



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**EVALUACIÓN DE LOS BENEFICIOS ECONÓMICOS
OBTENIDOS POR REDUCCIÓN DE OZONO EN LA ZMVM
EN EL PERIODO 1991–2011 CONSIDERANDO LA
MOVILIDAD DE LA POBLACIÓN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA

JOSÉ MANUEL HUERTA ROLDÁN



MÉXICO, D.F.

2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: **VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO**
VOCAL: Profesor: **NÉSTOR NOÉ LÓPEZ CASTILLO**
SECRETARIO: Profesor: **JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO**
1er. SUPLENTE: Profesor: **FEDERICO CARLOS HERNÁNDEZ CHAVARRÍA**
2° SUPLENTE: Profesor: **JORGE ALEJANDRO AVELLA MARTÍNEZ**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

**CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO, CIRCUITO EXTERIORS/N MÉXICO DF 04510**

ASESOR DEL TEMA:

DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

SUSTENTANTE:

JOSÉ MANUEL HUERTA ROLDÁN

ÍNDICE

RESUMEN	6
INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVO GENERAL	11
<i>Objetivos Específicos.....</i>	11
HIPÓTESIS.....	12
JUSTIFICACIÓN.....	13
MARCO TEÓRICO	14
Zona Metropolitana del Valle de México	14
Ubicación Geográfica	14
Conformación Política y Social	15
Importancia Económica y Social.....	17
Vulnerabilidad ante la Contaminación Ambiental	18
Ozono, O₃	19
Ozono Estratosférico	20
Ozono Troposférico	21
Impactos en la Salud.....	23
Impactos a la Salud evaluados en este trabajo	25
Normatividad Vigente	27
Tendencia de las Concentraciones Ambientales de Ozono Troposférico	27
Programas enfocados en la mejora de la calidad del aire de la ZMVM	31
SIMAT-RAMA	35
Encuesta Origen-Destino.....	36
Grid Analysis Display System (GrADS).....	36
Análisis Objetivo Cressman (Oacres)	37
METODOLOGÍA.....	38
Mapas horarios de la distribución de Ozono en la ZMVM.....	38
Mapas horarios de la distribución de la Población en la ZMVM.....	38
Concentración Ponderada por Población (CPP).....	38
Evaluación de impactos a la Salud.....	40
Evaluación del Beneficio Económico.....	41
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	45
Mapas de la distribución horaria de la población de la ZMVM.....	45
Distribución horaria de las concentraciones de ozono en la ZMVM	45

Concentración Ponderada por población (CPP).....	46
Disminución de Impactos en la Salud.....	49
Evaluación del beneficio económico.....	51
CONCLUSIONES.....	57
RECOMENDACIONES.....	59
REFERENCIAS.....	60
ANEXO.....	62
Índice de Precios al Consumidor 1980-2012 USA.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 TENDENCIA DEL OZONO AMBIENTAL (PPB) EN LAS ESTACIONES DE MONITOREO	9
TABLA 2 COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LA ZMVM ¹	14
TABLA 3 COLINDANCIAS DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO	16
TABLA 4 DELEGACIONES QUE CONFORMAN LA ZMVM	16
TABLA 5 MUNICIPIOS DEL ESTADO DE MÉXICO QUE INTEGRAN LA ZMVM.	17
TABLA 6 PROPIEDADES FÍSICAS DEL OZONO.	19
TABLA 7 VALORES DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE.	24
TABLA 8 NIVEL DE OZONO Y EFECTOS OBSERVADOS.	25
TABLA 9 IMPACTOS EN LA SALUD EVALUADOS Y PORCENTAJE SUSCEPTIBLE DE LA POBLACIÓN	27
TABLA 10. ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS DE LA RAMA-SIMAT.	30
TABLA 11 MEDIDAS IMPLEMENTADAS POR SECTOR DEL PROAIRE 2002-2010	32
TABLA 12 FUNCIONES CONCENTRACIÓN-RESPUESTA (B) INDICA EL PORCENTAJE DE CAMBIO EN CADA IMPACTO A LA SALUD POR UN CAMBIO DE 1-PPB Y TB LA TASA BASAL DE INCIDENCIA DE CADA IMPACTO	41
TABLA 13 PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DEL BENEFICIO ECONÓMICO	42
TABLA 14 MÁXIMOS ANUALES DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS DE OZONO AMBIENTAL VS CONCENTRACIÓN PONDERADA POR POBLACIÓN MÓVIL VS CONCENTRACIÓN PONDERADA POR POBLACIÓN FIJA	47
TABLA 15 ΔC EMPLEADAS PARA EL CÁLCULO DE LA DISMINUCIÓN DE IMPACTOS EN LA SALUD	50
TABLA 16 DISMINUCIÓN DE IMPACTOS EN LA SALUD	50
TABLA 17 BENEFICIOS ECONÓMICOS (USD) OBTENIDOS EN EL PERIODO 1991-2011 POR REDUCCIÓN DE OZONO AMBIENTAL, CONSIDERANDO UNA DISTRIBUCIÓN DE POBLACIÓN FIJA	51
TABLA 18 BENEFICIOS ECONÓMICOS (USD) OBTENIDOS EN EL PERIODO 1991-2011 POR REDUCCIÓN DE OZONO AMBIENTAL, TOMANDO EN CUENTA LA MOVILIDAD DE LA POBLACIÓN	51
TABLA 19 BENEFICIOS ECONÓMICOS ACUMULADOS A PRECIOS CONSTANTES EN USD PARA LOS CASOS DE DISTRIBUCIÓN DE POBLACIÓN FIJA Y DISTRIBUCIÓN DE POBLACIÓN MÓVIL A LO LARGO DEL DÍA	52
TABLA 20 CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL AL BENEFICIO ECONÓMICO TOTAL POR IMPACTO ANALIZADO	54
TABLA 21 BENEFICIOS OBTENIDOS POR DÉCADA PARA POBLACIÓN MÓVIL	55
TABLA 22. BENEFICIOS OBTENIDOS POR DÉCADA PARA POBLACIÓN FIJA	55
TABLA 25 BENEFICIO ECONÓMICO (USD/HAB*AÑO) DESGLOSADO PARA CADA IMPACTO A LA SALUD	56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO	15
FIGURA 2 ESTRUCTURA DE LEWIS RESONANTE DEL OZONO.....	19
FIGURA 3 SEVERIDAD E INCIDENCIA DE LAS ENFERMEDADES POR OZONO.....	23
FIGURA 4 CONCENTRACIÓN PROMEDIO ANUAL DE OZONO EN EL PERIODO DE ESTUDIO	29
FIGURA 5 NÚMERO DE HORAS POR AÑO QUE SE REBASÓ LA NOM-023-SSA1-1993	29
FIGURA 6 TENDENCIA DEL MÁXIMO ANUAL DE OZONO	30
FIGURA 7 DISTRIBUCIÓN DE LA RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO	35
FIGURA 8 PROCESO DE INTERPOLACIÓN OACRES	37
FIGURA 11 DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN EN LA ZMVM, 5 DE LA MAÑANA (IZQ.) Y 5 DE LA TARDE (DER.).....	45
FIGURA 12 MAPAS DE CONCENTRACIONES DE OZONO EN PPB. PARA UNA HORA DE 1991 (IZQ.) PARA UNA HORA DE 2001(DER.)	46
FIGURA 13 CONCENTRACIONES DE OZONO (RAMA) VS OZONO PONDERADO POR POBLACIÓN FIJA Y MÓVIL	48
FIGURA 14 BENEFICIO ACUMULADO EN USD A PRECIOS CONSTANTES DE 2000 PARA POBLACIÓN FIJA Y POBLACIÓN MÓVIL	53
FIGURA 15 CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL AL BENEFICIO ECONÓMICO TOTAL.....	54

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1 EJEMPLO HIPOTÉTICO DEL CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN PONDERADA DE UNA HORA DEL PERIODO DE ESTUDIO	39
CUADRO 2 EJEMPLO: EVALUACIÓN DEL CAMBIO EN LA MORTALIDAD Y DEL BENEFICIO ASOCIADO DE 1991 A 1992	43
CUADRO 3 ACTUALIZACIÓN A PRECIOS DE 2000 DEL BENEFICIO ECONÓMICO OBTENIDO POR DISMINUCIÓN DE LA MORTALIDAD DE 1991 A 1992	44

RESUMEN

En esta tesis se evaluaron los beneficios económicos obtenidos de 1991 a 2011 debido a la reducción de la exposición a ozono por parte de la población de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), tomando en cuenta su movilidad a lo largo del día.

En estudios previos se ha estimado la exposición a contaminantes ambientales tomando en cuenta una distribución estática de población¹, utilizando su lugar de residencia a partir de datos censales. En este trabajo se consideró que la población no se mantiene fija durante el día, sino que se desplaza para realizar sus actividades cotidianas, generando una distribución de población que varía de acuerdo con el lugar y hora del día.

Con base en lo anterior, se midió la exposición de la población, considerando los cambios en la concentración horaria de ozono y al mismo tiempo considerando los flujos horarios de población. De esta forma se estimaron de manera más exacta los impactos en la salud de la población por contaminación atmosférica, calculando márgenes de error con metodologías previas que no toman en cuenta la movilidad de la población, al tiempo que se propuso una nueva forma de medición científica de las exposiciones.

Esta tesis fue de carácter multidisciplinario y contó con 3 componentes; uno geográfico-urbano, uno de química atmosférica y uno económico. El componente geográfico-urbano se ocupó de estimar la distribución horaria de la población mediante el manejo de información espacial proveniente de encuestas origen-destino y censos de población. Por otra parte, el componente de química-atmosférica se ocupó de la distribución horaria del ozono en la ZMVM y por último el componente económico, se ocupó de estimar los impactos a la salud y costos asociados.

¹ L.D. Reyes; J.A. García. (2006). *Evaluación Preliminar de Beneficios Ambientales por cambios en la concentración de Ozono en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México empleando BenMap*. Tesis de Licenciatura. México. Universidad Nacional Autónoma de México.

