 días regulares y únicamente 3 días de buena calidad del aire hasta finales de Julio, siendo la zona norte y sur las más afectadas.

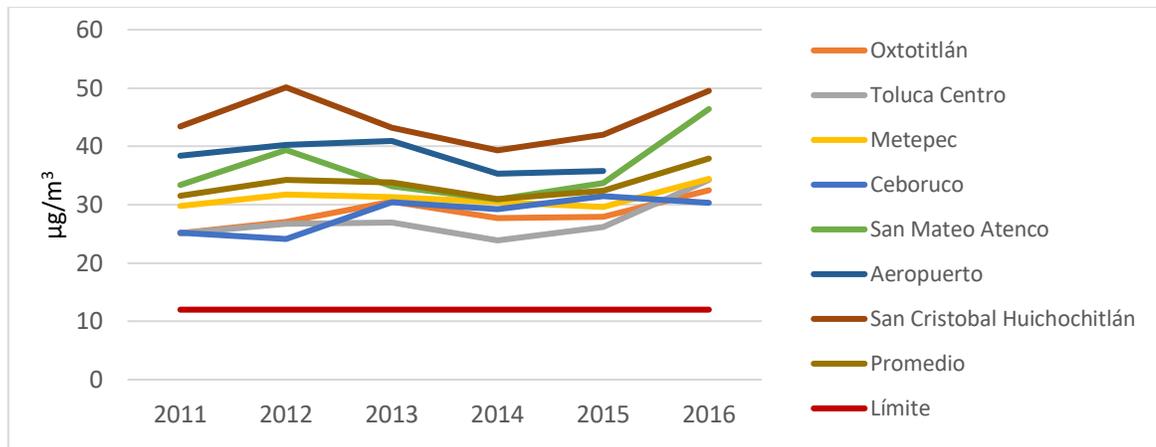
#### 2.4.2. PM<sub>2.5</sub>

En la ZMVT se comenzaron a tener registros de este contaminante a partir de 2011. Las PM<sub>2.5</sub> son asociadas en un 68% a las emisiones de vehículos, sobre todo los de carga y pasajeros, mientras que la erosión de los suelos y la vegetación representan un 17% de las fuentes totales de emisiones de las PM<sub>2.5</sub> en la ZMVT (Gobierno del Estado de México, 2007).

Como se puede ver en la *Gráfica 2.14.*, todos los registros de las estaciones están al menos dos veces por arriba del valor límite de concentración promedio anual para el periodo 2011-2016; la zona norte de la ZMVT, al igual que con las PM<sub>10</sub>, es también la más afectada por este contaminante, la estación con concentraciones más altas de PM<sub>2.5</sub>

es San Cristóbal Huichochitlán (SC), con al menos cuatro veces el valor permitido para el cuidado de la salud; seguida por la estación Aeropuerto (AP) y San Mateo Atenco (SM).

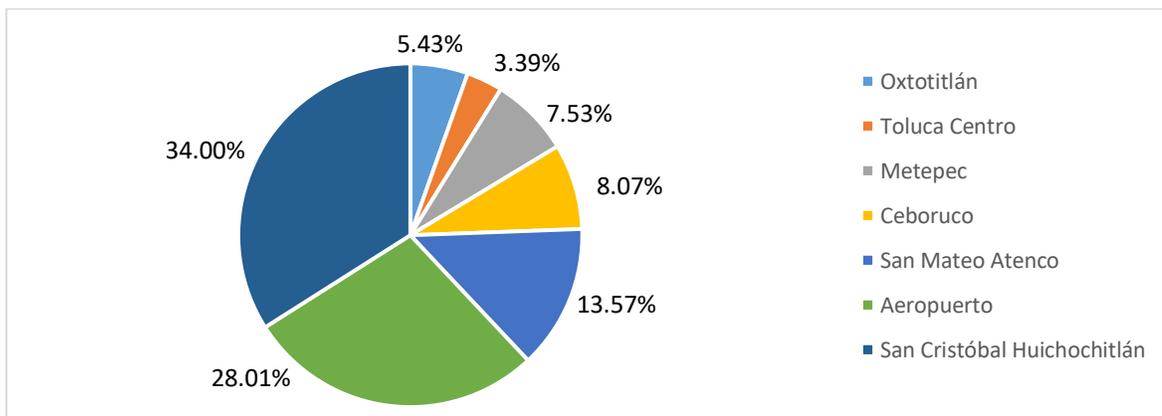
**Gráfica 2.14. Promedio anual de la concentración de PM<sub>2.5</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

La Gráfica 2.15. muestra que, al igual que para las PM<sub>10</sub>, la estación San Cristóbal Huichochitlán (SC) presentó el mayor porcentaje de las concentraciones máximas (34%) de PM<sub>2.5</sub> durante el periodo 2011-2016 seguido de las estaciones Aeropuerto (AP) con un 28.01% y San Mateo Atenco (SM), esto debido a la gran cantidad de camiones de carga, pasajeros y a que San Cristóbal Huichochitlán es una zona rural.

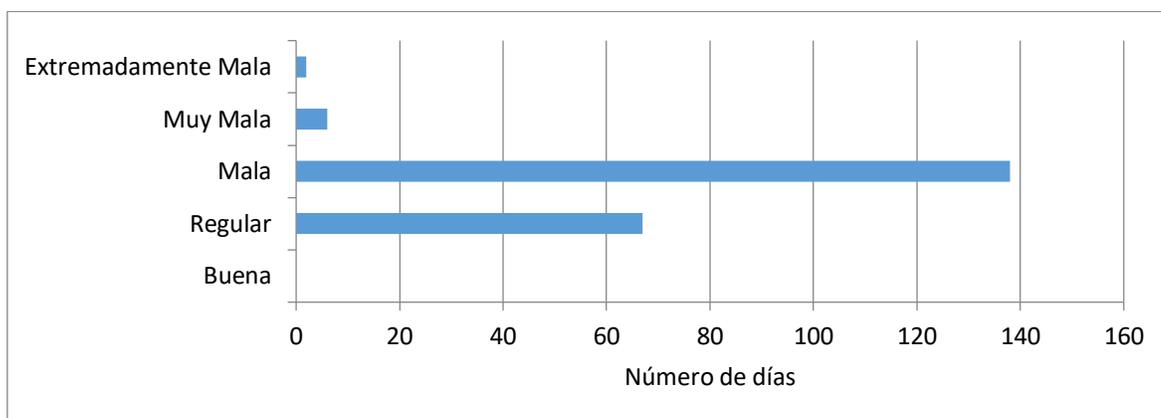
**Gráfica 2.15. Distribución porcentual de los niveles máximos de PM<sub>2.5</sub> en las estaciones de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

El índice IMECA en la ZMVT comenzó a obtenerse hasta 2016 a pesar de que las estaciones ya registraban información para este contaminante desde 2011. Hasta finales de Julio de 2016 se contabilizaron 138 días con mala calidad del aire en la ZMVT, 67 de calidad regular, 6 de muy mala calidad, 2 de extremadamente mala calidad y ninguno de buena calidad.

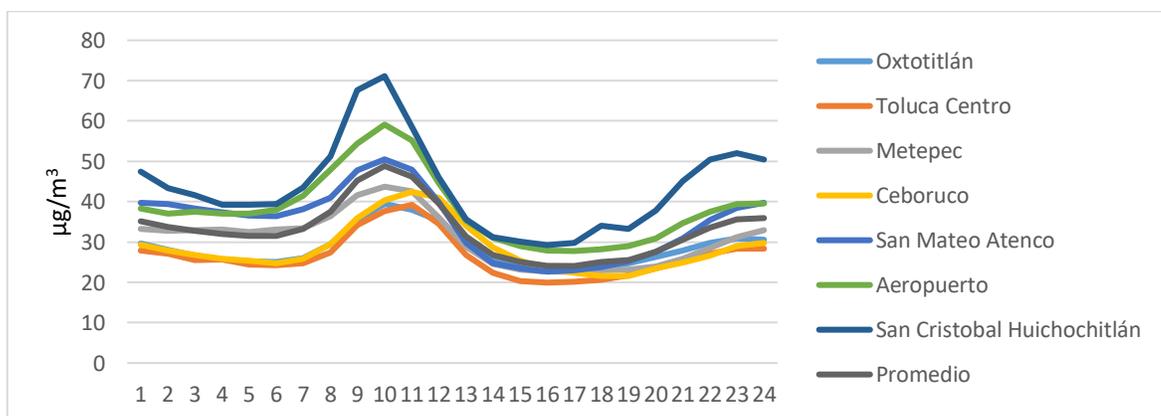
**Gráfica 2.16. IMECA para PM<sub>2.5</sub> en 2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Se presentan las concentraciones más altas de PM<sub>2.5</sub> entre las 7:00 y 11:00 horas, siendo la estación San Cristóbal (SC) la que presenta niveles más altos, como se aprecia en la *Gráfica 2.17*. Se puede observar un pequeño incremento en las concentraciones a partir de las 20:00, siendo más marcado en la estación San Cristóbal (SC) que en el resto de las estaciones.

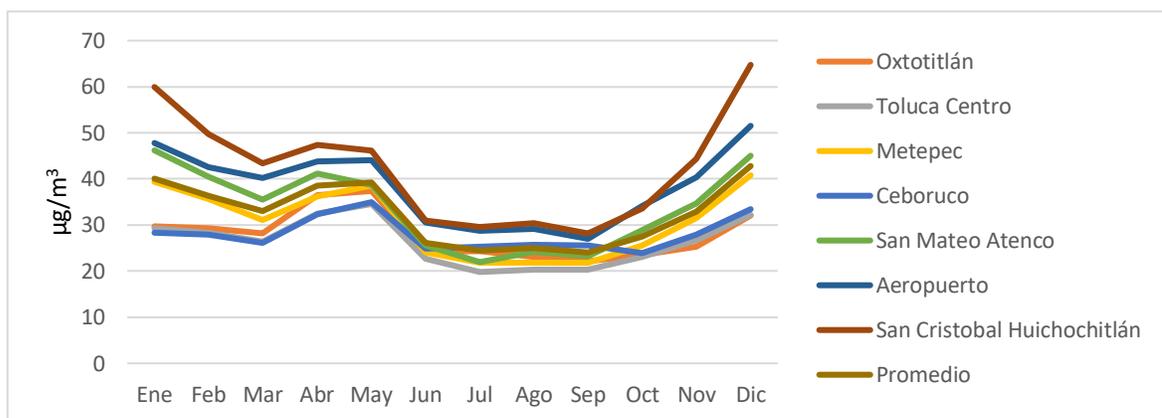
**Gráfica 2.17. Promedio horario de la concentración de PM<sub>2.5</sub> por estación de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

La Gráfica 2.18. nos muestra el factor temporal por estaciones de monitoreo, los meses de junio a septiembre presentan una disminución en la concentración de  $PM_{10}$  debido a la lluvia que se presenta estos meses.

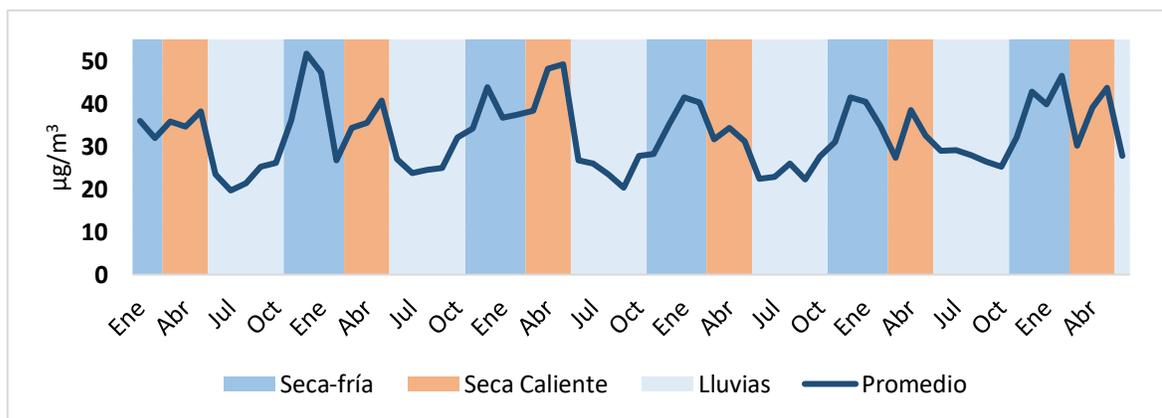
**Gráfica 2.18. Promedio mensual de la concentración de  $PM_{2.5}$  por estación de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Las  $PM_{2.5}$  presentan un comportamiento temporal idéntico al de las  $PM_{10}$ , en época seca-fría se presentan las mayores concentraciones por la estabilidad atmosférica de la época; las concentraciones disminuyen en la época seca-caliente, hasta alcanzar los niveles mínimos de concentración en la época de lluvias. (Véase Gráfica 2.19.)

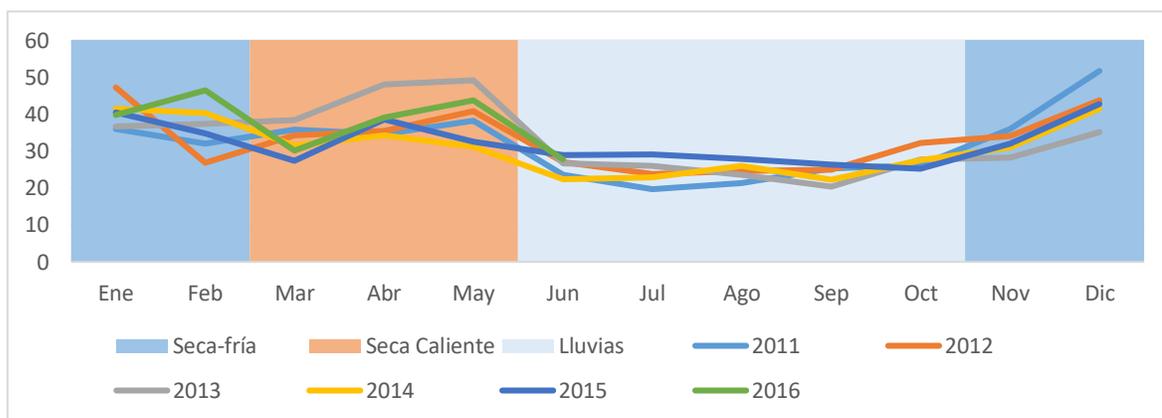
**Gráfica 2.19. Promedio mensual de la concentración de  $PM_{2.5}$ , 2011-2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Si comparamos la gráfica anterior año por año obtenemos la *Gráfica 2.20.*, donde se puede apreciar que los primeros meses del año el comportamiento del contaminante es irregular como consecuencia de lluvias esporádicas durante la temporada, mientras que a partir de junio el contaminante se comporta de manera muy similar año con año.

**Gráfica 2.20. Promedio mensual de la concentración de PM<sub>2.5</sub> por año, 2011-2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

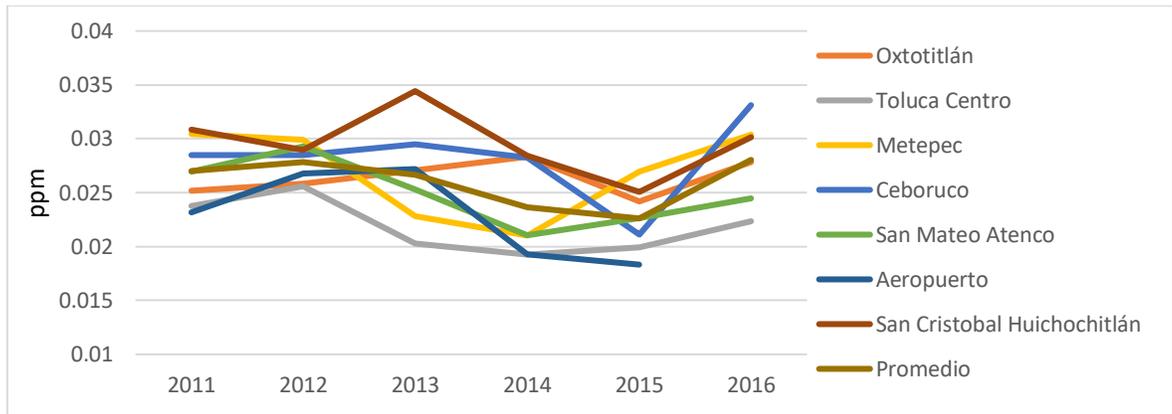
### 2.4.3. Ozono (O<sub>3</sub>)

Para el periodo 2000-2009 se contó con información de este contaminante hasta el 2007, observándose un incumplimiento de la norma para el límite anual en la mayoría de las estaciones, exceptuando la estación Toluca-Centro (CE) a partir del año 2001 y en las estaciones SC, SL y SM en 2007. En cuanto al límite máximo horario se observa un incumplimiento casi completo, registrando los niveles más altos en la estación Metepec (MT); en general las estaciones de la periferia registraron los valores más elevados, las estaciones CE y AP contaron con los niveles más bajos.

En la *Gráfica 2.21.* se observa que todos los contaminantes se encuentran por debajo del valor límite establecido para promedio de 8 horas, ya que la OMS considera que, si se cumple el valor diario, se cumplirá con los valores anuales. San Cristóbal (SC) se ha mantenido entre los primeros lugares, debido a que la concentración de ozono incremento de forma importante en esta estación en el año 2013; evento que no ocurrió en el resto de las estaciones. Metepec (MT) registró una disminución de la concentración de este contaminante en 2013 y 2014, pero no pudo mantenerlo, repuntando en 2015 y 2016.

La mayoría de las estaciones registraron un descenso en los años 2013 y 2014, sin embargo, en 2015 y lo que va del año 2016 han cambiado esta tendencia, aunque no de forma tan importante como en la estación Metepec (MT).

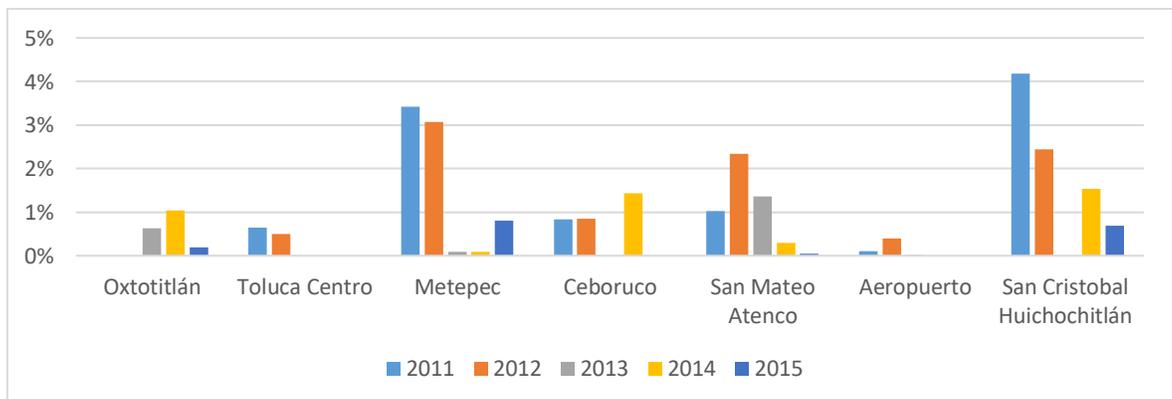
**Gráfica 2.21. Promedio anual de la concentración de O<sub>3</sub> por estación, 2011-2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En la *Gráfica 2.22*, se muestra que a través de los años las estaciones que han excedido más veces el valor límite establecido para el promedio de 8 horas son San Cristóbal Huichochitlán y Metepec, por otro lado, la estación Aeropuerto es la que menos excesos de O<sub>3</sub> registra. Es notoria la disminución en la concentración que ha presentado el contaminante en la mayoría de las zonas, a excepción de Ceboruco que sigue un comportamiento inverso.

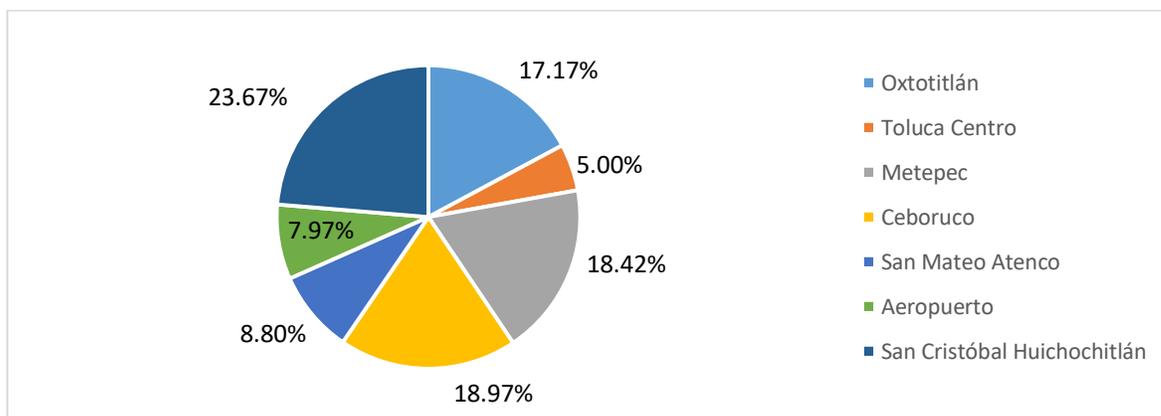
**Gráfica 2.22. IPE para el límite de 8 horas del O3 por estación de monitoreo, 2011-2015**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Los niveles máximos de O<sub>3</sub> se han distribuido más equitativamente en las estaciones en comparación con las partículas suspendidas; sin embargo, resaltan las estaciones San Cristóbal (SC), Ceboruco (CB), Metepec (MT) y Oxtotitlán (OX) en ese orden. Por su parte Toluca-Centro (CE) es la estación en la que se ha registrado la menor incidencia. (Véase *Gráfica 2.23.*)

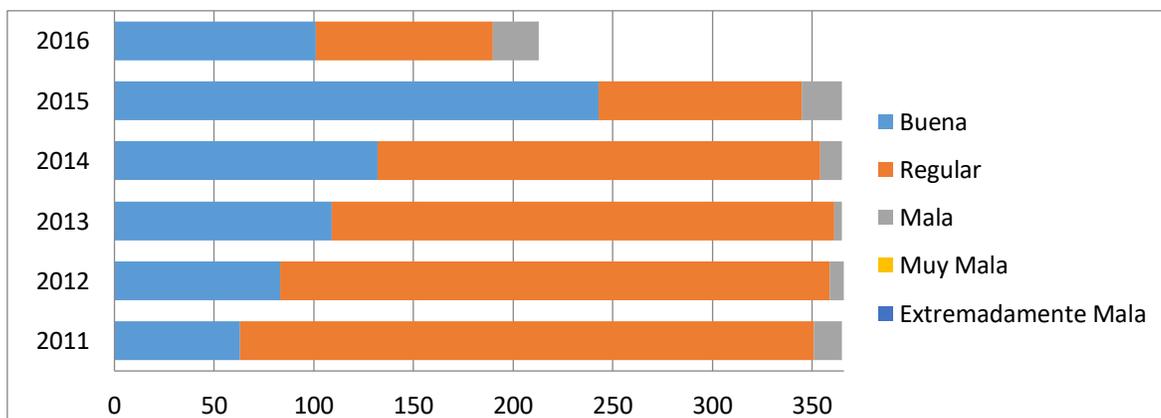
**Gráfica 2.23. Distribución porcentual de los niveles máximos de O<sub>3</sub> en las estaciones de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

El IMECA nos confirma que la calidad del aire con respecto al Ozono ha ido mejorando a través de los años ya que los días en que los niveles de ozono representan una buena calidad han ido aumentando (véase *Gráfica 2.24.*). Al final de Julio de 2016, existe casi la misma proporción de días con calidad buena y regular (89 y 101 respectivamente). (*Gráfica 2.24.*)

**Gráfica 2.24. IMECA para O<sub>3</sub>**

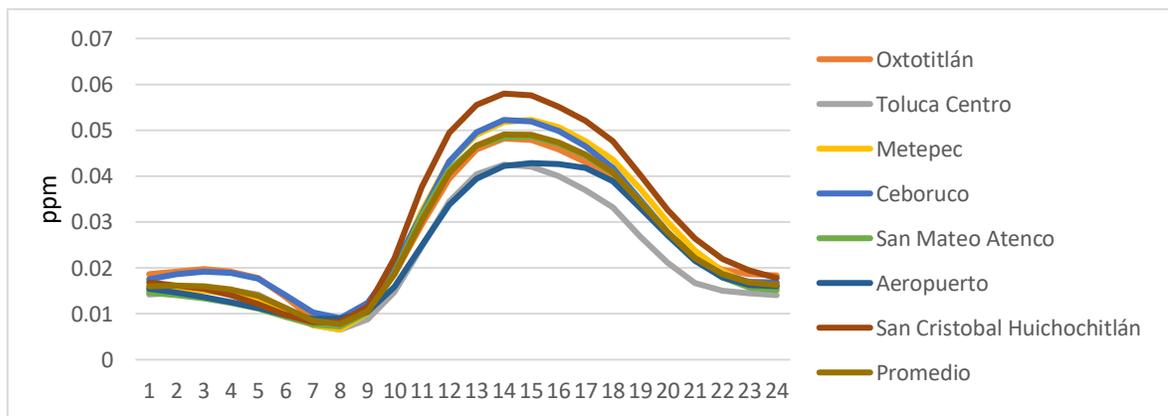


Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Antes de 2009 se presentaban concentraciones superiores a 0.11ppm (límite establecido por la NOM-020-SSA1-1993 hasta antes de 2014) entre las 14:00 y las 17:00 horas; el 50% de los días en los que se excedió el límite normado en esta época se hizo entre las 15 y 16 horas (INE-SEMARNAT, 2011)).

En el periodo analizado los niveles de concentración más elevados se presentan entre las 9:00 y 18:00 horas, lo que coincide con la jornada de mayor luz solar y calor, aunado a que el ozono deriva de los óxidos de nitrógeno emitidos por los vehículos automotor que presentan un mayor uso en este horario. San Cristóbal (SC), Metepec (MT) y Ceboruco (CB) son las estaciones que registran los niveles más altos a nivel horario. (Véase *Gráfica 2.25.*)

**Gráfica 2.25. Promedio Horario de la concentración de O<sub>3</sub>**



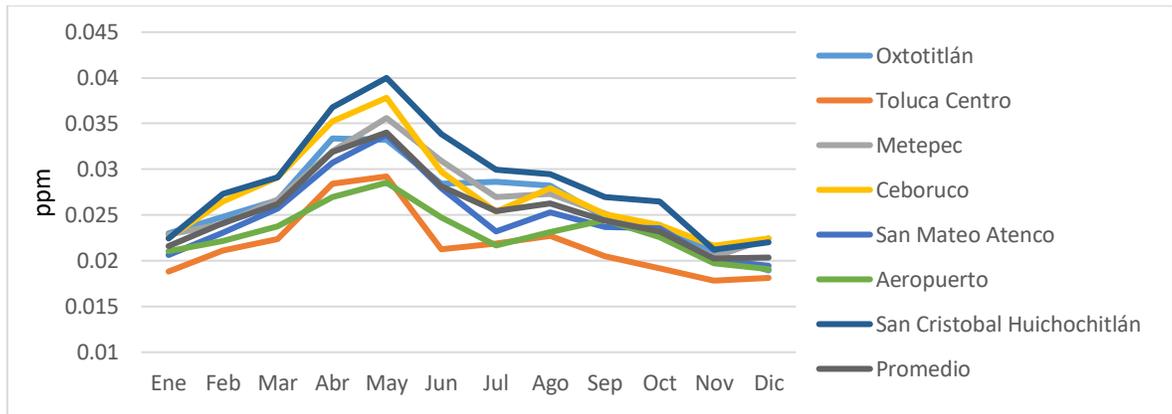
Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Este contaminante presenta un aumento en su concentración en los meses de abril y mayo debido a las altas temperaturas que se presentan en estos meses. San Cristóbal (SC) es la estación con niveles de contaminación de O<sub>3</sub> más altos a lo largo de los meses, seguida muy de cerca por Ceboruco (CB). Toluca-Centro (CE) es la estación que registra promedios mensuales más bajos.

Es importante resaltar que el ozono se genera a partir del NO<sub>2</sub> combinado con luz y calor, sin embargo, el NO descompone al O<sub>3</sub> formando nuevamente NO<sub>2</sub>. Debido a que los vehículos emiten ambos, los niveles de O<sub>3</sub> son menores en las regiones más conurbadas a causa de las fuertes emisiones de NO que inhiben su crecimiento. El NO<sub>2</sub> se disipa a las periferias de estas regiones, el sol y el calor lo descomponen en ozono sin

que el óxido nítrico interfiera; razón por la que las estaciones Toluca-Centro y Aeropuerto son las que registran menores niveles de ozono.

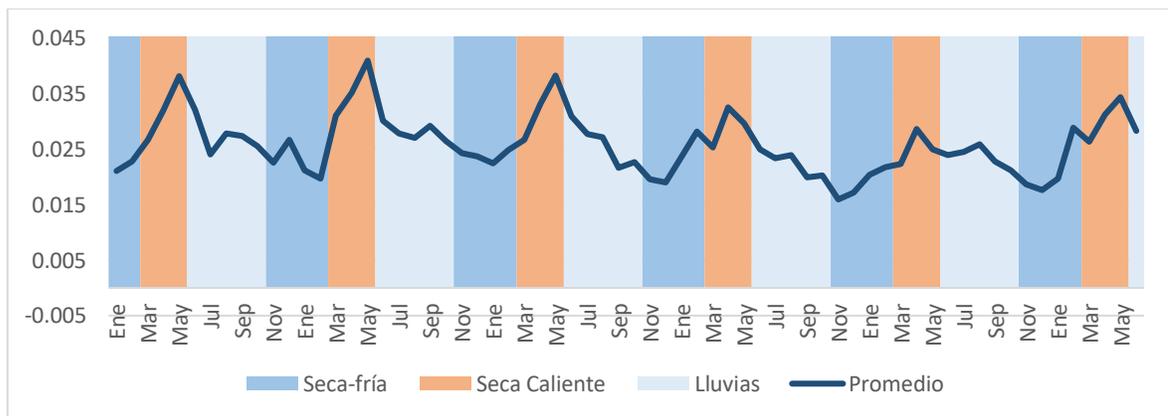
**Gráfica 2.26. Promedio mensual de la concentración de O<sub>3</sub> por estación de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Este contaminante tiene sus concentraciones más elevadas en la temporada seca-caliente debido a que la luz solar en esta época es mayor, además del incrementó en la cantidad de incendios forestales que también repercuten en los niveles de ozono, mientras que sus niveles más bajos se presentan en la época seca-fría. (Véase *Gráfica 2.27.*)

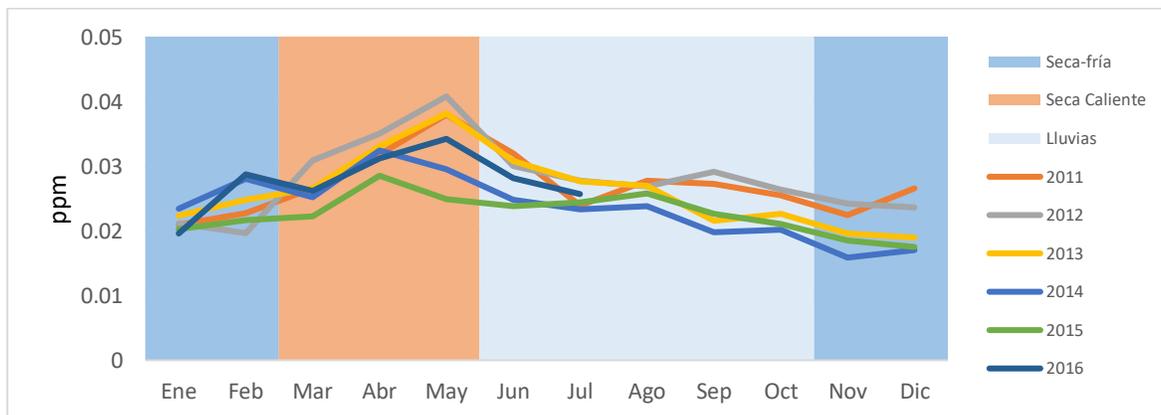
**Gráfica 2.27. Promedio mensual de la concentración de O<sub>3</sub>, 2011-2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En la *Gráfica 2.28.* se observa que, en 2012, 2013 y 2014 había una tendencia a la baja en la concentración del ozono, pero el comportamiento cambió desde el mediados de 2015, registrándose concentraciones más elevadas que el año anterior.

