

Análisis de la medición de la contaminación atmosférica en el municipio de Guadalajara

ROSA ELENA REYES NODHAL
TERESITA DE JESÚS ALVARADO CASTELLANOS
ERNESTO MARCELO GUEVARA

Resumen

La tendencia que ha vivido el municipio de Guadalajara en las últimas décadas apunta hacia una vocación económica orientada hacia el comercio y servicios, aunada al desarrollo de los sectores estratégicos como turismo, electrónica y tecnologías de la información, así como la manufactura de alto valor agregado. Estas actividades han generado diversas alteraciones al medio ambiente de la ciudad, entre las que destaca la contaminación del aire por sus características urbano-industriales, por el emplazamiento de numerosas industrias, por un importante parque vehicular en mal estado y por la emisión de polvos de áreas periféricas semiurbanas y rurales cada vez más deforestadas.

Se estudian los niveles de contaminación atmosférica en Guadalajara mediante la comparación de los valores observados para cada contaminante en los monitores Centro y Oblatos de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana y las nuevas pautas propuestas por la Organización Mundial de la Salud en el año 2006 para la concentración de contaminantes y las guías de calidad del aire. La información de los valores Imecas ha sido concentrada en promedio trimestral de acuerdo con las estaciones del año desde 1996 a 2011.

Palabras clave: contaminación atmosférica, municipio de Guadalajara, actividad económica, zona de influencia, Organización Mundial de la Salud, Imecas.

Abstract

In recent years, the municipality of Guadalajara points to an economic vocation oriented to trade and services and the development of strategic sectors such as tourism,

electronics and information technology, as well as the manufacture. These activities cause environmental impacts such as air pollution produced by the urban-industrial plants, an important vehicle fleet and the dust emission in semi-urban and rural peripheral áreas, increasingly deforested.

In this paper, levels of air pollution in Guadalajara are studied by comparing the observed values for each pollutant in Central and Oblatos monitor stations, according to the Official Mexican Standard and new guidelines proposed by the World Health Organization in 2006 for concentration of pollutants and air quality guidelines. Information regarding Imecas values has been focused on quarterly average according to the seasons from 1996-2011.

Keywords: air pollution, Guadalajara municipality, economic activity, influence zone, World Health Organization, Imecas.

Clasificación JEL: Q52, Q53.

Fecha de recepción: 29//2014. *Fecha de aceptación:* 06/10/2014.

Antecedentes

La contaminación de la atmósfera con el tiempo se ha hecho más evidente debido a la creciente necesidad de modelos de desarrollo económico acelerados; la revolución industrial del siglo XVIII marcó el inicio no sólo de índices de crecimiento elevados en la producción debido a nuevas tecnologías y la aparición de la competencia científica y económica, sino que a la par provocó el inicio de la degradación del medio ambiente en las regiones industrializadas y el daño a los seres que en ella habitan, como consecuencia del uso intensivo e irracional de los recursos naturales.

La localización de actividades económicas en ciertas zonas de las ciudades se debe a la infraestructura que ofrecen en comunicación de acceso fluido en las vías de transporte urbano, dotación de energía y otros servicios urbanos, que las convierte en zonas de alta concentración de contaminantes atmosféricos.

En Guadalajara, como en las grandes ciudades del país, la problemática atmosférica se encuentra estrechamente relacionada con su esquema de desarrollo urbano, industrial y tecnológico; hasta antes de los años treinta su actividad económica dependía del comercio y de la agricultura; ya en las décadas de 1940 y 1950 se convirtió en un importante centro comercial y manufacturero.

En los decenios siguientes la actividad manufacturera continuó en expansión, de tal forma que se establecieron en Guadalajara numerosas industrias extranjeras, entre las que sobresalen la fotográfica, la cigarrera, la hulera y la de productos químicos, que se agregaron a las industrias nacionales de producción de alimentos, bebidas y metalurgia. De acuerdo con el SIEGJ, Guadalajara tenía 10.1% de unidades industriales del total del estado en el año 2011.

La tendencia que ha vivido el municipio de Guadalajara en las últimas décadas apunta hacia una vocación económica orientada hacia el comercio y servicios, aunada

al desarrollo de los sectores estratégicos como turismo, electrónica y tecnologías de la información, moda, diseño y joyería, así como la manufactura de alto valor agregado.

En este sentido el desarrollo industrial de Guadalajara ha tenido su propia dinámica a través de la promoción de industrias aisladas y de parques industriales. La planta productiva de Guadalajara conforma una industria que produce bienes de consumo final orientados a la satisfacción de las necesidades básicas de la población regional y nacional.

Conforme ha transcurrido el tiempo, este proceso ha generado en la ciudad diversas alteraciones al medio ambiente, entre las que destaca por las características urbano-industriales de este asentamiento, la contaminación del aire. Ésta surge como resultado del emplazamiento de numerosas industrias, por un importante parque vehicular en mal estado y por la emisión de polvos de áreas periféricas semiurbanas y rurales cada vez más deforestadas.

De acuerdo con inventario que realizó Semarnap a mediados de los años noventa, las principales fuentes de contaminantes del aire son: el transporte, las fuentes naturales, los servicios y la industria. En dicho estudio se asentó que el transporte generó alrededor de 70% del volumen total de las emisiones a la atmósfera, las fuentes naturales contribuyeron con cerca de 17% del total de emisiones, siendo éstas básicamente de partículas suspendidas. El sector servicios emitió un poco menos de 5% y la industria un porcentaje inferior a 3%.

Según el Instituto Nacional de Ecología, las emisiones que genera la industria, aunque proporcionalmente menores en volumen que los vehículos automotores, pueden ser más peligrosas por su composición química y su concentración, sobre todo por los efectos nocivos que tienen sobre la salud de los seres vivos.