Si bien hay costos asociados a los efectos de los contaminantes, el beneficio se logró cuando se obtuvo un costo menor con referencia al costo del año anterior.

Los impactos a la salud evaluados fueron Mortalidad, Hospitalizaciones por Complicaciones Respiratorias, Emergencias de Asma, Días de Actividad Restringida Menor y Días Perdidos de Escuela.

Para el cálculo de impactos a la salud por exposición a concentraciones ambientales de ozono, así como para el cálculo de los beneficios económicos obtenidos, se utilizaron los modelos de exposición-respuesta y de evaluación económica propuestos por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (US EPA).

Se encontró que dadas las reducciones de ozono en el periodo de estudio se lograron evitar 3,179 muertes prematuras, 12,188 Hospitalizaciones, 4,006 Emergencias de Asma, 19,505,229 Días de Actividad Restringida Menor y 78,221,438 Días Perdidos de Escuela, asociadas con exposición a ozono ambiental.

Esta disminución en los efectos a la salud representó beneficios económicos de \$1,050,065,183; \$28,324,342; \$1,398,057; \$257,674,328 y \$662,894,482 USD respectivamente.

En el proyecto participaron el Instituto de Geografía y el Centro de Ciencias de La Atmósfera de la UNAM.

INTRODUCCIÓN

Existe una continua y creciente preocupación por las consecuencias que las emisiones de gases contaminantes tienen sobre el medio ambiente y sus efectos en el cambio climático a largo plazo y en el corto y mediano plazo sobre los ecosistemas y la salud de la población entre otros². Las características geográficas, económicas y sociales de la ZMVM, hacen de la contaminación un asunto que requiere atención inmediata.

La ZMVM es una de las áreas urbanas más grandes y pobladas del mundo y una de las más notorias por su pobre calidad del aire. En el caso del ozono ambiental, en el año 1991 se rebasó la norma NOM-020-SSA1-1993, 335 días, mientras que en el año 2011 se rebasó 154 días, siendo el máximo para cada año 404 y 184 partes por billón (ppb) respectivamente. La disminución, tanto en los días que se rebasó la norma, así como en las concentraciones máximas anuales se debió principalmente a la implementación de programas de control de emisiones, el más reciente el Programa Pro Aire 2011-2020 del cual se hablará en el Marco Teórico.

La Tabla 1 muestra la tendencia de la concentración máxima horaria de cada año del periodo de estudio, así como las estaciones y horas en las que se registraron dichas concentraciones. Se puede notar que existe una alta incidencia de niveles elevados de ozono en la región Suroeste de la ZMVM. En todos los años de 1991 a 2011, los máximos de ozono se presentaron entre las 11:00 y las 16:00, esto, debido a que el ozono es un contaminante secundario generado en presencia de óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) en presencia de radiación solar ultravioleta (UV).

² B. Metz; O.R. Davidson; P.R. Bosch; R. Dave; L.A. Meyer (eds) (2007). *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Fourth Assessment Report (AR4). University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. USA.

Tabla 1 Tendencia del Ozono Ambiental (ppb) en las Estaciones de Monitoreo

Año	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Concentración Máxima (1hr)	404	475	370	312	349	323	318	309	321	282
Estación	Ped	Pla	Ped	Ped	Ped	Ped	Tac	EAC	Pla	Ped
Hora	12:00	13:00	13:00	12:00	12:00	13:00	15:00	14:00	14:00	14:00

Continuación Tabla 1(a)

Año	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Concentración Máxima (1hr)	271	284	243	226	222	211	203	189	198
Estación	Azc	Ped	Azc	SUR	SUR	Azc	Ped	EAC	Ped
Hora	14:00	14:00	14:00	14:00	16:00	13:00	14:00	14:00	16:00

Continuación Tabla 1(b)

Año	2010	2011
Concentración Máxima (1hr)	208	184
Estación	Cua	Coy
Hora	16:00	14:00

Ped-Pedregal, Azc-Azcapotzalco, SUR- Santa Úrsula, EAC- Enap Acatlán, Cua-Cuautitlán, Coy-Coyoacán

A pesar de que han habido reducciones significativas en las concentraciones máximas de 1hr. de ozono, la calidad del aire sigue rebasando en exceso los estándares de calidad del aire nacionales e internacionales, no obstante, las disminuciones que hubieron en los años

analizados, permitieron obtener beneficios relacionados con la salud de la población expuesta, tales como: reducción de morbilidad y mortalidad por exposición aguda.

El procedimiento para el cálculo del beneficio económico consistió en multiplicar el número de impactos en la salud evitados, por el valor monetario de cada impacto.

La evaluación del beneficio económico por reducción de impactos a la salud, es de gran utilidad, ya que sirve como herramienta al realizar análisis de costo-beneficio, orientados a evaluar la conveniencia de aplicar medidas para controlar los niveles de contaminación ambiental.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la exposición a ozono de la población de la ZMVM en el periodo 1991-2011 considerando su movilidad a lo largo del día.

Objetivos Específicos

- Obtener la concentración ponderada por población máxima de cada año del periodo de estudio, mediante la combinación de los mapas de distribución de la población con los de distribución ozono ambiental dentro de la ZMVM.
- Determinar el número de Impactos a la Salud de: Mortalidad, Hospitalizaciones por Emergencias Respiratorias, Emergencias de Asma, Días de Actividad Restringida Menor y Días Perdidos de Escuela asociados con exposición de la población a ozono.
- Identificar el costo o beneficio económico relacionado con la incidencia de los impactos evaluados.
- Determinar cómo influye la movilidad de la población en su exposición a ozono respecto a la exposición obtenida si se tiene en cuenta una distribución de población fija.

HIPÓTESIS

Si las concentraciones de ozono han disminuido en el periodo de estudio, habrá una disminución en los impactos a la salud asociados a dicho contaminante. La reducción de impactos a la salud tendrá asociado un beneficio económico.

Cuando se tome en cuenta la movilidad de la población, su exposición a ozono será menor, que si se considera una distribución de población fija, debido a que durante el día los habitantes de la ZMVM se concentran en la región centro-norte, donde las concentraciones de ozono son menores.

JUSTIFICACIÓN

La evaluación de los beneficios económicos asociados a la disminución de impactos en la salud por exposición a contaminantes tomando en cuenta los procesos urbanos y de transporte, es uno de los objetivos contemplados en los programas PROAIRE 2002-2010 y PROAIRE 2011-2020. Los beneficios económicos se pueden comparar contra el costo social del diseño, evaluación e implementación de estrategias de control de emisiones.

MARCO TEÓRICO

Zona Metropolitana del Valle de México

Ubicación Geográfica

La ZMVM se sitúa en un cuadrante geográfico delimitado por las coordenadas geográficas mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2 Coordenadas Geográficas de la ZMVM ¹

Al Norte	19° 54´ Latitud Norte
Al Sur	19° 03´ Latitud Norte
Al Oeste	99° 31´ Latitud Oeste
Al Este	98° 38´ Latitud Oeste

Como se muestra en la Figura 1 se encuentra a una altura de 2,240 metros sobre el nivel del mar (msnm), rodeada por grandes cadenas montañosas que le brindan protección contra huracanes, tormentas, etc. Al Norte por el Cerro del Chiquihuite y la Sierra de Guadalupe, al Oriente por El Cerro de San Nicolás y la Sierra de Santa Catarina, mientras que al Sur y Suroeste se encuentra la Sierra del Ajusco, con más de 3600 msnm de altura, por último, al poniente se encuentra el Cerro de Las Cruces³.

³ F.L. García; A. Ramírez; S. Pérez. *Informe Climatológico Ambiental del Valle de México 2005*, p. 5-10. [Disponible en <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=378> (consultada 29.10.12)].

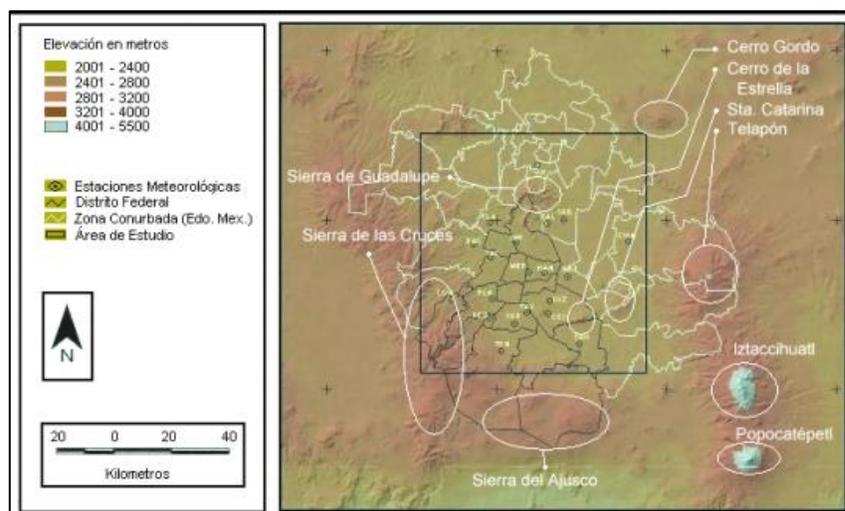


Figura 1 Ubicación Geográfica de la Zona Metropolitana del Valle de México

La fisiografía de la cuenca del Valle de México está ligada a la dinámica del Eje Neo Volcánico Transversal, que, desde el punto de vista geológico y eco-regional, es la frontera que divide a Norteamérica de Centroamérica y por lo tanto al país en dos. La cuenca se ubica justamente en el corazón del Eje, lo cual le da a la región condiciones naturales muy particulares. Su altitud, riqueza biológica, condiciones atmosféricas y dinámica hidrológica le brindan grandes atributos geográficos esenciales para la actividad humana, tales como relieve interior suave, clima templado, disponibilidad de bosques y agua, etcétera, pero también con rasgos topográficos, geológicos y asimismo fenómenos naturales con un impacto negativo en la calidad del aire: montañas que atrapan los vientos, exceso de agua en época de lluvias, zona sísmica, entre otros.