**Gráfica 2.28. Promedio mensual de la concentración de O<sub>3</sub> por año, 2011-2016**



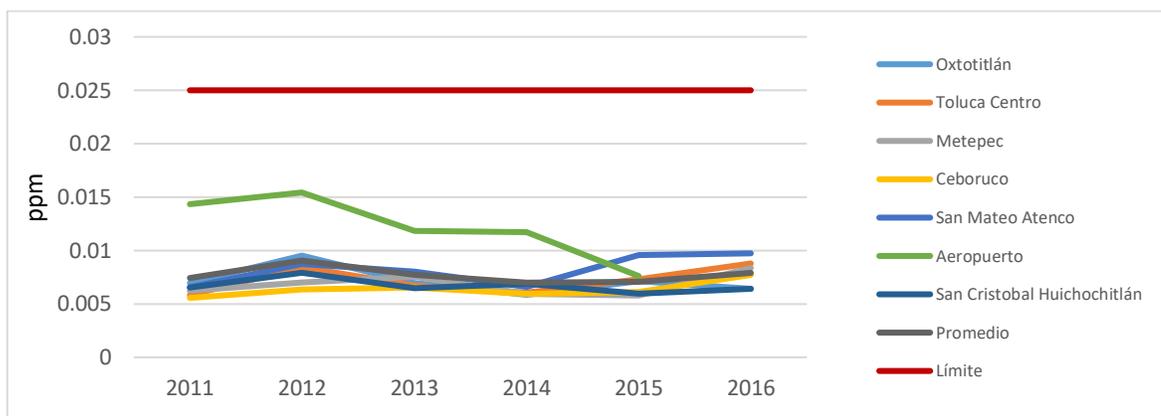
Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

#### 2.4.4. Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)

Desde que se inició el registro de SO<sub>2</sub> en 1995, se ha mantenido por debajo del límite del promedio anual de las concentraciones horarias establecido por la NOM. Se observó un incremento en las concentraciones entre 2004 y 2006 que no afectó el cumplimiento de la NOM, seguido por un declive en los años posteriores. La concentración de SO<sub>2</sub> mostró una tendencia a la baja del 2000 al 2011.

Desde 2011 la estación Aeropuerto registró los niveles de concentración más altos, duplicando los niveles del resto; sin embargo, mantuvo una tendencia a la baja a lo largo de los años hasta que la estación dejó de hacer mediciones a finales de 2015. En las demás estaciones el nivel se mantuvo sin mucha variación por debajo del 0.01 ppm de 2011 a 2016. (Véase *Gráfica 2.29.*)

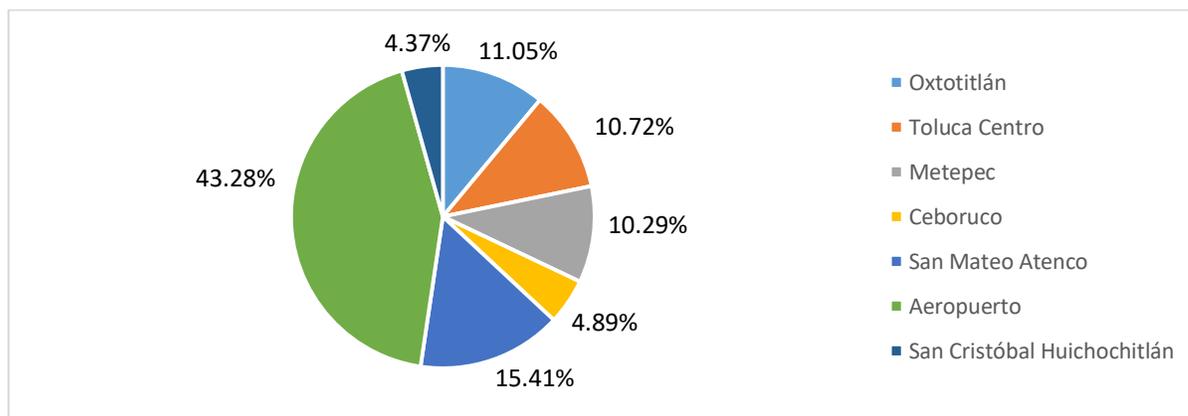
**Gráfica 2.29. Promedio anual de la concentración de SO<sub>2</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Los niveles máximos de SO<sub>2</sub> en la ZMVT se registraron en la estación Aeropuerto (AP) el 43.28% de las veces, seguido por San Mateo Atenco (SM) el 15.41%, presuntamente por la gran cantidad de vehículos automotor que circulan por esta zona. (Véase Gráfica 2.31.)

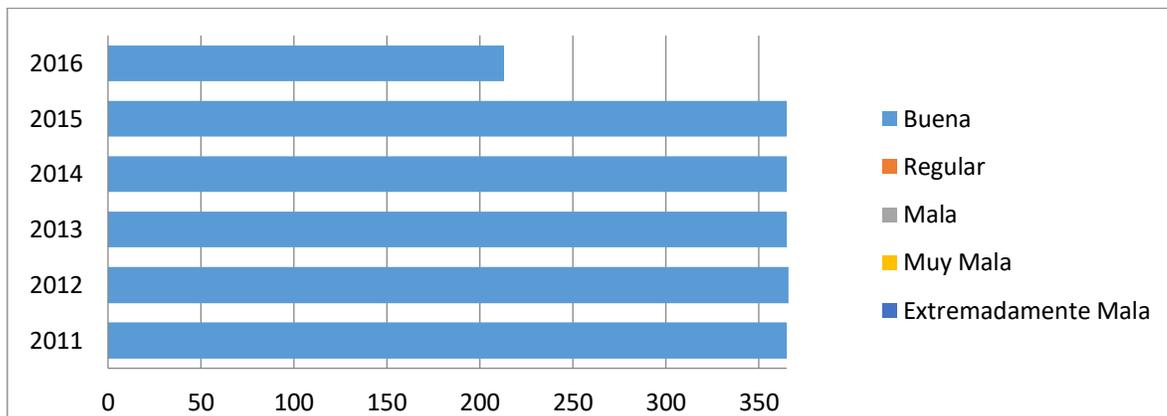
**Gráfica 2.30. Distribución porcentual de los niveles máximos de SO<sub>2</sub> en las estaciones de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En cuanto al índice IMECA, la Gráfica 2.31. nos muestra que el SO<sub>2</sub> no es problema en la ZMVT, ya que se ha registrado buena calidad del aire todos los días durante el periodo de análisis.

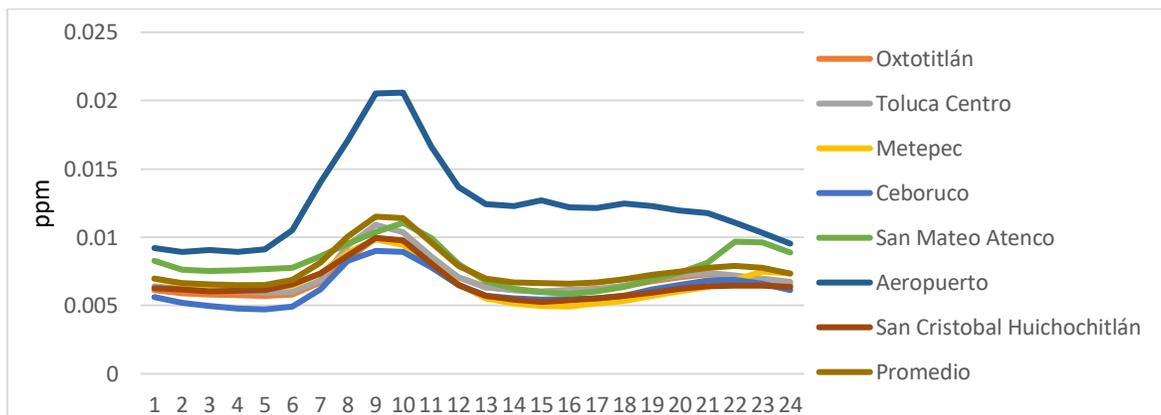
**Gráfica 2.31. IMECA para SO<sub>2</sub>**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En la *Gráfica 2.32.* podemos observar que las horas en las que mayor concentración de SO<sub>2</sub> se registra son entre las 7:00 y 13:00 horas debido al inicio de las actividades de la población de la ZMVT, llegando a niveles máximos entre las 9:00 y 10:00 horas, al igual que en los gráficos anteriores resalta la concentración que se da en la estación Aeropuerto (AP).

**Gráfica 2.32. Promedio horario de la concentración de SO<sub>2</sub> por estación de monitoreo**



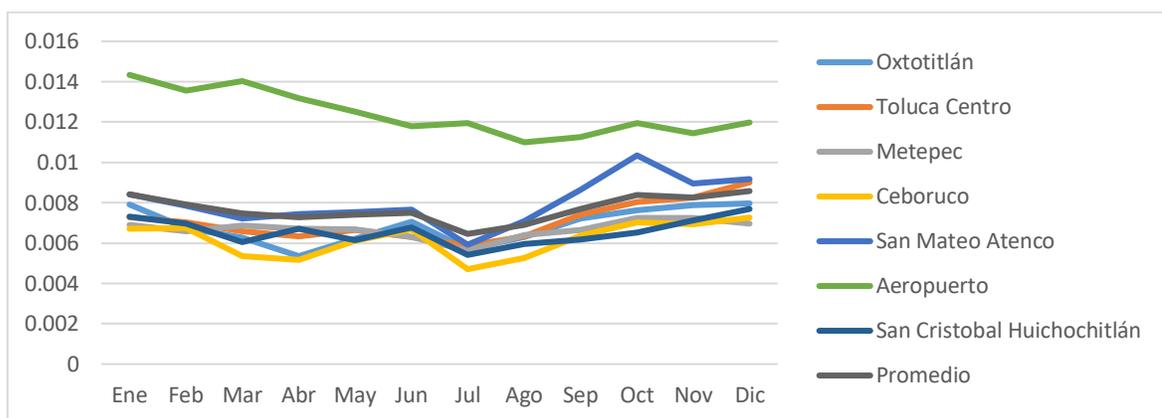
Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En cuanto al límite del promedio de 24 horas se cumplió en todo el periodo 2000-2009 con concentraciones del 70% al 75% con respecto a la NOM. Para este contaminante se observaron concentraciones más altas en el este de la ZMVT, particularmente en la estación San Mateo (SM) donde se presentaron los niveles más

elevados durante este periodo, disminuyendo gradualmente hasta alcanzar los niveles más bajos en la estación Oxtotitlán (OX) (SEMARNAT, 2012).

El SO<sub>2</sub> no muestra comportamientos en extremo notorios dependiendo del mes del año, las concentraciones más altas se registran de octubre a febrero, y tiene un ligero repunte en junio. El promedio mensual de la estación Aeropuerto (AP) es mayor que en el resto de las estaciones, y sigue una tendencia a la baja casi constante a lo largo de los meses. (Véase *Gráfica 2.33.*)

**Gráfica 2.33. Promedio mensual de SO<sub>2</sub>**

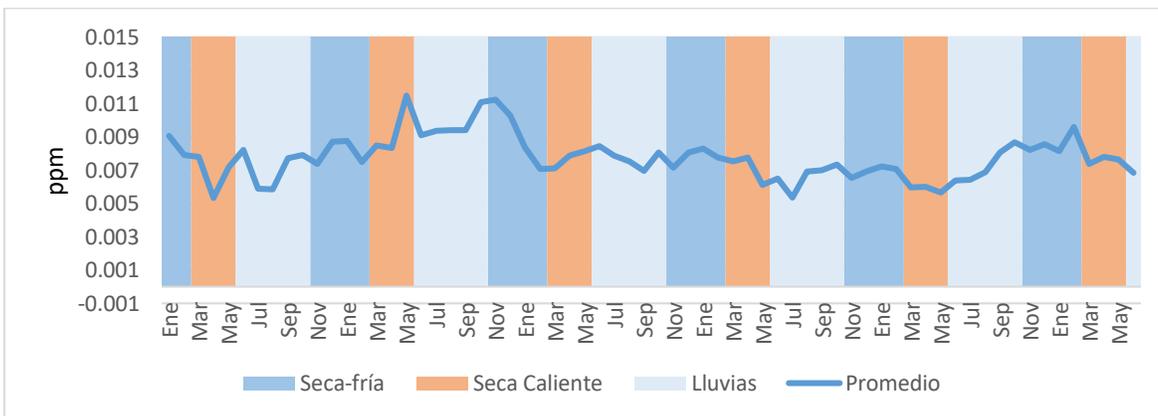


Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Los valores tan elevados de la estación Aeropuerto (AP) se deben a que es una estación que tiene flujos vehiculares abundantes y una buena parte de estos usan diésel, mismos que tienen emisiones de SO<sub>2</sub> superiores a los de gasolina, además de que está rodeada de parques industriales que emiten este contaminante.

En 2012 se tuvieron los niveles más altos para este contaminante principalmente al final de la época seca-caliente y a principios de la seca fría, en los años posteriores existió una leve disminución de la concentración hasta septiembre de 2015, cuando comenzaron a incrementar los niveles de este contaminante, sin embargo, no se alcanzaron los niveles del año 2012.

**Gráfica 2.34. Concentración mensual promedio de SO<sub>2</sub>, 2011-2016**



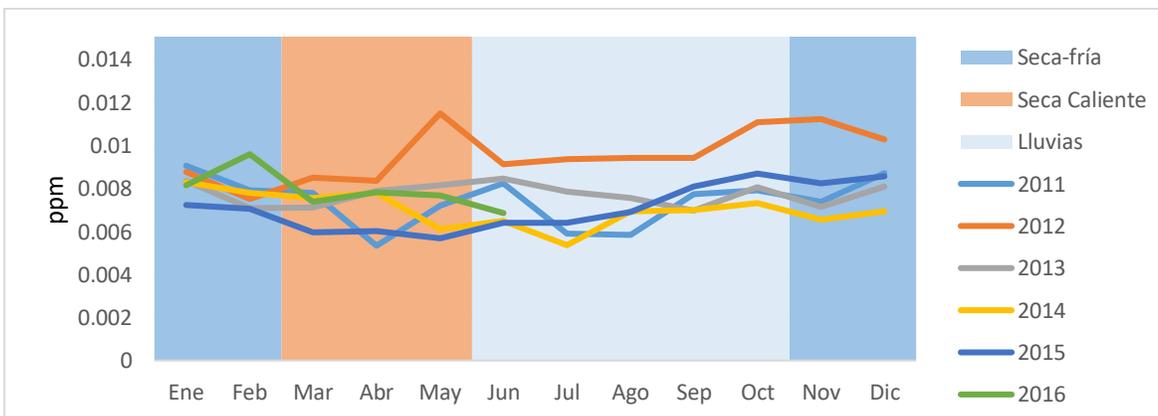
Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Como se aprecia en la gráfica 2.34, a diferencia de otros contaminantes, el SO<sub>2</sub> no sigue un patrón tan marcado en las épocas del año. Sin embargo, a pequeña escala, surge un ligero patrón; ya que al final de la temporada de lluvias tienden a incrementarse los niveles, posteriormente el crecimiento se estabiliza en la época seca- fría y disminuye de forma irregular en la temporada seca-caliente.

El único año que no siguió este comportamiento fue 2012 ya que, en lugar de descender en la época seca caliente, el indicador incremento de manera drástica en mayo, aunque descendió para junio; sin embargo, siguió tendencia alcista.

A manera general este contaminante tiene un comportamiento estable.

**Gráfica 2.35. Promedio mensual de la concentración de SO<sub>2</sub> por año, 2011-2016**



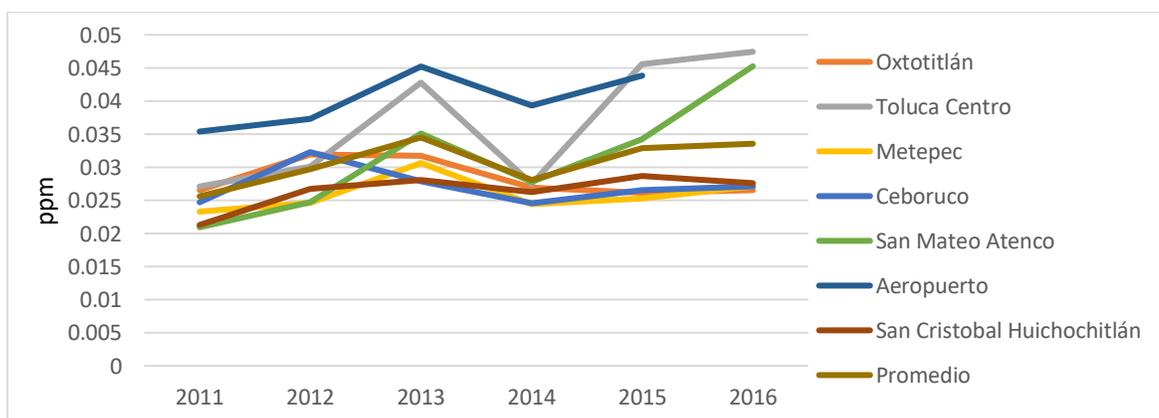
Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

#### 2.4.5. Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

Para el periodo 2000-2009 la concentración del NO<sub>2</sub> cumplió con el límite horario establecido, las concentraciones más altas se presentaron en Toluca-Centro (CE) y Oxtotitlán (OX), hubo otras estaciones que registraron niveles a la mitad de lo establecido en la norma (0.21 ppm) a lo largo de todo el periodo como Metepec (MT). El monitoreo de este contaminante se detuvo en 2009, y presentó algunas irregularidades los años previos; se observan únicamente cuatro días con concentraciones superiores a las recomendadas, tres de estos días se registraron en la estación Toluca-Centro (CE) en el 2000, 2002 y 2004 y una en Metepec (MT) en el 2000; estas altas concentraciones se permiten una vez al año sin que se consideren como una falta a la normativa (SEMARNAT, 2012)

En 2011 se reanudó el registro de NO<sub>2</sub> en la ZMVT, a pesar de que se han mantenido los niveles muy por debajo de los límites establecidos se puede apreciar una leve tendencia alcista de 2011 a 2016, las estaciones que registraron niveles más altos fueron Aeropuerto (AP), Toluca-Centro (CE) y San Mateo Atenco (SM), la estación CE está ubicada en una zona caracterizada por una intensa actividad vehicular debido a la presencia de servicios administrativos a nivel estatal y regional. La estación Oxtotitlán (OX) y Ceboruco (CB) han registrado niveles ligeramente más bajos los últimos años. (Véase *Gráfica 2.36.*)

**Gráfica 2.36. Promedio anual de la concentración de NO<sub>2</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016**

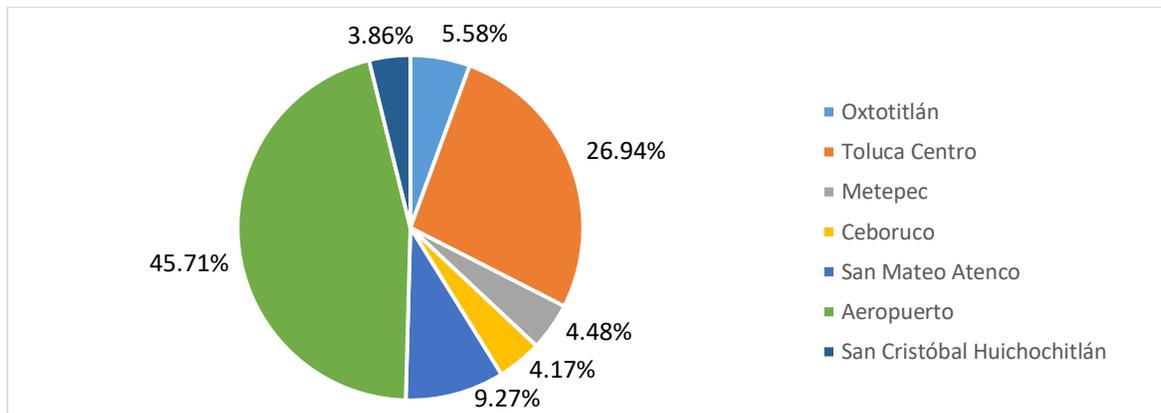


Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Las estaciones que han registrado más niveles máximos en la ZMVT son la estación Aeropuerto (AP) con el 45.71% de las veces y Toluca-Centro (CE) con 26.94%,

mientras que San Cristóbal (SC) es de las estaciones que registran menor presencia de éstos junto con Ceboruco (CB). (Véase *Gráfica 2.37.*)

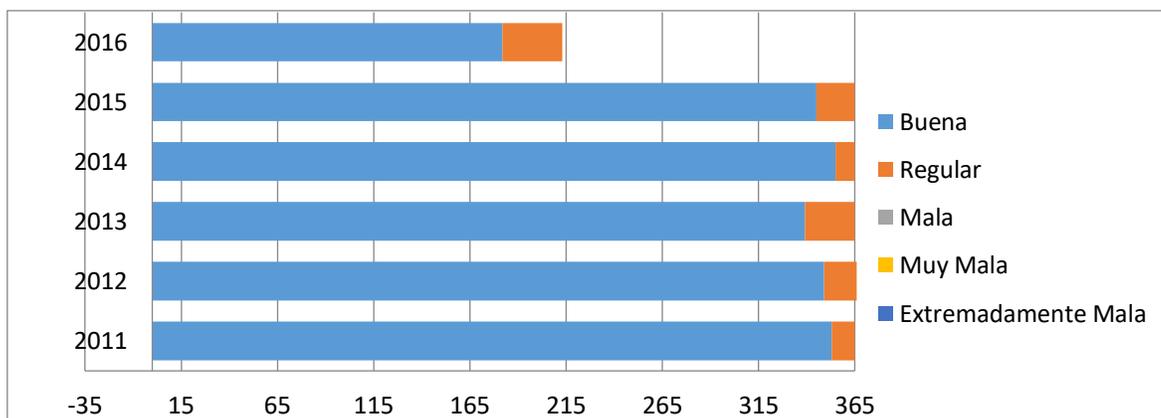
**Gráfica 2.37. Distribución porcentual de los niveles máximos de NO<sub>2</sub> en las estaciones de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En cuanto a la calidad de los días respecto a este contaminante se nota una tendencia en aumento de días regulares de 2011 a 2013, teniendo una mejora en la calidad del aire en 2014. En lo que va del 2016 se tiene un registro de 31 días regulares para este contaminante, cantidad que supera los años anteriores del análisis, a pesar de que sólo se tienen registros hasta julio de este año. (Véase *Gráfica 2.38.*)

**Gráfica 2.38. IMECA para NO<sub>2</sub>**

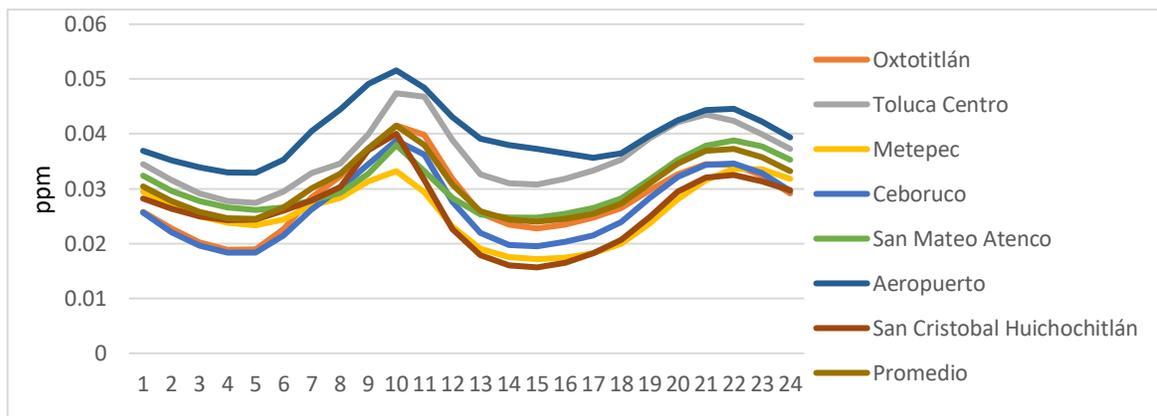


Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En la *Gráfica 2.39.* se observa que los niveles de concentración más altos para el NO<sub>2</sub> se presentan entre las 6:00 y 12:00 horas, además de un aumento después de las

19:00 horas; la zona aeropuerto es la que presenta los mayores niveles, la estación Toluca-Centro (CE) es la segunda estación con mayores concentraciones de NO<sub>2</sub>. El resto de las estaciones siguen niveles muy parecidos entre sí.

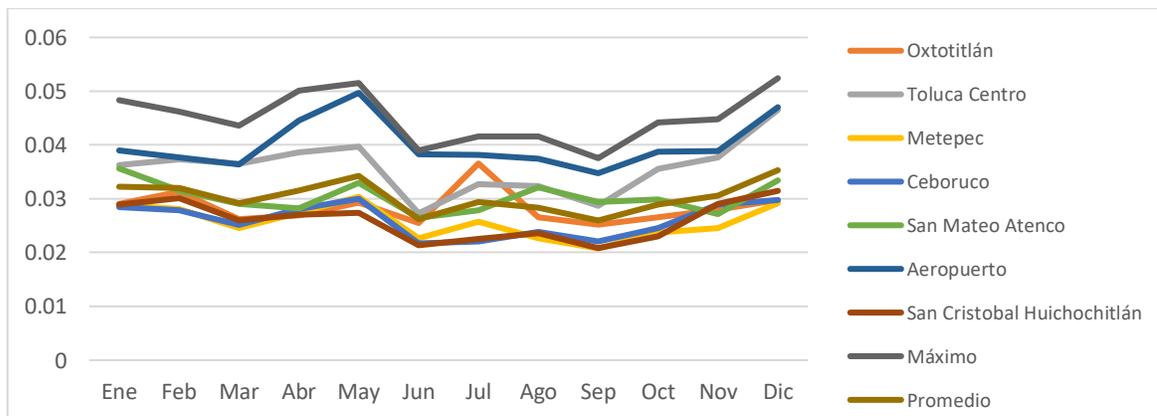
**Gráfica 2.39. Promedio horario de la concentración de NO<sub>2</sub> por estación de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

El comportamiento mensual de este contaminante se observa en la *Gráfica 2.40.*, la concentración más alta se presenta en mayo y diciembre, el resto de los meses el comportamiento es muy estable. La estación Aeropuerto (AP) y Toluca-Centro (CE) son las que presentan mayores niveles, mientras que las estaciones restantes tienen un comportamiento similar a lo largo de los meses.

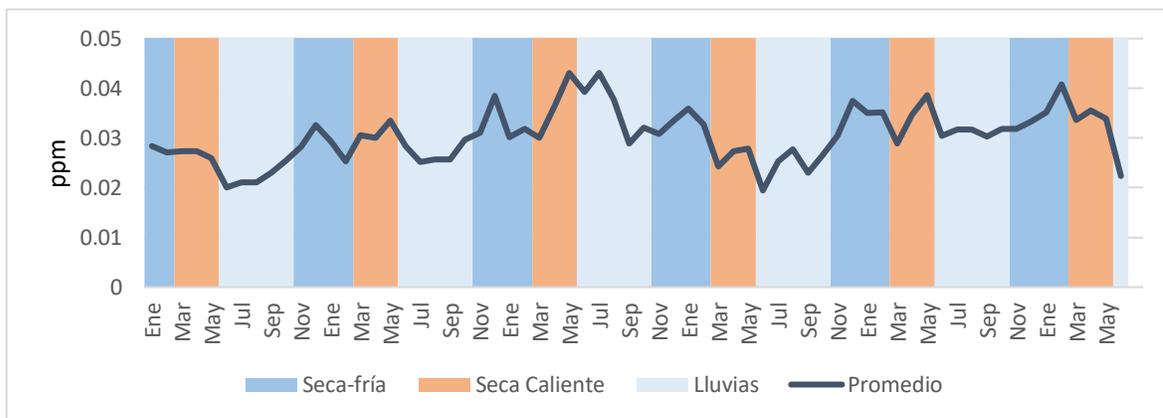
**Gráfica 2.40. Promedio mensual de la concentración de NO<sub>2</sub> por estación de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En la *Gráfica 2.41*, se nota también el ligero aumento en la concentración de  $\text{NO}_2$  a partir de 2011, la época de lluvias es la estación que presenta menos concentración del contaminante. La época seca-caliente es en general la temporada que presenta mayores concentraciones, a excepción de 2014 y 2015, años en el que se nota un comportamiento contrario.

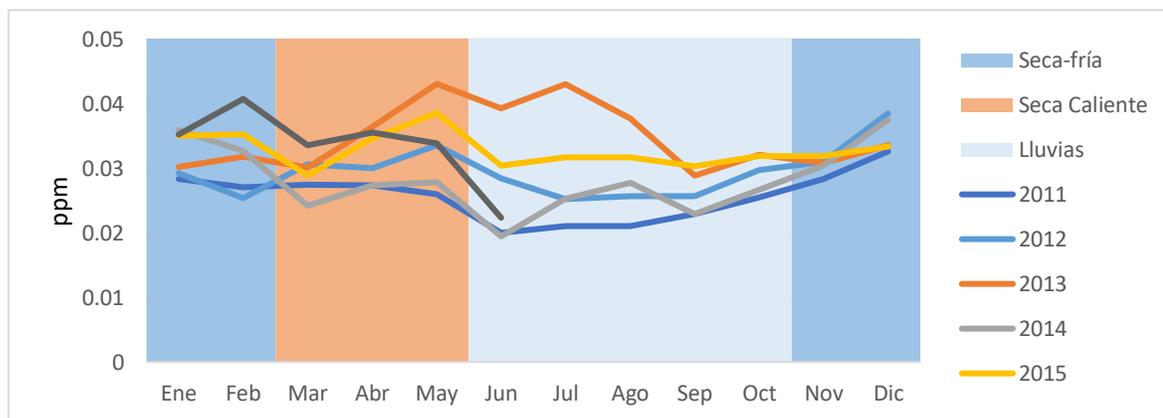
**Gráfica 2.41. Concentración mensual promedio de  $\text{NO}_2$ , 2011-2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Al igual que para el  $\text{SO}_2$ , los niveles de  $\text{NO}_2$  siguen un comportamiento irregular pero estable a lo largo de los años, salvo por los meses de septiembre a diciembre, en los que se logra apreciar una unificación en el comportamiento con una tendencia al alza.

**Gráfica 2.42. Concentración mensual de  $\text{NO}_2$  por año, 2011-2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

#### 2.4.6. Monóxido de Carbono (CO)

La información obtenida para este contaminante en el periodo 2000-2009 se vuelve más irregular con los años; además de que sólo se contó con un año de información para las estaciones Aeropuerto, San Cristóbal y San Mateo. Del año 2000 al 2006 se cuenta con información suficiente para afirmar que las concentraciones de CO se mantuvieron por debajo de la mitad del límite del promedio móvil de 8 horas. Presentó tendencia a la baja desde el año 2000.

Las concentraciones más elevadas se concentraron en el oeste de la ZMVT, las estaciones que mayores concentraciones registraron fueron Toluca-Centro (CE) y Oxtotitlán (OX), zonas caracterizadas por altos niveles de tráfico vehicular.

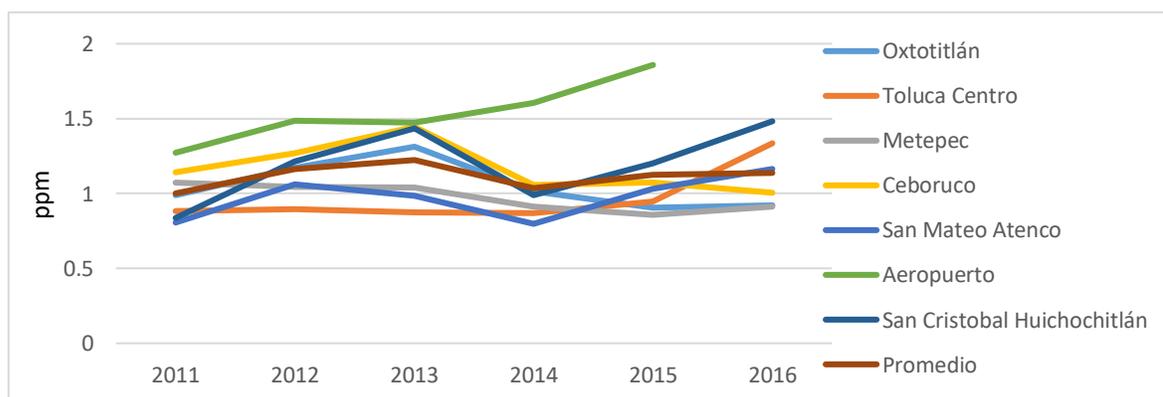
La información obtenida del año 2011 a 2016 es muy irregular, en la estación Oxtotitlán (OX) se tienen aproximadamente 400 días inválidos; seguido por Ceboruco (CB) y Aeropuerto (AP) con al menos 300 días con información insuficiente.

Con la información que se cuenta se puede observar que la estación Aeropuerto (AP) presentó tendencia alcista; desde el inicio del periodo analizado se destacó como la estación con mayor concentración de CO (Véase *Gráfica 2.43.*) La segunda estación con mayores niveles es San Cristóbal Huichochitlán (SC).

La estación Toluca-Centro (CE) inició en 2011 con niveles bajos en comparación con el resto de las estaciones, pero en 2015 comenzó a incrementar sus niveles llegando a posicionarse en lo que va del año 2016 como la segunda estación con mayor concentración (la estación Aeropuerto dejó de funcionar a finales de 2015).