Cabe mencionar que las emisiones de las industrias se refieren a humos y gases, polvos, olores, vapores y neblinas que alteran el equilibrio atmosférico y provocan enfermedades respiratorias. Aquellas que más contaminan corresponden a las ramas hulera, tequilera, alimentaria, fundidora y las de producción de caliza que generan humos y gases de combustión; al respecto, la Comisión Estatal de Ecología señala que 25% de la contaminación atmosférica es emitida por la actividad manufacturera, cuyos efectos son más severos en las zonas sur y oriente por la cantidad de empresas ahí establecidas.

Tipos de contaminantes

Los contaminantes de la atmósfera se clasifican en cinco categorías: monóxido de carbono, bióxidos de azufre, bióxido de nitrógeno, ozono y partículas suspendidas; las tres primeras se caracterizan por ser específicas, las dos últimas pueden estar compuestas por distintos elementos (véase cuadro 1).

Cuadro 1
Tipos de contaminantes

<i>Símbolo</i>	<i>Definición</i>
NO ₂	Bióxido de Nitrógeno
CO	Monóxido de Carbono
SO ₂	Bióxido de Azufre
PM ₁₀	Partículas Suspensas
O ₃	Ozono

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable (Semades), Jalisco, 2006.

En el caso de la contaminación por desechos de hidrocarburo, se debe al consumo que existe por los combustibles derivados del petróleo, sin considerar otras fuentes de energía como pueden ser la energía solar, hidráulica o atómica. El uso intensivo de este combustible despiden gases que al concentrarse en la atmósfera en cantidades que rebasan la norma de calidad del aire establecida, se consideran nocivos, como son: bióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono, que al concentrarse impiden que los rayos solares lleguen a la tierra, generando efecto invernadero alterando los marcos térmicos del planeta debido al smog.

En cuanto a las partículas de humo, éstas son producidas por procesos químicos y metalúrgicos, soldaduras y/o químicos por calor o combustión, tienen un promedio de 0.2 a 0.3 micras, cuyos componentes son óxidos de plomo, óxido de zinc, y óxido de cadmio. En cuanto al ozono, es un oxidante inorgánico que llega a las proporciones de un contaminante cuando se combina con óxido nítrico y con los rayos ultravioleta, produciendo una reacción con el oxígeno y con moléculas orgánicas e hidrocarburos.

Medición de la calidad del aire por tipo de contaminante

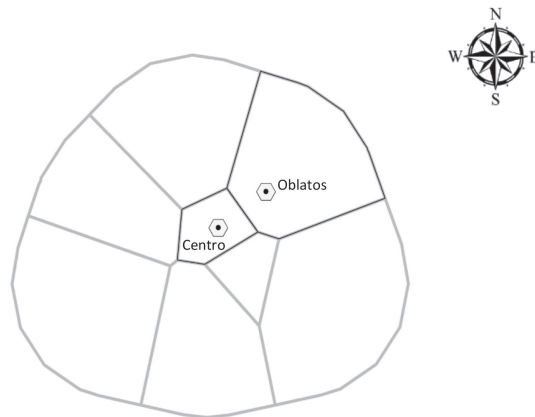
Recientemente la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha propuesto medidas más estrictas de control de la contaminación, al reducir los niveles máximos de concentración por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por tipo de contaminante. Según los estudios realizados por el mismo organismo internacional se espera que las nuevas pautas logren disminuir las muertes en alrededor de 15% anual en el mundo.

Se estima que la polución del aire causa aproximadamente dos millones de muertes prematuras en el mundo por año. Más de la mitad de estas muertes se producen en personas en los países en vías de desarrollo. En muchas ciudades los niveles medios anuales de PM10 (fuente principal de la quema de combustibles) excede los 70 microgramos por metro cúbico; las nuevas pautas dicen que para prevenir la salud, esos niveles deben estar más abajo de los 20 microgramos por metro cúbico.²




La medición de los Imecas para el municipio de Guadalajara se refiere a la información concentrada en los monitores *Centro* y *Oblatos*, ubicados en la zona de influencia delimitada por los polígonos de Thiessen (véanse mapas 1, 2, 3 y 4).

Mapa 1

GDL: Polígonos de Thiessen para las estaciones Centro y Oblatos



Simbología

-  Estación Centro y Oblatos
-  Thiessen
-  Thiessen ZMG

Estación Centro

En efecto, las partículas suspendidas (PM₁₀) son el mejor indicador de la calidad del aire por su conformación, que puede ser de origen natural o también puede formarse por reacción fotoquímica en la atmósfera, constituidas por nitratos y sulfatos o por carbonos orgánicos.

En este sentido, al observar las mediciones promedio de PM₁₀ de 1996 a 2011 en el monitor Centro, se tiene que si bien su nivel de concentración muestra una tendencia negativa en 64 observaciones, 35.0% de las mediciones están por arriba de los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendados por la OMS e incluso se observan concentraciones mayores

a los $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, principalmente en las estaciones invierno y primavera para el periodo analizado.

Otro factor importante que interviene en el problema de la contaminación en Guadalajara, son los vientos que concentran o dispersan el ozono y las partículas en suspensión; se sabe que a mayor velocidad del viento, los contaminantes se dispersan rápidamente, de otra manera en periodos de calma los contaminantes mantienen su concentración en la atmósfera.

El ozono, cuya aparición se debe a la reacción de hidrocarburos, es otro contaminante que mantiene registros altos en el monitor Centro, con 41.0%, muy cercanos a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el periodo analizado, tasa máxima recomendada por la OMS para este componente; esto puede ser resultado del intenso flujo vehicular y de las características climáticas del municipio, de seco y semiseco de invierno a otoño y semi-cálido en verano, con vientos de oeste a este en los meses de abril a diciembre.

La concentración de ozono (O_3) en la temporada de invierno registra valores superiores a los $12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de 1966 hasta 2011. En primavera las concentraciones de ozono son más alarmantes, sobre todo en los años de 2008 a 2011 con valores en un rango de $83.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $93.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que significa un incremento porcentual anual de 11.0%, valores que rebasan en todos los casos la norma establecida por la OMS para este contaminante, de $12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora (véase cuadro 1).