Conformación Política y Social

Cuenta con una superficie de 7,854 Km^{2,4} los cuales representan el 0.39% de la superficie total del país, de los cuales 1,495 Km² corresponden a las delegaciones del Distrito Federal y

⁴ Instituto Nacional de Ecología (INE). (2011). *Cuarto Almanaque de Datos y Tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009)*, México. ISBN: 978-607-790-858-6. [Disponible en http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=652 (consultada 20.09.12)].

los restantes 6,359 Km² corresponden a municipios del Estado de México e Hidalgo. Como se muestra en la Tabla 3, colinda al Norte con los Estados de Hidalgo y de México; al Este con los Estados de México, de Tlaxcala y de Puebla; al Sur con los Estados de México y de Morelos y al Oeste con el Estado de México.

Tabla 3 Colindancias de la Zona Metropolitana del Valle de México

Colindancia	Estados
Al Norte	Hidalgo, Estado de México
Al Sur	Estado de México y Morelos
Al Oeste	Estado de México
Al Este	Estado de México, Tlaxcala y Puebla

Actualmente está conformada por las 16 delegaciones del Distrito Federal (Tabla 4), y 60 municipios, de los cuales 59 corresponden al Estado de México (Tabla 5) y sólo uno (Tizayuca) al Estado de Hidalgo. Cuenta, de acuerdo con el censo de población 2010, con: 20,116,842 habitantes⁵ y una flota vehicular en 2008 de 4.5 millones de vehículos⁴. Es después de Tokio en Japón y Delhi en India, la ciudad más poblada del mundo.

Tabla 4 Delegaciones que conforman la ZMVM

Álvaro Obregón	Cuajimalpa	Iztapalapa	Tlalpan
Azcapotzalco	Cuauhtémoc	Magdalena Contreras	Tláhuac
Benito Juárez	Gustavo A. Madero	Miguel Hidalgo	Venustiano Carranza
Coyoacán	Iztacalco	Milpa Alta	Xochimilco

⁵ Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2011) *Cuaderno Estadístico de la Zona Metropolitana del Valle de México 2010*. México. [Disponible en <http://www.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/sfi/detalle.aspx?c=265&s=inegi&upc=702825003318&pf=Prod&ef=&f=2&cl=0&tg=80> (consultada 17.08.12)].

Tabla 5 Municipios del Estado de México que integran la ZMVM.

Acólman	Chimalhuacán	Nopaltepec	Texcoco
Amecameca	Ecatepec de Morelos	Otumba	Tezoyuca
Apaxco	Ecatzingo	Ozumba	Tlalmanalco
Atenco	Huehuetoca	Papalotla	Tlalnepantla de Baz
Atizapán de Zaragoza	Hueypoxtla	La Paz	Tultepec
Atlautla	Huixquilucan	San Martín de las Pirámides	Tultitlán
Axapusco	Isidro Fabela	Tecámac	Villa del Carbón
Ayapango	Ixtapaluca	Temamátla	Zumpango
Coacalco de Berriozabal	Jaltengo	Temascalapa	Cuautitlán Izcalli
Cocotitlán	Jilotzingo	Tenango del Aire	Valle de Chalco Solidaridad
Coyotepec	Juchitepec	Teoloyucan	Tonanitla
Cuautitlán	Melchor Ocampo	Chalco	Teotihuacán
Naucalpán de Juárez	Tepetlaóxtoc	Chiautla	Nezahualcóyotl
Tepetlixpa	Chicoloapan	Nextlalpán	Tepotzotlán
Chinconcuac	Nicolás Romero	Tequixquiac	

Importancia Económica y Social

La ZMVM representa gran parte del total de la actividad económica del país, tiene una participación del 27.6% en el Producto Interno Bruto (PIB) nacional y se encuentra concentrado el 21.4% de la población del país.

Recientemente la ZMVM se ha caracterizado por su desaceleración industrial y la consolidación de un sector para la prestación de servicios nacionales y regionales; es el centro financiero del país y sede de las principales empresas nacionales y extranjeras que operan en México⁴.

Vulnerabilidad ante la Contaminación Ambiental

La alta densidad de población y la gran actividad productiva, implican la presencia de factores de presión ambiental, y es por tanto, un ecosistema crucial para la sustentabilidad.⁶

Entre los principales factores fisiográficos, climáticos y sociales que afectan la calidad del aire en la cuenca de la ZMVM destacan los siguientes:

- 1) Debido a su altitud, el contenido de oxígeno en el aire es aproximadamente 23% menor que a nivel del mar, debido a esto, los procesos de combustión interna en vehículos automotores son menos eficientes, provocando que se emitan mayores contaminantes al medio ambiente.
- 2) El entorno montañoso que rodea la ZMVM constituye una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y la dispersión de contaminantes. Por lo cual se considera una región propicia para la acumulación de los contaminantes atmosféricos.
- 3) Debido a su latitud tropical, la intensa radiación solar que se registra a lo largo de todo el año favorece la formación de ozono. Ello es resultado de las complejas reacciones que la luz UV del Sol desencadena entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos emitidos a la atmósfera, los cuales son precursores del ozono, y junto con los óxidos de azufre, precursores de partículas finas⁷.
- 4) Contaminantes secundarios como el ozono son arrastrados por los vientos concentrándolos en la región Suroeste del Valle.
- 5) La gran actividad industrial, así como la alta densidad poblacional, ocasionan un incremento de la contaminación ambiental, consecuencia de operaciones industriales y del flujo diario de vehículos automotores.

⁶ Secretaría del Medio Ambiente-Gobierno del Distrito Federal. (2008). *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2006*. 1a. ed. México. [Disponible en http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/ie06_criterio_pw.pdf (consultada 05.06.13)]

⁷ Secretaría del Medio Ambiente-Gobierno del Distrito Federal. (2006). *Gestión Ambiental del Aire en el Distrito Federal 2000-2006*. 1a. ed. México. [Disponible en <http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/gaa/> (consultada 30.11.12)].

Ozono, O₃

La Figura 2 muestra la estructura de Lewis resonante del Ozono.

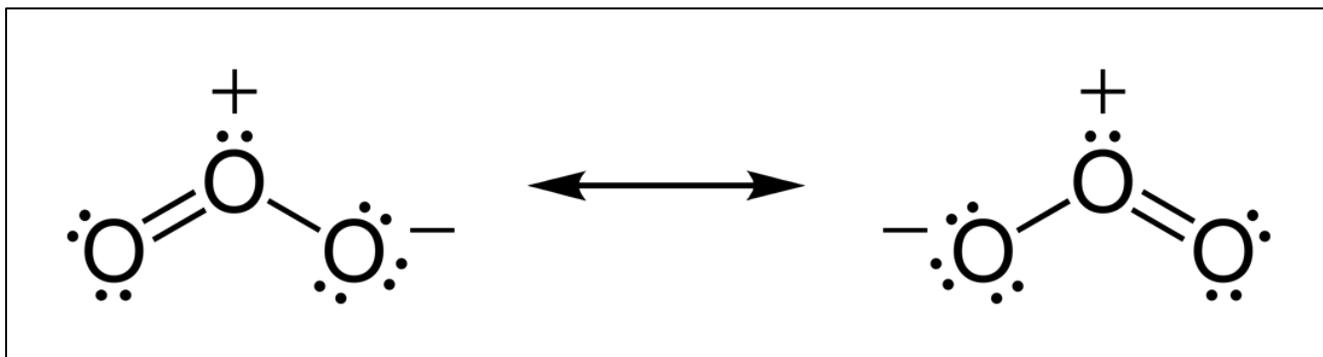


Figura 2 Estructura de Lewis Resonante del Ozono

El ozono (O₃) es un alótropo del oxígeno constituido por moléculas triatómicas de oxígeno, es un compuesto gaseoso ligeramente azulado muy reactivo que posee la capacidad de oxidar materiales. Es utilizado como germicida y para esterilizar el aire o agua para beber⁸. La Tabla 6 que aparece a continuación muestra las principales propiedades físicas del ozono.

Tabla 6. Propiedades Físicas del Ozono.

Estado de Agregación	Gaseoso
Apariencia	Azul Pálido
Densidad	0.00214 g/cm ³
Masa Molar	47.99 g/mol
Punto de Fusión °C	-192.45
Punto de ebullición °C	-112.15
Viscosidad	NA
Solubilidad en Agua 0°C	0.105g/100mL
ΔH°_f sólido	142.3 kJ/mol

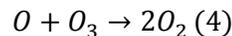
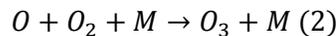
⁸ Shakhshiri. (2007). *Ozone (O₃)*. Chemical of the Week: General Chemistry. [Disponible en <http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/PDF/Ozone.pdf>(consultada 15.10.12)].

Ozono Estratosférico

El ozono estratosférico se encuentra naturalmente en capas altas de la atmósfera y resulta benéfico e indispensable para la vida en la Tierra, ya que:

- 1) Actúa como filtro de las radiaciones UV (sin este filtro la existencia de vida en la tierra sería prácticamente imposible).
- 2) Ayuda a mantener el equilibrio térmico de la atmósfera. A este ozono que está a más de 25 km de altura también se le conoce como capa de ozono y es de vital importancia para la vida en la tierra, desafortunadamente esta capa se ha ido debilitando con el paso del tiempo debido a actividades antropogénicas, principalmente por el uso indiscriminado de aerosoles con alto contenido de clorofluorocarbonos (CFCs)⁹.

A continuación se muestran las reacciones que ocurren con el ozono estratosférico y que permiten que actúe como filtro protector de la radiación UV^{9,10}:



M es un sustrato aceptor de energía, normalmente moléculas de N₂ y O₂

La radiación de longitud de onda inferior a 240 nm propicia la disociación de las moléculas de oxígeno diatómico como se indica en la reacción (1), estos átomos son muy reactivos y reaccionan con otra molécula de oxígeno formando el ozono, reacción (2). En cambio, las

⁹ M.L. Davis; D.A. Cornwell. (2008). *Introduction to Environmental Engineering*. Fourth Edition. Mc Graw-Hill. New York. p. 574,575.