Es importante resaltar que todas las estaciones se encuentran muy por debajo del límite establecido de 11 ppm.

**Gráfica 2.43. Promedio anual de la concentración de CO por estación de monitoreo, 2011-2016**

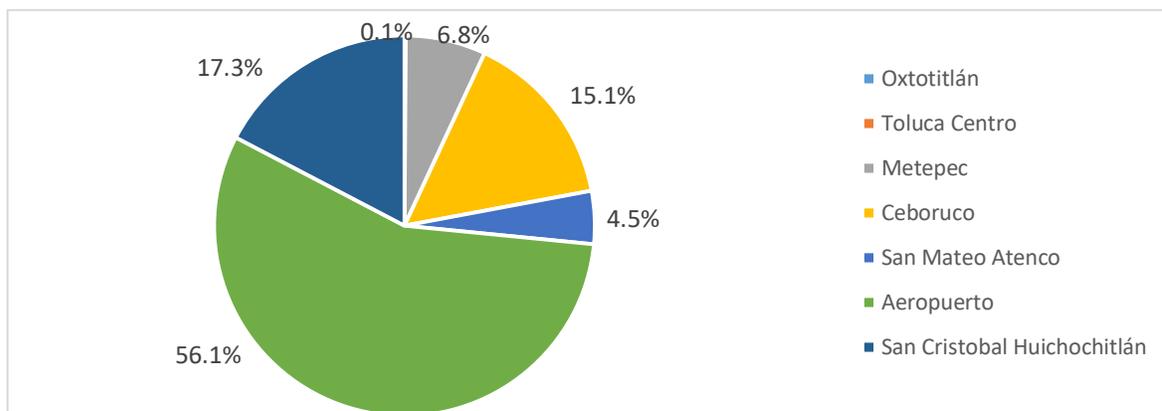


Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

La estación que registró más del 50% del total de niveles máximos de CO fue la estación Aeropuerto (AP), esto puede explicarse ya que el equipo de monitoreo estaba ubicado a nivel de la carretera, midiendo directamente el CO proveniente de los autos, lo que disparó el indicador. La estación que le sigue es San Cristóbal Huichochitlán con el 17% de estos.

Cabe destacar que la estación Toluca Centro no registró ningún valor máximo, y Oxtotitlán lo hizo tan solo el 0.1% de las veces. (Véase *Gráfica 2.44.*)

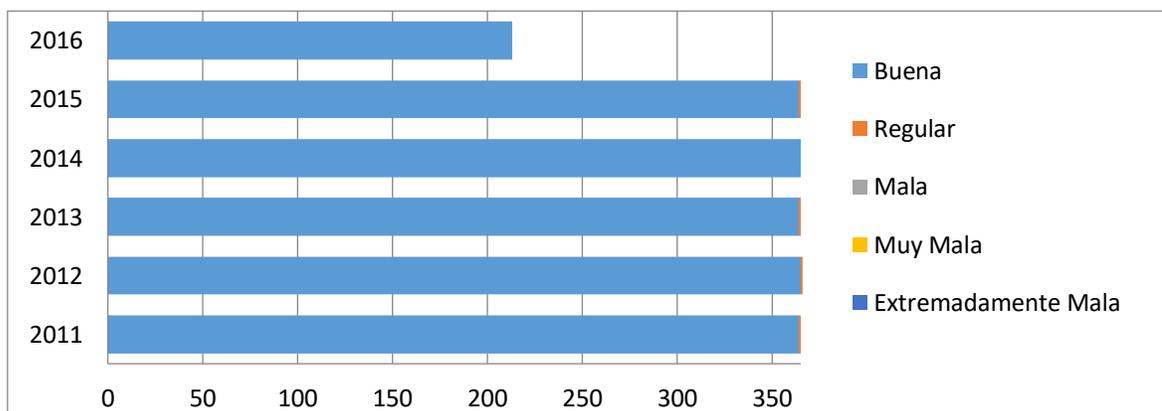
**Gráfica 2.44. Distribución porcentual de los niveles máximos de CO en las estaciones de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

El CO ha mantenido una calidad buena del año 2011 al 2016, registrando tan solo un día con calidad regular en los años 2011, 2013 y 2015, y con calidad buena en la totalidad de los días 2012, 2014 y 2016. El CO no representa un problema grave para la ZMVT en este sentido. (Véase *Gráfica 2.45.*)

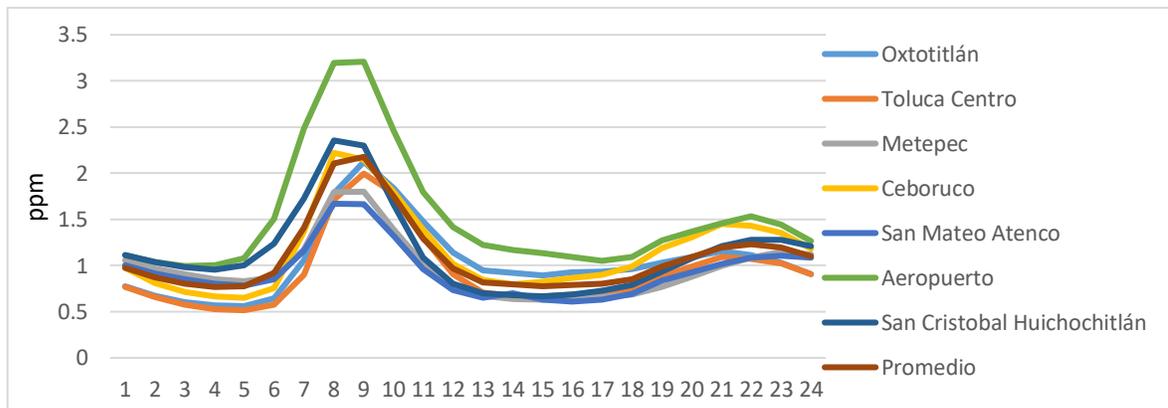
**Gráfica 2.45. IMECA para CO**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

En forma horaria presenta un incremento entre las 6:00 y las 11:00 horas, al igual que el resto de los contaminantes esto se debe a la hora del inicio de las actividades diarias y el uso de estufas, calentadores y vehículos. La *Gráfica 2.46.* muestra un ligero repunte después de las 18:00 horas, hora en que la mayoría de la población finaliza sus labores y hace uso de algún transporte.

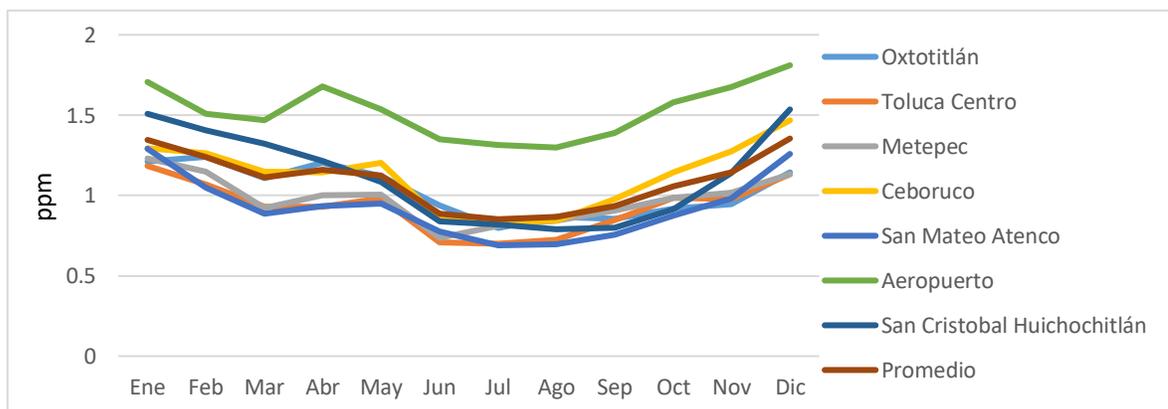
**Gráfica 2.46. Promedio horarios de CO por estación de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Los meses que se eleva la concentración del CO son de enero a marzo y a finales de año de septiembre a diciembre, y se presentan los niveles más bajos de concentración de CO en los meses de junio a agosto. Nuevamente la estación Aeropuerto (AP) tiene niveles de CO que se separan de forma considerable del resto de las estaciones. (Véase *Gráfica 2.47.*)

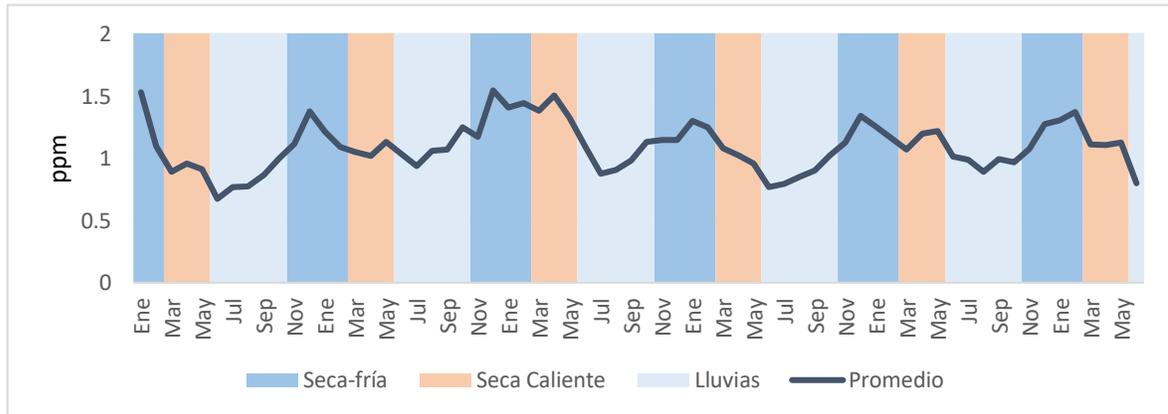
**Gráfica 2.47. Promedio mensual de la concentración de CO por estación de monitoreo**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

El CO tiene una tendencia a presentar mayores concentraciones en los meses de invierno, mientras que la época de lluvias es la que menos niveles presenta. (Véase *Gráfica 2.48.*)

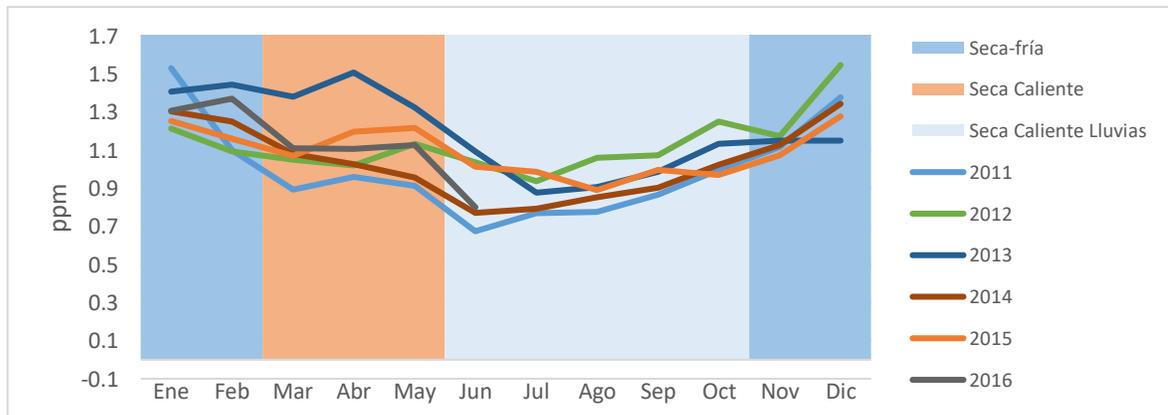
**Gráfica 2.48. Promedio mensual promedio de CO, 2011-2016**



Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

Se puede apreciar en la *Gráfica 2.49.* que la concentración de los distintos años ha seguido un patrón regular en las distintas épocas del año, disminuyen los niveles de CO durante la temporada seca-cálida (salvo en 2013), llegando a valores mínimos en la época de lluvias, y regresa a sus niveles originales durante el invierno.

**Gráfica 2.49. Concentración mensual de CO por año, 2011-2016**



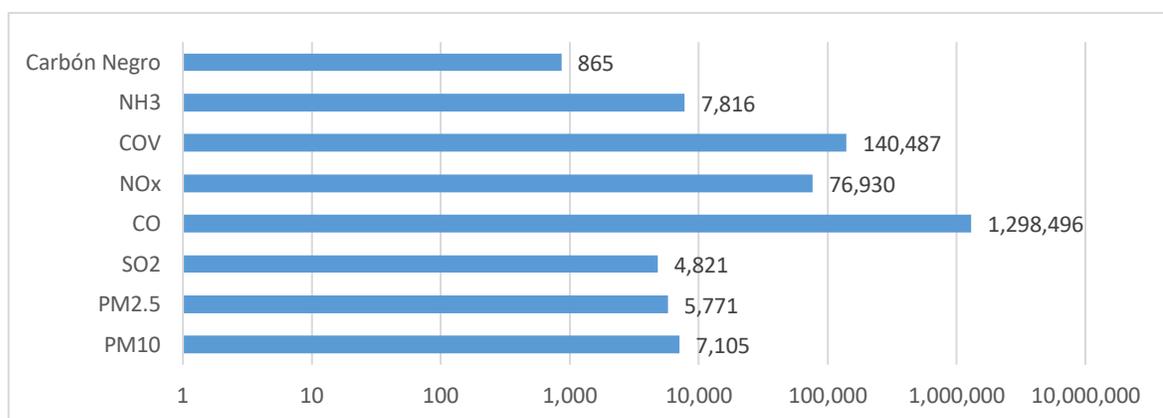
Fuente: Elaboración del autor con datos proporcionados por la RAMA-ZMVT (2011-2016)

## 2.5. Inventario Nacional de Emisiones para la ZMVT

Se han creado inventarios en 1999, 2005 y 2008; contienen información sobre las fuentes emisoras de los principales contaminantes atmosféricos y las cantidades emitidas de estos contaminantes.

A nivel de la ZMVT, los contaminantes siguen un patrón similar al del Estado. Como se muestra en la *Gráfica 2.50.*, el CO es el compuesto de mayor emisión, que es 9 veces superior al segundo de mayor emisión que son los COV precursores del ozono y seguidos de cerca por los óxidos de nitrógeno.

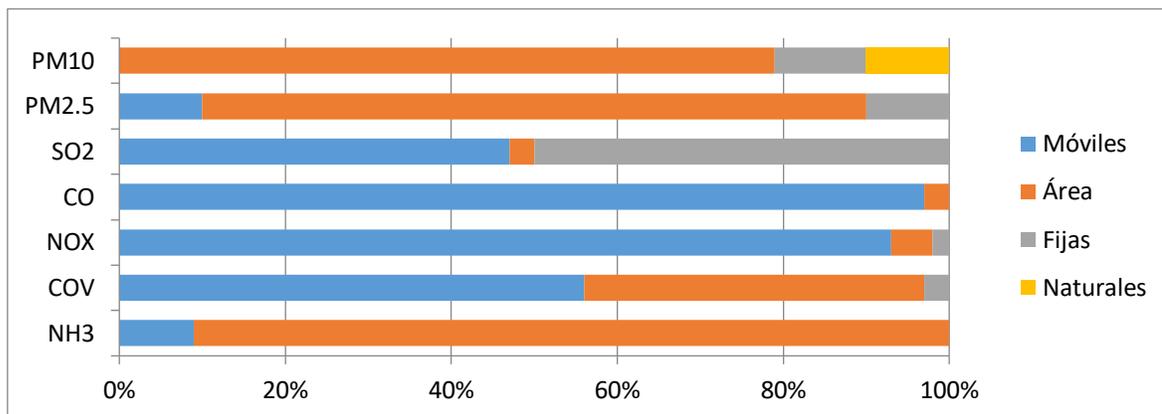
**Gráfica 2.50. Emisión de contaminantes en la ZMVT en 2008 (toneladas).**



Fuente: Elaboración del autor con de SEMARNAT (2014).

Según datos del Inventario de Emisiones del 2005 para la ZMVT los vehículos automotores eran los principales emisores de COVs, NO<sub>x</sub> y CO, además de ser emisores importantes de SO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub>; las PM<sub>10</sub> eran emitidas en su mayoría por suelos sin vegetación, mientras que las fuentes de área eran las principales emisoras de NH<sub>3</sub> (Gobierno del Estado de México, 2007).

**Gráfica 2.51. Distribución porcentual de las emisiones en la ZMVT por tipo de fuente, 2008**



Fuente: Elaboración del autor con datos de SEMARNAT (2014)

Para 2008 las fuentes fijas emitían el 50% del  $\text{SO}_2$  de la ZMVT, siendo la industria de la celulosa y el papel la principal emisora. Las fuentes de área son las principales emisoras de  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$  con 81% y 79% respectivamente y se debe al uso de leña para la combustión doméstica.

Sin embargo, se considera que las fuentes móviles son las principales emisoras de contaminantes de la ZMVT debido al uso de combustibles fósiles como el diésel y la gasolina; emiten un 97% del CO por una mala combustión y la carencia de sistemas de control de emisiones; 93% de  $\text{NO}_x$  debido al proceso de oxidación del combustible durante la combustión; 56% de los COV causado por la baja velocidad de la circulación y la falta de convertidores catalíticos y 47% de  $\text{SO}_2$ .

Los vehículos privados y comerciales con un peso mayor a tres toneladas son el principal problema en la entidad ya que emiten un 63% de CO, 56% de  $\text{NO}_x$ , 53% de COV, 48% de  $\text{SO}_2$ . Por su parte, los autos particulares (tipo sedán) son la segunda fuente que más contaminantes emite con 19% del CO, 15% de los  $\text{NO}_x$ , 27% de COV, 21% de  $\text{SO}_2$ , mientras que el transporte urbano y los taxis emiten el 29% de  $\text{NO}_x$ , 5% de COV, 10% de  $\text{SO}_2$ .

## Conclusiones

La situación atmosférica dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca presenta problemas con dos de los contaminantes analizados: material particulado y

ozono, siendo el primero el que presenta la situación más grave, todas las estaciones de monitoreo registraron niveles superiores a los límites establecidos para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, durante todo el periodo analizado. Por su parte, el ozono también presenta incumplimientos a la norma; sin embargo, estos incumplimientos son esporádicos.

El resto de los contaminantes, se han mantenido por debajo de los límites establecidos, determinando así que no presentan un riesgo para la población.

Analizando la temporada del año se puede determinar que la mayoría de los contaminantes presentan sus mayores niveles durante la temporada seca fría y seca caliente; es decir, entre los meses de noviembre y mayo, siendo más marcado este comportamiento en el material particulado, el ozono y el monóxido de carbono.

Por otro lado, en el análisis del Inventario Nacional de Emisiones se observó que aquellas fuentes que presentan una mayor emisión de contaminantes son las fuentes móviles y las fuentes de área, mismas que están estrechamente ligadas con la cantidad de vehículos automotor.

### **Capítulo 3: CONTRASTE DE LA ZMVT EN CON OTRAS REGIONES DE MÉXICO**

Una vez evaluados los niveles de contaminación en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, es preciso comparar la situación de la región con el resto del país para determinar si la región presenta un patrón distinto al nacional, ya sea más crítico o más controlado; es por esta razón que en el presente capítulo se evaluará la contaminación atmosférica a nivel nacional, y se analizará el comportamiento de los contaminantes del aire en distintas demarcaciones del territorio nacional.

#### **3.1. Inventario Nacional de Emisiones (INEM)**

El Inventario Nacional de Emisiones (INEM) está conformado por información sobre la cantidad de emisiones de contaminantes de fuentes fijas, fuentes de área, fuentes naturales y fuentes móviles. El primer INEM se publicó en 2006 y reportó datos de 1999, éste fue únicamente para estados fronterizos, posteriormente se publicaron el INEM 2005 y el de 2008, en los cuáles se incluyeron todos los municipios del país.

Los contaminantes que fueron registrados en el INEM, para las 32 entidades federativas, son las partículas menores a 10 micrómetros  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , bióxido de azufre  $SO_2$ , monóxido de carbono CO, óxidos de nitrógeno  $NO_x$ , compuestos orgánicos volátiles COV y Amoniacó  $NH_3$ .

Entre las fuentes fijas encontramos plantas industriales manufactureras o de producción, sus emisiones provienen de equipos estacionarios o fuentes fugitivas no confinadas. Las fuentes de área son parecidas a las fijas; sin embargo, se encuentran dispersas y son muy numerosas, por lo que se han agrupado por separado, emiten contaminantes en cantidades bajas, son establecimientos comerciales y de servicios como: terminales de autobuses, rellenos sanitarios, aeronaves, locomotoras, entre otras (INECC, 2014b).

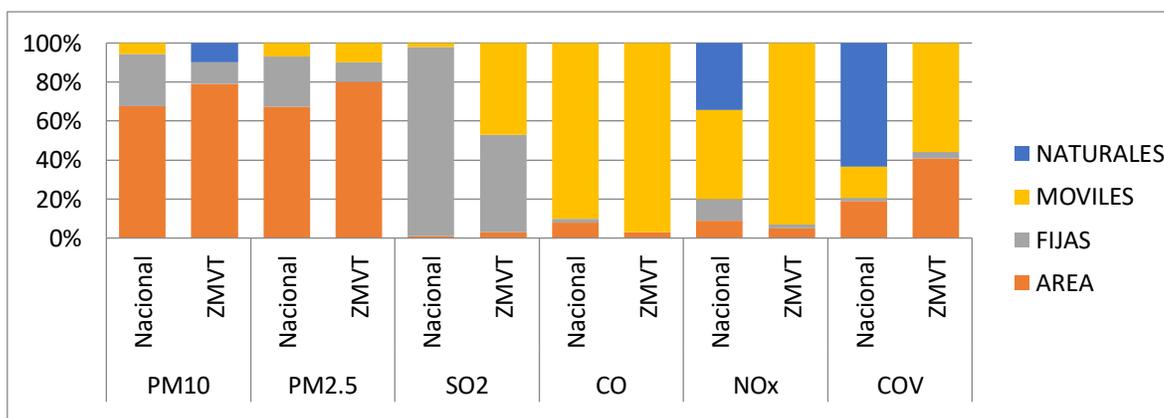
Las fuentes móviles se dividen en dos: las no carreteras y las que circulan en la carretera; las primeras contemplan los equipos automotores o portátiles que tienen prohibida su operación en caminos públicos, son utilizados en actividades de construcción, agrícolas, además de vehículos y botes recreativos, equipo de jardinería, motores auxiliares, etcétera; en cambio, las carreteras incluyen vehículos automotores

que circulan en las zonas urbanas como automóviles, camionetas, camiones de carga y pasajeros, etcétera (INECC, 2014b).

Por último, las fuentes naturales emiten contaminantes sin que las actividades humanas sean causas directas, se dividen en biogénicas y geogénicas. Las biogénicas se refieren a las emisiones producidas por bosques o cultivos, y a los óxidos de nitrógeno que surgen del suelo; mientras que las geogénicas provienen de volcanes, géisers, manantiales de aguas sulfurosas y filtraciones de aceite en ambientes marino (INECC, 2014b).

Con los datos de este estudio se pudo analizar el porcentaje de contaminantes emitido por los diferentes tipos de fuentes, el material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) proviene en su mayoría de las fuentes de área (tanto a nivel nacional como en la ZMVT), el bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es emitido en gran parte por fuentes fijas a nivel nacional; sin embargo, en la ZMVT es emitido en un 50% y 47% por fuentes fijas y móviles respectivamente, el monóxido de carbono (CO) proviene en su mayoría de las fuentes móviles, en específico de los autos (SEMARNAT, 2011), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) proviene también de las fuentes móviles en la ZMVT. En cambio, a nivel nacional un 46% es emitido por fuentes móviles y un 34% por fuentes de área, los compuestos orgánicos volátiles (COV) e la ZMVT provienen de fuentes de área y móviles, mientras que a nivel nacional las fuentes naturales son las principales emisoras. (Véase *Gráfica 3.1.*)

**Gráfica 3.1. Distribución porcentual de los contaminantes por Tipo de Fuente**

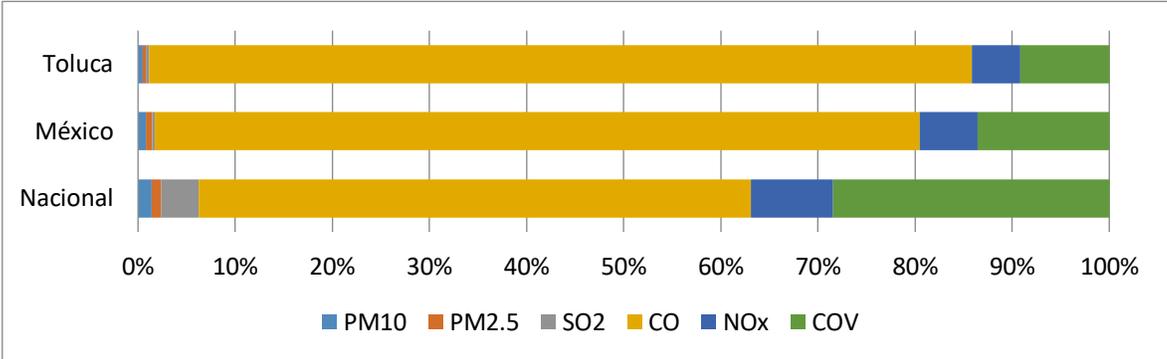


Fuente: Elaboración del autor con datos del INEM 2005

Como se observa en la *Gráfica 3.2.*, la cantidad de contaminantes emitidos en las entidades sigue un patrón similar. El CO es el contaminante que representa más del 50%

de las emisiones, es importante mencionar que para la ZMVT representa un 84% del total de emisiones; seguidos por los COV con un 9%, y los NO<sub>x</sub> que representan 5% total de las emisiones. A nivel nacional el SO<sub>2</sub> y el PM<sub>10</sub> se emiten en más del 1% cada uno, mientras que a nivel estatal y de la ZMVT las PM y el SO<sub>2</sub> representan menos de este 1% del total de las emisiones.

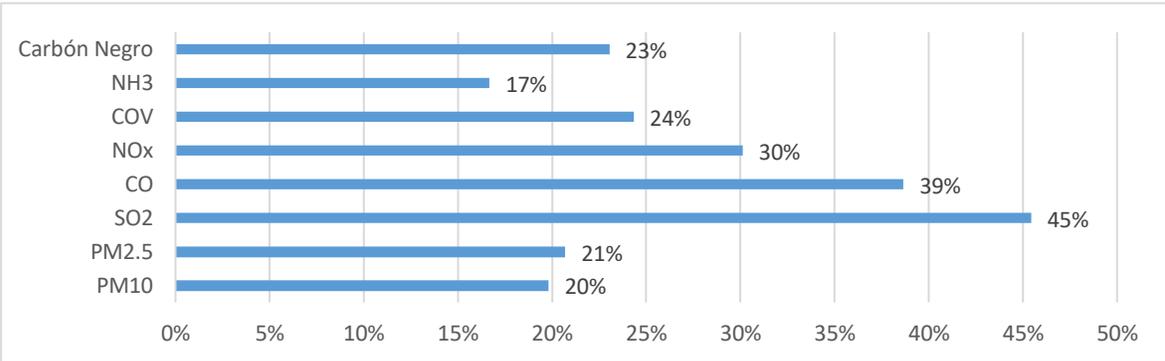
**Gráfica 3.2. Distribución porcentual de los contaminantes emitidos en 2005**



Fuente: Elaboración del autor con datos del INEM 2005

La ZMVT contribuye a las cantidades de contaminantes emitidos en el Estado de México con los porcentajes expresados en la *Gráfica 3.3*. A pesar de que esta región representa tan solo el 11.9% del territorio estatal, contribuye a la emisión de contaminantes de forma importante, siendo más notorias las emisiones de SO<sub>2</sub>, monóxido de carbono (CO) y de óxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

**Gráfica 3.3. Producción de contaminantes en la ZMVT respecto a la producción estatal**



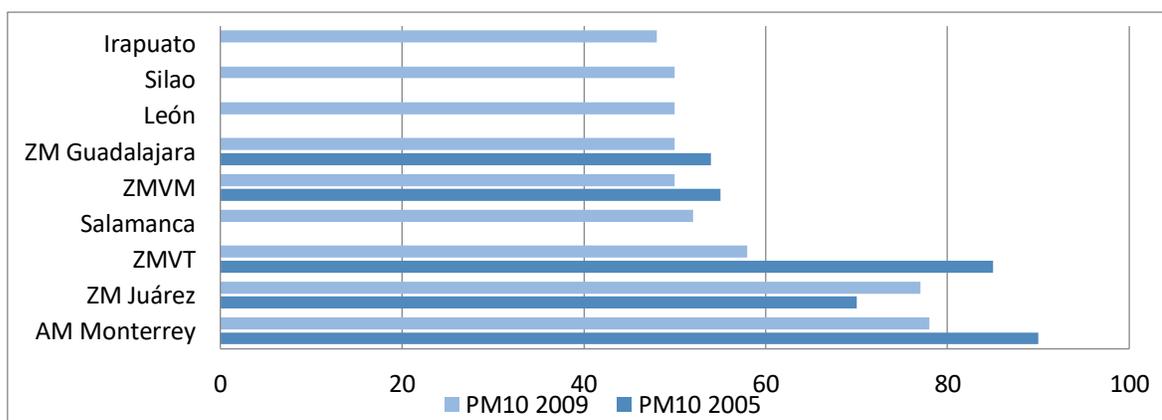
Fuente: Elaboración del autor con datos del INEM 2008

### 3.2. PM<sub>10</sub> en México

Para 2009 sólo 17 redes en México contaban con información de tres años consecutivos de concentraciones de PM<sub>10</sub>, a pesar de que la calidad de la información no era la óptima para realizar un diagnóstico confiable sobre la exposición de la población en nueve entidades: Salamanca, Irapuato, León, Silao, Cd. Juárez, Toluca, Monterrey, Guadalajara y el valle de México (INE-SEMARNAT, 2011).

De este diagnóstico se concluyó que las ciudades en las que la población estuvo expuesta a concentraciones mayores de PM<sub>10</sub> fueron Monterrey, Cd. Juárez, y Toluca además de que para Cd. Juárez las concentraciones de PM<sub>10</sub> aumentaron un 10% de 2005 a 2009 (Véase Gráfica 3.4.), Mexicali es una ciudad que generalmente presenta muy altas concentraciones de PM<sub>10</sub> pero no pudo ser clasificada ya que la información con la que se contaba no era suficiente. Las ciudades con menos exposición a estas partículas fueron Irapuato, Silao y León.

**Gráfica 3.4. Exposición de la población a las PM<sub>10</sub> (Concentración promedio anual ponderada por población en µg/m<sup>3</sup>)**



Fuente: INE-SEMARNAT (2011).

Entre las poblaciones en las que se redujo la concentración de PM<sub>10</sub> de 2005 a 2009 se encuentran Toluca, Valle de México, Guadalajara y Monterrey. Es importante destacar el caso de Toluca, ya que de 2005 a 2009 se tuvo una mejoría del 30%, cabe aclarar que para 2009 sólo se consideraron 7 de las 9 estaciones con las que cuenta la entidad, las estaciones de Aeropuerto (AP) y Centro (CE) no funcionaron durante este año. A pesar de esto Toluca se encuentra entre las tres ciudades más contaminadas con

PM<sub>10</sub>, al igual que Juárez y Monterrey; por otro lado las tres poblaciones menos contaminadas son Silao, la Zona Metropolitana de Guadalajara e Irapuato, no dejando de lado que los indicadores calculados para estas ciudades apenas cumplieron los límites. (SEMARNAT, 2011)

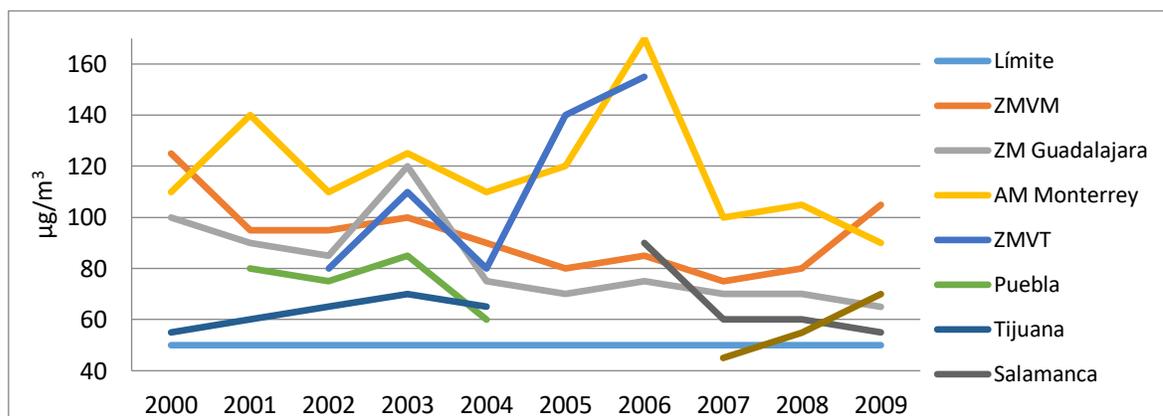
Para 2013 los promedios anuales más altos se registraron en Mexicali, Ciudad Juárez y Pachuca, mientras que los más bajos se tuvieron en el Distrito Minero de Molango, Silao y Ensenada. En la ZMVT no se cumplió la NOM-025-SSA1-1994 este año, ni para el límite de 24 horas, ni el límite anual.