Nótese que las temporadas del año que concentran mayores niveles de contaminación por partículas en suspensión (PM10) y de ozono (O_3) son en invierno y primavera, esto se debe probablemente a la actividad industrial dispersa en todo el municipio, que genera partículas y las emite al medio ambiente que, conjuntamente con el clima seco y la gran actividad vehicular en el municipio en estas épocas del año, producen el efecto invernadero que mantiene una capa densa de contaminantes en el ambiente y no le permite liberarse en tanto no ascienda la temperatura. Esta situación provoca alta incidencia de enfermedades relacionadas con el aparato respiratorio y la vista en la población que se ubica en la zona de influencia del monitor Centro.

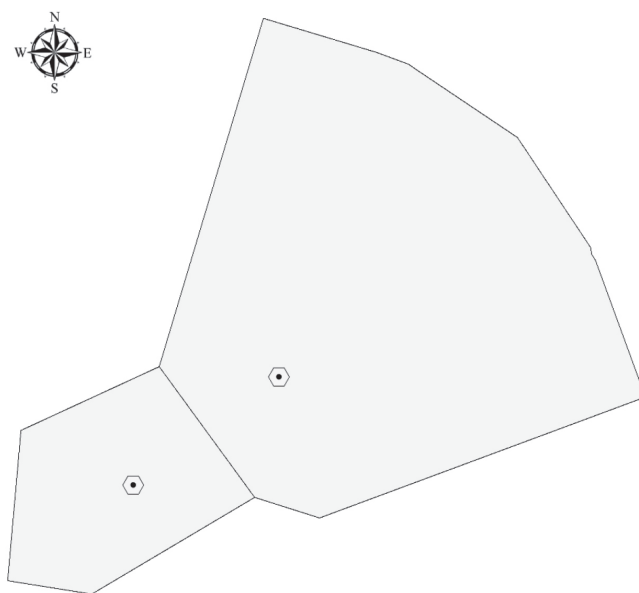
En el caso del bióxido de nitrógeno (NO_2), cuya fuente principal es la combustión en industrias y vehículos, resulta ser el otro contaminante presente en la atmósfera del municipio de Guadalajara, ya que en el periodo analizado, 1996 a 2011, se observa que 22.0% de las mediciones de NO_2 exceden los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual recomendados por la OMS, sobre todo en invierno y primavera; sin embargo, del 78.0% restante, 38.0% presenta concentraciones de (NO_2) entre 30 y $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ muy cerca del límite recomendado (cuadro 1).

Las sustancias generadas por la combustión incompleta de hidrocarburos que contienen carbono, se identifican como monóxido de carbono (CO), este contaminante ha presentado mediciones de entre 0 y 56 puntos Imecas durante el periodo analizado; cabe mencionar que 99.0% de las mediciones exceden los niveles aceptados por la norma mexicana de $13.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de $10.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendada por la OMS. En la época de invierno en 100% de las observaciones se han concentrado valores de $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$; sin embargo, en las otras épocas del año la presencia de CO en la atmósfera registra valores de cero $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Cabe mencionar que el bióxido de azufre (SO_2), producto de la combustión de carbón, diesel, combustóleo y gasolina con azufre, además de fundiciones de betas metálicas ricas en azufre y procesos industriales, también está presente en la atmósfera del municipio analizado, con niveles de concentración de entre 2 y 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que se ubican muy por debajo de los límites establecidos por la norma mexicana de 340 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y cerca de los valores recomendados por la OMS de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el periodo analizado (cuadro 1).

Mapa 2

GDL: Zona de influencia de las estaciones Centro y Oblatos



Simbología

-  Estación Centro y Oblatos
-  Thiessen

Estación Oblatos

La estación de monitoreo ambiental Oblatos, en el periodo analizado ha pasado por un gran número de deficiencias técnicas que han suspendido la lectura de las medi-

ciones de los contaminantes en la zona, concretamente en los años de 2002 a 2005 y recientemente en 2011; la insuficiencia de datos hace que el análisis de las concentraciones presente ciertas dificultades para evaluar sus tendencias.

De acuerdo con la información disponible para este monitor, de 1996 a 2011 por trimestres promedio dividido por estaciones anuales, primavera, verano, otoño e invierno, se puede observar el comportamiento en las concentraciones de partículas contaminantes en su zona de influencia.

Para el componente PM10 monitoreado por la estación Oblatos, 39% de las concentraciones rebasan los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ límite máximo recomendado por la OMS para este elemento y un porcentaje de 20.3% para mediciones en el rango $40\text{-}49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ muy cercanas a las propuestas por este organismo. Cabe mencionar que en este monitor se concentraron mediciones de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el invierno y primavera de 2011 con rango satisfactorio; sin embargo, este nivel de concentración rebasa en 37.5% las pautas sugeridas por la OMS en el periodo analizado (cuadro 1).

Otro aspecto que interviene en el problema de la contaminación en Guadalajara son los vientos y sus efectos en la concentración y dispersión en la atmósfera de ozono, cuya aparición, como ya se mencionó, se debe a la reacción de hidrocarburos en la atmósfera; este contaminante ha rebasado los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nivel no satisfactorio con la Norma Mexicana y la propuesta por la OMS; los niveles de este compuesto mantienen concentraciones altas en invierno y primavera de 2011, con $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como resultado de los vientos del este, que contribuyen a concentrar el ozono en periodos de calma. Cabe mencionar que el ozono contribuye de manera alarmante en la contaminación de la atmósfera del municipio, ya que 100% de las mediciones rebasan el promedio por hora de $12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido por la OMS en 2006 (cuadro 1).