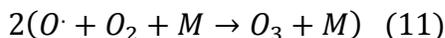
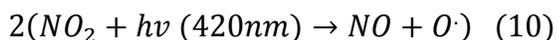
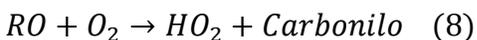
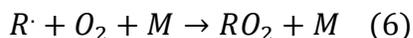
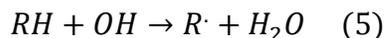
¹⁰ Chicón L. *Ozono Atmosférico*. [Disponible en <http://ambientis.org/ozono.pdf> (consultada 18.11.12)].

reacciones de longitud de onda superior a 290 nm favorecen la destrucción de ozono para formar oxígeno diatómico y oxígeno monoatómico reacción (3). Finalmente, el ciclo se completa con la destrucción del ozono como se indica en la reacción (4). A este conjunto de reacciones se les denomina reacciones de Chapman¹⁰.

Ozono Troposférico

El ozono que está en las capas altas de la atmósfera y nos protege de la radiación UV, resulta ser un típico contaminante secundario, y principal protagonista de la contaminación por smog fotoquímico en partes bajas de la atmósfera y participa con un porcentaje considerable en el calentamiento global.

Durante el día, cuando los hidrocarburos (principal fuente de energía en la ZMVM) son emitidos a la atmósfera están expuestos a reacciones de oxidación. Los productos de la oxidación en presencia de óxidos de nitrógeno, y radiación solar, inician la producción de ozono. Las siguientes reacciones representan el ciclo de formación del ozono troposférico¹¹:



¹¹ El ozono en la Tropósfera. [Disponible en <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=4&opcionrecursostecnicos=11> (consultada 30.05.13)]

M puede ser N₂ u O₂

La reacción neta del ejemplo anterior es:



Donde RH representa una molécula de hidrocarburo que puede ser oxidada por el radical hidroxilo obteniendo el radical R· y agua, reacción (5), el radical R· posteriormente reacciona con oxígeno para producir un hidrocarburo oxidado RO₂, reacción (6), que después reaccionará con el óxido nítrico (NO) para formar dióxido de nitrógeno (NO₂) y RO reacción (7). El RO generado reacciona una vez más para producir una molécula reactiva de HO₂ reacción (8). El carbonilo producido en (8) puede actuar como una molécula orgánica que al reaccionar con oxígeno, da otro radical hidroperóxido (HO₂), Los hidroperóxidos formados en la reacción (8), reaccionan con NO para dar otra molécula de NO₂ y un hidroxilo reacción (9) que iniciará nuevamente el ciclo en la reacción (5). La radiación solar UV divide las moléculas de dióxido de nitrógeno producidas en la reacción (9), obteniendo monóxido de nitrógeno y un átomo reactivo de oxígeno reacción (10), que reaccionará con el oxígeno del aire en presencia de nitrógeno (N₂) para formar el ozono reacción (11)^{11,12}.

Las fuentes antropogénicas más importantes de precursores de ozono troposférico son las emisiones vehiculares, emisiones industriales y los solventes químicos. A pesar de que estos precursores se originan en áreas urbanas, también pueden ser arrastrados por los vientos a lo largo de varios kilómetros provocando incrementos en la concentración de ozono en regiones menos pobladas.

¹² Secretaría del Medio Ambiente –Gobierno del Distrito Federal. (2012). *Calidad del Aire en la Ciudad de México: Informe 2011*. Creative Commons. México. p.106.

Impactos en la Salud

El ozono a nivel de suelo puede ocasionar inflamación pulmonar, irritación de garganta, dolor, sensación de quemazón en el pecho al respirar profundamente, depresión del sistema inmunológico frente a infecciones pulmonares, cambios agudos en la función, estructura y metabolismo pulmonar y efectos sistémicos en órganos blandos como el hígado.

Diversos estudios epidemiológicos han evaluado las asociaciones entre concentraciones ambientales de ozono troposférico y un amplio rango de impactos negativos en la salud, que incluyen mortalidad prematura, admisiones a hospitales por enfermedades respiratorias, emergencias de asma, y restricciones en la actividad (días perdidos de escuela y días de actividad restringida menor).

La relación entre la severidad del efecto y la proporción de la población que lo sufre se presenta como la pirámide de la Figura 3. Muchos individuos experimentan el impacto menos grave, mientras que pocos individuos experimentan los efectos más severos como hospitalización o muerte¹³.

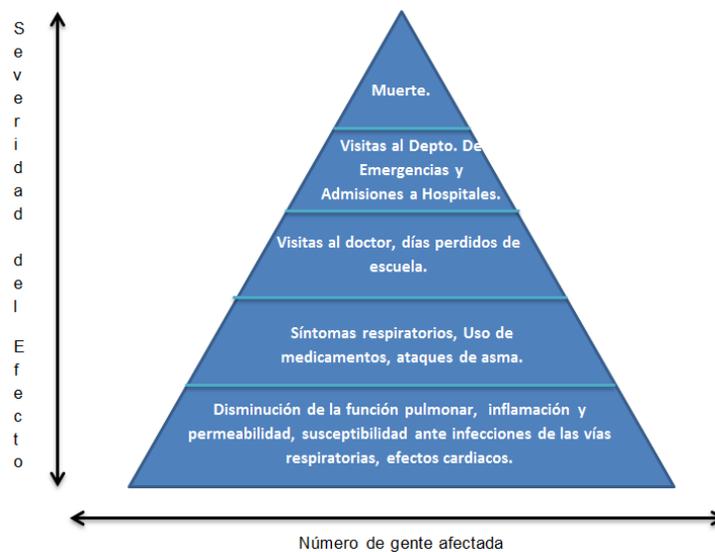


Figura 3 Severidad e Incidencia de las Enfermedades por Ozono

¹³ US Environmental Protection Agency (EPA). *Health Effects of ozone in the general population*. [Disponible en <http://www.epa.gov/apti/ozonehealth/population.html> (consultada 12.01.13)]

En la Tabla 7 se muestran en la columna a la izquierda las concentraciones promedio de ozono medidas en ppb, en la columna central los intervalos del Índice de Calidad del Aire y en la columna a la derecha los descriptores asociados con la calidad del aire.

Tabla 7. Valores del Índice de Calidad del Aire.

Concentración promedio de Ozono en ppb, de 8 horas	Índice de Calidad del Aire	Descriptor de la Calidad del Aire
0.0 a 64	0 a 50	Bueno
65 a 84	51 a 100	Moderado
85 a 104	101-150	Dañino a la salud de grupos sensibles
105 a 124	151-200	Dañino a la Salud
125(8-hr) a 404(1-hr)	201-300	Muy dañino a la Salud

En general, cuando los niveles de ozono son altos, las probabilidades de ser afectado aumentan mientras más tiempo se permanezca activo al aire libre y más agotadora sea la actividad que se lleve a cabo. Los estudios científicos demuestran que:

A niveles de ozono por encima de 120 ppb, los esfuerzos físicos pesados durante periodos de tiempo cortos (de 1 a 3 horas) pueden aumentar el riesgo de experimentar síntomas respiratorios y una función pulmonar reducida.

A niveles de ozono entre 80 y 120 ppb aún el esfuerzo físico moderado al aire libre durante períodos de tiempo más largos (de 4 a 8 horas) puede aumentar el riesgo de experimentar efectos relacionados al ozono.

En la Tabla 8 se indican los efectos a la salud que pueden ocurrir a diferentes niveles de ozono.

Tabla 8. Nivel de Ozono y Efectos Observados.

Nivel de Ozono	Efectos Observados
Bueno	No se anticipan efectos a la salud
Moderado	Los individuos extraordinariamente sensibles pueden experimentar efectos respiratorios a causa de la exposición prolongada al ozono durante el ejercicio físico al aire libre.
Dañino a la salud de grupos sensibles	Los grupos sensibles pueden experimentar síntomas respiratorios (como tos o dolor al respirar profundamente) y una función pulmonar reducida, lo que puede ocasionar alguna incomodidad al respirar.
Dañino a la Salud	Grupos sensibles tienen una mayor probabilidad de experimentar síntomas respiratorios (como una tos empeorada o dolor al respirar profundamente) y una función pulmonar reducida, lo que puede causar alguna dificultad para respirar. A este nivel cualquiera podría experimentar efectos respiratorios
Muy dañino a la salud	Los miembros de grupos sensibles probablemente experimentarán síntomas respiratorios cada vez más severos y una respiración deteriorada. Muchas personas saludables realizando esfuerzos físicos moderados experimentarán algún tipo de efecto. De acuerdo a los estimados de la EPA, aproximadamente la mitad experimentará una función pulmonar reducida; una quinta parte experimentará una función pulmonar severamente reducida; del 10 al 15% experimentará síntomas respiratorios desde moderados hasta severos (como tos empeorada y dolor al respirar). Las personas con asma serán afectadas más severamente, ocasionando que algunas tengan que aumentar el uso de medicamentos o que procuren atención en una clínica o sala de emergencias

Impactos a la Salud evaluados en este trabajo

A continuación se da una breve definición de cada uno de los impactos a la salud evaluados en este trabajo. Más adelante en la sección de Metodología se amplía en los parámetros de la función concentración-respuesta y en el valor económico de cada impacto.

Mortalidad Prematura

Estudios publicados desde 1990 han dado evidencia que soporta una relación entre exposiciones agudas a ozono y muertes prematuras. Estas investigaciones incluyen estudios de series de tiempo específicos por ciudad, muchos de los cuales han sido incluidos en

meta-análisis recientes^{14,15,16}. Estos estudios, típicamente controlan para factores que impactan en la mortalidad, como el clima, tendencias de tiempo, estacionalidad, día de la semana y otros contaminantes.

Admisiones a Hospitales Por Enfermedades Respiratorias

Estudios llevados a cabo en Estados Unidos han detectado de una relación entre O₃ y hospitalizaciones por enfermedades del sistema respiratorio. Esta relación ha sido especialmente observada en el verano y el invierno.

Emergencias de Asma

Varios estudios han identificado una relación entre ozono y las visitas a salas de emergencia por emergencias de Asma Pediátricas.