Las zonas metropolitanas de Monterrey, Guadalajara y Toluca fueron las entidades que registraron el mayor número de días de concentración no aceptable por la NOM-025-SSA1-1994, seguida por la ZMVM y León, mientras que Silao y Salamanca registraron la mayoría de días aceptables, es importante considerar que sólo se contó con información de 4 años para estas entidades y que algunos días no se registraron datos válidos.

Mientras que las ciudades de Puebla y Salamanca muestran mejoría en la cantidad de días aceptables, las zonas metropolitanas de Toluca y Valle de México muestran un aumento en los días no aceptables para los últimos tres años, siendo Toluca la ciudad con la problemática más fuerte para este indicador.

En la *Gráfica 3.5*. se observa que todas las ciudades registraron niveles más altos que el límite establecido, en el área metropolitana de Monterrey se registraron niveles casi del triple de los permitidos, mientras que la ZM del Valle de México tuvo niveles del doble de los límites establecidos. La ZM de Guadalajara tiene niveles decendientes, por su parte, la ZM del Valle de Toluca registró una tendencia a la alza, llegando a niveles muy elevados en 2006 equiparables al AM de Monterrey, a partir de ese año no se cuenta con información suficiente para obtener el indicador.

**Gráfica 3.5. Evaluación del cumplimiento del límite anual para el promedio aritmético de PM<sub>10</sub> en las regiones del país.**



Fuente: INE-SEMARNAT (2011).

De acuerdo con un estudio de la OMS (2016c) que contempló 2972 ciudades de 105 países, Toluca se encontró en la posición 302 del ranking de las ciudades más contaminadas con PM<sub>10</sub> con una promedio anual de 80 µg/m<sup>3</sup>, lo que la posiciona en el percentil 13 de las ciudades con mayor polución.

En este mismo estudio se incluyeron otras 8 ciudades de México, y Toluca se encontró sólo por debajo de Monterrey que contó con una medición de 86 µg/m<sup>3</sup>.

### 3.3. PM<sub>2.5</sub> en México

En 2009 solamente se medían estas partículas en cuatro zonas metropolitanas: Mexicali, Monterrey, Guadalajara y Valle de México; sin embargo, el análisis de promedio anual hecho por la SEMARNAT se realizó únicamente para Monterrey y Valle de México por la calidad de la información reportada. Ambas ciudades mostraron una reducción en sus concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, sobre todo Monterrey, con una disminución del 25%.

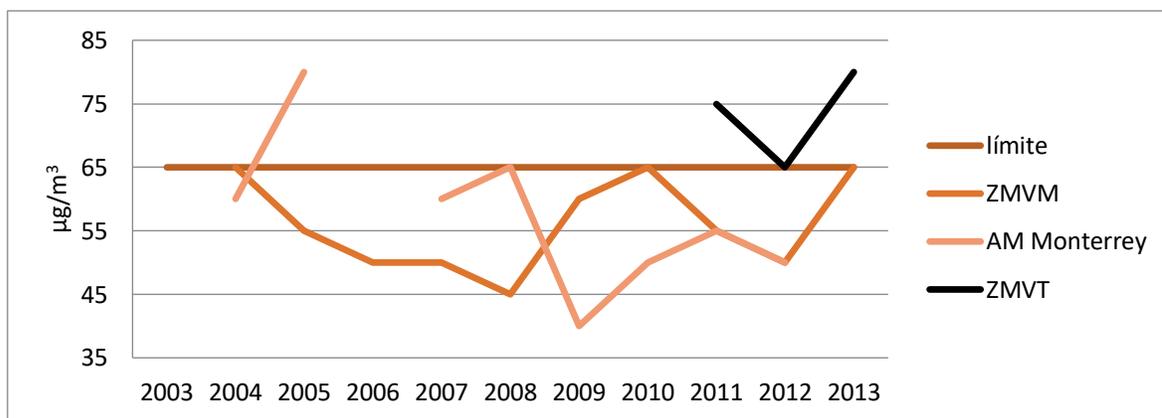
En el análisis de la distribución de los días con calidad del aire buena, regular y mala (hasta 2009) se pudo contemplar también la zona metropolitana de Mexicali. En éste se concluyó que, a pesar de la falta de información, en Mexicali la cantidad de días con mala calidad del aire fue mayor que los días con buena calidad, contrario al Valle de México y Monterrey en los que los días con buena calidad superaron en buena proporción a los que tuvieron mala calidad, sin embargo las tres zonas coinciden en tener

una proporción importante de días con calidad regular. A partir de 2009 la ZMVM y Monterrey contaron con más del 50% de días con calidad buena.

La ZMVT cuenta con información de 2011 a 2013, estos años registró entre el 9 y 10% de días con calidad mala, entre un 59% y 63% con calidad regular y sólo un 30% con buena calidad del aire (Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, 2014).

En 2013 se obtuvo el límite anual para 9 ciudades, de las cuáles Mérida fue la única en cumplir con este límite, mientras que la ZMVT fue la segunda ciudad con mayor concentración.

**Gráfica 3.6. Evaluación del cumplimiento del promedio aritmético anual de PM<sub>2.5</sub> en las regiones del país.**



Fuente: Elaboración del autor con datos de la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental (2014).

### 3.4. Ozono (O<sub>3</sub>) en México

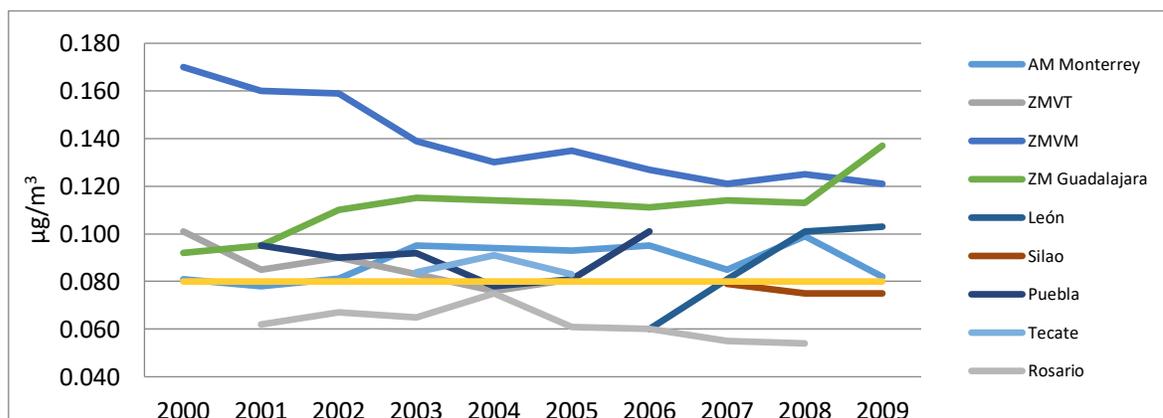
En el año 2009, fueron 7 las ciudades que contaron con datos suficientes para poder calcular la concentración promedio anual ponderada por la población (CPAPP): Silao, San Luis Potosí, León y las zonas metropolitanas de Juárez, Monterrey, Guadalajara y el Valle de México. La única que cumplió con la normatividad fue San Luis Potosí, por otro lado, las poblaciones que presentaron una mayor concentración de ozono fueron la ZMVM, ZMG, Silao y León, en ese orden. La concentración del Valle de México fue superior en un 8% a Guadalajara a pesar de que desde 2005 el indicador se redujo un 13% en la ZMVM e incrementó un 25% en la ZMG (Véase *Gráfica 3.7.*)

En 2013 se contemplaron 21 ciudades para comparar el límite de una hora y ocho horas (establecido por la NOM-020-SSA1-1993), se pudo observar que sólo Ciudad Juárez, Mérida, Chihuahua y Celaya cumplieron ambos, la ZMVT inclumplió estos límites; sin embargo, no se encuentra entre las ciudades con concentraciones más elevadas (ZM del Valle de México y Guadalajara) (Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, 2014).

Por su parte, en el número de días con calidad del aire buena, regular y mala, resalta la mala calidad del aire en el Valle de México, a pesar de que ha mejorado su calidad a lo largo de los años, en 2012 los días con mala calidad son superiores al 32%, lo que no sucede en ninguna de las otras ciudades y zonas. La segunda zona con mayor concentración de días con mala calidad es Guadalajara, en el periodo 2003-2013 alcanzó la máxima cantidad de días malos en 2008 con el 38% de los días, y cuenta aproximadamente con 200 días cada año con calidad regular. La ZMVT ha tenido una tendencia decreciente de cantidad de días malos, en 2000 se registraron 38, mientras que para 2013 sólo se tuvieron 4 (Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, 2014).

Como se observa en la *Gráfica 3.7.* todas las ciudades comparadas sobrepasaron la concentración límite para 8 horas (a excepción de Rosario); en general, el comportamiento del contaminante en la ZMVT es regular. La Zona Metropolitana del Valle de México y la de Guadalajara son las ciudades con niveles más elevados, la primera tiene una tendencia a la baja y la segunda a la alza.

**Gráfica 3.7. Evaluación del cumplimiento del límite anual para el promedio móvil de 8 horas de O<sub>3</sub> en las regiones del país.**



Fuente: INE-SEMARNAT (2011).

### 3.5. Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) en México:

El SO<sub>2</sub> se mide en una gran cantidad de estaciones de monitoreo, sin embargo, a 2009 sólo se contó con información para tres años consecutivos en 14 redes, y de estas, únicamente 8 tuvieron información de calidad para obtener un diagnóstico de la exposición de la población al contaminante: Irapuato, Salamanca, León, Puebla, Silao, ZMVM, Monterrey y Guadalajara (SEMARNAT, 2012).

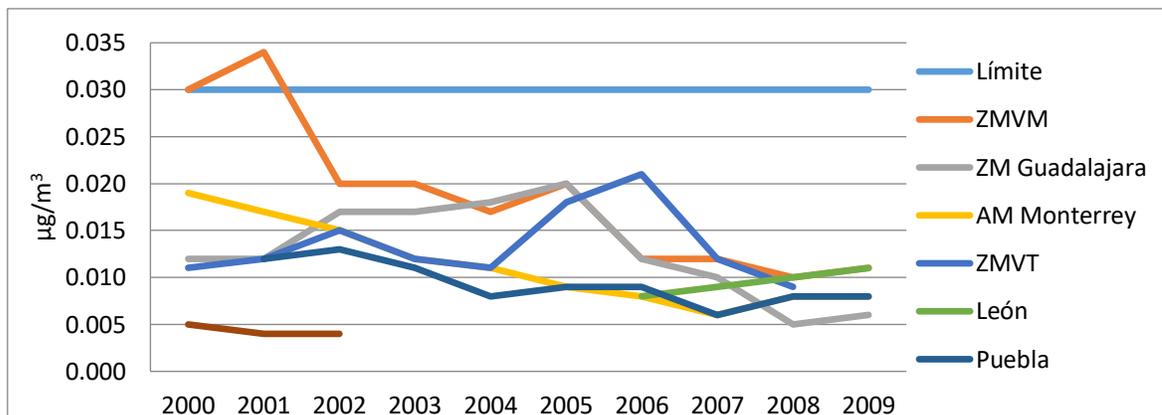
En términos de la concentración promedio anual ponderada por la población (CPAPP) se observó que en 2009 las ciudades de Salamanca e Irapuato contaron con una exposición promedio superior al resto de las ciudades mencionadas en el párrafo anterior, a pesar de que Salamanca tuvo una reducción del 70% comparado con su situación en 2005; otras ciudades que tuvieron reducción en la exposición fueron Puebla, Monterrey, el valle de México y Guadalajara, haciendo notable la reducción del 40% en el valle de México y Guadalajara con respecto al 2005 (INE-SEMARNAT, 2011)

Salamanca, Irapuato y León fueron las ciudades más contaminadas con SO<sub>2</sub> en 2009, siendo Silao la ciudad más limpia. Durante el periodo 2000-2009 Salamanca fue la ciudad con la mayor problemática con el SO<sub>2</sub>, sin embargo a partir de 2003 presentó una constante mejora.

En la *Gráfica 3.8.* se puede observar que a excepción de la ZMVM todas las estaciones se encontraron muy por debajo del límite establecido. La ZMVT tuvo niveles por debajo de la mitad del límite, excepto en 2005 y 2006 (año en el que fue la región con

mayor concentración), en general tiene un comportamiento estable. La ZMVM y Puebla tienen tendencia a la baja.

**Gráfica 3.8. Evaluación del cumplimiento del límite anual para el promedio móvil horario de SO<sub>2</sub> en las regiones del país.**



Fuente: INE-SEMARNAT (2011).

### 3.6. Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en México:

En el 2009 sólo se contó con información de tres años consecutivos en 15 redes, sin embargo, únicamente cuatro regiones pudieron ser diagnosticadas sobre la exposición de la población a este contaminante: San Luis Potosí, y las zonas metropolitanas de Monterrey, Guadalajara y el Valle de México (SEMARNAT, 2012)

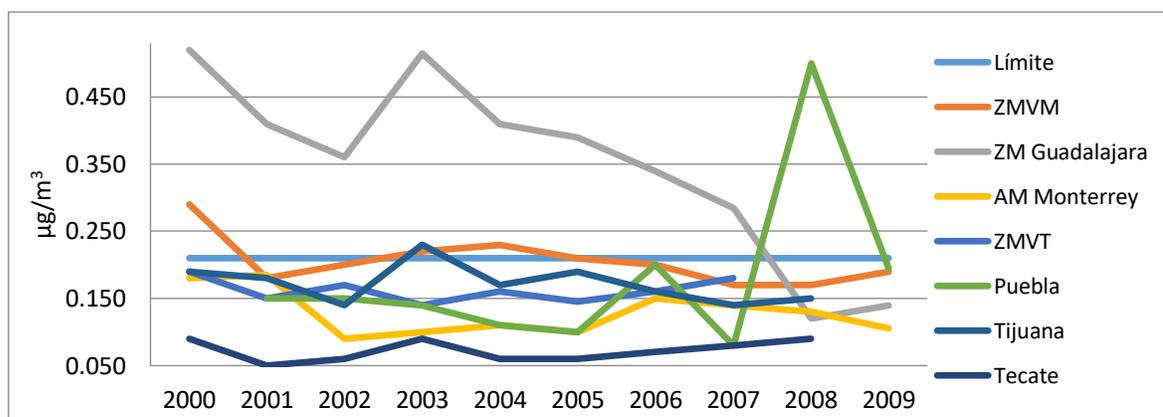
En términos de la concentración promedio anual ponderada por la población (CPAPP), las ciudades más contaminadas en 2009 con NO<sub>2</sub> son las zonas metropolitanas del valle de México y Guadalajara, a pesar de mostrar una reducción de la exposición del 16% en ambas ciudades desde 2006. La ciudad menos contaminada fue San Luis Potosí, esta ciudad no tiene problemas de contaminación con NO<sub>2</sub>.

Hablando de cantidad de días con calidad del aire buena, regular y mala, fue posible realizar el análisis para más ciudades. En 2009 hubo ciudades que no contaban con información suficiente o que no realizaron mediciones como Toluca, San Luis Potosí y todas las redes de Baja California.

Entre las ciudades con mayor cantidad de días con calidad mala están las zonas metropolitanas del Valle de México y Guadalajara; en contraste con Monterrey, León, San Luis Potosí y Mexicali (exceptuando el 2009) que tuvieron una mayor cantidad de días con buena calidad.

Como se puede observar en la *Gráfica 3.9*, la ZM de Guadalajara ha mantenido una tendencia a la baja, pasando de tener el doble de concentración que el límite establecido a tener niveles por debajo de la mitad de este límite; Puebla tuvo un comportamiento atípico durante el 2008. El resto de las entidades mantienen niveles en general por debajo del límite. La ZMVT, Puebla y Tijuana tienen niveles similares, cabe aclarar que no se contó con información suficiente para calcular el valor de 2009 para Tijuana y la ZMVT.

**Gráfica 3.9. Evaluación del cumplimiento del límite de una hora para el NO<sub>2</sub> en las regiones del país.**



Fuente: INE-SEMARNAT (2011).

### 3.7. Monóxido de Carbono (CO) en México

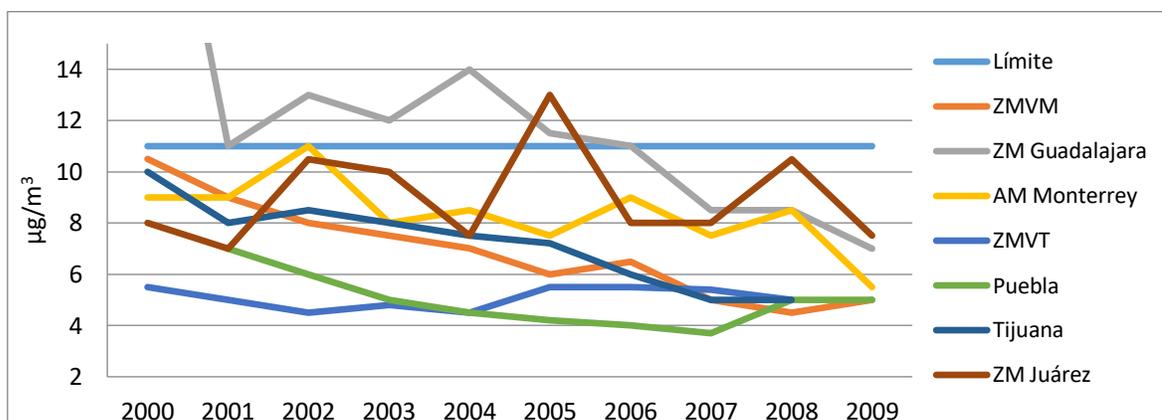
Para este contaminante 16 poblaciones contaron con información para tres años consecutivos, sin embargo el diagnóstico realizado en 2009 sobre la exposición de la población se realizó únicamente en seis ciudades debido a la calidad y cantidad de la información presentada, las poblaciones que incluyó la SEMARNAT en este estudio fueron San Luis Potosí, Salamanca y las zonas metropolitanas del Valle de México, Monterrey, Guadalajara y Juárez.

En la zona metropolitana de Guadalajara la exposición de los habitantes a CO es mayor que en el resto de las ciudades, por su parte, Salamanca presentó una exposición 35% menor a la de Guadalajara. La ciudad con menos exposición a CO fue San Luis Potosí. La SEMARNAT concluyó en 2009 que para esa fecha San Luis Potosí no contaba con problemas de contaminación de CO (SEMARNAT, 2011).

Las ciudades con más días con calidad del aire mala fueron Guadalajara y Mexicali. La mayoría de las ciudades registraron una mejora en su calidad de aire, pero es importante recalcar que la información es sesgada debido a la falta de datos (SEMARNAT, 2011).

La *Gráfica 3.10.* muestra que la ZM de Guadalajara tuvo niveles por encima de los niveles de concentración permitidos, sin embargo, mantuvo una tendencia a la baja; la ZM de Juárez también registró niveles superiores en 2005. Otras ciudades que mantuvieron tendencia a la baja fue la ZMVM, Puebla (exceptuando el repunte de 2008), Tijuana y el área metropolitana de Monterrey. La ZMVT tuvo una tendencia a la alza (contrario al resto de las entidades), y no contó con información suficiente para el año 2009.

**Gráfica 3.10. Evaluación del cumplimiento del límite horario para el SO<sub>2</sub> en las regiones del país.**



Fuente: INE-SEMARNAT (2011).

### Conclusiones

En este capítulo se tomó la información disponible para distintas regiones del país y se observó que la Zona Metropolitana del Valle de Toluca se encuentra entre las regiones más contaminadas, principalmente a causa del material particulado y del ozono. En cuanto al resto de los contaminantes, se puede afirmar que el comportamiento de esta región se encuentra dentro del promedio para las ciudades y zonas metropolitanas analizadas.

Para culminar con el presente capítulo, se presenta la *Tabla 3.1*, que resume la información presentada anteriormente, con el fin de tener un contexto mas general de la

situación de la región. Cabe resaltar la fuerte influencia que tienen las fuentes móviles y de área en la contaminación de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca

**Tabla 3.1. Comparación de la situación de los contaminantes en la ZMVT**

Contaminante	ZMVT	Nacional
PM <sub>10</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Principales fuentes: de área (79%) y naturales (10%)</li> <li>-No se cumplió con la norma establecida</li> <li>-Primer ciudad con mayor exposición de la población en 2005, y tercera en 2009</li> <li>-Segunda región con mayor número de días con mala calidad del aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Principales fuentes: de área (68%) y fijas (26%)</li> <li>-No se cumplió con la norma establecida</li> </ul>
PM <sub>2.5</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Principales fuentes: área (80%)</li> <li>-Segunda ciudad con mayor concentración en 2013</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Principales fuentes: área (67%) y fijas (26%)</li> </ul>
SO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Principales fuentes: fijas (50%) y móviles (47%)</li> <li>-Comportamiento estable de la concentración, excepto en 2006 y 2007, años en que fue la región con mayores niveles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Principales fuentes: fijas (97%)</li> <li>-Tendencia a la baja de los niveles</li> </ul>
CO	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Representa el 84.19% de la producción estatal total de contaminantes</li> <li>-Tendencia al alza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Representa 56% de la producción nacional total de contaminantes</li> <li>-Tendencia a la baja</li> </ul>
NO <sub>x</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Principales fuentes: móviles (93%)</li> <li>-NO<sub>2</sub>: Cumplió con la norma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Principales fuentes: móviles (46%) y naturales (34%)</li> </ul>
COV's	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Principales fuentes: móviles (56%) y de área (41%)</li> <li>-9.11% de la producción estatal total de contaminantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Principales fuentes: naturales (64%)</li> <li>-28% de la producción nacional total de contaminantes</li> </ul>
O <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se cumplió con la normativa</li> <li>-Disminución de los días con mala calidad del aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No se cumplió con la normativa</li> </ul>

Fuente: INE-SEMARNAT (2011).

## **Capítulo 4: ESTUDIOS SOBRE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA**

Para poder verificar puntos de vista ajenos a los autores, el objetivo de este capítulo es realizar una revisión de trabajos de investigación que puedan aportar herramientas adicionales para el análisis que se desarrollará posteriormente, de manera que se pueda integrar un trabajo más completo.

Por otro lado, la revisión de estudios similares permitirá contar con un punto de comparación para los resultados obtenidos en el presente trabajo.

### **4.1. Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá**

Este estudio fue presentado en el año 2017 por Mauricio Gaitán, Juliana Cancino y Eduardo Behrentz de la Universidad de los Andes. En este trabajo de investigación se realizó un análisis cuantitativo de la calidad del aire, valorando la situación ambiental en Bogotá, Colombia; y considera datos desde 1997 hasta 2007. Se estudiaron los datos recabados por 15 estaciones de monitoreo distribuidas en la ciudad, mismas que medían la concentración de los 5 contaminantes criterio que fueron analizados en el trabajo.

Durante la investigación se calcularon promedios horarios, diarios, mensuales y anuales; además de generarse series de tiempo para poder observar las tendencias de los contaminantes.

En este análisis se determinó el índice porcentual de excedencias a la norma (IPE), el cual es un indicador que muestra la incidencia de mediciones excedentes a la normativa. Este indicador fue calculado de la siguiente forma:

$$IPE = \sum_i \left( \frac{N_E}{N_D} \right) * 100$$

Donde  $N_E$  es el número de veces en que el promedio horario o diario excede la norma y  $N_D$  el número de datos disponibles para cada una de las estaciones ( $i$ ) de la red de monitoreo.

#### **Resultados:**

Al aplicar este indicador a los datos disponibles se encontró que el contaminante con mayor IPE es el material particulado, llegando a ser del 50% el indicador global en el año 2005, y en la zona industrial llegó incluso a ser del 100% durante este mismo año.

Se concluyó que en Bogotá no había problemas de contaminación del aire para  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  Y  $\text{CO}$ . Caso contrario, el material particulado ( $\text{PM}_{10}$ ) ha superado los niveles aceptados por el reglamento ambiental local y la OMS, de 2001 a 2005.

Aunado a esto, se encontró una mayor interacción entre la concentración de  $\text{PM}_{10}$  y la velocidad de viento, contrario a lo que se pensaba acerca de que el factor meteorológico que más afectaba eran las precipitaciones. Lo anterior se determinó mediante la obtención del coeficiente de correlación (inversa) de Pearson para estas dos variables, el cual resultó tener un valor de 0.65.

Como conclusión se sostiene que el incremento en la concentración de particulado en el aire se debe al crecimiento de la ciudad y la falta de medidas de control en la región (Gaitán et. al., 2007).

#### **4.2. Pronóstico de la Calidad del Aire en el área metropolitana de la Ciudad de México a través del análisis de las series de tiempo de los componentes del IMECA**

En este trabajo de investigación, Cecilia Montero (autor del mismo) realizó un análisis cuantitativo de los componentes IMECA en la Ciudad de México basándose en la teoría de series de tiempo, considerando las normas ambientales establecidas para esta entidad para el periodo 1986 a 2009.

En primera instancia se hizo un análisis de tendencia anual para los contaminantes, posteriormente se analizaron de forma teórica las medidas políticas tomadas por el Gobierno del Distrito Federal para reducir las emisiones de los contaminantes. Finalmente, se hizo un análisis de series de tiempo para poder pronosticar a largo plazo el comportamiento de los contaminantes.

Se hizo además un análisis de regresión, donde la variable dependiente fueron los contaminantes y las independientes fueron factores meteorológicos como la velocidad del viento, humedad, dirección del viento y temperatura.

Para proceder con el análisis de series de tiempo se revisó la tendencia a largo plazo para cada contaminante, se ajustó la serie a una curva de Gompertz, la cual se eligió por su comportamiento asintótico cuando "t" tiende a infinito con el objetivo de determinar el comportamiento a largo plazo de los contaminantes.

Tendencia anual y ajuste de curva de Gompertz:

El autor concluyó que el ozono ( $O_3$ ), óxido de carbono (CO), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y el óxido de nitrógeno (NO) tenían tendencia decreciente; debido a una renovación del parque vehicular, la instalación de sistemas de inyección electrónica en vehículos que circulan en la CDMX y a la disminución en el contenido de azufre en los combustibles empleados en la ciudad. El  $PM_{10}$  ha presentado concentraciones estables a lo largo de los años, mientras que las  $PM_{2.5}$  mostraron concentraciones por encima de los valores permitidos.

El ajuste de curva de Gompertz mostró que la asíntota calculada para el modelo de  $O_3$ , CO y  $SO_2$  tenía un valor menor a la norma establecida por lo que estos contaminantes no constituirían un problema a corto y largo plazo. Sin embargo, el  $NO_2$ ,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se estabilizarían en un punto mayor al límite máximo permitido, por lo que se prosiguió a realizar un modelo ARIMA para estos tres contaminantes con el fin de realizar un pronóstico de su comportamiento.

Modelos ARIMA:

Para el Dióxido de Nitrógeno se tomó información semanal de 2003 a 2009, al ser una serie no estacionaria se le aplicó una diferencia, se propusieron modelos AR(3) y MA(2); se calculó los cuadrados medios de las diferencias (MSD) para decidir el modelo más adecuado, el MSD del AR(3) fue el menor. El análisis de residuales del modelo AR(3) concluyó que los errores tenían media cero, al final se consideró que el modelo ARIMA(3,1,0) era el adecuado para construir pronósticos.

Para el  $PM_{10}$  se tomó información semanal de 1995 a 2009, al ser una serie no estacionaria se le aplicó una diferencia, se propusieron modelos AR(3) y MA(2); se calculó los cuadrados medios de las diferencias (MSD) para decidir el modelo más adecuado, el MSD del AR(3) fue el menor. El análisis de residuales del modelo AR(3) concluyó que los errores tenían media cero, al final se consideró que el modelo ARIMA(3,1,0) era el adecuado para construir pronósticos.

Para el  $PM_{2.5}$  se tomó información semanal de 2003 a 2009, al ser una serie no estacionaria se le aplicó una diferencia, se propusieron modelos AR(2) y MA(2); se calculó los cuadrados medios de las diferencias (MSD) para decidir el modelo más adecuado, el MSD del AR(2) fue el menor. El análisis de residuales del modelo AR(2)

concluyó que los errores tenían media cero, al final se consideró que el modelo ARIMA(2,1,0) era el adecuado para construir pronósticos.

Finalmente, se realizó un modelo de regresión que permitió observar la dependencia del IMECA con respecto a variables meteorológicas como la humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, logrando una  $R^2$  ajustada del 75%.

$$Imeca = 427 - 0.858 * dir\_viento - 1.57 * humed\_rel - 3.06 * temperatura$$

Donde:

*dir\_viento*: dirección del viento en grados Azimut

*humed\_rel*: humedad relativa en porcentaje (%)

*temperatura*: temperatura en grados Celsius (°C)

Se intentó introducir la velocidad del viento en el modelo, pero no era significativo. Los coeficientes en la regresión son negativos, por lo que cada que uno de los predictores incrementa, el índice IMECA disminuye.

El modelo tuvo una R cuadrada ajustada de 75% y el análisis de los residuales mostró normalidad.

En base a los resultados de la regresión el autor concluyó que existen mayores riesgos de concentraciones altas durante invierno, debido a las bajas temperaturas, en marzo el IMECA se eleva por la poca humedad y pocos vientos.

#### **4.3. Desarrollo y aplicación de un modelo de pronóstico de calidad de aire (MP<sub>10</sub>) para Temuco y Padre Las Casas.**

Este estudio fue realizado en Chile en el 2007 por el Laboratorio de Modelación y Análisis Atmosférico del Centro Nacional del Medio Ambiente a petición de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, Región de la Araucanía. El objetivo del estudio fue establecer un instrumento de gestión ambiental que permitiera cumplir con los objetivos del plan de descontaminación en las comunas de Temuco y Padre las Casas.

Se realizó un análisis basándose en información obtenida de los meses de abril a septiembre, de los años 2003, 2004 y 2005; utilizándose información del año 2006 para validar los modelos.

Los modelos elaborados en el estudio son una herramienta para anticiparse a concentraciones elevadas de PM<sub>10</sub> que pongan en riesgo la salud de la población, y así poder tomar medidas de mitigación para reducir los niveles de este contaminante.

Se construyó un modelo de pronóstico de PM<sub>10</sub> utilizando el análisis de regresión múltiple para cada una de las comunas. Tomando como variables independientes el PMCA pronosticado (variable general), y variables propias de cada comuna como la dirección del viento y la temperatura; además de variables con rezago y diferencias.

El modelo incluye un análisis del Potencial Meteorológico de Contaminación Atmosférica, que consiste en una medida meteorológica que cuantifica el potencial de la atmósfera para propiciar la mezcla de contaminantes de forma vertical, así como la dispersión de los mismos.

Se obtuvieron dos modelos para el valor máximo del promedio móvil de 24 horas válidos para el día actual, y otros dos para el día posterior; debido a que se cuenta con una estación de radiosondeo, la cual emite información diaria de la temperatura del aire de acuerdo a la altura, entre otras mediciones. Estos dos casos dependen de si la sonda se lanzó exitosamente o no, es decir, que se cuente o no con información de la radiosonda en el día o no.

La ecuación para pronósticos en Padre Las Casas con sonda válida para el día actual es:

$$MPLE24D0 = -3.585 + 0.824 * MPPL2406L + 9.321 * IMD0 - 1.079 * SDIR928L \\ + 0.234 * SDIR5008L - 0.735 * DTA5008L$$

Dónde:

*MPPL24D0*: Valor Máximo Móvil de 24 horas MP10 de hoy en la estación Padre Las Casas

*MPPL2406L*: Valor Móvil de 24 horas MP10 a las 05 horas local en la estación de Padre Las Casas

*IMD0*: PMCA pronosticado para hoy

*SDIR928L*: Seno de la Dirección del Viento del nivel de 925 hPa hoy a las 08:00 H local Sonda Puerto Montt

*SDIR5008L*: Seno de la Dirección del Viento del nivel de 500 hPa hoy a las 08:00 H local Sonda Puerto Montt

*DTA5008L*: Diferencia entre ayer y hoy de la Temperatura del nivel de 500 hPa a las 08:00 H local Sonda Puerto Montt

En el estudio se observaron relaciones existentes entre la concentración máxima del promedio móvil de 24 horas de material particulado (PM) y variables meteorológicas (como la temperatura y el viento).

Para el caso de Temuco se construyeron modelos para el caso del valor máximo del promedio móvil de 8 horas y de 1 hora, además de modelos con una base de datos ampliada con el objetivo de mejorar el ajuste del modelo de 24 horas.