La presencia del bióxido de nitrógeno (NO_2) medido por el monitor Oblatos presenta valores mayores a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de promedio anual, en aproximadamente 13.0% de las observaciones de 1996 a 2011. Se observa también que 17.0% de las mediciones presenta concentraciones de (NO_2) entre 30 y $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ muy cerca del límite recomendado (cuadro 1).

El monóxido de carbono (CO) presente en la atmósfera de Guadalajara ha superado en 52.0% de las mediciones los valores recomendados tanto por las Normas Mexicanas como las de la OMS: $13.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $10.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, sobre todo en la época invernal de los tres últimos años analizados, 2009 a 2011 con valores entre 20 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En cuanto al bióxido de azufre (SO_2) presente en la zona de influencia del monitor Oblatos, se ha ubicado dentro de los límites establecidos tanto por la Norma Mexicana de $340 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la recomendada por la OMS de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$; es importante mencionar que las mediciones en los trimestres de invierno del SO_2 alcanzaron valores de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$; sin embargo, para el año 2011 su valor disminuye a $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (cuadros 1 y 2).

Mapa 3
GDL: Colonias localizadas en la zona de influencia
de las estaciones Centro y oblatos



Estimación de la tendencia por contaminante

El análisis del comportamiento de las concentraciones registradas en la zona de influencia de los monitores Centro y Oblatos ubicados en el municipio de Guadalajara, se realiza con base en las tendencias estimadas mediante series de tiempo para los promedios trimestrales de 1996 a 2011 para los cinco contaminantes presentes en la atmósfera en dicho municipio. Los valores encontrados a partir de dicho análisis muestran algunos efectos nocivos que, sobre la salud de los habitantes, tiene la exposición a esas concentraciones de contaminantes, tal como lo puntualizan las *Guías de calidad del aire* presentadas por la OMS.

Mapa 4
Red de Monitoreo en la ZMG



Los resultados obtenidos mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) manifiestan tendencias negativas en el periodo 1996-2011, excepto para el bióxido de nitrógeno (NO_2) medido por el monitor Oblatos, cuyo coeficiente es ($\beta = 0.54$). En el cuadro 2 se muestran los resultados para cada uno de los elementos incluidos en el análisis.

Estación Centro

Las estimaciones de los parámetros para cada contaminante medido en la estación Centro revelan tendencias negativas en todos los elementos analizados; sin embargo,

si bien es cierto que los niveles de contaminación han descendido de acuerdo con las Normas Mexicanas de la calidad del aire, al observar los valores promedio, éstos rebasan los máximos recomendados por la OMS, tal es el caso de las partículas en suspensión (PM10), el monóxido de carbono (CO) y el ozono (O₃) (cuadros 1 y 2).

Concretamente, el valor del parámetro alfa para las partículas en suspensión (PM10) es de 55.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mayor al recomendado por la OMS de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, esto es alarmante porque, de acuerdo con las *Guías de calidad del aire* (GCA) publicadas por este organismo, las concentraciones de partículas alrededor de 50 mg/m^3 —objetivo intermedio 2 (OI-2)— sólo reducen el riesgo de mortalidad prematura en un 6% (cuadro 3).

En lo que se refiere al valor del parámetro beta de ($\beta = -1.38$), la tendencia negativa es poco significativa, apenas 1.38 microgramo por metro cúbico en el periodo analizado, por lo que podría decirse que la contaminación por este elemento disminuyó en promedio 1.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el periodo analizado.

La ecuación para el monóxido de carbono (CO) muestra resultados preocupantes (CO = 38.70 – 1.27T), esto es, el valor promedio de 38.70 mg/m^3 rebasa el valor permitido por la Norma Mexicana en 2.83 veces y la pauta recomendada por la OMS en 3.6 veces, cuyos valores límites son 13.7 mg/m^3 y 10.8 mg/m^3 respectivamente, lo que muestra que su disminución en la atmósfera de (- 1.27T) en el tiempo analizado es apenas 1.27 microgramos por año, es decir, que tendrían que pasar casi 21 años para que las concentraciones de CO disminuyan a 10.8 mg/m^3 , y los efectos en la salud de los habitantes en la zona pueden ser graves, ya que los padecimientos por este contaminante afectan el funcionamiento del sistema cardiovascular y disminuyen la actividad cerebral en exposiciones prolongadas (cuadro 2).

El ozono es otro de los elementos contaminantes con mayor presencia en el municipio (O₃ = 71.03 – 0.69T); con base en los valores de la ecuación estimada se puede observar que el valor promedio de 71.03 mg/m^3 se mantiene por debajo de los 100 mg/m^3 de acuerdo con la OMS, pero este valor es considerado para la calidad de aire como moderado, con base en el indicador del *índice de calidad del aire de 51 a 100 mg/m^3* (AQI por sus siglas en inglés), cabe mencionar que sus emisiones afectan las vías respiratorias, sobre todo en la población que padece de asma, enfisema pulmonar o bronquitis.

Por otra parte, la tendencia del dióxido de azufre (SO₂ = 12.20 – 0.39T) muestra que la disminución por año de esta sustancia es poco significativa ($\beta = -0.39$), es decir, menor a un $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el lapso de 1996 a 2011. Se puede decir en el caso de dióxido de azufre que es un elemento altamente peligroso por su absorción en suelos y la contaminación del agua en las capas superficiales y subterráneas, en el aire puede permanecer de tres a cinco días, favoreciendo su expansión en grandes extensiones de terreno. El valor negativo de su tendencia de (- 0.39T) en los años analizados parece indicar que el control de las emisiones para limpiar la atmósfera de partículas de azufre es demasiado lento y su incidencia en las enfermedades respiratorias como el asma, bronquitis y enfisemas pulmonares y molestias como la irritación de los ojos es alta, incluso en casos agudos se puede presentar paro cardíaco y colapso circulatorio.