Días de Actividad Restringida Menor

Se entiende por día de actividad restringida, cualquier día en el cual una persona se ve forzada a reducir sus actividades normales debido a condiciones crónicas o agudas. Los días de actividad restringida menor son días en los cuales la actividad reducida no resulta en una pérdida de trabajo, escuela o incapacidad.

Días Perdidos de Escuela

Este rubro considera las pérdidas en el salario de uno de los padres al tener que quedarse en casa con el niño(a) que sufre de alguna enfermedad respiratoria asociada a exposición a ozono.

La Tabla 9 muestra una lista de los 5 impactos analizados. También muestra el porcentaje susceptible de la población a cada impacto¹⁶.

¹⁴ M.L. Bell; F. Dominici; J.M. Samet. (2005). *A meta-analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study*. *Epidemiology*. 16(4): 436-445.

¹⁵ K. Ito; S.F. De Leon; M. Lippmann. (2005). *Associations between ozone and daily mortality: analysis and meta-analysis*. *Epidemiology*. 16(4): 446-457.

Tabla 9 Impactos en la Salud Evaluados y Porcentaje Susceptible de la Población

Impacto	Porcentaje de la Población Susceptible¹⁶	Edad
Mortalidad	100%	Todas las edades
Hospitalizaciones por complicaciones respiratorias	100%	Todas las edades
Emergencias de Asma	35%	Edad < 18 años
Días de Actividad Restringida Menor	63%	18-65 años
Días Perdidos de Escuela	27%	Edad 5-17 años

Normatividad Vigente

El criterio para evaluar la calidad del aire con respecto al ozono, es el valor normado para la protección de la salud de la población establecido en la norma NOM-020-SSA1-1993, que establece que: *“La concentración de ozono como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo normado de 0.11 ppm, o lo que es equivalente a 216 µg/m³, en una hora, una vez al año, en un periodo de tres años para protección a la salud de la población susceptible”¹⁷.*

Tendencia de las Concentraciones Ambientales de Ozono Troposférico¹⁸

En esta tesis se analizó la base de datos de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) perteneciente al Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA) del Gobierno del Distrito Federal (GDF) y se observó una tendencia decreciente en las concentraciones de ozono en el periodo de estudio, ya que en el año 1991

¹⁶ Bart D. Ostro; Hien Tran & Jonathan I. Levy (2006): *The Health Benefits of Reduced Tropospheric Ozone in California*. Journal of the Air & Waste Management Association. 56:7: 1007-1021.

¹⁷ Secretaría de Salud. *Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993, Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente respecto al ozono (O₃). Valor normado para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población*. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. Tomo DLXXXIX, no. 25. pp. 47-53.

¹⁸ Dirección de Monitoreo Atmosférico-Secretaría del Medio Ambiente.

[<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=2&opcioninfoproductos=30> consultada 05.06.13]

se registró un máximo de 404 ppb, mientras que en el año 2011 fue de 184 ppb. Así mismo se rebasó la norma *NOM-020-SSA1-1993*, 335 días en 1991 y 154 días en 2011.

De acuerdo con la Figura 4 puede observarse una tendencia decreciente en las concentraciones promedio de ozono dentro de la ZMVM, así como en el número de horas por año que se rebasó la norma (Figura 5).

A pesar de que se han logrado reducciones de más del 50% en las concentraciones de ozono en el periodo 1991-2011, la concentración máxima anual de ozono rebasó todos los años el valor establecido en la norma referida anteriormente (Figura 6).

También se encontró que en el 48% de los casos la concentración máxima de ozono se registró a las 14:00, un 19% a la 13:00, un 14 % tanto a las 12:00 como a las 16:00, y un 5 % a las 15:00. Como se puede notar en todos los casos el máximo de ozono se encuentra entre las 12:00 y 16:00 que es cuando la radiación solar UV se encuentra en sus niveles más altos. También se detectó que en la estación de monitoreo ambiental *Pedregal* (Ped), se registraron con mayor frecuencia (49%) los máximos anuales, seguida de la estación de monitoreo ambiental *Azcapotzalco* (Azc) con un 14% del total. Ver *Tabla 10*

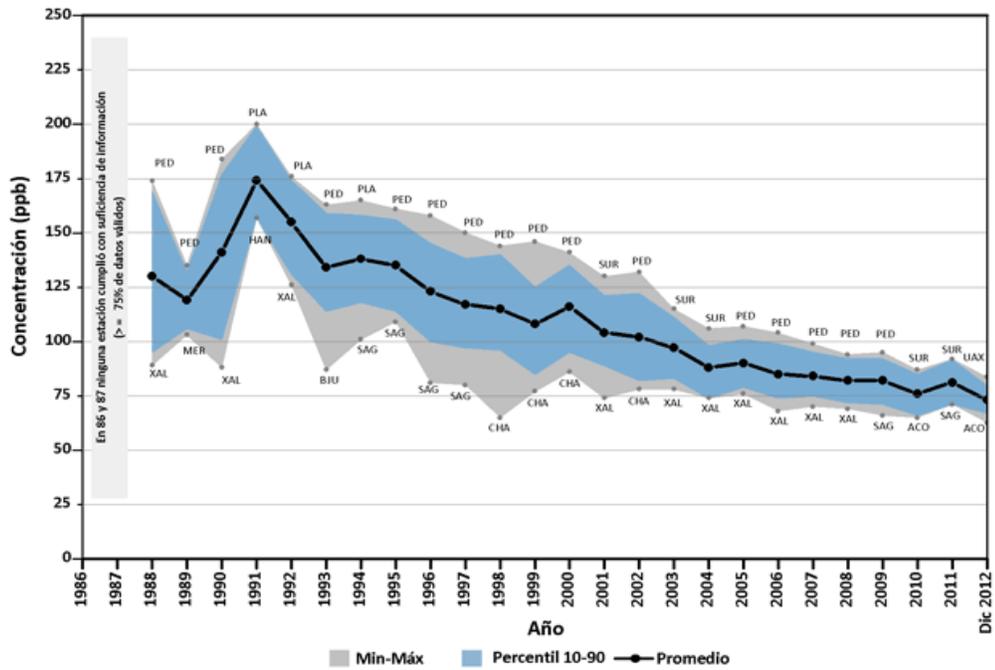


Figura 4 Concentración Promedio Anual de Ozono en el Periodo de estudio

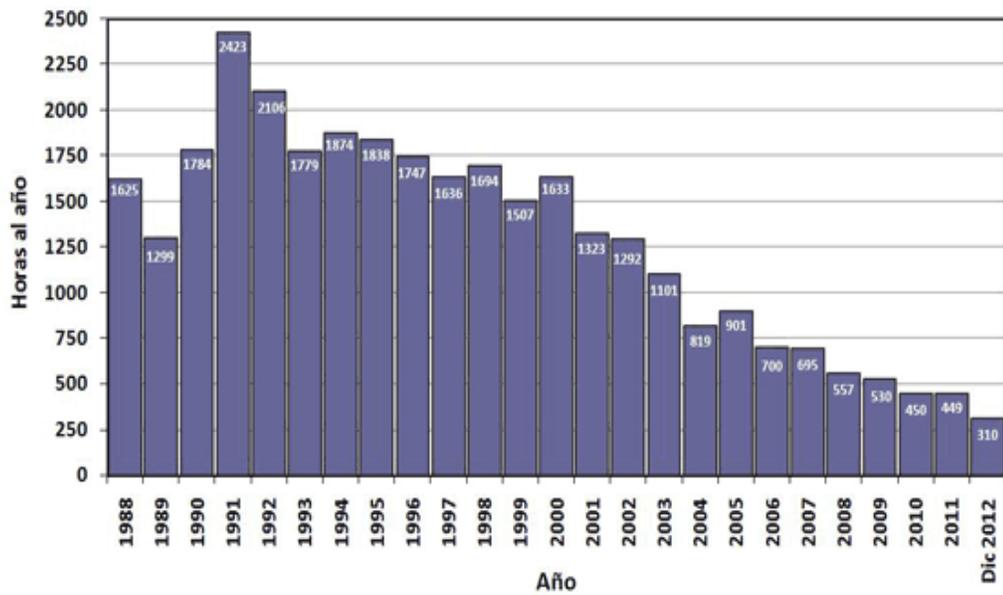


Figura 5 Número de horas por año que se rebasó la NOM-023-SSA1-1993

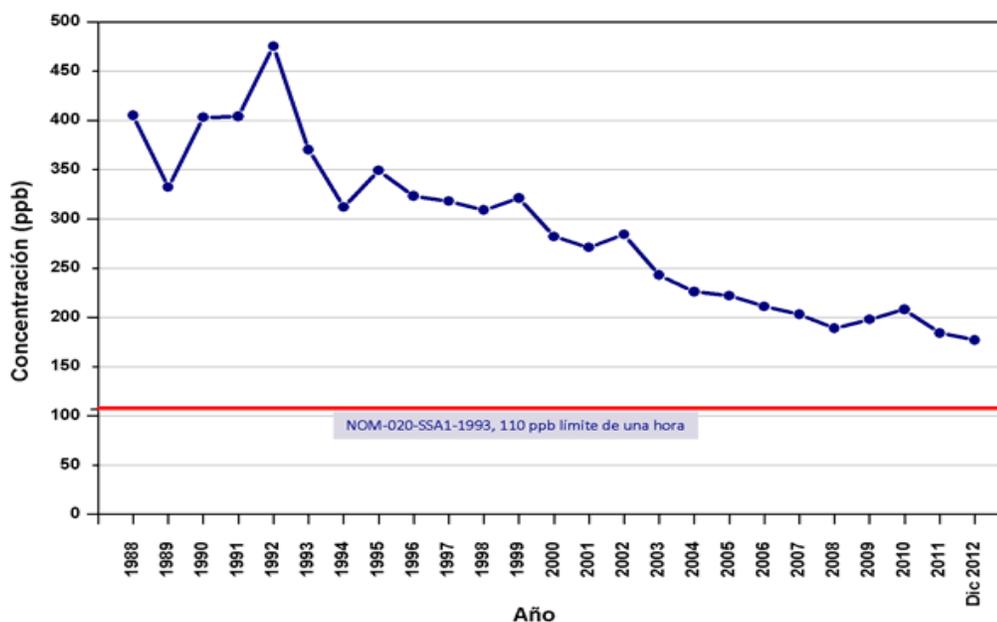


Figura 6 Tendencia del Máximo Anual de Ozono

Tabla 10. Análisis de la base de datos de la RAMA-SIMAT.