Las variables que tuvieron un mayor peso en los distintos modelos construidos fueron la temperatura mínima, y los promedios móviles de  $PM_{10}$  en horas fijas.

#### **4.4. Análisis de ozono y óxidos de nitrógeno mediante técnicas de series de tiempo y regresión lineal.**

Este estudio fue realizado por Armando Correa, Roberto Muñoz y Gustavo García, integrantes de la Secretaría del Medio Ambiente en la Ciudad de México, contemplando información de 3 estaciones de monitoreo (Tlalnepantla, Merced y Pedregal) para el periodo de 1986 a 1999.

Para el análisis se consideraron los valores máximos de cada una de las series incluidas en los modelos.

Es importante resaltar que este análisis se dividió en dos partes; en primera instancia se consideró la teoría de series de tiempo para la concentración máxima diaria del ozono, y, por otro lado, se contempló la regresión múltiple para la misma variable.

A pesar de contemplar 3 estaciones de monitoreo, se prestó mayor atención a la estación Pedregal, ya que, de acuerdo con otros estudios, se ha considerado ésta como una guía de los cambios en los niveles de ozono.

El modelo de regresión consideró como variables independientes la concentración media diaria de ozono, los contaminantes precursores de ozono ( $NO_2$  y  $NO_x$ ), así como la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

El ozono presentó una débil relación con las variables independientes al realizarse el análisis de correlación, 0.3 con los contaminantes precursores, 0.3 con los parámetros meteorológicos; estos valores se utilizaron para la construcción del modelo de regresión múltiple.

Se comparó el modelo ARIMA con el modelo de regresión obtenidos para la estación Pedregal, y se encontró que el primero propone que las variaciones de  $O_3$  en el pasado no afectan de forma obligatoria su comportamiento en el futuro, contrario al

modelo de regresión, además de que no considera las variables meteorológicas; por lo que se agregó el resto de las variables independientes.

Así mismo, los autores sostienen que el incremento de los niveles de ozono en los últimos años analizados se debe a un periodo de condiciones meteorológicas extremas, así como un incremento en las fuentes fijas de emisión y la flota vehicular.

Concluyen que la tendencia de los niveles de ozono será ligeramente a la baja. En cuanto al modelo de regresión se pudo concluir que es un contaminante que no presenta un patrón estacional, las variables que más lo afectan son las concentraciones diarias de  $O_3$ , seguido por los contaminantes precursores de ozono del día anterior ( $NO_2$  y  $NO_x$ ).

#### **4.5. Análisis de dependencia usando regresión lineal múltiple y regresión de componentes principales en contaminantes del aire y parámetros meteorológicos: caso de estudio**

Fue presentado en 2014 por Julián Novoa, Daniel Parra, Silvia Quijano, Diana Orrego, y Miguel Becerra; todos investigadores de la Institución Universitaria Salazar y Herrera.

Los autores estudiaron el comportamiento de los contaminantes en la Ciudad de México ( $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NO$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ) y su interacción con las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento). El análisis contempló información diaria de 4 de las 16 estaciones en esta ciudad (Tlalnepantla, Xalostoc, Mercedes y Pedregal) durante los años de 2005 a 2013.

Después de depurar la base de datos, se realizó un análisis de correlación entre las variables y se encontró una fuerte relación positiva entre el ozono y la temperatura, así como una relación inversa moderada con la humedad relativa.

Se establecieron dos tipos de modelos, uno construido mediante el análisis de componentes principales, y el segundo a través de la regresión lineal múltiple. Y se encontró que los modelos con mayor ajuste se obtuvieron a través del método de componentes principales.

El mejor modelo obtenido corresponde al ozono en la estación Tlalnepantla, que fue explicado en un 82% por la temperatura, la humedad relativa, la dirección y la

velocidad del viento. Así mismo se determinó una dependencia del 42 y 36% del NO y el CO respectivamente con relación a las mismas variables meteorológicas.

## **Conclusiones**

Dentro de la bibliografía revisada, que considera el análisis de regresión y de series de tiempo para evaluar la contaminación atmosférica, la mayoría valora, además de las variables que derivan de los niveles registrados de cada contaminante, variables meteorológicas; tales como la temperatura, el viento, las precipitaciones entre otras, mismas que se utilizarán en los modelos a construir en este trabajo.

Por otro lado, ninguno de los estudios analizados considera como variables independientes la cantidad de vehículos registrados, mismas que para cumplir los objetivos del presente trabajo, serán contempladas en todos los modelos construidos.

Así mismo, a partir de que varios de los estudios consideran el análisis de series de tiempo, se incluirán en algunos de los modelos de regresión propuestos variables que derivan de este análisis, tales como rezagos y diferencias, lo anterior para poder nutrir los modelos de características procedentes del análisis de series de tiempo.

## **Capítulo 5: MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE CONTAMINANTES DEL AIRE EN LA ZMVT.**

Para culminar con el desarrollo de este trabajo, se expondrán los cinco modelos estadísticos que permitirán estimar los niveles de cada contaminante, no sin antes presentar la teoría matemática detrás de la construcción de los mismos.

Finalmente, a partir de los modelos construidos, se presentará una propuesta que permitirá contraer los niveles de contaminación atmosférica, y se evaluará el impacto que tendría de acuerdo a los pronósticos de los modelos planteados.

### **5.1. Análisis de Regresión**

El análisis de regresión fue inicialmente desarrollado por Sir Francis Galton en la última parte del siglo XIX. Estudió la relación entre las alturas de padres e hijos y descubrió que las alturas de niños con ambos padres de muy alta o muy baja estatura parecían retornar a la estatura media de la población. Este personaje desarrolló un modelo matemático que describió esta tendencia, por lo que es el precursor de los modelos de regresión actuales (Kutner, 2005).

El análisis de regresión trata de la dependencia estadística de una variable dependiente (generalmente conocida como “Y”) con respecto a una o más variables, denominadas explicativas (conocidas como  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ ), con el objetivo de estimar y/o predecir la media o valor promedio poblacional de la variable dependiente en términos de los valores conocidos o fijos de las variables explicativas (Gujarati, 2004).

La metodología se basa en un conjunto de supuestos que hacen posible que los estimadores poblacionales obtenidos a partir de una muestra, adquieran propiedades que permitan señalar que los estimadores obtenidos son los mejores (Gujarati, 2004).

Este tipo de metodología es ampliamente usado en todo tipo de áreas, desde economía, negocios, disciplinas sociales, ingeniería, física, salud, entre otras. Es precisamente por este amplio margen de aplicaciones que la regresión es tan importante actualmente.

La regresión tiene diversos usos: la descripción de un conjunto de datos y la relación entre estos permite la estimación de parámetros que ayudan a mantener actualizada información necesaria para llevar a cabo un control adecuado, y por último la

predicción que ayuda tomar las medidas necesarias antes de que suceda un determinado evento.

Como se mencionó anteriormente, en cualquier forma de regresión existen dos tipos de variables, las independientes (explicativas o predictoras) y las dependientes (o respuestas). Las primeras son las causantes del movimiento de las variables respuesta.

Existen 3 elementos a considerar en la construcción de un modelo de regresión: la selección de las variables independientes, la elección de una forma funcional de la relación entre las variables, y por último determinar el alcance del modelo (Kutner, 2005).

La importancia de la selección de las variables radica en que las variables elegidas deben ser causales de la variable que se desea explicar para que el modelo construido tenga sentido, también se tiene que considerar que el que un modelo tenga muchas variables no implica que sea un buen modelo, incluso puede estar sobreparametrizado, es decir, tener más variables de las necesarias para describir el fenómeno.

La selección de una forma funcional para el modelo se refiere a la aplicación de un modelo matemático que se ajuste de forma adecuada a la información. Generalmente esta forma no se conoce de antemano, por lo que se tiene que obtener empíricamente a través del comportamiento de las variables.

Las formas más comunes de modelos son lineales y cuadráticas, pero existe una amplia gama de relaciones que se pueden utilizar.

Por último, el alcance del modelo se debe establecer a través de la información que contiene cada una de las variables en la muestra, es decir, el modelo resultante tiene aplicación sólo en valores próximos a la muestra, o dentro del rango de la misma.

Comúnmente se establece que, en los modelos de regresión, el valor de la variable respuesta en la observación  $i$  se denota:  $Y_i$ , de manera similar  $X_i$  representa el valor de la variable predictora en la observación  $i$ ; dependiendo del modelo que se utilice pueden existir diferentes variables independientes, en este caso se establecería  $X_{ji}$  donde  $j$  representa el número de la variable predictora.

Existen diversos tipos de modelos de regresión, éstos se clasifican en modelos lineales y no lineales. Los primeros, tienen una relación lineal entre la variable

dependiente y las variables independientes (implica una relación de primer orden), el comportamiento se puede explicar mediante una línea recta, y las variables no están divididas, ni multiplicadas, ni elevadas por otra variable.

Por otro lado, las no lineales son menos estrictas ya que el modelo puede ser explicado mediante ecuaciones que impliquen algún tipo de curva, estas pueden ser logarítmicas, exponenciales, etc.

Para el desarrollo del presente trabajo lo que se utilizará será un modelo lineal debido a la naturaleza de las variables independientes que son la cantidad de autos, camiones de pasajeros, motos, y camiones de carga, así como su relación con las variables independientes que son los niveles de concentración promedio mensual de cada uno de los contaminantes analizados.

Modelo de regresión con  $k$  variables:

Para el caso del presente trabajo, se desarrollarán modelos de  $k$  variables, en cada modelo un contaminante criterio será la variable dependiente y las variables independientes serán la cantidad de autos, camiones de carga, camiones de pasajeros y motocicletas, así como variables referentes a factores meteorológicos y la temporada del año debido a su relevancia en los niveles de cada contaminante.

El modelo de  $k$  variables tiene la siguiente forma:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i$$

Dónde:

$Y_i$  – La observación  $i$  de la variable dependiente

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  – Los coeficientes de las variables dependientes

$\beta_0$  – Intercepto de la regresión

$X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki}$  – La observación  $i$  de cada una de las  $k$  variables independientes

$\varepsilon_i$  – Error de la observación  $i$

### 5.1.1. Estimación por Mínimos Cuadrados

Debido a que los elementos  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  son desconocidos, es indispensable calcularlos a partir de una muestra; el proceso de estimación de estos parámetros se realiza a través del método de mínimos cuadrados.

El método de mínimos cuadrados fue creado por el matemático Carl Friedrich Gauss, y consiste en un proceso que permite estimar los parámetros *beta* de la regresión de tal forma que la suma de los errores al cuadrado ( $\sum \varepsilon_i^2$ ) sea la menor posible, implicando que los estimadores obtenidos sean los mejores, en otras palabras, el modelo obtenido con estos estimadores es el que mejor se ajusta a la muestra con la que se obtuvo (Gujarati, 2004).

Debido a que el error en cada observación puede ser tanto positivo como negativo, la suma de estos errores puede ser mínima sin la necesidad de hacer ningún ajuste ya que los errores se cancelan unos con otros; sin embargo, los errores individuales pueden ser muy grandes. Para evitar esta situación, el método eleva cada error al cuadrado antes de sumarlos y minimizarlos, es por esta razón que el método se denomina mínimos cuadrados.

El proceso de obtención de los estimadores parte de la ecuación de la regresión:

$$Y_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{1i} + \hat{\beta}_2 X_{2i} + \dots + \hat{\beta}_k X_{ki} + \varepsilon_i$$

La ecuación anterior resume el modelo para cada una de las observaciones  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_N$ , es decir

$$Y_1 = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{11} + \hat{\beta}_2 X_{21} + \dots + \hat{\beta}_k X_{k1} + \varepsilon_1$$

$$Y_2 = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{12} + \hat{\beta}_2 X_{22} + \dots + \hat{\beta}_k X_{k2} + \varepsilon_2$$

⋮

$$Y_N = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{1N} + \hat{\beta}_2 X_{2N} + \dots + \hat{\beta}_k X_{kN} + \varepsilon_N$$

El conjunto de ecuaciones del modelo se puede expresar a su vez en matrices de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \cdots & X_{k1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \cdots & X_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{1N} & X_{2N} & \cdots & X_{kN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix}$$

A su vez la expresión anterior se puede escribir como en la siguiente expresión.

$$Y = X \cdot \hat{\beta} + \varepsilon$$

Donde:

$Y$  – Es la matriz columna de tamaño  $N \times 1$ , que contiene las observaciones de la variable dependiente

$X$  – Es la matriz de tamaño  $N \times (k + 1)$ , que contiene las  $N$  observaciones de las  $k$  variables independientes además de la columna de unos correspondiente al intercepto

$\hat{\beta}$  – Es la matriz columna de tamaño  $k \times 1$ , que contiene los estimadores beta

$\varepsilon$  – Es la matriz columna de tamaño  $N \times 1$ , correspondiente a los  $N$  términos de error

Partiendo de la ecuación anterior se despeja el error y se eleva al cuadrado; recordando que como se está trabajando con matrices para elevar al cuadrado es necesario multiplicar por la matriz transpuesta

$$\varepsilon = Y - X\hat{\beta}$$

$$\varepsilon' \varepsilon = (Y - X\hat{\beta})' \cdot (Y - X\hat{\beta})$$

$$\varepsilon' \varepsilon = (Y' - X' \hat{\beta}') \cdot (Y - X\hat{\beta})$$

$$\varepsilon' \varepsilon = Y'Y - 2\hat{\beta}'X'Y + \hat{\beta}'X'X\hat{\beta}$$

Posteriormente se procede a minimizar el error al cuadrado, derivando la expresión respecto a la matriz beta e igualando a cero se obtiene:

$$-2X'Y + 2X'X\hat{\beta} = 0$$

$$2X'X\hat{\beta} = 2X'Y$$

$$X'X\hat{\beta} = X'Y$$

Para poder despejar la matriz  $\hat{\beta}$  por propiedades de matrices se requiere utilizar la matriz inversa

$$(X'X)^{-1} \cdot (X'X)\hat{\beta} = (X'X)^{-1} \cdot X'Y$$

Debido a la propiedad de que una matriz multiplicada por su inversa es igual a la matriz identidad  $I$ , entonces finalmente se obtiene:

$$I\hat{\beta} = (X'X)^{-1} \cdot X'Y$$

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} \cdot X'Y$$

Esta expresión es la que se utiliza para estimar los coeficientes beta de la regresión.

### 5.1.2. Pruebas de hipótesis para los parámetros

Un buen modelo es aquel que describe un fenómeno con la menor cantidad de variables posibles. Es por eso que una vez que el modelo propuesto ha sido ajustado, es necesario verificar que cada una de las variables sea relevante en el mismo. Para poder probar lo anterior se realiza la prueba de hipótesis que pone en contraste la hipótesis nula

$$H_0: \beta_i = 0$$

y la hipótesis alternativa

$$H_1: \beta_i \neq 0$$

Para esta prueba de hipótesis se ocupa el estadístico de prueba (Mendenhall, 1981)

$$t = \frac{\hat{\beta}_i - 0}{S_{\beta_i}}$$

En el caso particular de esta prueba de hipótesis lo que se busca es tener pruebas suficientes para rechazar la hipótesis nula, es decir, se quiere que la variable asociada al parámetro  $\beta_i$  sea relevante en el modelo, que sea distinto a cero.

Generalmente, para tener un análisis más rápido se evalúa el valor  $p$  (*p-value*) asociado al estadístico de prueba  $t$ , el cual representa la probabilidad de las colas

asociadas al estadístico de prueba en la distribución t de Student; para poder rechazar la hipótesis nula debe ser menor al valor del error ( $\alpha$ ) que se desea.

Para llegar al modelo final es necesario que todas las variables sean relevantes en este, por lo que se eliminan las variables una por una comenzando por aquella con mayor *p-value*, de tal manera que las variables finales tengan un *p-value* inferior al valor  $\alpha$  establecido.

### 5.1.3. Análisis Residual

Una vez que se obtuvo el modelo final, es preciso verificar los supuestos en los que se basa el modelo de regresión, mismos que consisten en que los términos de error de la regresión provienen de una distribución normal con media cero y varianza constante, que son independientes entre ellos.

Existen diversos estadísticos y análisis que permiten determinar si los residuales de una regresión siguen el comportamiento mencionado anteriormente; entre estos se encuentran las pruebas Jarque-Bera, Breusch-Godfrey LM y las pruebas de heterocedasticidad.

El estadístico Jarque-Bera permite realizar la prueba de hipótesis referente a la normalidad de los residuales; considera la diferencia del sesgo y la curtosis de la serie de datos con las de una distribución normal. Este estadístico se compara con una distribución ji-cuadrada con 2 grados de libertad y se calcula así:

$$Jarque - Bera = \frac{N}{6} \left( S^2 + \frac{(K - 3)^2}{4} \right)$$

Donde  $N$  es el número de observaciones de la serie,  $S$  corresponde al sesgo y  $K$  a la curtosis (EViews, 2017).

Por otro lado, la prueba de Breusch-Godfrey LM permite determinar si existe correlación o no entre los residuales. Contrasta las hipótesis de que no hay correlación serial de cualquier orden sobre  $p$ .

Para calcular este estadístico se ajusta un modelo auto regresivo de orden  $p$  para los residuales, mismo que se añade a la regresión original una vez que se despejó el residual, de tal forma que se tiene un solo modelo para los errores. Este nuevo modelo tiene asociado un  $R^2$  mismo que se multiplica por  $(T - p)$ , donde  $T$  es el número de

observaciones, y se compara con una distribución Ji-cuadrada con  $p$  grados de libertad (EViews, 2017).

Como se pretende que los errores sean independientes, entonces se busca no rechazar la hipótesis nula, por lo que se buscan valores superiores al nivel de significancia determinado para la probabilidad asociada a la cola de la distribución  $\chi^2_p$ .

Finalmente, las pruebas de heterocedasticidad permiten verificar que la varianza de los residuales generados sea constante. Para el caso de este trabajo se usará la prueba White, ya que en la bibliografía se considera que es la prueba más robusta que el resto.

La prueba White se basa en un nuevo modelo de regresión que considera como variable dependiente el cuadrado de los errores y como variables independientes, todas las combinaciones generadas por el producto cruzado de las variables originales, es decir, las variables originales, sus cuadrados y sus combinaciones pareadas.

El estadístico de la prueba White se calcula mediante la multiplicación del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) del nuevo modelo con el número de observaciones; esta multiplicación se distribuye  $\chi^2_{p-1}$ , donde  $p$  corresponde al número de variables independientes de la nueva regresión (EViews, 2017).

Esta prueba contrasta la hipótesis nula: los errores son homocedásticos; contra la alternativa: los errores son heterocedásticos (EViews, 2017). Debido a que se busca que la varianza de estos sea constante entonces se pretende encontrar evidencia suficiente para aceptar la hipótesis nula.

#### **5.1.4. Pronóstico**

Cuando nos encontramos frente a series temporales no estacionarias, los tratamientos antes mencionados no son suficientes; volviéndose necesaria la cointegración. El análisis de cointegración justifica el uso de modelos de corrección por el error para la estimación de relaciones entre variables a corto plazo, mediante la verificación de relaciones a largo plazo.

Al realizar una regresión estática entre series temporales independientes la mayoría de las veces se obtiene como resultado una *Regresión Espuria*, es decir, una regresión con un  $R^2$  elevado y un estadístico pequeño, lo que nos llevaría a creer que es una buena regresión; sin embargo, los errores de la ecuación podrían estar auto correlacionados

positivamente (estimadores mínimos cuadrados de los coeficientes ineficientes y estimadores de los errores estándar inconsistentes). Para disminuir la probabilidad de obtener una *regresión espuria* es necesario expresar las variables en diferencias.

### 5.1.5. Modelos de Corrección por el Error:

Los modelos de corrección por el error son una representación de modelos dinámicos. Considérese el siguiente modelo dinámico determinista:

$$Y_t = \alpha + \beta X_t + \alpha_1 Y_{t-1}, \quad |\alpha| < 1 \quad (5.1)$$

Los modelos dinámicos implican movimientos en el tiempo, si se parte de una situación de desequilibrio, aunque  $X$  permanezca fijo,  $Y_t$  cambiará a través del tiempo, lo que es conocido como componente de propagación (CP) o cambio dinámico característico (Otero, 1993):

$$CP = (\Delta Y)_{X=cte} = \alpha_1 \Delta Y_{t-1} \quad (5.2)$$

Se le suma y resta  $Y_{t-1}$  a la segunda parte de la ecuación anterior; considerando que la  $Y_{t-1}$  que se suma es equivalente  $\alpha + \beta X_{t-1} + \alpha_1 Y_{t-2}$ , obteniendo así:

$$CP = \alpha + \beta X_{t-1} + (\alpha_1 - 1)Y_{t-1} \quad (5.3)$$

O bien

$$CP = -(1 - \alpha_1) \left( Y_{t-1} - \frac{\alpha}{1 - \alpha_1} - \frac{\beta}{1 - \alpha_1} X_{t-1} \right) \quad (5.4)$$

Por las condiciones exógenas  $X_{t-1}$ , en el periodo  $t-1$ , tendrá un valor correspondiente a largo plazo para  $Y$  ( $Y_{t-1}^*$ ) de:

$$Y_{t-1}^* = \frac{\alpha}{1 - \alpha_1} + \frac{\beta}{1 - \alpha_1} X_{t-1} \quad (5.5)$$

Obtenida haciendo  $Y_t = Y_{t-1} = Y_t^*$  en (5.1), despejando  $Y_t^*$  de la ecuación y retardándola un periodo.

El segundo factor de la ecuación (5.4) representa la divergencia entre el valor real de  $Y$  en el periodo  $t - 1$  y el valor a largo plazo correspondiente a este periodo (Otero, 1993). Cuando  $X$  cambia entre los periodos  $t - 1$  y  $t$ , el cambio que experimentará  $Y$  se verá afectado por:

$$\Delta Y_t = \beta \Delta X_t + \alpha_1 \Delta Y_{t-1}$$

El primer sumando es el *componente de impulso*, el segundo es el *componente de propagación* (CP). El componente de impulso representa el cambio de  $Y$  inducido por los

desequilibrios de corto plazo, mientras que el componente de propagación es resultado de los desequilibrios a largo plazo (Otero, 1993). Al sustituir en la ecuación anterior la (5.4) se obtiene la representación de corrección por el error:

$$\Delta Y_t = \beta \Delta X_t - (1 - \alpha_1) \left( Y_{t-1} - \frac{\alpha}{\alpha_1 - 1} - \frac{\beta}{\alpha_1 - 1} X_{t-1} \right) \quad (5.6)$$

La diferencia que está dentro del paréntesis se puede considerar como un “error”, ya que es la diferencia entre  $Y_{t-1}$  y su valor de equilibrio a largo plazo  $Y_{t-1}^*$ , entre más grande sea el *error*, mayor será el cambio de  $Y$ . En este sentido, el componente de propagación (CP), funciona como un mecanismo automático de corrección de las desviaciones actuales respecto al equilibrio a largo plazo; motivo por el cual a este procedimiento se le conoce como *corrección por el error* (Otero, 1993).

Al trabajar con ecuaciones con diferencias como la (5.6), a diferencia de la (5.1) que es en niveles, se reducen los problemas de colinealidad.

Una forma más general de representar la corrección de errores es mediante el modelo dinámico con retardo de estructura racional general:

$$A(L)Y_t = \alpha + B(L)X_t + u_t \quad (5.7)$$

Donde las raíces de  $A(L) = 0$  caen fuera del círculo de radio igual a la unidad, como condición de estabilidad:

$$Y_t = \alpha + B(L)X_t + [1 - A(L)]X_t + u_t \quad (5.7 *)$$

$A(L)$  y  $B(L)$  son los polinomios en el operador de retardos,  $L$ , sin factores comunes:

$$A(L) = 1 - \alpha_1 L - \alpha_2 L^2 - \dots - \alpha_n L^n \quad (5.8)$$

$$B(L) = \beta_0 - \beta_1 L - \beta_2 L^2 - \dots - \beta_m L^m \quad (5.9)$$

Al sustituir se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} B(L)X_t &= \beta_0 X_t + \beta_1 X_{t-1} + \dots + \beta_m X_{t-m} = \\ &= \beta_0 (X_t - X_{t-1}) - (\beta_2 + \beta_3 + \dots + \beta_m)(X_{t-1} - X_{t-2}) \\ &\quad - (\beta_3 + \beta_4 + \dots + \beta_m)(X_{t-2} - X_{t-3}) - \dots - \beta_m (X_{t-m+1} - X_{t-m}) \\ &\quad + (\beta_0 + \beta_1 + \dots + \beta_m)X_{t-1} = \\ &= \beta_0 \Delta X_t - \sum_{j=1}^{m-1} \left( \sum_{k=j+1}^m \beta_k \right) \Delta X_{t-j} + B(1)X_{t-1} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Análogamente,

$$[1 - A(L)]Y_t = [1 - A(1)]Y_{t-1} - \sum_{j=1}^{n-1} \left( \sum_{k=j+1}^n a_k \right) \Delta Y_{t-j} \quad (5.11)$$

Sustituimos (5.10) y (5.11) en la ecuación (5.7 \*):

$$Y_t = \alpha + [1 - A(1)]Y_{t-1} - \sum_{j=1}^{n-1} \left( \sum_{k=j+1}^n a_k \right) \Delta Y_{t-j} + \beta_0 \Delta X_t \\ - \sum_{j=1}^{m-1} \left( \sum_{k=j+1}^m \beta_k \right) \Delta X_{t-j} + B(1)X_{t-1} + u_t$$

Al restar  $Y_{t-1}$  en ambos lados de la ecuación obtenemos:

$$\Delta Y_t = - \sum_{j=1}^{n-1} \left( \sum_{k=j+1}^n a_k \right) \Delta Y_{t-j} + \beta_0 \Delta X_{t-j} - \sum_{j=1}^{m-1} \left( \sum_{k=j+1}^m \beta_k \right) \Delta X_{t-j} \\ - A(1) \left[ Y_{t-1} - \frac{\alpha}{A(1)} - \frac{B(1)}{A(1)} X_{t-1} \right] + u_t \quad (5.12)$$

En donde  $B(1)/A(1)$  es el multiplicador total. La ecuación (5.12) es la forma general del modelo de corrección de error para dos variables (Otero, 1993).

De forma matricial la ecuación (5.12) se escribe como:

$$c'^*(L)(1 - L)x_t = \alpha - \alpha'x_t - 1 + u_t$$

donde:

$$x'_t = [Y_t \ X_t]$$

$$\alpha' = [A(1) \ - \ B(1)]$$

$$c'^*(L) = [A^*(L) \ B^*(L)],$$

Sea  $A^*(L)$  y  $B^*(L)$  polinomios en el operador  $L$ , cuyos coeficientes se derivan de  $A(L)$  y  $B(L)$  respectivamente.

### 5.1.6. Cointegración:

Este análisis permite detectar estimaciones libres de resultados espurios a corto y largo plazo. Los modelos de corrección de error son una base adecuada para la cointegración, ya que éstos representan de forma adecuada el comportamiento dinámico de las series. En algunas ocasiones las series temporales no estacionarias deben diferenciarse  $d$  veces para que se vuelvan estacionarias, por lo que se les denomina *integrada de orden  $d$* .  $X_t$  es integrada de orden  $d$  ( $X_t \sim I(d)$ ) si no es estacionaria, pero  $\Delta^d X_t$  sí lo es.

Definición: Sea  $X_t$  un vector de  $N$  series temporales. Las componentes de  $X_t$  son cointegradas de orden  $d, b$  ( $x_t \sim CI(d, b)$ ), si:

1. Todas las componentes de  $X_t$  son  $I(d)$
2. Existe un vector  $\alpha (\neq 0)$  tal que  $z_t = \alpha' x_t \sim I(d - b)$ ;  $b > 0$

La relación  $z_t = \alpha' x_t$  (5.13) se conoce como *relación de cointegración*, y el vector  $\alpha$ , *vector de cointegración* (Otero, 1993).

Supongamos la existencia de dos variables  $X$  y  $Y$  que se sugiere tienen una relación de equilibrio a largo plazo, con series de datos denotados por  $X_t \sim I(1)$  e  $Y_t \sim I(1)$ , sea:

$$Z_t = \alpha_1 Y_t + \alpha_2 X_t \quad (5.14)$$

Lo normal sería que para cualquier par de valores que tomen  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , resulte  $Z_t \sim I(1)$ , dado que  $X_t$  y  $Y_t$  son de tipo  $I(1)$  y  $Z_t$  es una combinación lineal de estas variables. Sin embargo, podría existir un valor de  $\alpha$  para el cual  $Z_t \sim I(0)$ , donde  $X_t$  y  $Y_t$  serían por definición  $CI(1,1)$  (Otero, 1993).

Supongamos que esta relación es cierta y se expresa mediante una relación lineal:

$$Y_t^* = \alpha + \beta X_t \quad (5.15)$$

Donde  $Y_t^*$  es el valor de equilibrio a largo plazo de  $Y$ , que corresponde a  $X$ , por lo que hay equilibrio en el periodo  $t$  si:

$$Y_t - Y_t^* = 0 \quad (5.16)$$

Es decir, si:

$$Y_t - (\alpha + \beta X_t) = 0 \quad (5.17)$$

Como  $Y_t$  será un valor distinto al equilibrio, podemos escribir:

$$Y_t - (\alpha + \beta X_t) = u_t$$

Donde  $u_t$  puede interpretarse como el error o la desviación entre  $Y_t$  y su valor de equilibrio en el periodo  $t$  (Otero, 1993), representado en la siguiente ecuación:

$$Y_t - \beta X_t = \alpha + u_t \quad (5.18)$$

Que por definición es la relación de cointegración (5.13). Se define:

$$x'_t = [Y_t \ X_t] \quad (5.19)$$

Al identificar los parámetros (5.18) y (5.13) se tiene:

$$\alpha'_t = [1 \ -\beta] \quad y \quad z_t = \alpha + u_t \quad (5.20)$$

Cuando se conoce el orden de causalidad, la relación de cointegración se obtiene despejando la variable dependiente, el vector de cointegración  $\alpha'$  aparece normalizado, es decir, el coeficiente de la variable dependiente es igual a la unidad.

Si  $X_t, Y_t \sim CI(1,1)$ ,  $z_t$  es estacionaria por definición, el error ( $u_t$ ) también es estacionario, por lo que las desviaciones del equilibrio no se ampliarán con el tiempo. Caso contrario, si  $X_t$  e  $Y_t$  son  $I(1)$  pero no cointegran ( $z_t$  es no estacionaria), las dos variables se apartarán cada vez más con el tiempo, por lo que no alcanzarían el equilibrio (Otero, 1993).

Si  $X_t$  y  $Y_t$  son integradas del mismo orden, y se sugiere una relación lineal a largo plazo entre ellas, se puede obtener una regresión estática, llamada *regresión de cointegración*:

$$Y_t = \alpha + \beta X_t + u_t \quad (5.21)$$

Si los residuos son estacionarios, hay evidencia de cointegración en las variables, lo que implicaría que la relación de equilibrio a largo plazo estaría libre de resultados espurios (Otero, 1993).

Es importante mencionar que dos series no pueden ser cointegradas si no son integradas del mismo orden.

#### 5.1.7. Test de Raíces Unitarias:

Para realizar el análisis de cointegración es necesario verificar el orden de integración de las variables, los métodos más comunes son las pruebas de raíces unitarias, de las cuales, las más usadas son la Dickey Fuller (DF) y Dickey Fuller ampliado (DFA) (Otero, 1993).

El test DF parte de la siguiente ecuación:

$$X_t = \alpha + \rho X_{t-1} + \epsilon_t \quad (5.22)$$

Donde  $\epsilon_t \sim NI(0, \sigma^2)$ . Para verificar que  $X_t$  no es estacionaria se verifica la hipótesis de que  $\rho=1$ , la hipótesis alternativa es que  $\rho \neq 1$ . Si  $\rho = 1$  entonces se tiene un proceso de caminata aleatoria con deriva (no estacionario), representado por el modelo:

$$(1 - L)X_t = \alpha + \epsilon_t$$

De forma práctica se tiene:

$$(1 - L)X_t = \alpha + (\rho - 1)X_{t-1} + \epsilon_t \quad (5.23)$$

Donde se verifica que  $X_{t-1}$  es igual a cero, frente a la hipótesis alternativa de que es menor que 0. Además de que cuando la hipótesis nula ( $\rho-1=0$ ), también el estimador mínimo cuadrático de  $\rho-1$  es sesgado por defecto.

### **5.1.8. Integración Estacional:**

Cuando se tienen series estacionales se pueden presentar tres variaciones estacionales: determinista, estacional estacionaria y estacional integrada.

Un proceso estacional determinista con pauta estable se puede captar mediante una regresión con variables estacionales ficticias.

El proceso estacional estacionario tiene frecuencias estacionales con periodicidad inferior a un año, y pueden presentar variaciones estacionales con periodos no iguales al tiempo de la serie (Otero, 1993), es decir, una serie trimestral podría presentar ciclos semestrales.