La misma situación se observa para la ecuación ($\text{NO}_2 = 39.03 - 0.69T$) del dióxido de nitrógeno (NO_2), cuyo valor para el parámetro beta es ($\beta = -0.69$) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indica que las concentraciones de este componente en la atmósfera disminuyeron en promedio $0.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$; no obstante, el valor obtenido para el parámetro alfa de $39.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es muy cercano a las pautas máximas recomendadas por la OMS de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y cuya disminución es apenas significativa en los años analizados, sobre todo porque su permanencia en la atmósfera contribuye a la formación o alteración de otros contaminantes como el ozono (O_3) y las partículas en suspensión (PM10), sobre todo porque estas partículas agravan los síntomas del asma y las reacciones alérgicas respiratorias.

Estación Oblatos

En lo que se refiere a las tendencias estimadas para el Monitor Oblatos, los resultados muestran valores negativos para cuatro de los elementos analizados de 1996-2011, excepto para el bióxido de nitrógeno ($\text{NO}_2 = 24.73 + 0.54T$), el valor positivo del parámetro ($\beta = 0.54T$) muestra que su concentración en la atmósfera aumenta en $0.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$; por otra parte, el valor promedio estimado de $24.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es inferior al límite recomendado por la OMS; sin embargo, el valor positivo de β refleja que estas partículas aumentan su concentración en la atmósfera en la zona de influencia de dicho monitor.

Los resultados de la estación Oblatos mostrados en el cuadro 2 para las partículas de ozono (SO_2) y (PM10) son alentadores, ya que sus niveles de concentración en la zona de influencia de este monitor han descendido de acuerdo con las Normas Mexicanas de la calidad del aire y con las pautas de la OMS. El bióxido de azufre (SO_2) y las partículas PM10 muestran en sus parámetros alfa valores de 4.23 y 43.76, respectivamente; esta última aún se mantiene cerca de los valores de la OMS de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Asimismo, las tendencias negativas para los parámetros beta de (-0.08) SO_2 y (-0.32) PM10 muestran que la disminución por año de estas sustancias contaminantes son poco o nada significativas, menores a un $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el lapso de 1996 a 2011. Se puede decir por ejemplo, para el caso de PM10 que deben pasar alrededor de tres años para disminuir un micro $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y limpiar la atmósfera de partículas de PM10 para evitar enfermedades como el asma, bronquitis y enfisemas pulmonares y molestias como la irritación de los ojos.

En lo que respecta al ozono, es el contaminante con mayor presencia en el municipio de Guadalajara, con una concentración de $95.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el año 2011, sólo $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ abajo del límite establecido por la Organización Mundial de la Salud de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Su tendencia a disminuir de acuerdo con la ecuación estimada ($\text{O}_3 = 53.52 - 0.039T$), es de $-0.039 \mu\text{g}/\text{m}^3$, es decir, la veinticincoava parte de una micra en el periodo analizado, valores alarmantes que parecen confirmar que el ozono seguirá afectando la salud de la población que vive en esta zona, cuyos padecimientos se refieren a cefalea, mareo, lagrimeo, fotofobia, tos, broncoespasmo y asma.

La ecuación estimada para el monóxido de carbono ($\text{CO} = 22.20 - 0.55T$) muestra que las concentraciones promedio de este componente en la atmósfera de Guadalajara en exceden dos veces los valores de la OMS de $10.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y no obstante el valor

negativo en su tendencia de ($\beta = -0.55T$) pone en duda las políticas estatales de control y supervisión de las fuentes que emiten este contaminante a la atmósfera, como son el sistema de transporte urbano, vehículos automotores en funcionamiento, los procesos industriales y la incineración de basura (cuadros 2 y 4).

Comentarios finales

El municipio de Guadalajara, con su propia dinámica productiva apunta hacia una vocación económica orientada al comercio y servicios, aunada al desarrollo de los sectores estratégicos como turismo, electrónica y tecnologías de la información, moda, diseño y joyería, así como la manufactura de alto valor agregado. Dichas actividades económicas han generado diversas alteraciones al medio ambiente, entre las que destaca por las características urbano-industriales de este asentamiento, la contaminación del aire. Ésta surge como resultado del emplazamiento de numerosas industrias, por un importante parque vehicular en mal estado y por la emisión de polvos de áreas periféricas semiurbanas y rurales cada vez más deforestadas.

Respecto a las emisiones y concentraciones de contaminantes registrados por los monitores Centro y Oblatos, se concluye que las partículas PM10 destacan entre las sustancias altamente concentradas en el municipio de Guadalajara, al registrar mediciones promedio por arriba de los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recomendados por la OMS, incluso se observan concentraciones mayores a los $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, principalmente en las estaciones invierno y primavera para el periodo analizado de 1996 a 2011. Asimismo, el ozono (O_3) observa valores de alta concentración en un rango de $83.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $93.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alcanzando $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en invierno y primavera de 2011, mismos que rebasan la norma establecida por la OMS.

Las estimaciones de parámetros para cada contaminante medido en la estación Centro revelan tendencias negativas en todos los elementos analizados; si bien es cierto que los niveles de contaminación han descendido de acuerdo con las Normas Mexicanas de la calidad del aire, rebasan los máximos recomendados por la OMS, tal es el caso de las partículas en suspensión (PM10), el monóxido de carbono (CO) y el ozono (O_3). Los valores promedio estimados son de $55.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, de $38.70 \text{mg}/\text{m}^3$ y de $71.03 \text{mg}/\text{m}^3$ para las partículas (PM10), monóxido de carbono (CO) y ozono (O_3), respectivamente.

Por su parte, las tendencias estimadas para el monitor Oblatos muestran valores negativos para las partículas en suspensión (PM10), el monóxido de carbono (CO) y el ozono (O_3) en el periodo 1996-2011, excepto para el bióxido de nitrógeno ($\text{NO}_2 = 24.73 + 0.54T$); el valor positivo del parámetro ($\beta = 0.54T$) muestra que su concentración en la atmósfera aumenta en $0.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y su valor promedio estimado es $24.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ inferior al límite recomendado por OMS.