Año	[O ₃] ppb	Estación	Mes	Hora	Número de Horas que se rebasó la Norma
1991	404	Pedregal	Octubre	12:00	2423
1992	475	Plateros	Marzo	13:00	2106
1993	370	Pedregal	Febrero	13:00	1779
1994	312	Pedregal	Octubre	12:00	1874
1995	349	Pedregal	Julio	12:00	1838
1996	323	Pedregal	Octubre	13:00	1747
1997	318	Tacuba	Septiembre	15:00	1636
1998	309	EAC	Diciembre	14:00	1694
1999	321	Plateros	Octubre	14:00	1507
2000	282	Pedregal	Mayo	14:00	1633
2001	271	Azcapotzalco	Enero	14:00	1323
2002	284	Pedregal	Septiembre	14:00	1292
2003	243	Azcapotzalco	Abril	14:00	1101
2004	226	Santa Úrsula	Mayo	14:00	819
2005	222	Santa Úrsula	Enero	16:00	901
2006	211	Azcapotzalco	Mayo	13:00	700
2007	203	Pedregal	Abril	14:00	695
2008	189	EAC	Abril	14:00	557
2009	198	Pedregal	Febrero	16:00	530
2010	208	Cuautitlán	Mayo	16:00	450
2011	184	Coyoacán	Mayo	14:00	449

Programas enfocados en la mejora de la calidad del aire de la ZMVM

- En 1986 se inició el registro de los niveles de contaminación con la instalación de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

- De 1986 a 1987 se pusieron en marcha las 21 acciones para reducir la contaminación del aire y las 100 medidas necesarias, que incluían medidas como la sustitución de combustóleo con alto contenido en azufre por gas natural en las centrales termoeléctricas, y la reducción de plomo en las gasolinas, además surgió el programa voluntario de *Un día sin auto*.

- De 1990 a 1995, se implementó el PICCA *Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica*, el cual se enfocó en la reducción de las emisiones de plomo, óxidos de azufre, monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, para ello las estrategias se concentraron en la mejora de la calidad de los combustibles, la reducción de emisiones en vehículos automotores, modernización tecnológica y control de emisiones en industrias y servicios mediante la introducción de catalizadores de dos y tres vías y suministro de gasolina sin plomo. En 1993 se inició la comercialización de diésel con bajo contenido de azufre, se completó la sustitución de combustóleo por gas natural y se cerró definitivamente la Refinería 18 de Marzo en la Delegación Azcapotzalco. Con las medidas implementadas en el PICCA se lograron reducciones sustanciales de plomo y dióxido de azufre y monóxido de Carbono.

De 1996 a 2000 con el propósito de ampliar, reforzar y dar continuidad al PICCA surgió PROAIRE *Programa para mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México*, enfocado a la reducción de concentraciones de ozono, para lo cual las medidas implementadas fueron dirigidas hacia la reducción de sus precursores (óxidos de nitrógeno e hidrocarburos), para ello las estrategias se concentraron en la reducción de emisiones en la industria, disminución

de emisiones por kilómetro en vehículos automotores y la reducción de las tasas de crecimiento de los kilómetros recorridos por vehículos automotores, mediante la introducción de tecnologías automotrices con menos emisiones de contaminantes, mejoras a las gasolinas, combustibles industriales y domésticos, destacando: la eliminación del tetraetilo de plomo (TEP) en las gasolinas y la incorporación de un compuesto hidrogenante como el metil terbutil éter (MTBE), y el establecimiento de valores máximos en el contenido de aromáticos, olefinas y benceno, la disminución de azufre y aromáticos en el diésel industrial y la sustitución del combustóleo ligero por gasóleo industrial cuyo contenido de azufre es menor. Los resultados fueron: Una reducción de plomo en un 99% respecto al año de 1988, los niveles de dióxido de azufre (SO₂) se redujeron muy por debajo de los indicados por la norma, los niveles de monóxido de carbono (CO) fueron reducidos significativamente, y los niveles de ozono (O₃) comenzaron a disminuir, en comparación con la tendencia que se tenía a principios de la década de los noventa.

2002 a 2010. En febrero de 2002 se presentó el PROAIRE 2002-2010, con acciones dirigidas hacia diferentes sectores como se puede observar en la Tabla 11¹⁹.

Tabla 11 Medidas implementadas por sector del PROAIRE 2002-2010

Sector	Medidas Implementadas
Transporte Privado	Reducción del contenido de azufre en diésel y gasolina, adaptación de sistemas de control de emisiones a vehículos no equipados desde fábrica, establecimiento y aplicación de límites de emisión más estrictos para vehículos nuevos a diésel, introducción de vehículos eléctricos y eliminación de vehículos contaminantes de mayor edad de uso privado.
Transporte Público	Renovación del transporte de pasajeros de baja capacidad, sustitución del transporte de pasajeros de mediana capacidad por vehículos nuevos de alta

¹⁹ C. Scheinbaum. (2005). *Avances en la Calidad del Aire y Cumplimiento del PROAIRE*. Foro de Calidad del Aire en el Distrito Federal y Cambio Climático. México D.F. 2-3 mayo de 2005. [Disponible en [http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/temporales/foroCACC/forocacc-01_avances_en_la_calidad_del_Aire_\(claudia_scheimbaum\).pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/temporales/foroCACC/forocacc-01_avances_en_la_calidad_del_Aire_(claudia_scheimbaum).pdf) (consultada 05.06.13)].

	capacidad, renovación de autobuses de la red de transporte de pasajeros y expansión del metro.
Industrial	Reconversión energética en la industria, control de emisiones de contaminantes, consolidación del Sistema Integrado de Regulación de la Industria SIRG, fortalecimiento de las actividades de inspección y vigilancia en la industria, disminución de las emisiones generadas por las plantas de energía eléctrica situadas en la ZMVM
De Servicios	Reducción de emisiones de hidrocarburos en lavanderías de lavado en seco, reducción de emisiones por fugas de gas LP en instalaciones domésticas, lineamientos del uso de combustibles en la operación de hornos artesanales para la fabricación de ladrillo y promover el uso de energía solar en sustitución de combustibles fósiles.
Conservación de Recursos Naturales	Refuerzo de los instrumentos legales en materia del uso de suelo, contención del crecimiento de la mancha urbana en el área rural de la ZMVM, mejora en la prevención y combate de incendios forestales, recuperación, restauración, conservación y ampliación de las áreas verdes de la ZMVM.
Educación Ambiental	A través de programas de información, formación y capacitación ambiental.
Salud	Modernización y actualización del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas, medidas particulares para reducir la exposición de la población a la contaminación del aire, actualización de la evaluación de costos económicos asociados a efectos a la salud, creación y revisión de normas de calidad del aire.
Fortalecimiento Institucional	Actualización del inventario de emisiones y modernización de la red automática de monitoreo atmosférico.

En términos de mejora de la calidad del aire PROAIRE 2002-2010 arrojó los siguientes resultados:

1. Aunque el ozono sigue siendo el principal problema de contaminación atmosférica se alcanzaron las tres metas establecidas: se eliminaron las concentraciones de ozono superiores a 200 IMECA; se redujo en forma considerable el número de días con

concentraciones de ozono entre 101-200 IMECA y han aumentado paulatinamente los días con buena calidad del aire.

2. Para las PM_{10} se registró una tendencia general decreciente. Sin embargo, la meta de no rebasar el promedio anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no se cumplió en todas las estaciones de monitoreo.
3. Se cumplió la meta de implementar la norma para $PM_{2.5}$, este contaminante mostró una reducción gradual en todos sus indicadores de 2004 a 2009.
4. Se cumplió la meta de reducir las concentraciones de CO ya que desde 2002 se ha tenido una reducción neta hasta 2008 de alrededor del 40% y una reducción acumulada desde 1989 superior al 70%.

Por lo que se refiere a la reducción de emisiones por la aplicación de acciones contenidas en el PROAIRE 2002-2010, se estimaron reducciones de 5,078 ton/año de partículas PM_{10} , 506 ton/año de SO_2 , 817,132 ton/año de CO, 62,779 ton/año de NO_x y 85,706 ton/año de COV.

Para el periodo 2011-2020, se diseñó el nuevo Programa PROAIRE 2011-2020 el cual integra estructuralmente variables y procesos urbanos, de transporte, económicos y sociales, con los procesos de generación de contaminantes criterio, tóxicos y de efecto invernadero. Cuenta con un total de 81 medidas y 116 acciones agrupadas en 8 estrategias; 1) Ampliación y refuerzo de la protección a la salud 2) Disminución estructural del consumo energético en la ZMVM 3) Calidad y eficiencia energética en todas las fuentes 4) Movilidad y regulación del consumo energético del parque vehicular 5) Cambio tecnológico y control de emisiones 6) Educación Ambiental, cultura de la sustentabilidad, y participación ciudadana 7) Manejo de áreas verdes, reforestación y naturación urbanas 8) Fortalecimiento institucional e investigación Científica.