Un proceso estacional integrado se puede definir como aquel que posee al menos una raíz unitaria estacional en su representación autorregresiva. En este proceso, cualquier perturbación que lo afecte momentáneamente tendrá un efecto permanente, mientras que en el proceso estacional estacionario los efectos van perdiendo intensidad con el tiempo, y en un proceso determinista no existen los efectos retardados (Otero, 1993).

Para verificar las raíces unitarias estacionales de este último proceso se debe determinar la cantidad de raíces existentes a las correspondientes frecuencias. Para casos de datos trimestrales se cuenta con el test elaborado por Hylleberg, éste ayuda a detectar integración estacional de primer orden. A cada  $\beta$  se le debe aplicar un test independiente y rechazarlo por separado (Otero, 1993).

### **5.1.9. Test de cointegración**

Para verificar la existencia de cointegración entre dos variables (integradas del mismo orden) y considerando la ecuación:

$$Y_t = \alpha + \beta X_t + u_t$$

Si  $\alpha$  y  $\beta$  son conocidos, se pueden generar valores para  $u_t$ , y verificar si es un proceso integrado mediante el método de Dickey-Fuller,

En caso de que los parámetros no sean conocidos, y bajo la hipótesis nula de que  $u_t$  no es estacionario, se obtienen estimaciones minimocuadráticas sesgadas de los parámetros. Se debe tomar en cuenta que los estimadores minimocuadráticos producen residuos mínimos, por lo que las pruebas DF y DFA tienden a rechazar la hipótesis nula (Otero, 1993).

### **5.1.10. Estimación del vector de cointegración:**

Granger y Engle propusieron el siguiente método (bietápico) para hallar el vector de cointegración: en primer lugar se encuentra la regresión de cointegración

$$Y_t = \alpha + \beta X_t + u_t$$

Los residuos obtenidos de esta regresión se utilizan para estimar los coeficientes del modelo de Corrección de Error (Otero, 1993), en el caso más simple se tendría:

$$\Delta Y_t = \beta_0 \Delta X_t - \gamma \hat{u}_{t-1} + vt$$

Donde  $\hat{u}_t$  es la serie de los residuos estimados en la etapa anterior.

Los estimadores  $\alpha$  y  $\beta$  en la primera etapa son consistentes, sin embargo, en muestras pequeñas se puede observar sesgo, además de que las distribuciones asintóticas de los estimadores no son normales.

Engle y Yoo propusieron un procedimiento de tres etapas, que no presentaría los problemas antes mencionados (Otero, 1993), las dos primeras etapas son las mismas que en el método bietápico.

La tercera etapa consiste en la regresión:

$$e_t = \delta(-cX_t) + \epsilon_t$$

donde  $e_t$  son los residuos obtenidos en la segunda etapa,  $c$  es la estimación del coeficiente del término de corrección por el error, también obtenida en la segunda etapa y  $\delta$  es el coeficiente de la última regresión,  $\delta$  servirá para corregir la estimación del coeficiente de la regresión estática ( $b^{(1)}$ ) de la primera etapa (Otero, 1993).

$$b^{(3)} = b^{(1)} + d \quad \text{donde } d = \hat{\delta} \text{ de la ecuación anterior}$$

Otra forma de estimar el multiplicador  $\beta$ , es mediante la estimación de la relación dinámica general (propuesto por Phillips y Loretan (1991)):

$$Y_t = \alpha + \sum_{i=1}^n a_i Y_{t-i} + \sum_{i=0}^m B_i X_{t-i} + u_t$$

El multiplicador a largo plazo se obtiene mediante:

$$\beta = \frac{\sum_{i=0}^m B_i}{1 - \sum_{i=1}^n a_i}$$

Estos procesos funcionan con dos variables, si el método cuenta con más de dos, existirá entonces más de un vector de cointegración, para N variables pueden existir N-1 vectores de cointegración (Otero, 1993).

## 5.2. Ajuste de modelos de regresión para los contaminantes de la ZMVT

Durante el proceso de modelación se ajustaron varios modelos para cada uno de los contaminantes en EViews, los modelos aquí presentados son aquellos que mostraron un mejor ajuste a los datos de acuerdo al coeficiente de determinación. Se construyó un modelo para cada contaminante ( $PM_{10}$ ,  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  y  $CO$ ), se excluyó al  $PM_{2.5}$  de esta parte del estudio debido a que los datos obtenidos se encuentran aún en proceso de validación, por lo que un modelo construido a partir de esta información no sería confiable.

Como variables independientes se tomaron la temperatura, la velocidad del viento, la radiación, la precipitación, así como variables binarias referentes a la temporada del año y otras que indican la presencia de valores atípicos en las variables dependientes. Así mismo se consideraron la cantidad de camiones de carga, camiones de pasajeros, autos y motocicletas en la ZMVT. Debido a que la información incluida en los modelos tiene una periodicidad mensual y estas variables son reportadas por el INEGI con periodicidad anual, se utilizó una interpolación utilizando como base el crecimiento vehicular mensual a nivel nacional para cada tipo de vehículo. Así mismo, la información disponible de estas variables para la ZMVT llega hasta el año 2014, por lo que los modelos construidos contemplan información desde 2011 hasta ese año.

En la *Tabla 5.1*. se presentan todas las variables que se utilizaron en los modelos que se presentarán a continuación.

**Tabla 5.1. Variables incluidas en los modelos**

Variable	Descripción
<b>AUTO</b>	Cantidad de automóviles registrados en la ZMVT
<b>CAMCAR</b>	Cantidad de camiones de carga registrados en la ZMVT
<b>CAMPAS</b>	Cantidad de camiones de pasajeros registrados en la ZMVT
<b>MOTO</b>	Cantidad de motocicletas registrados en la ZMVT
<b>PM10</b>	Concentración mensual promedio de PM <sub>10</sub> en las estaciones de la ZMVT
<b>O3</b>	Concentración mensual promedio de O <sub>3</sub> en las estaciones de la ZMVT
<b>SO2</b>	Concentración mensual promedio de SO <sub>2</sub> en las estaciones de la ZMVT
<b>NO2</b>	Concentración mensual promedio de NO <sub>2</sub> en las estaciones de la ZMVT
<b>CO</b>	Concentración mensual promedio de CO en las estaciones de la ZMVT
<b>MCE</b>	Método de corrección de error
<b>DU_SC</b>	Variable binaria con valor 1 para la temporada seca caliente, 0 para el resto del año
<b>DU_SF</b>	Variable binaria con valor 1 para la temporada seca fría, 0 para el resto del año
<b>DU_LLUV</b>	Variable binaria con valor 1 para la temporada de lluvias, 0 para el resto del año
<b>TEMP</b>	Temperatura mensual promedio registrada en la ZMVT
<b>RAD</b>	Radiación mensual promedio registrada en la ZMVT
<b>PRECIP</b>	Precipitación mensual promedio registrada en la ZMVT
<b>DUM_O3</b>	Variable binaria con valor 1 para los meses en que se presentaron comportamiento irregular en el ozono debido a factores externos, 0 para el resto
<b>DUM_SO2</b>	Variable binaria con valor 1 para los meses en que se presentaron comportamiento irregular en el SO <sub>2</sub> ozono debido a factores externos, 0 para el resto
<b>DUM_NO2</b>	Variable binaria con valor 1 para los meses en que se presentaron comportamiento irregular en el NO <sub>2</sub> ozono debido a factores externos, 0 para el resto

Se construyeron tres modelos para cada uno de los contaminantes; el primero corresponde a las variables sin tratamiento, al segundo se le aplicó una transformación logarítmica y el tercero es un modelo que considera diferencias, rezagos, así como transformaciones logarítmicas. Para simplificar los resultados de este último, se consideró la variable  $t_{A_t}$  como la tasa de crecimiento de  $A$  en el tiempo  $t$ , donde:

$$t_{A_t} = \ln\left(\frac{A_t}{A_{t-1}}\right)$$

A continuación, se presentan los modelos construidos para cada contaminante.

Es importante resaltar que la mayoría de los modelos sin tratamiento y con transformación logarítmica no se pudieron ajustar adecuadamente debido a que los p-valores asociados a las pruebas individuales eran muy elevados, y por lo tanto las variables no son relevantes dentro del modelo.

### 5.2.1. PM<sub>10</sub>

Una vez que se ajustaron los modelos para este contaminante, se obtuvieron los resultados que muestra la *tabla 5.2*.

**Tabla 5.2. Modelos construidos para PM<sub>10</sub>**

Variable	t <sub>PM10 t</sub>	PM <sub>10</sub>	ln(PM <sub>10</sub> )
<b>AUTO</b>	t <sub>AUTO t</sub> - t <sub>AUTO t-1</sub> -115.3581 (-4.445)	Auto -0.0013 (-0.21)	ln(Auto) -12.7083 (0.30)
<b>CAMCAR</b>	t <sub>CAMCAR t-2</sub> - t <sub>CAMCAR t-3</sub> 167.884 (3.340)	Camcar 0.0038 (0.21)	ln(Camcar) -7.4147 (-0.24)
<b>CAMPAS</b>		Campas -0.0381 (-0.35)	ln(Campas) -1.1459 (0.66)
<b>MOTO</b>	t <sub>MOTO t-2</sub> - t <sub>MOTO t-3</sub> -34.33 (-2.139)	Moto 0.0018 (0.76)	ln(Moto) -2.9051 (-0.49)
<b>PM10</b>	t <sub>PM10 t-1</sub> 0.403 (-2.958)		

Variable	t <sub>PM10 t</sub>	PM <sub>10</sub>	ln(PM <sub>10</sub> )
<b>MCE_PM10</b>	MCE_PM10 <sub>t-1</sub> -0.817 (-5.616)		
<b>DU_SC</b>	DU_SC 0.292 (3.235)		
<b>DU_SF</b>	DU_SF 0.304 (3.643)		
<b>Constante</b>	-0.159 (-3.305)	198.807 (0.76)	-38.4942 (-0.29)
<b>Observaciones</b>	44	48	48
<b>R<sup>2</sup></b>	0.64	0.1489	0.1275

Nota: las cantidades entre paréntesis debajo de las estimaciones son los estadísticos t

Como se puede observar en la tabla anterior, el modelo que presentó un mejor ajuste es el de diferencias y rezagos con un coeficiente de determinación de 0.6; la tabla 5.3 muestra los estadísticos para este modelo.

**Tabla 5.3. Resultados del mejor modelo de regresión para PM<sub>10</sub>**Variable dependiente: **D(LOG(PM10))**Periodo: **2011M05 2014M12**Observaciones: **44**

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.159517	0.048262	-3.305200	0.0022
D(LOG(PM10(-1)))	0.402874	0.136215	2.957641	0.0054
D(LOG(AUTO),2)	-115.3581	25.94926	-4.445525	0.0001
D(LOG(CAMCAR(-2)),2)	167.8839	50.25880	3.340388	0.0020
MCE_PM10(-1)	-0.816847	0.145459	-5.615651	0.0000
D(LOG(MOTO(-2)),2)	-34.33031	16.05170	-2.138733	0.0393
DU_SC	0.291829	0.090197	3.235472	0.0026
DU_SF	0.303719	0.083373	3.642894	0.0008
R-squared	0.639919	Mean dependent var		-0.004943
Adjusted R-squared	0.569903	S.D. dependent var		0.262388
S.E. of regression	0.172079	Akaike info criterion		-0.518764
Sum squared resid	1.065999	Schwarz criterion		-0.194365
Log likelihood	19.41280	Hannan-Quinn criter.		-0.398461
F-statistic	9.139652	Durbin-Watson stat		2.092954
Prob(F-statistic)	0.000002			

Fuente: Resultados arrojados por EViews

Como se puede apreciar, todas los p-values asociadas al estadístico t son menores a .05, lo que indica que las variables son relevantes con un nivel de confianza del 95%. Por otro lado, el coeficiente de determinación es del 63.99%, lo que implica que las variables independientes explican un bajo porcentaje de la variabilidad en la variable dependiente.

**Tabla 5.4. Pruebas estadísticas sobre los residuales del PM<sub>10</sub>**

Prueba	Estadístico	Grados de libertad	P-value
Media	-1.32e-17	--	--
Jarque-Bera	1.015177	2	0.601945
Heterocedasticidad de White	24.30193	29	0.7139
Shapiro Wilk	0.9746	--	0.4345
Breusch Godfrey	10.77536	12	0.5483

Fuente: Resultados arrojados por EViews

El estadístico Jarque-Bera muestra un p-value igual a .6019 lo que da evidencia suficiente para afirmar que los residuales siguen una distribución normal, así mismo se puede afirmar que la media es estadísticamente igual a cero.

En cuanto al análisis de varianza, la prueba de heterocedasticidad White permite afirmar que los residuales son homocedásticos ya que el p-value a este estadístico es de

0.7139, superior a 0.05. Por su parte, el test Shapiro Wilk tiene un valor de 0.5483; lo que, aunado a las pruebas Jarque-Bera y White, otorga evidencia suficiente para decir que los residuales siguen una distribución normal con media cero y varianza constante, cumpliendo uno de los supuestos de la regresión.

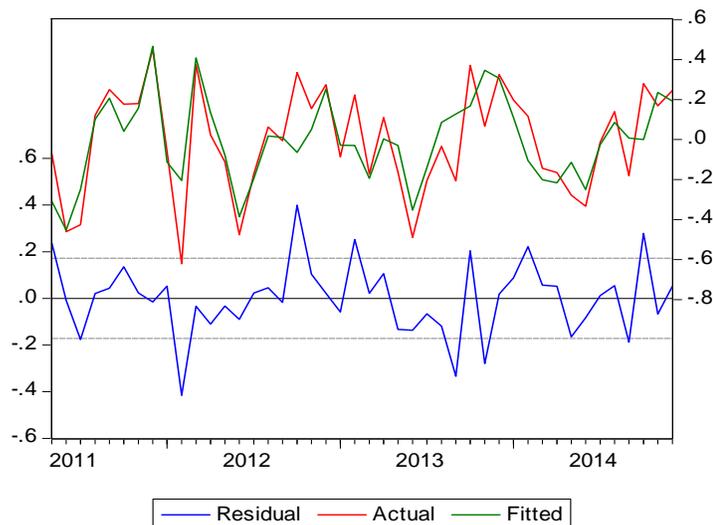
Por otro lado, el estadístico Breusch-Godfrey permite establecer que las correlaciones entre los residuales son iguales a cero, cumpliendo también con el supuesto de independencia entre residuales. Lo cual nos permite afirmar que es un modelo que cumple todos los supuestos con un nivel de confianza del 95%.

Finalmente, podemos expresar el modelo de PM<sub>10</sub> mediante la siguiente expresión, la cual expone, debajo de cada coeficiente, su estadístico *t* entre paréntesis, así como el coeficiente de determinación, el error estándar y el número de observaciones de la regresión.

$$\widehat{t_{PM10_t}} = -0.159 + 0.403 t_{PM10_{t-1}} - 115.358(t_{AUTO_t} - t_{AUTO_{t-1}}) \\ (-3.305) (2.958) \quad (-4.445) \\ + 167.884(t_{CAMCAR_{t-2}} - t_{CAMCAR_{t-3}}) - 34.330(t_{MOTO_{t-2}} - t_{MOTO_{t-3}}) \\ (3.340) \quad (-2.139) \\ -0.817 MCE_{PM10_{t-1}} + 0.292 DU_{SC_t} + 0.304 DU_{SF_t} \\ (-5.616) \quad (3.235) \quad (3.643) \\ n = 44 \quad ee = 0.172 \quad R^2 = 0.640$$

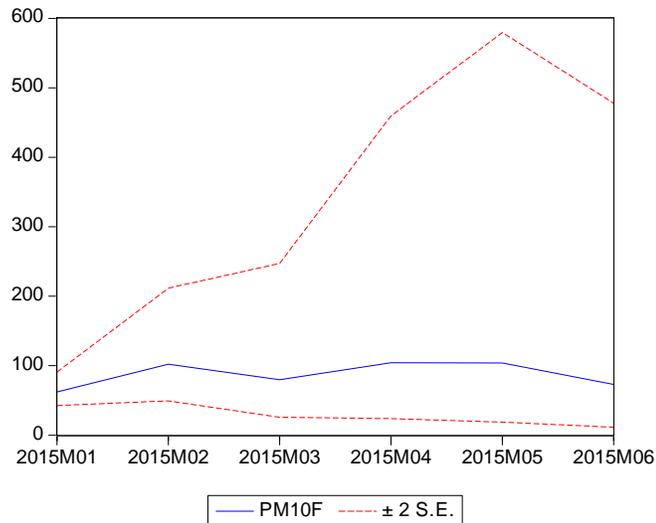
Así mismo, el siguiente gráfico muestra el comportamiento del modelo anterior durante el periodo analizado.

**Gráfica 5.1. Modelo ajustado para PM<sub>10</sub>**



Una vez estimado el modelo final, se procede a realizar un pronóstico del comportamiento del  $PM_{10}$ , mismo que se presenta a continuación

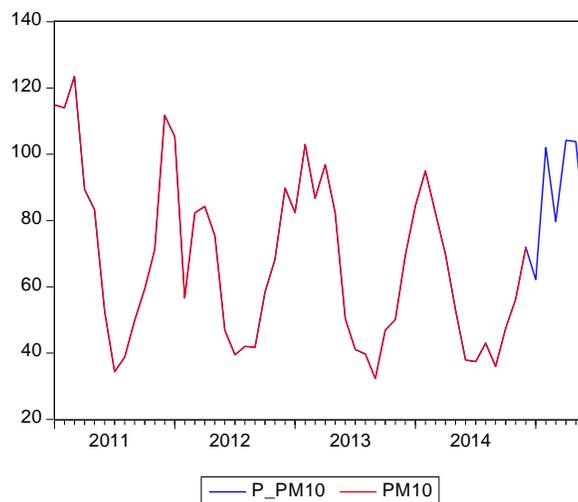
**Gráfica 5.2. Valores pronosticados de  $PM_{10}$  (enero-junio 2016)**



Es importante mencionar que en la *Gráfica 5.3* se muestra que a un nivel de confianza del 95% los intervalos de confianza son muy amplios en los valores superiores, lo que podría ser un factor importante a considerar en este modelo; sin embargo en este trabajo no se realizará un análisis más profundo al respecto.

Analizando el comportamiento del pronóstico se observa que sigue un patrón que concuerda con los registros que se han tenido desde 2011, en donde se han registrado los niveles más altos en los primeros meses del año.

**Gráfica 5.3. Serie de tiempo de  $PM_{10}$  con pronóstico (enero 2011-junio 2015)**



### 5.2.2. Ozono

Los datos presentados en la tabla 5.5 corresponden a los modelos construidos para este contaminante.

**Tabla 5.5. Modelos construidos para O<sub>3</sub>**

Variable	O <sub>3</sub> t - O <sub>3</sub> t-1	O <sub>3</sub>	ln(O <sub>3</sub> )
<b>AUTO</b>	t <sub>AUTO t</sub> - t <sub>AUTO t-1</sub> -0.446 (-1.73)	Auto 0.00000018 (0.14)	ln(Auto) -7.9193 (-0.36)
<b>CAMCAR</b>	t <sub>CAMCAR t-2</sub> - t <sub>CAMCAR t-3</sub> 1.124 (2.48)	Camcar 3.80E-08 (0.01)	ln(Camcar) 10.2421 (0.64)
<b>CAMPAS</b>	t <sub>CAMPAS t</sub> - t <sub>CAMPAS t-1</sub> 0.094 (2.30)	Campas -0.000011 (-0.47)	ln(Campas) -0.2953 (-0.33)
<b>MOTO</b>	t <sub>MOTO t-2</sub> - t <sub>MOTO t-3</sub> -0.395 (-2.73)	Moto -2.50E-06 (-0.71)	ln(Moto) -1.1905 (-0.39)
<b>O3</b>	O <sub>3</sub> t-3 - O <sub>3</sub> t-4 -0.107 (-1.99)		
<b>NO2</b>	NO <sub>2</sub> t - NO <sub>2</sub> t-1 0.155 (2.45)		
<b>MCE</b>	MCE_O <sub>3</sub> t-1 -0.759 (-5.14)		
<b>DU_SC</b>	DUSC t 0.005 (7.96)		
<b>RAD</b>	ln(RAD t) - ln(RAD t-1) 0.019 (9.29)		
<b>DUM_O3</b>	DUO <sub>3</sub> t -0.005 (-4.44)		
<b>Constante</b>	-0.001 (-2.78)	-63 (-0.11)	-6.6802 (-0.10)
<b>Observaciones</b>	44	48	48
<b>R<sup>2</sup></b>	0.91	0.1862	0.2166

Nota: las cantidades entre paréntesis debajo de las estimaciones son los estadísticos t

El mejor coeficiente de determinación es de 0.91, el cual corresponde al modelo en diferencias; para la construcción este modelo se contemplaron otras variables tales como la radiación y el NO<sub>2</sub> debido a que se ha demostrado que los niveles de ozono tienen asociación con estas variables. Los resultados de este modelo se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 5.6. Resultados del mejor modelo de regresión para O<sub>3</sub>**

Variable dependiente: **D(O3)**  
 Periodo: **2011M05 2014M12**  
 Observaciones: **44**

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.000795	0.000286	-2.779717	0.0089
D(O3(-3))	-0.106797	0.053718	-1.988085	0.0552
D(LOG(AUTO),2)	-0.445909	0.257825	-1.729505	0.0931
D(LOG(CAMPAS),2)	0.093391	0.040644	2.297784	0.0281
D(LOG(CAMCAR(-2)),2)	1.124891	0.453704	2.479352	0.0184
D(LOG(MOTO(-2)),2)	-0.395064	0.144474	-2.734507	0.0100
D(NO2)	0.154811	0.063046	2.455529	0.0195
D(LOG(RAD))	0.019055	0.002052	9.285977	0.0000
DU_SC	0.005429	0.000682	7.965725	0.0000
DUM_O3	-0.004530	0.001020	-4.439254	0.0001
MCE_O3(-1)	-0.758765	0.147634	-5.139485	0.0000
R-squared	0.913544	Mean dependent var		-0.000335
Adjusted R-squared	0.887345	S.D. dependent var		0.004543
S.E. of regression	0.001525	Akaike info criterion		-9.921600
Sum squared resid	7.67E-05	Schwarz criterion		-9.475553
Log likelihood	229.2752	Hannan-Quinn criter.		-9.756185
F-statistic	34.86970	Durbin-Watson stat		2.273319
Prob(F-statistic)	0.000000			

Fuente: Resultados arrojados por EViews

Es importante resaltar que este modelo tiene un nivel de confianza del 90% debido a que la variable “auto” tiene un valor p de 0.0931. En caso de aplicar un criterio del 95%, todas las variables asociadas a vehículos saldrían del modelo una a una, lo cual no permitiría cumplir los propósitos del presente trabajo.

Se construyó un modelo con datos a 2015; sin embargo, las variables referentes a vehículos automotor no fueron significantes para la regresión resultante, por lo que se tomó la decisión de permanecer con modelo construido hasta 2014.

En cuanto al coeficiente de determinación se obtuvo un 91.35%, el cual fue el máximo entre los modelos construidos para el ozono y por ende el mejor modelo construido.

Comenzando con el análisis residual para este modelo, realizado con 42 observaciones, podemos apreciar en la *Tabla 5.7* que la media de los residuales es aproximadamente cero, y por otro lado el estadístico Jarque-Bera nos permite afirmar que estos siguen una distribución normal.

**Tabla 5.7. Pruebas estadísticas sobre los residuales del O<sub>3</sub>**

Prueba	Estadístico	Grados de libertad	P-value
Media	1.97e-20		
Jarque-Bera	2.365064	2	0.306502

Shapiro Wilk	0.94834		0.04773
Heterocedasticidad de White	13.68293	10	0.1880
Breusch Godfrey	17.33660	12	0.1374

Fuente: Resultados arrojados por EViews

Por su parte, la prueba Breusch-Godfrey otorga evidencia suficiente para confirmar que no existe correlación entre los residuales, ya que tiene un p-value de 0.1374.

En cuanto al análisis de varianza, la prueba de heterocedasticidad White permite afirmar que los residuales son homocedásticos ya que el p-value a este estadístico es de 0.1880, superior a 0.05.

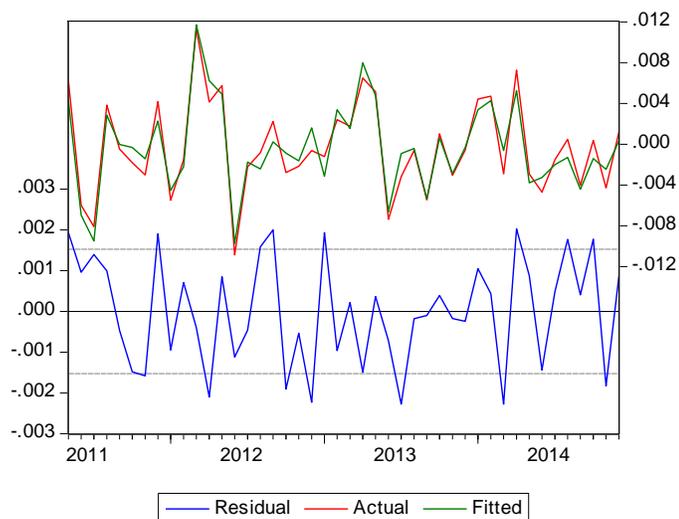
Por otro lado, la prueba Shapiro Wilk tiene un valor de 0.04773, con un nivel de confianza del 5% por lo que de acuerdo a este estadístico no se cumple la prueba de normalidad.

Es importante mencionar que el nivel de confianza para este modelo es del 10%; por lo que, basándonos en las pruebas Jarque-Bera y White es posible concluir que los residuales siguen una distribución con media cero y varianza constante.

Como resultado tenemos un modelo que describe en un 91.35% el comportamiento de la variable modelada, además de que cumple todos los supuestos. Considerando la definición de la tasa de crecimiento en la sección 5.2.1, la ecuación final (con sus estadísticos  $t$  entre paréntesis), así como la gráfica ilustrativa del modelo serían las siguientes.

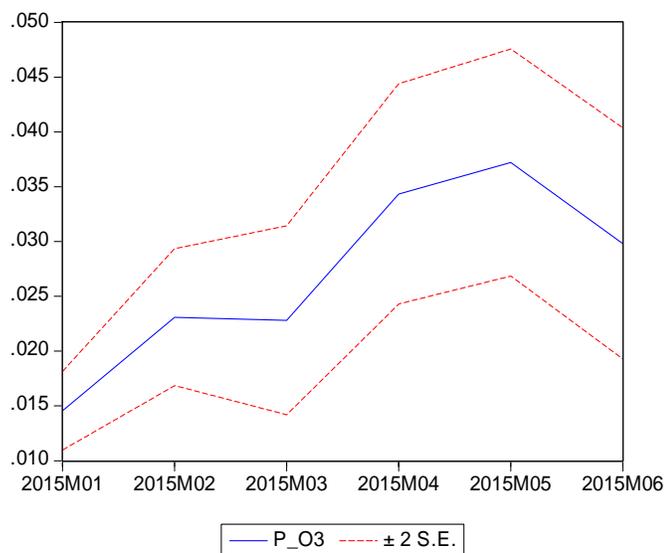
$$\begin{aligned}
03_t - \widehat{03}_{t-1} = & -0.001 - 0.107(03_{t-3} - 03_{t-4}) - 0.446(t_{AUTO_t} - t_{AUTO_{t-1}}) \\
& (-2.78) \quad (-1.99) \quad (-1.73) \\
& + 0.094(t_{CAMPAS_t} - t_{CAMPAS_{t-1}}) + 1.125(t_{CAMCAR_{t-2}} - t_{CAMCAR_{t-3}}) \\
& (2.30) \quad (2.48) \\
& - 0.395(t_{MOTO_{t-2}} - t_{MOTO_{t-3}}) + 0.155(NO2_t - NO2_{t-1}) + 0.005 DU\_SC_t \\
& (-2.73) \quad (2.45) \quad (7.96) \\
& + 0.019(\ln RAD_t - \ln RAD_{t-1}) + - 0.005 DUM\_03_t - 0.759 MCE\_03_{t-1} \\
& (9.29) \quad (-4.44) \quad (-5.14) \\
& n = 44 \quad R^2 = 0.91 \quad ee = 0.00
\end{aligned}$$

**Gráfica 5.5. Modelo ajustado para O<sub>3</sub>.**



Finalmente, una vez que el modelo ha sido ajustado y validado, se utiliza para pronosticar el comportamiento del O<sub>3</sub>, como se observa en las siguientes gráficas.

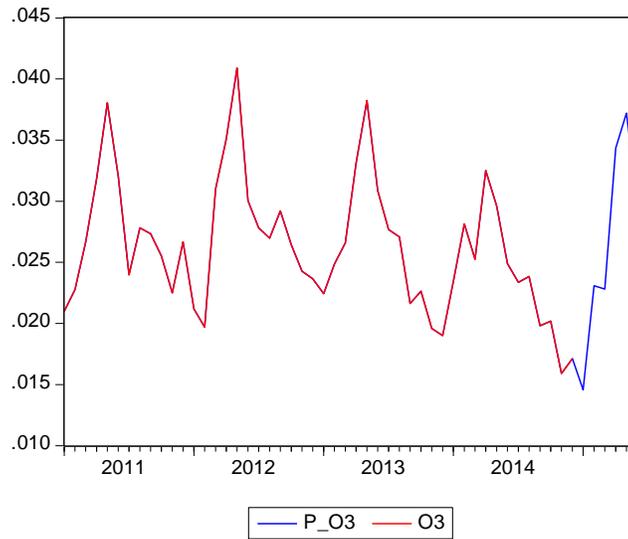
**Gráfica 5.6. Valores pronosticados de O<sub>3</sub> (enero-junio 2015)**



A diferencia de las partículas suspendidas, el ozono muestra intervalos de confianza regulares, lo que brinda un comportamiento más predecible.

La *Gráfica 5.7.* muestra que la predicción obtenida sigue un patrón que coincide con los valores registrados anteriormente, donde el ozono presenta sus valores en máximos en los meses de abril y mayo.

**Gráfica 5.7. Serie de tiempo de O<sub>3</sub> con pronóstico (enero 2011-junio 2015)**



### 5.2.3. Bióxido de Azufre

A continuación, se presenta el resumen de los modelos construidos para el SO<sub>2</sub>. Se puede apreciar, que al igual que los dos modelos anteriores el que presentó mejor ajuste es el modelo en diferencias.

**Tabla 5.8. Modelos construidos para SO<sub>2</sub>**

Variable	SO <sub>2</sub> t - SO <sub>2</sub> t-1	SO <sub>2</sub>	ln(SO <sub>2</sub> )
<b>AUTO</b>	t <sub>AUTO</sub> t - t <sub>AUTO</sub> t-1 -2.608 (-3.62)	Auto -3.34E-07 (-1.24)	ln(Auto) -15.029 (-0.96)
<b>CAMCAR</b>	t <sub>CAMCAR</sub> t-2 - t <sub>CAMCAR</sub> t-3 1.704 (3.31)	Camcar 0.00000115 (1.43)	ln(Camcar) 15.155 (1.32)
<b>CAMPAS</b>	t <sub>CAMPAS</sub> t - t <sub>CAMPAS</sub> t-1 0.071 (3.68)	Campas 0.000012 (2.46)	ln(Campas) 1.044 (1.63)
<b>MOTO</b>		Moto 0.000000253 (0.34)	ln(Moto) -0.263 (-0.12)
<b>SO2</b>	SO <sub>2</sub> t-3 - SO <sub>2</sub> t-4 -0.215 (-2.73)		
<b>MCE_SO2</b>	MCE_SO <sub>2</sub> t-1 -1.168 (-8.79)		
<b>DU_SO2</b>	DUSC t 0.002 (4.51)		
<b>Constante</b>	0 (-1.37)	0.0061 (0.53)	9.105 (0.19)
<b>Observaciones</b>	44	48	48
<b>R<sup>2</sup></b>	0.760	0.430	0.407

Nota: las cantidades entre paréntesis debajo de las estimaciones son los estadísticos t

Los resultados del modelo elegido se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 5.9. Resultados del mejor modelo de regresión para SO<sub>2</sub>**

Variable dependiente: **D(SO<sub>2</sub>)**

Periodo: **2011M05 2014M12**

Observaciones: **44**

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.000130	9.46E-05	-1.375396	0.1773
D(SO <sub>2</sub> (-3))	-0.215109	0.078775	-2.730676	0.0096
D(LOG(AUTO),2)	-2.608315	0.720085	-3.622234	0.0009
D(LOG(CAMPAS),2)	0.070733	0.019231	3.678095	0.0007
D(LOG(CAMCAR),2)	1.703958	0.515259	3.306990	0.0021
MCE_SO <sub>2</sub> (-1)	-1.168549	0.132968	-8.788210	0.0000
DUM_SO <sub>2</sub>	0.001974	0.000438	4.510975	0.0001
R-squared	0.758892	Mean dependent var		3.65E-05
Adjusted R-squared	0.719794	S.D. dependent var		0.001132
S.E. of regression	0.000599	Akaike info criterion		-11.85637
Sum squared resid	1.33E-05	Schwarz criterion		-11.57252
Log likelihood	267.8401	Hannan-Quinn criter.		-11.75110
F-statistic	19.40975	Durbin-Watson stat		1.596074
Prob(F-statistic)	0.000000			

Fuente: Resultados arrojados por EViews

Se logra apreciar que las variables finales del modelo son relevantes en este con un nivel de confianza del 95%, además de que las mismas explican la contaminación por SO<sub>2</sub> en un 75.88%.