Anexo 1. Cuadros

Cuadro 1

Comparación de las mediciones por contaminante entre la Norma Mexicana y las propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMG)

<i>Contaminante</i>	<i>Exposición aguda (Concentración y tiempo promedio)</i>	
	<i>Norma Mexicana*</i>	<i>Modificación** OMS</i>
Ozono (O ₃)	216 µg/m ³ 0.11 ppm (1 hora)	100 µg/m ³ (0.075 ppm) (por ocho horas) 12.5 µg/m ³ Promedio por (1 hora)
Bióxido de azufre (SO ₂)	340 µg/m ³ 0.13 ppm (24 horas)	20 µg/m ³ (24 horas) 0.83 µg/m ³ Promedio por (1 hora)
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	395 µg/m ³ 0.21 ppm (1 hora)	40 µg/m ³ (media anual) 200 µg/m ³ (una hora)
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8 horas) 13.7 µg/m ³	9 ppm (8 horas) 10.8 µg/m ³
Partículas fracción respirable (PM10)	150 µg/m ³ (24 horas)	20 µg/m ³ (Media anual) 50 µg/m ³ (24 horas)

* Comisión Estatal de Ecología, 2006.

** World Health Organization: Who gives the air quality guidelines for particulate ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. *Global update*, 2005.

Fuente: UDG, CUCEA, Departamento de Economía, 2011.

Cuadro 2
 Series de tiempo por contaminante*

<i>Estación Centro</i>						
<i>Variable dependiente</i>	<i>Regresor</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Ecuación</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Prueba "t"</i>	<i>R²</i>
NO ₂	1	39.03	NO ₂ = 39.03 – 0.69T	2.70	14.43	0.30
	Tiempo	- 0.69		0.28	- 2.45	
PM10	1	55.54	PM10 = 55.54 – 1.38T	3.62	15.35	0.49
	Tiempo	- 1.38		0.37	- 3.70	
CO	1	38.70	CO = 38.70 – 1.27T	2.22	17.45	0.69
	Tiempo	- 1.27		0.23	- 5.60	
SO ₂	1	12.20	SO ₂ = 12.20 – 0.39T	0.88	13.81	0.57
	Tiempo	- 0.39		0.09	- 4.30	
O ₃	1	71.03	O ₃ = 71.03 – 0.69T	4.31	17.20	0.18
	Tiempo	- 0.75		0.42	- 1.7	
<i>Estación Oblatos</i>						
<i>Variable dependiente</i>	<i>Regresor</i>	<i>Coefficiente</i>	<i>Ecuación</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Prueba "t"</i>	<i>R²</i>
NO ₂	1	24.73	NO ₂ = 24.73 + 0.54T	5.62	4.39	0.058
	Tiempo	0.58		0.58	- 0.93	
PM10	1	43.76	PM10 = 43.76 – 0.32T	10.66	4.11	0.005
	Tiempo	- 0.32		1.10	- 0.29	
CO	1	22.20	CO = 22.20 – 0.55T	4.31	5.16	0.99
	Tiempo	- 0.55		0.44	-1.20	
SO ₂	1	4.23	SO ₂ = 4.23 – 0.08T	1.69	2.49	0.016
	Tiempo	0.08		0.18	- 0.47	
O ₃	1	53.52	O ₃ = 53.52 – 0.039T	13.48	3.97	0.0001
	Tiempo	- 0.39		1.39	- 0.03	

* La tendencia representa el comportamiento predominante de la serie. Ésta puede ser definida como el cambio de la media a lo largo de un periodo; la ecuación a estimar es de la forma:

$$Y_{(t)} = \alpha + \beta T + e$$

Cuadro 3

Guías de calidad del aire de la OMS y objetivos intermedios para el material particulado: concentraciones medias anuales

<i>Objetivo</i>	<i>PM10 (µg/m3)</i>	<i>Fundamento del nivel elegido</i>
Objetivo intermedio-1 (OI-1)	70	Estos niveles están asociados con un riesgo de mortalidad a largo plazo alrededor de un 15% mayor que con el nivel de las GCA.
Objetivo intermedio-2 (OI-2)	50	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente [2-11%] en comparación con el nivel del OI-1.
Objetivo intermedio-3 (OI-3)	30	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad en un 6% [2-11%] aproximadamente en comparación con el nivel del OI-2.
Guía de calidad del aire (GCA)	20	Éstos son los niveles más bajos con los cuales se ha demostrado, con más del 95% de confianza, que la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón aumenta en respuesta a la exposición prolongada al MP2,5.

Fuente: Organización Mundial de la Salud, 2006.