Con este nuevo PROAIRE 2011-2020 se estima obtener una reducción en las emisiones de contaminantes criterio de más de 490mil toneladas, más de 5mil toneladas de compuestos tóxicos, y de más de 5 millones 500 mil toneladas de gases de efecto invernadero²⁰

SIMAT-RAMA

El Sistema Integral de Monitoreo Atmosférico SIMAT es el sistema de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF) empleado para vigilancia y monitoreo de la calidad del aire de la ZMVM. En la actualidad la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) cuenta con 34 estaciones de monitoreo ubicadas en puntos estratégicos de la ZMVM, 21 están localizadas en el Distrito Federal y 13 en el Estado de México (Figura 7). La RAMA realiza mediciones continuas y permanentes de ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) y partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$).²¹

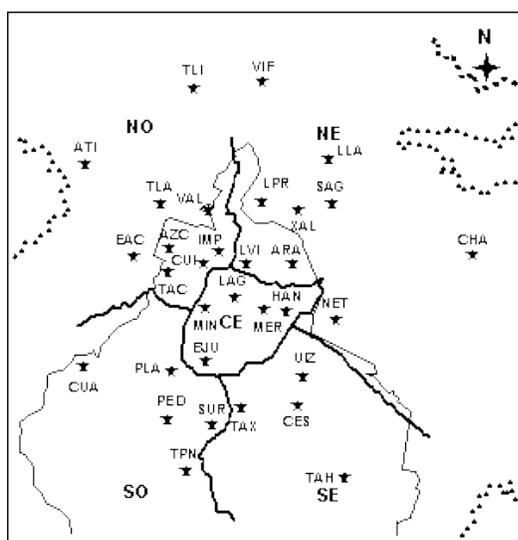


Figura 7 Distribución de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico²²

²⁰ Secretaría del Medio Ambiente-Gobierno del Distrito Federal. *Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020*. [Disponible en http://www.sma.df.gob.mx/proaire2011_2020/index.php?opcion=1 (consultada 11.01.13)].

²¹ Secretaría del Medio Ambiente. <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=4&opcionrecursos tecnicos=4> (Visitada 12.12.12).

²² Imagen tomada de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/113/cap4.html>

Encuesta Origen-Destino

Para evaluar la movilidad de la población se propuso el uso de la Encuesta Origen-Destino 2007, de la ZMVM, la cual estima la distribución de la población para un día del año 2007, en base a Áreas Geo-Estadísticas Básicas (AGEBS). Esta encuesta y otras anteriores de su tipo han sido empleadas exitosamente para determinar relaciones espaciales entre lugares de actividad económica y residencial y como insumo para determinar viajes al trabajo y flujos por modo de transporte²³.

Grid Analysis Display System (GrADS)

Utilizado para crear los mapas de distribución de la población y de concentraciones de ozono, es una herramienta interactiva de escritorio empleada para manipulación y visualización de información de Ciencias de la Tierra. Posee dos modelos para manejar la información, ya sea en forma de rejilla o en forma de datos de estación.²⁴

Usa un ambiente de información en 5 dimensiones: las 4 dimensiones convencionales de longitud, latitud, nivel vertical, tiempo, más una quinta dimensión opcional para rejillas, que es generalmente implementada para hacer ensambles o empalmes. La información de diferentes series de datos puede ser montada gráficamente con un registro correcto de espacio y tiempo. Las operaciones son ejecutadas interactivamente por medio de expresiones tipo Fortran en la línea de comandos.

²³ Encuesta Origen-Destino 2007. Principales Resultados. [Disponible en <http://igecem.edomex.gob.mx/descargas/estadistica/ENCUESTADEORIGEN/EOD2007.pdf> (Consultada 25.08.12)].

²⁴ <http://iges.org/grads> (Consultada 23.08.12).

Análisis Objetivo Cressman (Oacres)²⁵

El Análisis Objetivo Cressman es una función aplicada mediante lenguajes de programación con la que cuenta GrADS que al aplicarse en información de datos de estaciones, permite aumentar la cantidad de datos, acomodándolos en una malla regularmente espaciada.

Como se muestra en la Figura 8 el análisis objetivo se utilizó para transformar las concentraciones horarias de ozono medidas en las estaciones de monitoreo dentro de la ZMVM (espaciadas irregularmente), en mapas con una mayor cantidad de concentraciones de ozono espaciadas regularmente.

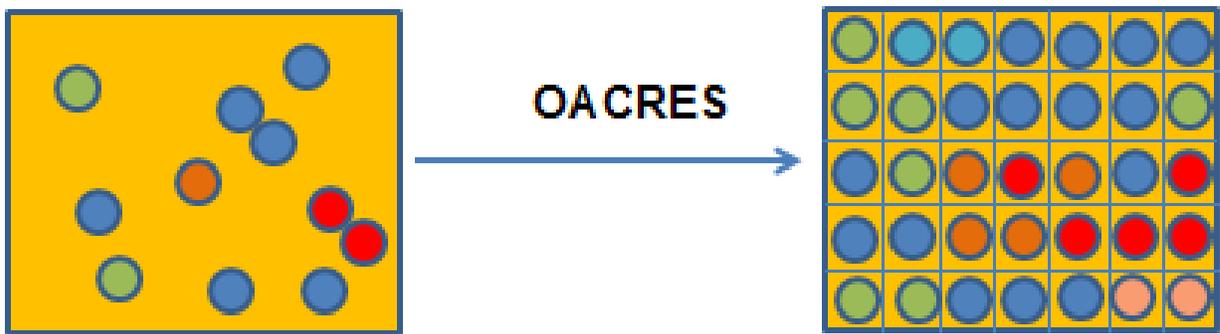


Figura 8 Proceso de Interpolación Oacres

La función OACRES puede ser lenta de ejecutarse dependiendo de la densidad de información de estación, además puede ser inestable si la densidad de datos de malla es mucho mayor que la densidad de información de estación, dando valores que no son reales. Por eso se sugiere hacer una comparación entre los valores obtenidos mediante OACRES y los valores de estación reales.

²⁵ Manual del Usuario de GrADS-Grid Analysis and Display System. [Disponible en <http://www.iges.org/grads/> (Visitada 11.12.12)].

METODOLOGÍA

Mapas horarios de la distribución de Ozono en la ZMVM

Para obtener los mapas de la distribución de ozono de la ZMVM se utilizaron los datos de las mediciones horarias de 1991 a 2011 de las estaciones de monitoreo de la RAMA.

Posteriormente se convirtieron a formato de GrADS y utilizando la función de interpolación Oacres se obtuvieron 184,080 mapas de distribución de ozono en la ZMVM (uno para cada hora comprendida entre 1991 y 2011).

Mapas horarios de la distribución de la Población en la ZMVM

La información de la Encuesta Origen-Destino (EOD) se convirtió a formato de GrADS, para generar 24 mapas (uno para cada hora del día), los cuales indican la distribución horaria de la población de la ZMVM²⁶.

Concentración Ponderada por Población (CPP)

Al combinar (ensamblar) los mapas de distribución horaria de población con los mapas de la distribución horaria de ozono en la ZMVM y con base en la ecuación (13) se obtuvieron 184,080 CPP, una para cada hora de 1991 a 2011.

$$CPP_i = \left(\sum_{j=1}^n \frac{C_j P_{ob_j}}{P_{ob\ Total\ ZMVM}} \right)_i \quad (13)$$

²⁶ En este trabajo se partió de la suposición de que la distribución de población horaria del día analizado por la EOD es la misma para todos los días comprendidos de 1991 a 2011.

Dónde:

j : representa un lugar de análisis dentro de la ZMVM, el cual se tiene una concentración de ozono C_j y una población expuesta P_j . En realidad $\frac{Pob_j}{Pob\ Total\ ZMVM}$ representa la fracción de población en dicho lugar.

CPP_i : representa la Concentración Ponderada por Población de la hora i .

C_j : representa las concentraciones de ozono en cada lugar de análisis dentro de la ZMVM

Pob_j : Cantidad de población expuesta a la Concentración C_j

$Pob\ Total$: Población Total de la ZMVM en la hora i

En el cuadro 1 se ilustra, mediante un ejemplo hipotético el cálculo de la CPP horaria.

Cuadro 1 Ejemplo hipotético del Cálculo de la Concentración Ponderada de una hora del Periodo de Estudio

<p>Mapa de Distribución de la Población de la hora i</p> <p>Población Total=100</p> <table border="1" data-bbox="362 1270 597 1459"><tr><td>50</td><td>20</td></tr><tr><td>20</td><td>10</td></tr></table>	50	20	20	10	<p>La concentración ponderada por población CPP_i se obtendría de la siguiente manera:</p> $CPP_i = \frac{100ppb * 50}{100} + \frac{80ppb * 20}{100} + \frac{120ppb * 20}{100} + \frac{80ppb * 10}{100}$ $CPP_i = 50ppb + 16ppb + 24ppb + 8ppb$ <p>Y por lo tanto para la hora i la concentración ponderada por población (CPP) sería=98 ppb</p>
50	20				
20	10				
<p>Mapa de Distribución de Ozono (ppb) de la hora i</p> <table border="1" data-bbox="354 1600 602 1801"><tr><td>100</td><td>80</td></tr><tr><td>120</td><td>80</td></tr></table>	100	80	120	80	
100	80				
120	80				

Evaluación de impactos a la Salud

Para evaluar los impactos a la salud asociados con concentraciones ambientales de ozono, se obtuvieron las CPP máximas de cada año y se sustituyeron en la ecuación (14), propuesta por la US EPA²⁷. Esta ecuación relaciona el cambio en la concentración de un contaminante con el cambio en la incidencia de un impacto en la salud.²⁸

$$\Delta I = (\Delta C) * (\beta) * (T_b) * \overline{Pob} \quad (14)$$

Dónde:

ΔI : Cambio en la incidencia del impacto a la salud.

(ΔC) : Diferencia de la CPP máxima del año de estudio menos la CPP máxima del año anterior (ppb).

(β) : Coeficiente Exposición- Respuesta: Indica el porcentaje de cambio en el impacto por unidad de concentración de ozono (%/ppb).

(T_b) : Tasa Basal: Línea base de la incidencia del impacto a la salud (Impactos/persona*año).

\overline{Pob} : Población promedio expuesta entre el año de estudio y el de referencia (personas).

En la tabla 12 se presentan los valores de β y T_b empleados para la evaluación de cada impacto. Estos coeficientes son el resultado de meta-análisis reciente de varios estudios epidemiológicos llevados a cabo principalmente en Estados Unidos y en otros países de Europa¹⁶.

²⁷ Agencia de Protección al Ambiente de lo Estados Unidos.