Evaluando los residuales tenemos evidencia suficiente para decir que se aproximan a una distribución normal ya que el estadístico Jarque-Bera tiene un p-value asociado de 0.5785, y el Shapiro Wilk de 0.2514, ambos mayores a 0.05, además de que es evidente que su media es aproximadamente cero. Así mismo la prueba de heterocedasticidad de White tiene un p-value de 0.2514 lo que permite determinar que existe homocedasticidad en los residuales.

**Tabla 5.10. Pruebas estadísticas sobre los residuales del SO<sub>2</sub>**

Prueba	Estadístico	Grados de libertad	P-value
Media	9.61e-20		
Jarque-Bera	1.094562	2	0.578521
Heterocedasticidad de White	23.62075	21	0.3118
Shapiro Wilk	0.96775		0.2514
Breusch-Godfrey	19.49190	12	0.0773

Fuente: Resultados arrojados por EViews

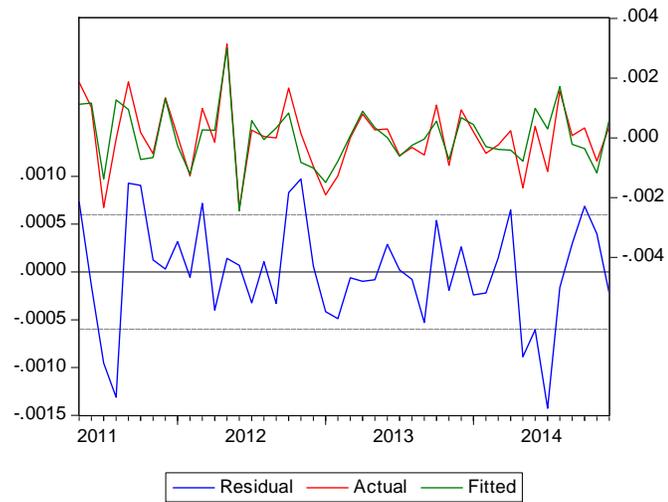
Por su parte la prueba Breusch-Godfrey calcula un p-value de 0.0773, que al ser superior a 0.05 permite afirmar que los errores no están correlacionados entre sí.

Finalmente, la prueba de heterocedasticidad de White muestra un p-value de 0.3118, evidencia suficiente para afirmar la homocedasticidad en los residuales.

Por lo tanto, tenemos un modelo que explica la variación de los datos en un 75.88% y que cumple con todos los supuestos en los que se basa una regresión con un nivel de confianza del 95%. El cual tiene la siguiente estructura y comportamiento:

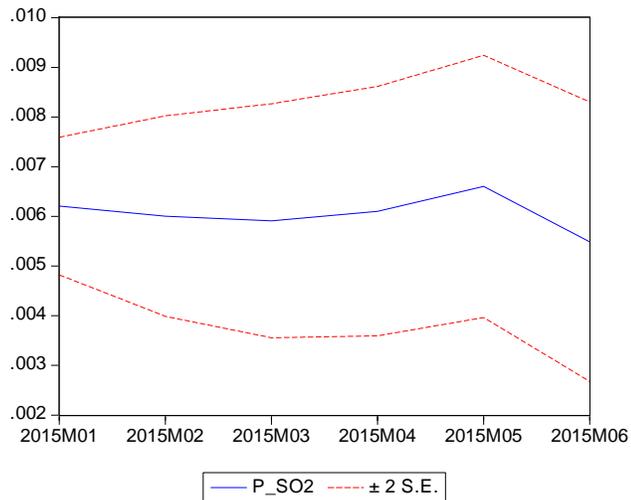
$$\begin{aligned}
 \widehat{SO2_t} - \widehat{SO2_{t-1}} = & 0.000 - 0.215(SO2_{t-3} - SO2_{t-4}) - 2.608(t_{AUTO_t} - t_{AUTO_{t-1}}) \\
 & (-1.37) \quad (-2.73) \qquad \qquad \qquad (-3.62) \\
 & + 0.071(t_{CAMPAS_t} - t_{CAMPAS_{t-1}}) + 1.704(t_{CAMCAR_t} - t_{CAMCAR_{t-1}}) \\
 & (3.68) \qquad \qquad \qquad (3.31) \\
 & - 1.168 MCE\_SO2_{t-1} + 0.002 DUM\_SO2_t \\
 & (-8.79) \qquad \qquad \qquad (4.51) \\
 & n = 44 \qquad R^2 = 0.76 \qquad ee = 0.00
 \end{aligned}$$

**Gráfica 5.8. Modelo ajustado para SO<sub>2</sub>.**

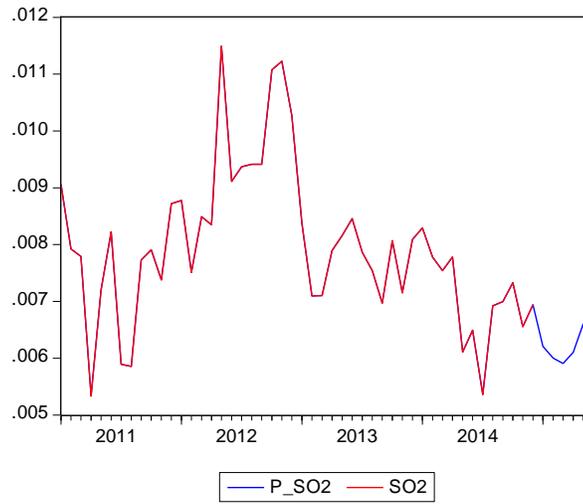


Por último, se utiliza este modelo para realizar un pronóstico de los niveles de SO<sub>2</sub>, mismos que se presentan a continuación.

**Gráfica 5.9. Valores pronosticados para SO<sub>2</sub>**



**Gráfica 5.10. Serie de tiempo de SO<sub>2</sub> con pronóstico (enero 2011-junio 2015)**



Debido al patrón irregular de este contaminante, no se aprecia si es un comportamiento adecuado o no, sin embargo, el pronóstico presenta un patrón a la baja que coincide con la tendencia de los últimos dos años.

### 5.2.4. Bióxido de Nitrógeno

Al igual que el resto de los contaminantes, se construyeron tres modelos, los cuales se presentan a continuación.

**Tabla 5.11. Modelos construidos para NO<sub>2</sub>**

Variable	NO <sub>2</sub> t - NO <sub>2</sub> t-1	NO <sub>2</sub>	ln(NO <sub>2</sub> )
<b>AUTO</b>	t <sub>AUTO t-3</sub> - t <sub>AUTO t-4</sub> 1.384 (3.39)	Auto -4.23E-08 (-0.04)	ln(Auto) -0.688 (-0.04)
<b>CAMCAR</b>	t <sub>CAMCAR t-2</sub> - t <sub>CAMCAR t-3</sub> 0.924 (3.06)	Camcar 0.00000128 (0.36)	ln(Camcar) 6.956 (0.51)
<b>CAMPAS</b>	t <sub>CAMPAS t-2</sub> - t <sub>CAMPAS t-3</sub> -0.167 (-2.66)	Campas -0.00001 (-0.59)	ln(Campas) -0.604 (-0.80)
<b>MOTO</b>	t <sub>MOTO t</sub> - t <sub>MOTO t-1</sub> -0.489 (-6.85)	Moto -0.00000282 (-0.85)	ln(Moto) -2.472 (-0.96)
<b>NO2</b>	NO <sub>2 t-3</sub> - NO <sub>2 t-4</sub> 0.242 (-2.57)		
<b>MCE</b>	MCE_NO <sub>2 t-1</sub> -0.0851 (-7.59)		
<b>DU_SF</b>	DU_SF <sub>t</sub> 0.002 (2.73)		
<b>DUM_NO2</b>	DU_NO <sub>2 t</sub> 0.007 (4.72)		
<b>Constante</b>	-0.001 (-2.05)	-0.047 (-0.9)	-47.756 (-0.82)
<b>Observaciones</b>	43	48	48
<b>R<sup>2</sup></b>	0.78	0.3000	0.3000

Nota: las cantidades entre paréntesis debajo de las estimaciones son los estadísticos t

Una vez evaluados los modelos construidos para este contaminante, se determinó que el mejor es el correspondiente a las diferencias, ya que presenta un coeficiente de determinación de 0.78. Los resultados de este modelo se presentan a continuación:

**Tabla 5.12. Resultados del modelo de regresión para NO<sub>2</sub>**Variable Dependiente: **D(NO2)**Periodo: **2011M06 2014M12**Observaciones: **43**

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.000971	0.000474	-2.048236	0.0483
D(NO2(-3))	0.241772	0.094059	2.570444	0.0147
D(LOG(AUTO(-3)),2)	1.383729	0.408259	3.389345	0.0018
D(LOG(CAMPAS(-2)),2)	-0.166113	0.062496	-2.657963	0.0119
D(LOG(CAMCAR(-2)),2)	0.924087	0.301651	3.063433	0.0043
D(LOG(MOTO),2)	-0.489291	0.071380	-6.854713	0.0000
DU_SF	0.002341	0.000856	2.735753	0.0098
MCE_NO2(-1)	-0.850897	0.112067	-7.592770	0.0000
DUM_NO2	0.006913	0.001465	4.717604	0.0000
R-squared	0.784852	Mean dependent var		0.000269
Adjusted R-squared	0.734228	S.D. dependent var		0.004553
S.E. of regression	0.002347	Akaike info criterion		-9.087294
Sum squared resid	0.000187	Schwarz criterion		-8.718671
Log likelihood	204.3768	Hannan-Quinn criter.		-8.951358
F-statistic	15.50380	Durbin-Watson stat		2.093013
Prob(F-statistic)	0.000000			

Fuente: Resultados arrojados por EViews

Como se logra apreciar en los resultados mostrados previamente, las variables del modelo final son relevantes con el 95% de confianza, y explican un 78.48% de la variación de la variable dependiente.

Por su parte la *Tabla 5.13* revela que los residuales provenientes de este modelo tienen una media aproximadamente de cero, además de que el estadístico Jarque-Bera muestra un p-value de 0.6467, y el Shapiro Wilk de 0.8166; lo que indica que los residuales se aproximan a una distribución normal.

**Tabla 5.13. Pruebas estadísticas sobre los residuales del NO<sub>2</sub>**

Prueba	Estadístico	Grados de libertad	P-value
<b>Media</b>	-4.54e-19	--	--
<b>Jarque-Bera</b>	0.871488	2	0.646783
<b>Shapiro Wilk</b>	0.98439		0.8166
<b>Heterocedasticidad de White</b>	14.19.908	8	0.0767
<b>Breusch Godfrey</b>	16.76587	12	0.1586

Fuente: Resultados arrojados por EViews

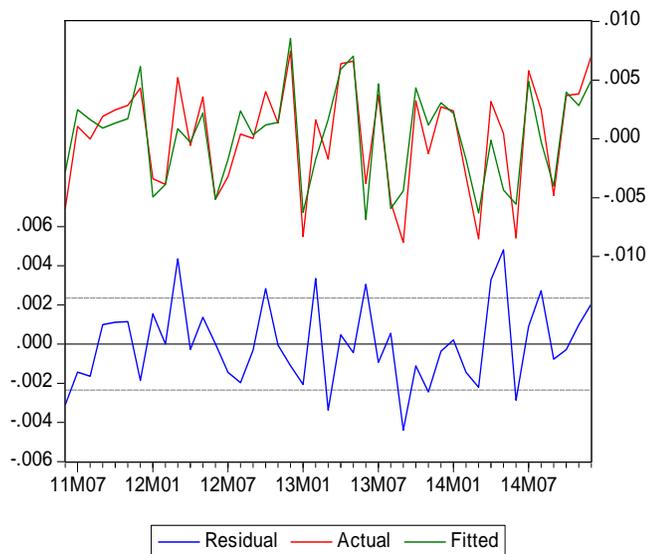
Analizando la prueba de heterocedasticidad de White podemos determinar que es un proceso homocedastico, ya que tiene un p-value de 0.0767. Por otro lado, la prueba

de correlación de Breusch-Godfrey indica un p-value de 0.1586, misma que establece la ausencia de correlación entre los residuales

En consecuencia, se cuenta con un modelo que describe el 78.48% del comportamiento de la variable dependiente, y cumple todos los supuestos con un nivel de confianza del 95%. La expresión del modelo final para el NO<sub>2</sub> se muestra a continuación (sus estadísticos t se encuentran entre paréntesis), así como el comportamiento que presenta el mismo.

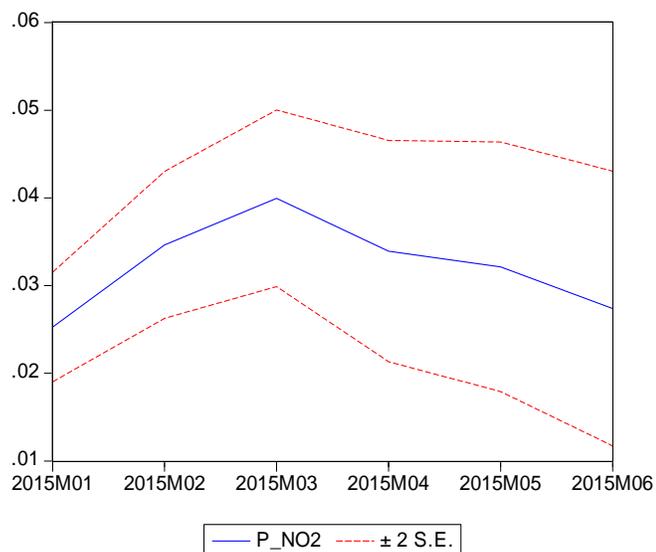
$$\begin{aligned}
 NO2_t - \widehat{NO2}_{t-1} = & -0.001 + 0.242 (NO2_{t-3} - NO2_{t-4}) + 1.384 (t_{AUTO_{t-3}} - t_{AUTO_{t-4}}) \\
 & (-2.05) \quad (-2.57) \quad (3.39) \\
 & - 0.167 (t_{CAMPAS_{t-2}} - t_{CAMPAS_{t-3}}) + 0.924 (t_{CAMCAR_{t-2}} - t_{CAMCAR_{t-3}}) \\
 & (-2.66) \quad (3.06) \\
 & - 0.489 (t_{MOTO_t} - t_{MOTO_{t-1}}) + 0.002 DU_{SF_t} - 0.851 MCE_{NO2_{t-1}} \\
 & (-6.85) \quad (2.73) \quad (-7.59) \\
 & + 0.007 DUM_{NO2_t} \\
 & (4.72) \\
 n = 43 \quad R^2 = 0.78 \quad ee = 0.00
 \end{aligned}$$

**Gráfica 5.12. Modelo ajustado para NO<sub>2</sub>**



Una vez concluida la validación del modelo, el paso siguiente es utilizarlo para realizar un pronóstico, el cual se presenta en las siguientes gráficas.

**Gráfica 5.13. Valores pronosticados para NO<sub>2</sub>**



**Gráfica 5.14. Serie de tiempo de NO<sub>2</sub> con pronóstico**



Al igual que el SO<sub>2</sub>, los niveles de NO<sub>2</sub> han sido un tanto irregulares a lo largo de los años, por lo que no es perceptible a simple vista si el pronóstico es congruente con el comportamiento histórico. De igual forma, el pronóstico obtenido con el modelo muestra un comportamiento irregular.

### 5.2.5. Monóxido de Carbono

Finalmente, se construyeron modelos de regresión para el monóxido de carbono, mismos que se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 5.14. Modelos construidos para CO**

Variable	CO <sub>t</sub>	CO	ln(CO)
<b>AUTO</b>	AUTO <sub>t</sub> 7.39E-07 (2.96)	Auto -0.00002 (-0.44)	ln(Auto) -1.538 (-0.07)
<b>CAMCAR</b>		Camcar 0.00009 (0.60)	ln(Camcar) 5.592 (0.36)
<b>CAMPAS</b>	CAMPAS <sub>t</sub> 8.50E-04 (2.44)	Campas 0.0009 (0.98)	ln(Campas) 0.326 (0.38)
<b>MOTO</b>	MOTO <sub>t</sub> -0.00009191 (-3.42)	Moto -0.00002 (-0.14)	ln(Moto) -1.839 (-0.62)
<b>CO</b>	CO t-1 0.225 (2.29)		
<b>PRECIP</b>	PRECIP <sub>t</sub> -0.002 (-5.41)		
<b>VEL_VIENTO</b>	VEL_VIENTO <sub>t</sub> -0.235 (-3.02)		
<b>Constante</b>	-1.305 (-2.66)	-0.2415 (-0.11)	-29.613 (-0.44)
<b>Observaciones</b>	47	48	48
<b>R<sup>2</sup></b>	0.81	0.1898	0.197

Nota: las cantidades entre paréntesis debajo de las estimaciones son los estadísticos t

A diferencia de los modelos anteriores, el que mejor ajuste presentó fue el que consideró las variables sin ningún tipo de tratamiento tal y como se presenta a continuación.

**Tabla 5.15. Resultados del modelo de regresión para CO**

Variable dependiente: **CO**  
 Periodo: **2011M02 2014M12**  
 Observaciones: **47**

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-1.305072	0.490399	-2.661246	0.0112
CO(-1)	0.225026	0.098353	2.287930	0.0275
AUTO	7.40E-06	2.50E-06	2.963462	0.0051
CAMPAS	0.000850	0.000348	2.440942	0.0192
MOTO	-9.19E-05	2.68E-05	-3.425595	0.0014
PRECIP	-0.001865	0.000345	-5.412974	0.0000
VEL_VIENTO	-0.235228	0.077947	-3.017800	0.0044
R-squared	0.815523	Mean dependent var	1.081880	
Adjusted R-squared	0.787852	S.D. dependent var	0.207440	
S.E. of regression	0.095546	Akaike info criterion	-1.721812	
Sum squared resid	0.365162	Schwarz criterion	-1.446258	
Log likelihood	47.46257	Hannan-Quinn criter.	-1.618119	
F-statistic	29.47159	Durbin-Watson stat	1.640505	
Prob(F-statistic)	0.000000			

Fuente: Resultados arrojados por EViews

Con un nivel de confianza del 95%, las variables presentadas en el modelo son relevantes y describen un 81.55% de la variación en la concentración de monóxido de carbono.

Cabe resaltar que los coeficientes en este modelo son tan pequeños debido a que las variables referentes a los vehículos no recibieron tratamiento, y la escala de medición con respecto a la variable objetivo es muy grande.

Por otro lado, el análisis del histograma de los residuales permite verificar que éstos tienen una media aproximadamente igual a cero como se muestra en la *Tabla 5.16*, así mismo, el estadístico Jarque-Bera, junto con el Shapiro Wilk otorgan evidencia suficiente para afirmar que se distribuyen de forma normal ya que tienen un p-value asociado de 0.6993 y 0.4893 respectivamente.

**Tabla 5.16. Pruebas estadísticas sobre los residuales del CO**

Estadístico	Valor	Grados de libertad	P-value
Media	-7.37e-16	--	--
Jarque-Bera	0.715068	2	0.699399
Heterocedasticidad de White	26.55157	27	0.4882
Shapiro Wilk	0.9774		0.4893
Breusch-Godfrey	16.72950	12	0.1601

Fuente: Resultados arrojados por EViews.

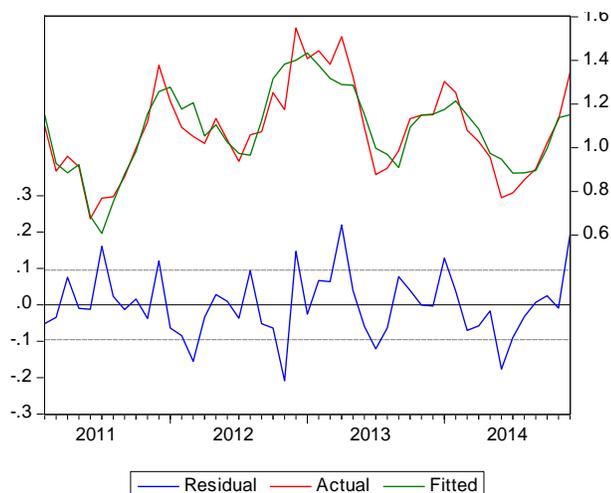
Para analizar la correlación entre los residuales se evalúa la prueba Breusch-Godfrey, la cual tiene un p-value vinculado de 0.1601, valor que afirma la ausencia de correlación entre los residuales.

Por su parte, la prueba de heterocedasticidad de White indica que los residuales son homocedasticos, ya que su p-value tiene un valor superior a 0.05.

Una vez que se validaron los supuestos en los que se basa la regresión, podemos afirmar que es un buen modelo y que describe el 81.55% de la variable independiente. La ecuación de este se presenta a continuación, seguido del grafico que muestra su comportamiento.

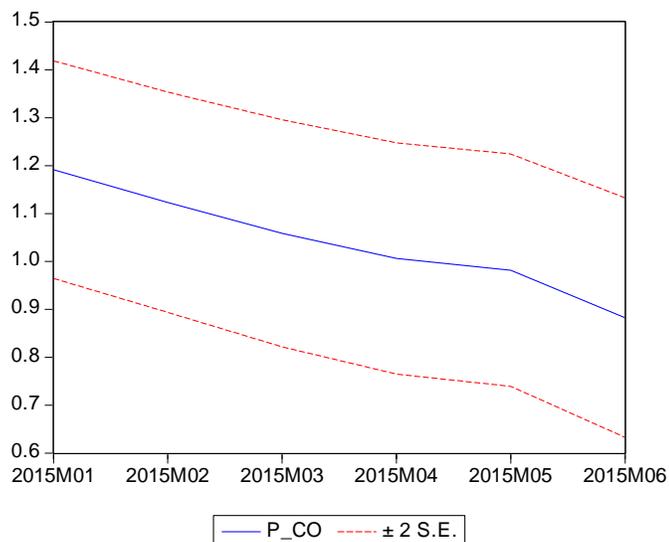
$$\begin{aligned}
 CO_t = & -1.305 + 0.225CO_{t-1} + 0.739E^{-6}AUTO_t + 849.828E^{-6}CAMPAS_t \\
 & (-2.66) \quad (2.29) \quad (2.96) \quad (2.44) \\
 & - 9.191E^{-5}MOTO_t - 0.002 * PRECIP_t - 0.235VEL_VIENTO_t \\
 & (-3.42) \quad (-5.41) \quad (-3.02) \\
 & n = 47 \quad R^2 = 0.81 \quad ee = 0.09
 \end{aligned}$$

**Gráfica 5.15. Modelo ajustado para CO**

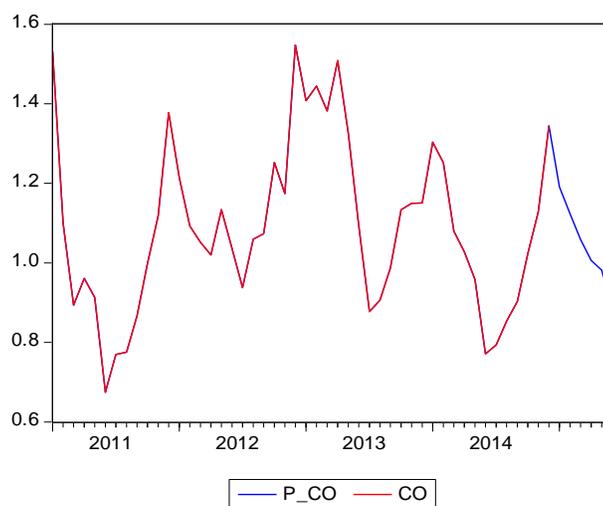


Finalmente, construimos un pronóstico para el CO con base en el modelo validando, el cual muestra el siguiente comportamiento.

**Gráfica 5.16. Valores pronosticados para CO (enero-junio 2016)**



**Gráfica 5.17. Serie de tiempo de CO con pronóstico (enero 2011- junio 2016)**



Se puede apreciar en la gráfica que los valores pronosticados siguen una tendencia a la baja, justo como lo ha hecho en los mismos meses de los años anteriores, coincidiendo con el patrón estacional del CO, por lo que se puede considerar que el pronóstico es coherente.

### 5.3. Propuesta de control vehicular para controlar la contaminación atmosférica.

Una vez construidos los modelos para todos los contaminantes se evaluó el impacto que tendría una disminución de cada una de las categorías de la flota vehicular, y se determinó que, de manera general, los vehículos que generan mayor contaminación son los camiones de carga y los camiones de pasajeros.

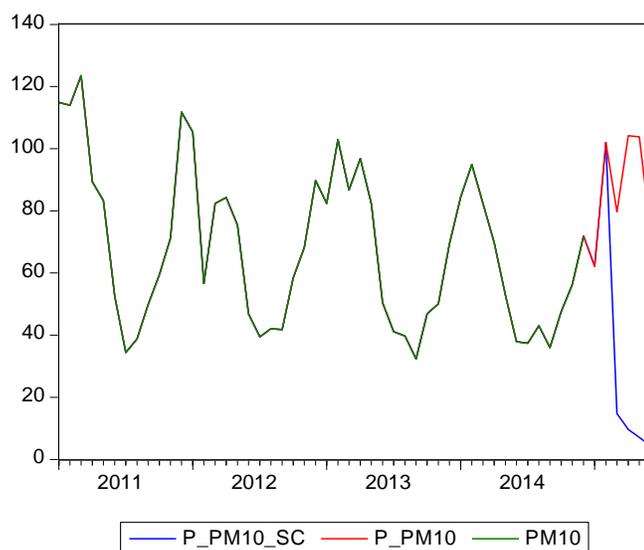
Como resultado de este análisis, se realizaron proyecciones de los niveles de contaminantes reduciendo de forma gradual la cantidad de estos vehículos llegando a una reducción total del 5%, obteniendo una reducción en cada contaminante como se muestra en las siguientes tablas y gráficas:

**Tabla 5.17. Niveles pronosticados de PM<sub>10</sub> con y sin reducción de la flota vehicular**

Mes	PM10 sin reducción	PM10 con reducción
ene-15	62.1397	62.1397
feb-15	102.0146	102.0146
mar-15	79.7006	14.7462
abr-15	104.1646	9.6002
may-15	103.8264	7.1014
jun-15	73.1822	4.3602

Fuente: Elaboración del autor con datos arrojados por EViews

**Gráfica 5.18. Serie de tiempo de PM<sub>10</sub> con pronósticos modificando flota vehicular (enero 2011- junio 2016)**



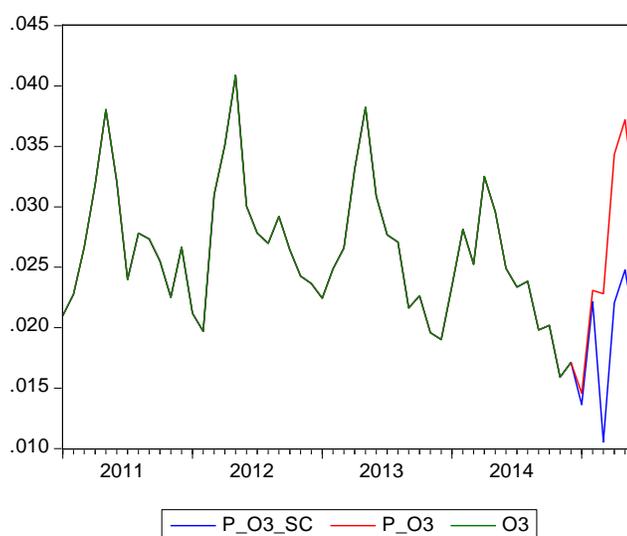
Fuente: Elaboración del autor con datos arrojados por EViews

**Tabla 5.18. Niveles pronosticados de O<sub>3</sub> con y sin reducción de la flota vehicular**

Mes	O <sub>3</sub> sin reducción	O <sub>3</sub> con reducción
ene-15	0.0203	0.0136
feb-15	0.0217	0.0221
mar-15	0.0223	0.0105
abr-15	0.0286	0.0221
may-15	0.0250	0.0248
jun-15	0.0239	0.0195

Fuente: Elaboración del autor con datos arrojados por EViews

**Gráfica 5.19. Serie de tiempo de O<sub>3</sub> con pronósticos modificando la flota vehicular (enero 2011- junio 2016)**



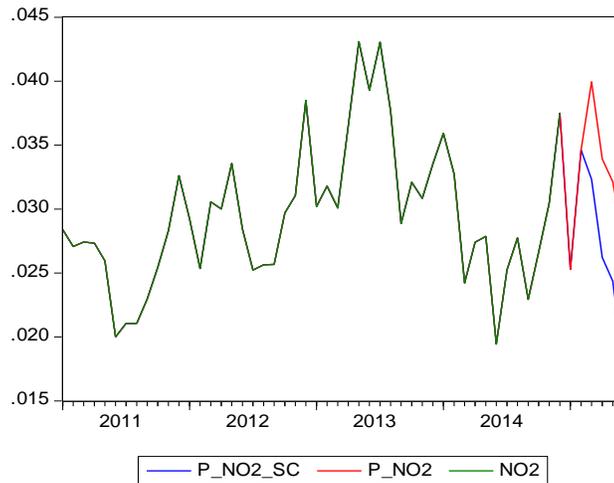
Fuente: Datos arrojados por EViews

**Tabla 5.19. Niveles pronosticados de NO<sub>2</sub> con y sin reducción de la flota vehicular**

Mes	NO <sub>2</sub> sin reducción	NO <sub>2</sub> con reducción
ene-15	0.0253	0.0253
feb-15	0.0346	0.0346
mar-15	0.0400	0.0323
abr-15	0.0339	0.0262
may-15	0.0321	0.0244
jun-15	0.0274	0.0177

Fuente: Elaboración del autor con datos arrojados por EViews

**Gráfica 5.20. Serie de tiempo de NO<sub>2</sub> con pronósticos modificando la flota vehicular (enero 2011- junio 2016)**



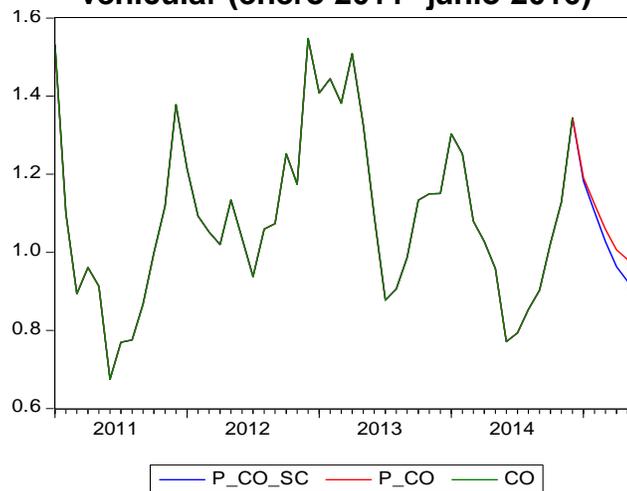
Fuente: Datos arrojados por EViews

**Tabla 5.10. Niveles pronosticados de CO con y sin reducción de la flota vehicular**

Mes	CO sin reducción	CO con reducción
ene-15	1.1915	1.1828
feb-15	1.1233	1.1036
mar-15	1.0586	1.0273
abr-15	1.0063	0.9629
may-15	0.9817	0.9261
jun-15	0.8823	0.8234

Fuente: Elaboración del autor con datos arrojados por EViews

**Gráfica 5.21. Serie de tiempo de CO con pronósticos modificando la flota vehicular (enero 2011- junio 2016)**



Fuente: Datos arrojados por EViews

El pronóstico para el SO<sub>2</sub> se manejará como un caso aparte debido a que el impacto en el pronóstico de la disminución de los camiones fue una reducción muy radical en la concentración de este contaminante, llegando incluso a niveles por debajo de cero, esto debido a que ambos tipos de vehículos son los que presentan mayor emisión de este contaminante como causa del tipo de combustible que utilizan; en los modelos no se consideran otras fuentes de contaminación y éstas dos variables son las que más impacto tienen en este contaminante en particular, por lo tanto los coeficientes asociados a estas son muy elevados dentro del modelo, principalmente en los camiones de carga, y una reducción pequeña en estos provoca una disminución muy marcada en la concentración del contaminante en cuestión para el modelo construido.