Cuadro 4

Contaminación ambiental: fuentes y efectos

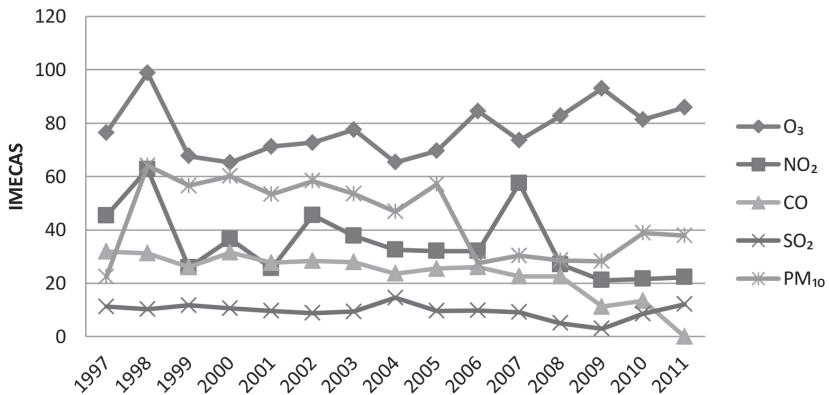
<i>Contaminante</i>	<i>Fuente</i>	<i>Niveles</i>	<i>Consecuencias</i>
Partículas Suspendidas PS	Motores de combustión. Vehículos automotores. Procesos industriales. Incineración.	X Anual < 75 ug/m3 X Día < 260 ug/m3	Incremento en la resistencia de la vía aérea. Inflamación del epitelio respiratorio. Estimulación del epitelio laríngeo y nasal.
Ozono O ₃	Reacción fotoquímica: óxido de nitrógeno + hidrocarburos	< 235 mg / m3 < 0.12 ppm durante 1 hora	Cefalea, mareo, lagrimeo, fotofobia. Efecto oxidativo sobre mucosas. Tos, disnea, broncoespasmo, asma.
Monóxido de carbono CO	Motores de combustión. Vehículos automotores. Procesos industriales. Incineración.	< 10 mg / m3/ 8 hrs < 9 ppm / 8 hrs < 35 ppm / hr	Carboxihemoglobina Trastorno en transporte de O ₂ Hipoxia tisular
Óxido de nitrógeno NO ² , NO	Motores de combustión. Vehículos automotores. Procesos industriales. Fertilizantes.	X Anual < 100 ug / m3 X Anual < 0.05 ppm	Inflamación de vías respiratorias. Edema pulmonar y bronquiolitis. Cianosis y disnea. Lluvia ácida.
Bióxido de azufre SO ₂	Combustión de aceites y de carbón. Plantas de ácido sulfúrico.	X Anual < 80 ug / m3 X Anual < 0.03 ppm X día < 365 ug/ m3 X día < 0.14 ppm	Aumento de resistencia de vía aérea. Brocoespasmo y edema. Lluvia ácida.

Plomo Pb	Motores de combustión. Vehículos automotores. Procesos industriales. Pinturas, cerámica, ba- terías.	X de 3 meses < 1.5 ug/ m3	Trastornos psicomotores. Disminución de desarrollo del IQ. Trastornos abdominales (dolor).
Bióxido de car- bono CO ₂	Todo tipo de combustión.	< 5,000 ppm / 5 hrs	Efecto invernadero en la atmós- fera. Calentamiento del planeta.

Fuente: Fundación Carpermor, A. C. (1995). *Contaminación atmosférica e infección respiratoria en México.*

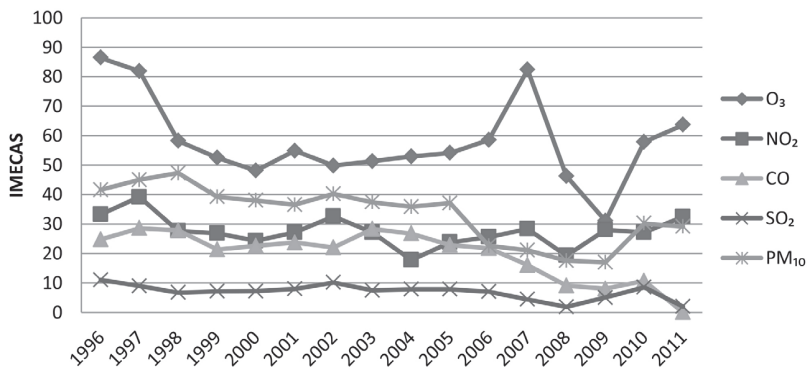
Anexo 2. Gráficas

Estación Centro: Primavera (Mar-May)
1996-2011



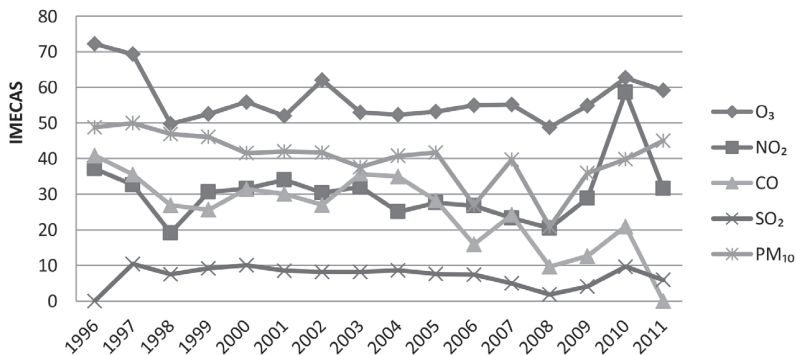
Fuente: el promedio se realizó con base en la información proporcionada por la Comisión Estatal de Ecología 2012.

Estación Centro: Verano (Jun-Ago)
1996-2011



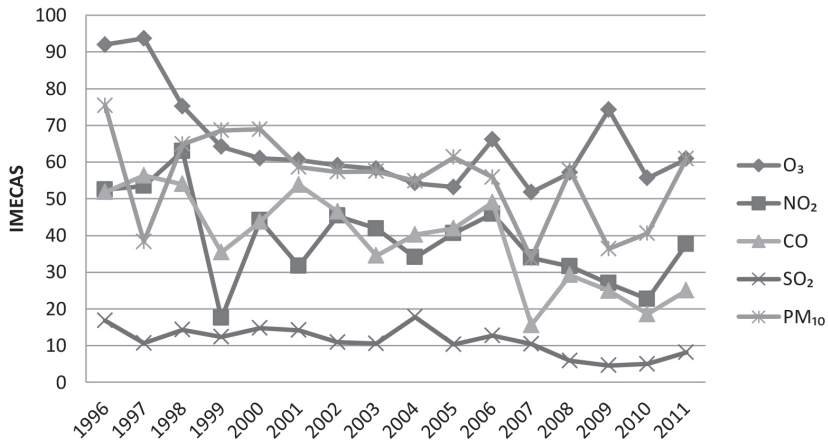
Fuente: el promedio se realizó con base en la información proporcionada por la Comisión Estatal de Ecología 2012.