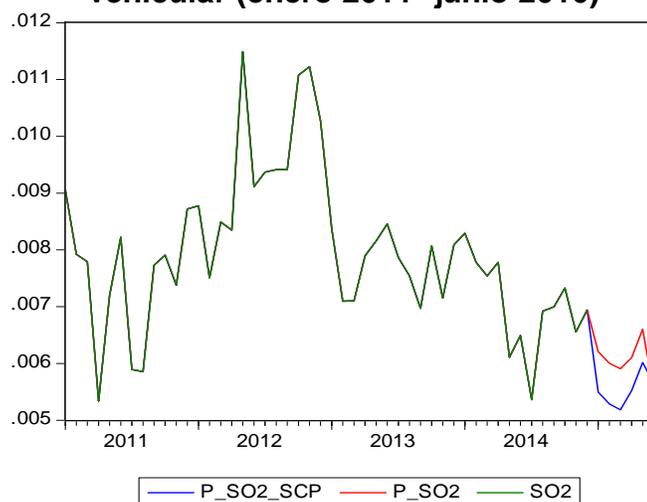
Por esta razón, para el caso de este contaminante se expondrá el impacto que tendría solo la reducción de los camiones de pasajeros, la cual se presenta en la siguiente gráfica.

**Tabla 5.21. Niveles pronosticados de SO<sub>2</sub> con y sin reducción de la flota vehicular**

Mes	SO <sub>2</sub> sin reducción	SO <sub>2</sub> con reducción
ene-15	0.0062	0.0055
feb-15	0.0060	0.0053
mar-15	0.0059	0.0052
abr-15	0.0061	0.0055
may-15	0.0066	0.0060
jun-15	0.0055	0.0056

Fuente: Elaboración del autor con datos arrojados por EViews

**Gráfica 5.22. Serie de tiempo de SO<sub>2</sub> con pronósticos modificando la flota vehicular (enero 2011- junio 2016)**



Fuente: Datos arrojados por EViews

Como se logra apreciar en la *Gráfica 5.22.*, una reducción paulatina en la flota vehicular de camiones de carga y camiones de pasajeros hasta llegar a un 95% de la flota actual podría disminuir de manera considerable la contaminación atmosférica en la ZMVT.

## Conclusiones

Resumiendo la información presentada en este capítulo, se obtuvieron cinco modelos, 4 con un nivel de confianza del 95%, y uno con una confianza del 90%, el cual corresponde al ozono.

Contrario a lo que se esperaba, la cantidad de autos en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca resultó no ser tan importante en los modelos; por el contrario, la cantidad de camiones de pasajeros y de camiones carga fueron las variables vehiculares que presentaron un mayor impacto en los niveles de contaminación.

Finalmente, la Tabla 5.22 presenta la reducción porcentual de cada contaminante, cabe resaltar que la reducción tan elevada en el PM<sub>10</sub> podría ser tan alta debido a que el coeficiente  $R^2$  obtenido en el modelo fue muy bajo; así mismo, la variación de los porcentajes en el ozono podría ser causada por los niveles de radiación.

**Tabla 5.22. Porcentajes de reducción en los niveles de contaminación con la disminución de la flota vehicular**

Fecha	PM10	O3	NO2	CO	SO2
ene-15	0.0%	32.9%	0.0%	0.7%	11.5%
feb-15	0.0%	-2.2%	0.0%	1.8%	12.0%
mar-15	81.5%	52.7%	19.1%	3.0%	12.3%
abr-15	90.8%	22.9%	22.7%	4.3%	9.5%
may-15	93.2%	0.7%	24.2%	5.7%	8.9%
jun-15	94.0%	18.5%	35.4%	6.7%	-2.8%

Fuente: Elaboración del autor con datos arrojados por EViews

## Conclusiones

Como se planteó en una de las hipótesis del presente trabajo, en los últimos meses analizados, los niveles de contaminación aumentaron para cuatro de los contaminantes analizados ( $PM_{10}$ ,  $NO_2$ ,  $CO$  y  $SO_2$ ); sin embargo, este incremento se debió a factores estacionales de estas variables; en contraste, los contaminantes  $SO_2$ ,  $O_3$  y  $PM_{10}$ , presentan una tendencia decendente a lo largo de todo el periodo analizado, contrario a la tendencia que se conjeturaba. Por su parte, el  $NO_2$  fue el único que presentó un alza en sus niveles.

A su vez, se encontró que las condiciones de la contaminación atmosférica son preocupantes debido a que dos de los contaminantes analizados,  $PM_{10}$  y  $O_3$ , han presentado niveles superiores a los permitidos por la Norma Oficial Mexicana, siendo permanente el  $PM_{10}$ , y ocasional en el caso del  $O_3$ .

Por otro lado, se logró determinar que a pesar de la gran cantidad de automoviles, los camiones de carga y los de pasajeros; que presentan un menor número de unidades en la región, son los que tienen un mayor impacto en los niveles de contaminación. Esto puede ser causado por la falta de mantenimiento que suelen presentar estos vehículos, aunado con el tipo de combustible que utilizan, el cual tiene un mayor impacto ambiental.

Derivado de lo anterior, se propone la implementación de una política que restrinja el uso de camiones de carga en la región en horarios matutinos, ya que es en este horario cuando la concentración de todos los contaminantes presentan un incremento importante; lo anterior permitiría una reducción en las emisiones, además de que facilitaría su dispersión.

En el mismo sentido se propone una política que otorgue incentivos a empresas de transporte de material y de pasajeros que cuenten con camiones modernos, con tecnología para la reducción de emisiones y/o diferentes tipos de combustibles.

Así mismo, se sugiere un programa de reordenamiento del transporte público en la región, el cual diversifique las rutas de camiones de pasajeros, para lograr un flujo vehicular constante.

## Referencias Bibliográficas

### 1. Electrónico:

- Asociación médica mundial (2016), “*Salud y Medio Ambiente*”, EN: <http://www.wma.net/es/20activities/30publichealth/30healthenvironment/> (11 de Julio de 2016, 10:20 hrs)
- CEPANAF (2014) “*Categorías de las áreas naturales protegidas*”, EN: [http://cepanaf.edomex.gob.mx/categoria\\_areas\\_naturales\\_protegidas](http://cepanaf.edomex.gob.mx/categoria_areas_naturales_protegidas) (08 de septiembre de 2016, 20:15 hrs)
- Chapingo (2012), “*Atmósfera, Calidad del Aire*”, EN: [http://dicifo.chapingo.mx/licenciatura/mambiente/informe\\_resumen13/05\\_atmosfera/5\\_1\\_2.html](http://dicifo.chapingo.mx/licenciatura/mambiente/informe_resumen13/05_atmosfera/5_1_2.html) (14 de Agosto de 2016, 20:05 hrs)
- COESPO (2000), “*Migración*”, EN: <http://coespo.edomex.gob.mx/migracion> (18 de septiembre de 2016, 9:33hrs)
- COESPO (2014), “*Zonas metropolitanas del Estado de México*”, EN: [http://coespo.edomex.gob.mx/zonas\\_metropolitanas](http://coespo.edomex.gob.mx/zonas_metropolitanas) (14 de septiembre de 2016, 19:20 hrs)
- CONANP, CONABIO (2014), “*Áreas protegidas en México*”, EN: <http://www.biodiversidad.gob.mx/region/areasprot/enmexico.html> (08 de septiembre de 2016, 20:17 hrs)
- European Comission (2016), “*Air Quality Standards*”, EN: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (5 de agosto de 2016, 20:20 hrs)
- EViews (2017), “*User’s Guide*”, EN: [http://www.eviews.com/help/helpintro.html#page/content%2Fpreface.html%23wwwconnect\\_header](http://www.eviews.com/help/helpintro.html#page/content%2Fpreface.html%23wwwconnect_header) (15 de Enero de 2017, 17:00 hrs.)
- INECC (2014a), “*Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire*”, EN: <http://www.inecc.gob.mx/calair-presentacion> (12 de Julio de 2016, 13:50 hrs)
- INECC (2014b), “*Fuentes de contaminación del aire*”, EN: <http://www.inecc.gob.mx/calair-informacion-basica/537-calair-fuentes> (1 de Octubre de 2016, 14:50 hrs)
- INECC (2014c), “*Modelos Matemáticos de la Calidad del Aire*”, EN: <http://www.inecc.gob.mx/calair-herramientas-analisis/557-calair-modelos> (22 de Julio de 2016, 12:33 hrs).

INEGI (2016), “Encuesta Intercensal 2015”, EN: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/encuestas/hogares/especiales/ei2015/> (15 de Septiembre de 2016, 12:24 hrs)

INEGI, “Mapoteca Digital”, EN: <http://cuentame.inegi.org.mx/mapasitio/default.aspx?tema=MS> (14 de septiembre de 2016, 19:43 hrs)

INEGI (1962), “VIII Censo General de Población 1960”, EN: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv1960/default.aspx> (15 de Septiembre de 2016, 12:45hrs)

Observatorio del Estado de México (2009), “Zona Metropolitana del Valle de Toluca”, EN: [http://observatorio.edomex.gob.mx/sites/observatorio.edomex.gob.mx/files/files/Zona\\_Valle\\_Toluca.pdf](http://observatorio.edomex.gob.mx/sites/observatorio.edomex.gob.mx/files/files/Zona_Valle_Toluca.pdf) (27 de Agosto de 2016, 16:45 hrs)

Observatorio del Estado de México (2015), “ZMVT”, EN: <http://observatorio.edomex.gob.mx/zmvt> (14 de septiembre de 2016, 19:30)

OMS (2006), “La exposición a riesgos ambientales provoca casi una cuarta parte de las enfermedades”, EN: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2006/pr32/es/> (22 de Julio de 2016, 11:40 hrs.)

OMS (2014), “7 millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica”, EN: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/es/> (22 de Julio de 2016, 12:15 hrs.)

OMS (2016a), “Calidad del aire (exterior) y salud”, EN: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/> (22 de Julio de 2016, 11:53 hrs.)

OMS (2016b), “Los efectos sobre la salud”, EN: [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/databases/health\\_impacts/es/index2.html](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/health_impacts/es/index2.html) (25 de Julio de 2016 15:53hrs)

OMS (2016c), “WHO Global Urban Ambient Air Pollution Database” EN: [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/databases/cities/en/](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/) (02 de Octubre de 2017, 13:40 hrs.)

Organización Panamericana de la Salud, “IMECA”, EN: <http://bvspers.paho.org/bvsci/e/compendio/manejo/monito/info/imeca.html> (15 de agosto de 2016, 9:16 hrs)

RAMA-ZMVT (2014), EN: <http://rama.edomex.gob.mx/> (10 de agosto de 2016, 16:14 hrs).

SEMARNAT (2012), “*Lluvia ácida, efectos y consecuencias*”, EN: [http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/05\\_atmosfera/recuadro2.html](http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/05_atmosfera/recuadro2.html) (22 de Julio de 2016, 12:23 hrs)

SEMARNAT (2014), “*Inventario Nacional de Emisiones 2005 y 2008*”, EN: <http://sinea.semarnat.gob.mx/sinae.php?process=UkVQT1JURUFET1l=&categ=99> (6 de octubre de 2016, 11:33 hrs)

SEMARNAT. “*Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA)*”, EN: [http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5\\_8080/ibi\\_apps/WFServl\\_et9f10.html](http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServl_et9f10.html) (9 de Septiembre de 2016, 11:23 hrs).

Secretaría de Salud, “*Lista de normas oficiales mexicanas de la Secretaría de Salud*”. EN: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nomssa.html> (22 de Julio de 2016, 12:30 hrs).

SIMAT (2016), EN: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php> (10 de octubre de 2016, 19:20 hrs).

USEPA (2016), “*NAAQS Table*”, EN: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table> (5 de agosto de 2016, 20:15 hrs)

## 1. Publicaciones

Ayuntamiento de Toluca (2012), Plan de acción climática municipal, Toluca, México.

Borja-Aburto V, Castillejos M, Gold S, Bierzwinski D, Loomis D (1998), “Mortality and ambient fine particles in southwest in Mexico City”, *Environ, Health Perspect*, vol. 106, pp.849-855.

Boubel, R., Vallero, D., Fox D., Turner, B. (1994). Fundamentals of Air Pollution, Academic Press, Tercera Edición, Estados Unidos.

Centro Nacional del Medio Ambiente (2007). Desarrollo y aplicación de un modelo de pronóstico de calidad de aire (MP10) para Temuco y Padre Las Casas, Santiago, Chile.

COESPO (2012), Zona metropolitana del Valle de Toluca, Aspectos Sociodemográficos; 1ra edición; Toluca, México.

Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental (2014), Informe Nacional de Calidad del Aire 2013, 1ra edición, México

Correa A. Muñoz R. García G. Análisis de ozono y óxidos de nitrógeno mediante técnicas de series de tiempo y regresión lineal; México.

DOF. (2009) Decreto Número 13 por el que se aprueba la declaratoria de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Gaceta de Gobierno, Tomo CLXXXVIII, 19 de noviembre de 2009.

Gaitán Mauricio, Cancino Juliana, Behrentz Eduardo. (2007), Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. En *Revista de Ingeniería*, no. 26, pp. 81-92, Colombia

Gobierno del Estado de México (2005), Plan Regional de Desarrollo Urbano del Valle de Toluca, Gobierno del Estado de México, México

Gobierno del Estado de México (2007), Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, 2004, 1ra edición, Estado de México.

Gobierno del Estado de México (2012), Programa para mejorar la calidad del aire del Valle de Toluca (2012-2017), Gobierno del Estado de México, México

Gujarati, D. (2004). Econometría, 4ª Edición, Mc Graw Hill, New York.

Gutiérrez JH, Corey G, Fortoul T. (1997). Contaminación del aire; riesgos para la salud; Primera Edición, Editorial Manual Moderno, México.

Hernández L, Téllez M, Sanín L, Lacasaña M, Campos A (2000). “Relación entre consultas de emergencia por enfermedades respiratorias y contaminación del aire en Ciudad Juárez, Chihuahua”. *Salud Pública*, pp. 288-297.

Hexter y Goldsmith (1971), “Carbon Monoxide: Association of Community Air Pollution with Mortality”. Departamento de Salud Pública en el estado de California, vol. 172.

Holguín F, Téllez M, Hernández M, Cortez M, Chow J, Watson J, Mannino D, Romieu I (2003), “Air Pollution and heart rate variability among the elderly in Mexico City”, *Epidemiology*, pp- 521-527.

Hurtado Magali, (2015), “La salud ambiental en México”, Instituto Nacional de Salud Pública.

Loomis D, Borja S, Bangdiwala C (1996) “Ozone exposure and daily mortality in Mexico City: a time-series analysis”. Reporte de Investigación 75, Health Effects Institute Cambridge, Massachusetts.

Romieu I., Gouveia N., Cifuentes LA, Ponce de Leon A., Junger W., Hurtado-Díaz M., Miranda-Soberanis V., Vera J., Strappa V., Rojas-Bracho L., Carbajal-Arroyo L., Tzintzun-Cervantes G. (2012). Multicity Study of Air Pollution and Mortality in Latin America (the ESCALA Study). Research Report 171. Health Effects Institute, Boston, Massachusetts.

INE-SEMARNAT (2011), Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009), 1ª Edición, INE-SEMARNAT, México.

Kutner M, Nachtsheim C, Neter J, Li W. (2005). Applied Linear Statistical Models, 5ª Edición, Mc Graw Hill Irwin, New York.

Montero López Cecilia (2011), Pronóstico de la Calidad del Aire en el área metropolitana de la Ciudad de México a través del Análisis de las Series de Tiempo de los componentes del IMECA, México.

NADF-009-AIRE-2006. Norma ambiental para el Distrito Federal NADF-009-AIRE-2006 que establece los requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire. Publicado en Gaceta Oficial del Distrito Federal el 29 de nov. 2006.

NOM-022-SSA1-1993. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de azufre. Publicado en DOF el 23 de dic. 1994,

NOM-023-SSA1-1993. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno. Publicado en DOF el 18 de ene. 1994.

NOM-021-SSA1-1993. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono. Publicado en DOF el 18 de ene. 1994.

NOM-025-SSA1-1993. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al material particulado. Publicado en DOF el 23 de dic. 1994.

NOM-020-SSA1-1993. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al ozono. Publicado en DOF el 30 de oct. 2002.

NOM-035-ECOL-1993. Métodos de medición para determinar la concentración de Partículas Suspendidas Totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición. Publicado en DOF el 18 de oct. 1993.

NOM-025-SSA1-2014. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Publicado en DOF el 20 de agosto 2014.

NTEA-007-SMA-DS-2006. Requisitos para elaborar el Índice Metropolitano de la calidad del aire. Publicado en Periódico Oficial del Gobierno del Estado de México el 5 de junio de 2007.

Novoa, J., Parra, D., Quijano, S., Orrego, D., Becerra, M. (2014). Análisis de dependencia usando regresión lineal múltiple y regresión de componentes principales en contaminantes del aire y parámetros meteorológicos: caso de estudio. *Revista QUID*, (23), 13-20.

OMS (2005), Guías de la calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, 1ra edición, WHO Press, Suiza.

ONU (2012), Report of the United Nations Conference on Environment and Development, pp. 3-14, Nueva York.

OMS (2012), Our Planet, Our Health, Our Future, 1ra edición, WHO Press, Río de Janeiro.

Otero, J. (1993). Econometría, series temporales y predicción, S.A. Alfa Centauro, 1ª Edición, España.

Polomba R, CEPAL (2002), Calidad de Vida Conceptos y Medidas. Cepal, Chile.

Secretaria del Medio Ambiente del Estado de México (2012), Programa para mejorar la calidad del aire del Valle de Toluca (2012-2017) (Proaire); 1ra edición, México.

SEDESOL, CONAPO, INEGI (2005); Delimitación de las zonas metropolitanas de México, 1ra edición, 2005, México.

SEDESOL, CONAPO, INEGI (2012), Delimitación de las Zonas metropolitanas de México 2010. 1ra edición, México.

SEMARNAT (2012), Informe de la Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental 2010-2012, Primera Edición, Semarnat; Proyectos por entidad pp. 39, Proaire pp. 33, Programa de transporte limpio pp.49; México.

SEMARNAT (2016), Resumen Ejecutivo. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2015. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde; Edición 2015, México

SMAGDF, SMAGEM, SEMARNAT, SSA (2015), Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020, México

Strauss y Mainwaring (1990), Contaminación del Aire, causas, efectos y soluciones, Editorial Trillas, 1ª Edición, México.

Trejo Rodolfo (2006), El IMECA: Indicador del Grado de Contaminación de la Atmósfera. En Revista *Conciencia Tecnológica*, no. 31, México.

Villareal A, Hernández L, Escamilla M, Sierra J, Ramírez M, Cortez M (2008), "Air Pollution, Airway inflammation, and lung function in a cohort study of Mexico City schoolchildren". *European Respiratory Journal*, pp. 548-552.

## Índice de Tablas

Tabla 1.1. Composición gaseosa del aire seco no contaminado .....	6
Tabla 1.2. Composición gaseosa del aire humedo no contaminado .....	6
Tabla 1.3. Gases reactivos en la atmósfera.....	7
Tabla 1.4. Clasificación del IMECA .....	9
Tabla 1.5.: Intervalos de concentración para asignación de colores .....	10
Tabla 1.6. Contaminantes por Ciudad .....	12
Tabla 1.7. Valores de PM recomendados por la OMS.....	17
Tabla 1.8. Normativa mexicana para PM.....	17
Tabla 1.9. Tipo de monitoreo para PM <sub>10</sub> .....	19
Tabla 1.10. Algoritmo para el cálculo de PM <sub>10</sub> .....	20
Tabla 1.11. Algoritmo para el cálculo de PM <sub>2.5</sub> .....	20
Tabla 1.12. Normativa mexicana para O <sub>3</sub> .....	22
Tabla 1.13. Algoritmo para el cálculo de Ozono O <sub>3</sub> .....	23
Tabla 1.14. Normativa mexicana para SO <sub>2</sub> .....	25
Tabla 1.15. Algoritmo para el cálculo de Bióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ).....	27
Tabla 1.16. Normativa mexicana para NO <sub>2</sub> .....	28
Tabla 1.17. Algoritmo para el cálculo de NO <sub>2</sub> .....	30
Tabla 1.18. Normativa mexicana para CO .....	31
Tabla 1.19. Algoritmo para el cálculo de CO .....	32
Tabla 2.1. Municipios de la ZMVT (COESPO) .....	34
Tabla 2.2. Municipios de la ZMVT (DOF 2009) .....	35
Tabla 2.3. Épocas climatológicas en la ZMVT .....	37
Tabla 2.4. Áreas naturales protegidas en la ZMVT .....	39
Tabla 2.5. Historia de la RAMA-ZMVT .....	46
Tabla 2.6. Estaciones de monitoreo de la ZMVT .....	47
Tabla 2.7. Variables que miden las estaciones de monitoreo .....	48
Tabla 3.1. Comparación de la situación de los contaminantes en la ZMVT.....	93
Tabla 5.1. Variables incluidas en los modelos .....	118
Tabla 5.2. Modelos construidos para PM <sub>10</sub> .....	119
Tabla 5.3. Resultados del mejor modelo de regresión para PM <sub>10</sub> .....	120
Tabla 5.4. Pruebas estadísticas sobre los residuales del PM <sub>10</sub> .....	120
Tabla 5.5. Modelos construidos para O <sub>3</sub> .....	123
Tabla 5.6. Resultados del mejor modelo de regresión para O <sub>3</sub> .....	124
Tabla 5.7. Pruebas estadísticas sobre los residuales del O <sub>3</sub> .....	124

<b>Tabla 5.8. Modelos contruidos para SO<sub>2</sub></b> .....	<b>128</b>
<b>Tabla 5.9. Resultados del mejor modelo de regresión para SO<sub>2</sub></b> .....	<b>128</b>
<b>Tabla 5.10. Pruebas estadísticas sobre los residuales del SO<sub>2</sub></b> .....	<b>129</b>
<b>Tabla 11. Modelos contruidos para NO<sub>2</sub></b> .....	<b>132</b>
<b>Tabla 5.12. Resultados del modelo de regresión para NO<sub>2</sub></b> .....	<b>133</b>
<b>Tabla 5.13. Pruebas estadísticas sobre los residuales del NO<sub>2</sub></b> .....	<b>133</b>
<b>Tabla 14. Modelos contruidos para CO</b> .....	<b>136</b>
<b>Tabla 5.15. Resultados del modelo de regresión para CO</b> .....	<b>137</b>
<b>Tabla 5.16. Pruebas estadísticas sobre los residuales del CO</b> .....	<b>138</b>
<b>Tabla 5.17. Niveles pronosticados de PM<sub>10</sub> con y sin reducción de la flota vehicular</b> .....	<b>140</b>
<b>Tabla 5.18. Niveles pronosticados de O<sub>3</sub> con y sin reducción de la flota vehicular</b> .....	<b>141</b>
<b>Tabla 5.19. Niveles pronosticados de NO<sub>2</sub> con y sin reducción de la flota vehicular</b> .....	<b>141</b>
<b>Tabla 5.10. Niveles pronosticados de CO con y sin reducción de la flota vehicular</b> .....	<b>142</b>
<b>Tabla 5.21. Niveles pronosticados de SO<sub>2</sub> con y sin reducción de la flota vehicular</b> .....	<b>143</b>
<b>Tabla 5.22. Porcentajes de reducción en los niveles de contaminación con la disminución de la flota vehicular</b> .....	<b>144</b>

## Índice de Gráficas

Gráfica 1.1. Límites establecidos para PM <sub>2.5</sub> .....	18
<i>Gráfica 1.2. Límites establecidos para PM<sub>10</sub></i> .....	18
Gráfica 1.3. Límites establecidos para O <sub>3</sub> . Promedio móvil de 8 horas .....	23
Gráfica 1.4. Límites establecidos para SO <sub>2</sub> . Promedio de 24 horas .....	26
Gráfica 1.5. Límites establecidos para NO <sub>2</sub> . Promedio horario .....	29
Gráfica 1.6. Límites establecidos para CO. Promedio móvil de 8 horas .....	31
Gráfica 2.1. Población del Estado de México .....	41
Gráfica 2.2. Población total en la ZMVT (2015) .....	41
Gráfica 2.3. Distribución de la población de la ZMVT por edad quinquenal, 1960 .....	42
Gráfica 2.4. Distribución de la población de la ZMVT por edad quinquenal, 2015 .....	43
Gráfica 2.5. Contaminantes en IMECA.....	50
Gráfica 2.6. Promedio anual de la concentración de PM <sub>10</sub> en las estaciones de monitoreo 2011-2016 .....	51
Gráfica 2.7. IPE para el límite de 24 horas de PM <sub>10</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016 .....	52
Gráfica 2.8. Distribución porcentual de los niveles máximos de PM <sub>10</sub> en las estaciones de monitoreo, 2011-2016 .....	53
Gráfica 2.9. PM <sub>10</sub> (IMECA) .....	53
Gráfica 2.10. Promedio horario de la concentración de PM <sub>10</sub> en las estaciones de monitoreo, 2011-2016 .....	54

Gráfica 2.11. Promedio Mensual de la concentración de PM <sub>10</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016 .....	55
Gráfica 2.12. Promedio mensual de la concentración PM <sub>10</sub> , 2011-2016 .....	55
Gráfica 2.13. Promedio mensual de la concentración de PM <sub>10</sub> por año, 2011-2016 .....	56
Gráfica 2.14. Promedio anual de la concentración de PM <sub>2.5</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016	57
Gráfica 2.15. Distribución porcentual de los niveles máximos de PM <sub>2.5</sub> en las estaciones de monitoreo 2011-2016 .....	57
Gráfica 2.16. PM <sub>2.5</sub> (IMECA 2016) .....	58
Gráfica 2.17. Promedio horario de la concentración de PM <sub>2.5</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016 .....	58
Gráfica 2.18. Promedio mensual de la concentración de PM <sub>2.5</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016 .....	59
Gráfica 2.19. Promedio mensual de la concentración de PM <sub>2.5</sub> , 2011-2016.....	59
Gráfica 2.20. PM <sub>2.5</sub> anual.....	60
Gráfica 2.21. Promedio anual de la concentración de O <sub>3</sub> por estación, 2011-2016 .....	61
Gráfica 2.22. IPE para el límite de 8 horas del O <sub>3</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016 .....	61
Gráfica 2.23. Distribución porcentual de los niveles máximos de O <sub>3</sub> en las estaciones de monitoreo, 2011-2016 .....	62
Gráfica 2.24. O <sub>3</sub> (IMECA) .....	62
Gráfica 2.25. Promedio Horario de la concentración de O <sub>3</sub> , 2011-2016.....	63
Gráfica 2.26. Promedio mensual de la concentración de O <sub>3</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016	64
Gráfica 2.27. Promedio mensual de la concentración de O <sub>3</sub> , 2011-2013 .....	64
Gráfica 2.28. Promedio mensual de la concentración de O <sub>3</sub> por año, 2011-2016 .....	65
Gráfica 2.29. Promedio anual de la concentración de SO <sub>2</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016	66
Gráfica 2.30. Distribución porcentual de los niveles máximos de SO <sub>2</sub> en las estaciones de monitoreo 2011-2016 .....	66
Gráfica 2.31. SO <sub>2</sub> (IMECA).....	67
Gráfica 2.32. Promedio horario de la concentración de SO <sub>2</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016	67
Gráfica 2.33. Promedio Mensual SO <sub>2</sub> .....	68
Gráfica 2.34. Concentración mensual promedio de SO <sub>2</sub> , 2011-2016 .....	69
Gráfica 2.35. Promedio mensual de la concentración de SO <sub>2</sub> por año, 2011-2016 .....	69
Gráfica 2.36. Promedio anual de la concentración de NO <sub>2</sub> por estación, 2011-2016.....	70
Gráfica 2.37. Distribución porcentual de los niveles máximos de NO <sub>2</sub> en las estaciones de monitoreo, 2011-2016 .....	71
Gráfica 2.38. NO <sub>2</sub> (IMECA).....	71
Gráfica 2.39. Promedio horario de la concentración de NO <sub>2</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016	72
Gráfica 2.40. Promedio mensual de la concentración de NO <sub>2</sub> por estación de monitoreo, 2011-2016 .....	72

Gráfica 2.41. Concentración mensual promedio de NO <sub>2</sub> , 2011-2016.....	73
Gráfica 2.42. Concentración mensual de NO <sub>2</sub> por año, 2011-2016.....	73
Gráfica 2.43. Promedio anual de la concentración de CO por estación de monitoreo, 2011-2016.	74
Gráfica 2.44. Distribución porcentual de los niveles máximos de CO en las estaciones de monitoreo, 2011-2016 .....	75
Gráfica 2.45. CO (IMECA) .....	75
Gráfica 2.46. Promedios horarios CO.....	76
Gráfica 2.47. Promedio mensual de la concentración de CO por estación de monitoreo, 2011-2016	76
Gráfica 2.48. Promedio mensual promedio de CO, 2011-2016.....	77
Gráfica 2.49. Concentración mensual de CO por año, 2011-2016 .....	77
Gráfica 2.50. Emisión de contaminantes en la ZMVT en 2008 (toneladas). .....	78
Gráfica 2.51. Distribución porcentual de las emisiones en la ZMVT por tipo de fuente, 2008 .....	79
Gráfica 3.1. Distribución porcentual de los contaminantes por Tipo de Fuente.....	82
Gráfica 3.2. Distribución porcentual de los contaminantes emitidos en 2005 .....	83
Gráfica 3.3. Producción de contaminantes en la ZMVT respecto a la producción estatal.....	83
Gráfica 3.4. Exposición de la población a las PM <sub>10</sub> (Concentración promedio anual ponderada por población en µg/m <sup>3</sup> ) .....	84
Gráfica 3.5. Evaluación del cumplimiento del límite anual para el promedio aritmético de PM <sub>10</sub> en las regiones del país. ....	86
Gráfica 3.6. Evaluación del cumplimiento del promedio aritmético de PM <sub>2.5</sub> en las regiones del país. ....	87
Gráfica 3.7. Evaluación del cumplimiento del límite anual para el promedio móvil de 8 horas de O <sub>3</sub> en las regiones del país. ....	89
Gráfica 3.8. Evaluación del cumplimiento del límite anual para el promedio móvil horario de SO <sub>2</sub> en las regiones del país. ....	90
Gráfica 3.9. Evaluación del cumplimiento del límite de una hora para el NO <sub>2</sub> en las regiones del país. ....	91
Gráfica 3.10. Evaluación del cumplimiento del límite horario para el SO <sub>2</sub> en las regiones del país.	92
Gráfica 5.1. Modelo ajustado para PM <sub>10</sub> .....	121
Gráfica 5.2. Valores pronosticados de PM <sub>10</sub> (enero-junio 2016).....	122
Gráfica 5.3. Serie de tiempo de PM <sub>10</sub> con pronóstico (enero 2011-junio 2015) .....	122
Gráfica 5.4. Residuales del ozono. ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Gráfica 5.5. Modelo ajustado para O <sub>3</sub> .....	126
Gráfica 5.6. Valores pronosticados de O <sub>3</sub> (enero-junio 2015).....	126
Gráfica 5.7. Serie de tiempo de O <sub>3</sub> con pronóstico (enero 2011-junio 2015) .....	127
Gráfica 5.8. Modelo ajustado para SO <sub>2</sub> .....	130
Gráfica 5.9. Valores pronosticados para SO <sub>2</sub> .....	130
Gráfica 5.10. Serie de tiempo de SO <sub>2</sub> con pronóstico (enero 2011-junio 2015) .....	131

Gráfica 5.11. Residuales del NO <sub>2</sub> .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Gráfica 5.12. Modelo ajustado para NO <sub>2</sub> .....	134
Gráfica 5.13. Valores pronosticados para NO <sub>2</sub> .....	135
Gráfica 5.14. Serie de tiempo de NO <sub>2</sub> con pronóstico .....	135
Gráfica 5.15. Modelo ajustado para CO .....	138
Gráfica 5.16. Valores pronosticados para CO (enero-junio 2016) .....	139
Gráfica 5.17. Serie de tiempo de CO con pronóstico (enero 2011- junio 2016) .....	139
Gráfica 5.18. Serie de tiempo de PM <sub>10</sub> con pronósticos modificando flota vehicular (enero 2011- junio 2016) .....	140
Gráfica 5.19. Serie de tiempo de O <sub>3</sub> con pronósticos modificando la flota vehicular (enero 2011- junio 2016) .....	141
Gráfica 5.20. Serie de tiempo de NO <sub>2</sub> con pronósticos modificando la flota vehicular (enero 2011- junio 2016) .....	142
Gráfica 5.21. Serie de tiempo de CO con pronósticos modificando la flota vehicular (enero 2011- junio 2016) .....	142
Gráfica 5.22. Serie de tiempo de SO <sub>2</sub> con pronósticos modificando la flota vehicular (enero 2011- junio 2016) .....	143

## Índice de Mapas

Mapa 2.1. Municipios de la ZMVT (COESPO) .....	34
Mapa 2.2. Municipios de la ZMVT (DOF 2009) .....	35
Mapa 2.3. Localización de las estaciones de monitoreo .....	48