Estación Centro: Otoño (Sep-Nov)
1996-2011



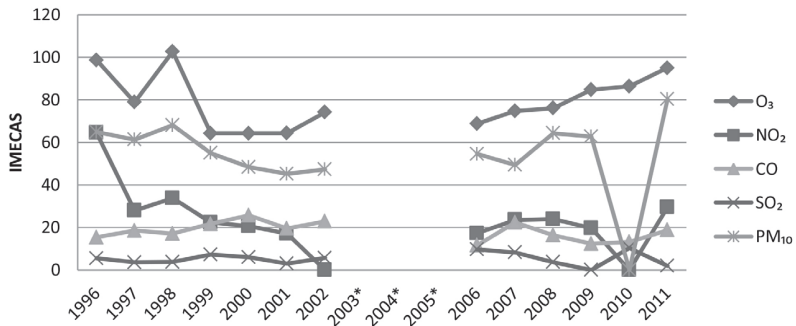
Fuente: el promedio se realizó con base en la información proporcionada por la Comisión Estatal de Ecología 2012.

Estación Centro: Invierno (Dic-Feb)
 1996-2011



Fuente: el promedio se realizó con base en la información proporcionada por la Comisión Estatal de Ecología 2012.

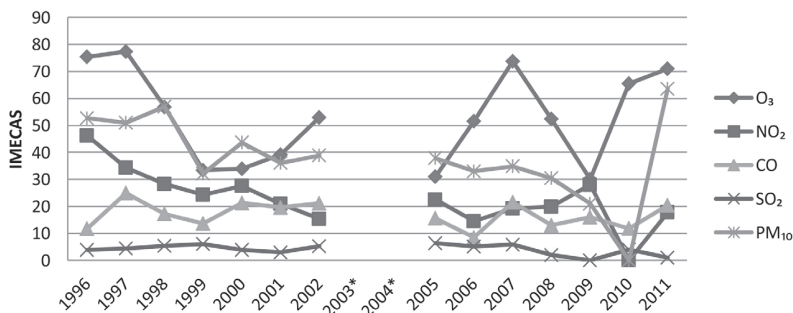
Estación Oblatos: Primavera (Mar-May)
 1996-2011



* Años sin información

Fuente: el promedio se realizó con base en la información proporcionada por la Comisión Estatal de Ecología 2012.

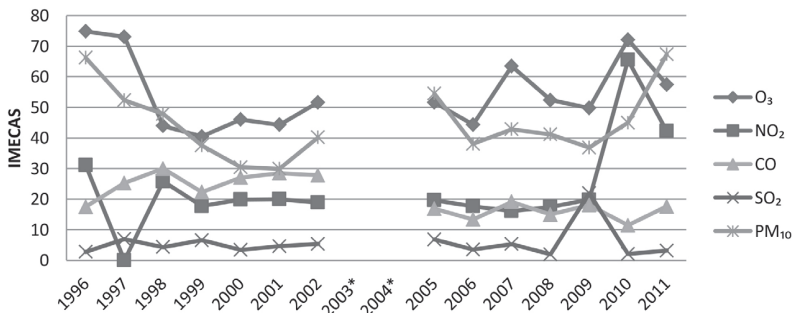
Estación Oblatos: Verano (Jun-Ago)
1996-2011



* Años sin información

Fuente: el promedio se realizó con base en la información proporcionada por la Comisión Estatal de Ecología 2012.

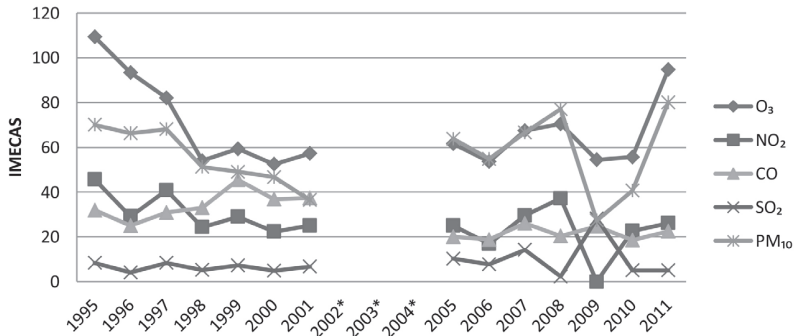
Estación Oblatos: Otoño (Sep-Nov)
1996-2011



* Años sin información

Fuente: el promedio se realizó con base en la información proporcionada por la Comisión Estatal de Ecología 2012.

Estación Oblatos: Invierno (Dic-Feb)
1996-2011



* Años sin información

Fuente: el promedio se realizó con base en la información proporcionada por la Comisión Estatal de Ecología 2012.

Referencias bibliográficas

- Anglada, Ludevid. (1998). *El cambio global en el medio ambiente*. México: Alfaomega.
- Emmel. (1983). *Ecología y biología de las poblaciones*. México: Interamericana.
- Fiel, Barry C. (1990). *Economía ambiental*. México: McGraw-Hill.
- Freeman. (1995). *Control de la contaminación del agua y del aire*. México: Limusa.
- García, Alfonso & Fernández, Oscar. (1998). La contaminación y la pequeña industria en México. *Comercio Exterior*, vol. 48. México.
- Gobierno del Estado de Jalisco. (1997). *Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana de Guadalajara 1997-2001*. México.
- INEGI. (Varios años). *Censos Económicos y de Población y Vivienda*. México: INEGI.
- Michel, Jean Elizabeth. (1979). La contaminación atmosférica y la salud. México: Universidad de Guadalajara: IGE.
- Odum, E. P. (1984). *Ecología*. México: Interamericana.
- Robbins. (2000). *Manual de patología estructural y funcional*. España: McGraw-Hill Interamericana.
- Seinfeld, John H. (1978). *Contaminación atmosférica*. Madrid: IEADL.
- Sistema de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (SIEG). 2010. Recuperado de: <http://sieg.gob.mx/general.php?id=2&idg=172>
- Strauss, W. & Mainwaring, S. J. (1995). *Contaminación del aire*. México: Trillas.