²⁸ BenMap <http://www.epa.gov/airquality/benmap/basic.html>

Tabla 12 Funciones concentración-respuesta (β) indica el porcentaje de cambio en cada impacto a la salud por un cambio de 1-ppb y T_b la tasa Basal de Incidencia de cada impacto

<i>Impactos</i>	β(casos/ppb O₃)	T_b (casos/persona año)
Mortalidad (M)	0.04	0.0045
Hospitalizaciones (H)	0.3	0.0023
Emergencias de Asma (EA)	0.24	0.0027
Días de Actividad Restringida Menor (DAR)	0.35	5
Días Perdidos de Escuela (DPE)	2.12	5

Evaluación del Beneficio Económico

El procedimiento para el cálculo del beneficio económico consistió en multiplicar el número de impactos en la salud evitados, por el valor monetario de cada uno²⁸. Ecuación (15)

$$\mathbf{Beneficio\ Económico = I * VM \quad (15)}$$

Dónde:

Beneficio Económico : Costo o Beneficio debido al cambio en la incidencia de un impacto en la salud (\$USD).

I: incidencia del impacto en la salud (impactos)

(VM): Valor Monetario; Estima el costo asociado a cada impacto en la salud (\$USD/impacto).

En la Tabla 13 se muestran los valores monetarios utilizados en este trabajo.

Tabla 13. Parámetros utilizados para el cálculo del Beneficio Económico

<i>Impactos</i>	Valor Monetario^{29,30} (USD)
Mortalidad (M)	300,000
Hospitalizaciones (H)	2111
Emergencias de Asma (EA)	317
Días de Actividad Restringida Menor (DAR)	12
Días Perdidos de Escuela (DPE)	12

²⁹ A. Jazcilevich et al. (2011). *An evaluation of the hybrid car technology for the Mexico Mega City*. Journal of Power Sources 196: 5704-5718.

³⁰ The World Bank. Urban Air Pollution. ESMAP. *Economic Valuation of the Health Benefits of Reduction in Air Pollution*. [Disponible en http://www.undp.org/cu/eventos/aprotegidas/Briefing_Note_No_12.pdf (Consultada 28.04.13)].

Cuadro 2 Ejemplo: Evaluación del cambio en la Mortalidad y del beneficio asociado de 1991 a 1992

Cambio en la Mortalidad

Con base en la Tabla 15 (Sección: Discusión de Resultados) se puede ver que para una distribución de población móvil, la CPP máxima de 1991 es 253, mientras que la CPP máxima de 1992 es 240, por lo tanto:

$$\Delta C_{1992-1991} = C_{1992} - C_{1991} = 240 \text{ppb} - 253 \text{ppb} = -13 \text{ppb}.$$

A partir de la tabla 12 de esta sección podemos obtener la β y T_b para la mortalidad.

$$\beta \text{ mortalidad} = 0.04 \frac{\% \text{cambio}}{\text{ppb}} \quad \text{y} \quad T_b \text{ mortalidad} = 0.0045 \frac{\text{muertes}}{\text{persona} \cdot \text{año}}$$

Para poder sustituir β en (14) debemos expresarla como fracción, por lo tanto $\beta = \frac{0.0004}{\text{ppb}}$

La población de la ZMVM en 1991 fue de 14, 898,548 personas, mientras que en 1992 fue de 14, 844,569 personas.

Por lo tanto, la población promedio expuesta en esos dos años fue:

$$\overline{Pob} = \frac{14,898,548 \text{ personas} + 14,844,569 \text{ personas}}{2} = 14,871,558 \text{ personas}$$

Sustituyendo los valores anteriores en (14) obtenemos el cambio en la mortalidad asociada a ozono:

$$\Delta \text{Mortalidad} = -13 \text{ppb} * \frac{0.0004}{\text{ppb}} * 0.0045 \frac{\text{muertes}}{\text{persona} * \text{año}} * 14,871,558$$

$$\Delta \text{Mortalidad} = -348 \text{ muertes prematuras}$$

En consecuencia se lograron evitar 348 muertes prematuras.

Valor Económico

El beneficio económico por la disminución en la mortalidad asociada a ozono sería:

$$\text{Beneficio Económico} = 348 \text{ vidas salvadas} * \text{Valor Estadístico de la Vida}$$

Aunque resulta un tema ampliamente controversial y subjetivo, en trabajos previos se ha determinado el valor estadístico de una vida (VEV), considerando lo que una persona estaría dispuesta a pagar para evitar la probabilidad de una muerte prematura debida a la contaminación ambiental, así como el capital que dejaría de producir. Para México se ha estimado que el VEV ronda los US\$ 300,000³⁰. Por lo tanto:

$$\text{Beneficio Económico} = 348 \text{ vidas salvadas} * 300,000 \frac{\text{USD}}{\text{Vida}}$$

Por lo tanto el beneficio económico por reducción de la mortalidad prematura de 1991 a 1992 sería de
104,000,000 USD

Ajuste de los beneficios económicos a precios de 2000

Los valores monetarios de cada año se ajustaron a precios del año 2000³¹ por ser un año intermedio del periodo de estudio. Finalmente se sumaron para obtener el beneficio total de 1991 a 2011.

Cuadro 3 Actualización a precios de 2000 del beneficio económico obtenido por disminución de la mortalidad de 1991 a 1992

$$\begin{aligned} & \text{IPC}_{1991}=136.17 \quad \text{IPC}_{2000}=172.19 \\ & \text{Beneficio Económico a precios de 2000} = 104,000,000 \text{ USD} * 104,000,000 * \frac{172.19}{136.17} \\ & \textit{Beneficio Económico} = 131,510,317 \text{ USD} \end{aligned}$$

³¹ Con base en el Índice de Precios al Consumidor de Estados Unidos, elaborado por el Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la H. Cámara de Diputados con base a datos de U.S. Bureau of Labor Statistics. Ver Anexo.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Mapas de la distribución horaria de la población de la ZMVM

En la Figura 11 se muestran 2 de los 24 mapas de distribución de la población obtenidos usando GrADS. En el eje "x" y "y" se indican las coordenadas geográficas, las cuales corresponden a la ZMVM.

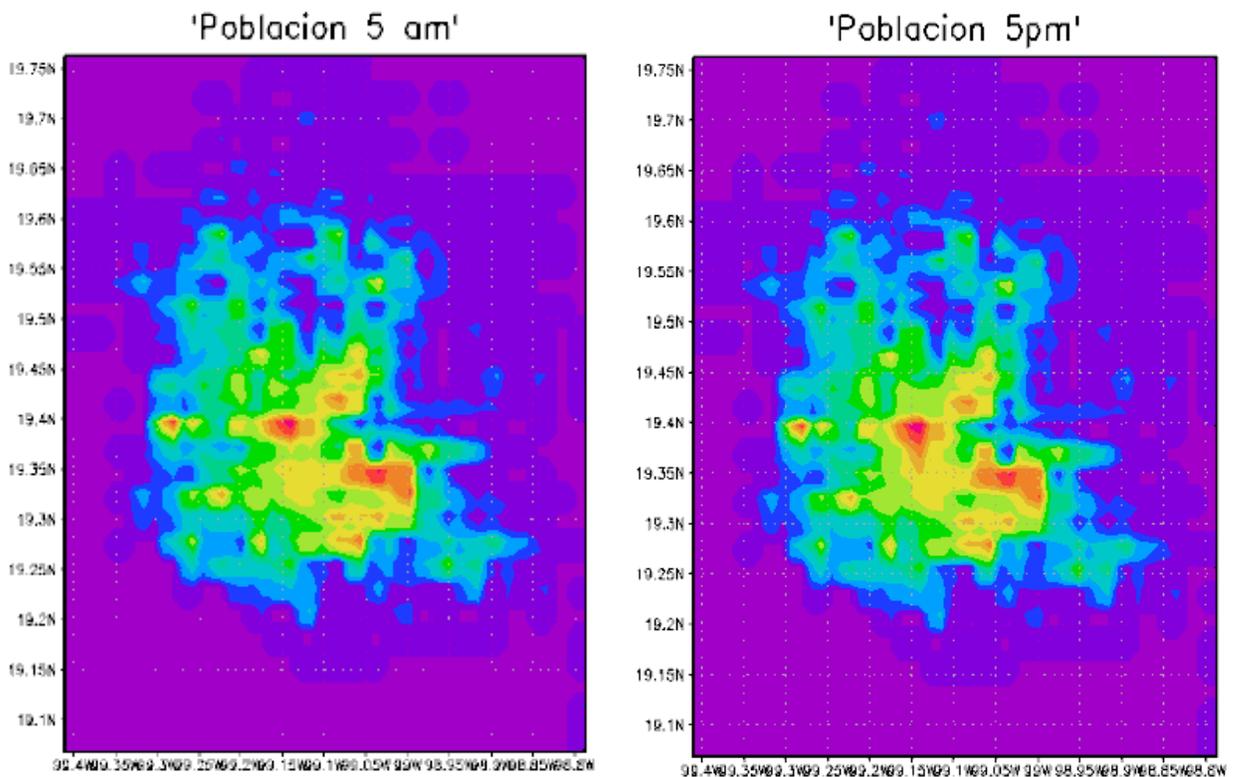


Figura 9 Distribución de la Población en la ZMVM, 5 de la mañana (izq.) y 5 de la tarde (der.)

Distribución horaria de las concentraciones de ozono en la ZMVM

En la Figura 12 se muestran 2 mapas de la distribución horaria de ozono dentro de la ZMVM. El mapa que se encuentra a la izquierda corresponde a una hora del año 1991; en él se observan valores máximos de ozono (110 ppb) en el Sureste de la ZMVM y mínimos (0 ppb) en el Sur-Oeste (esto no significa que haya una concentración nula, sino que la interpolación

Oacres arrojó ese resultado dada la falta de mediciones en las estaciones de monitoreo cercanas). En el mapa a la derecha las concentraciones máximas de ozono se encuentran en el Sur-Oeste de la ZMVM, con valores entre 140 ppb y 100 ppb, con valores mínimos de 30 ppb en el Noreste y Sureste.

Cabe mencionar, que una vez más, en el eje "x" y en el eje "y" se indican las coordenadas geográficas, las cuales corresponden a la ZMVM, mientras que en la parte inferior de cada mapa de dicha Figura se indican las escalas de las concentraciones de ozono en ppb.

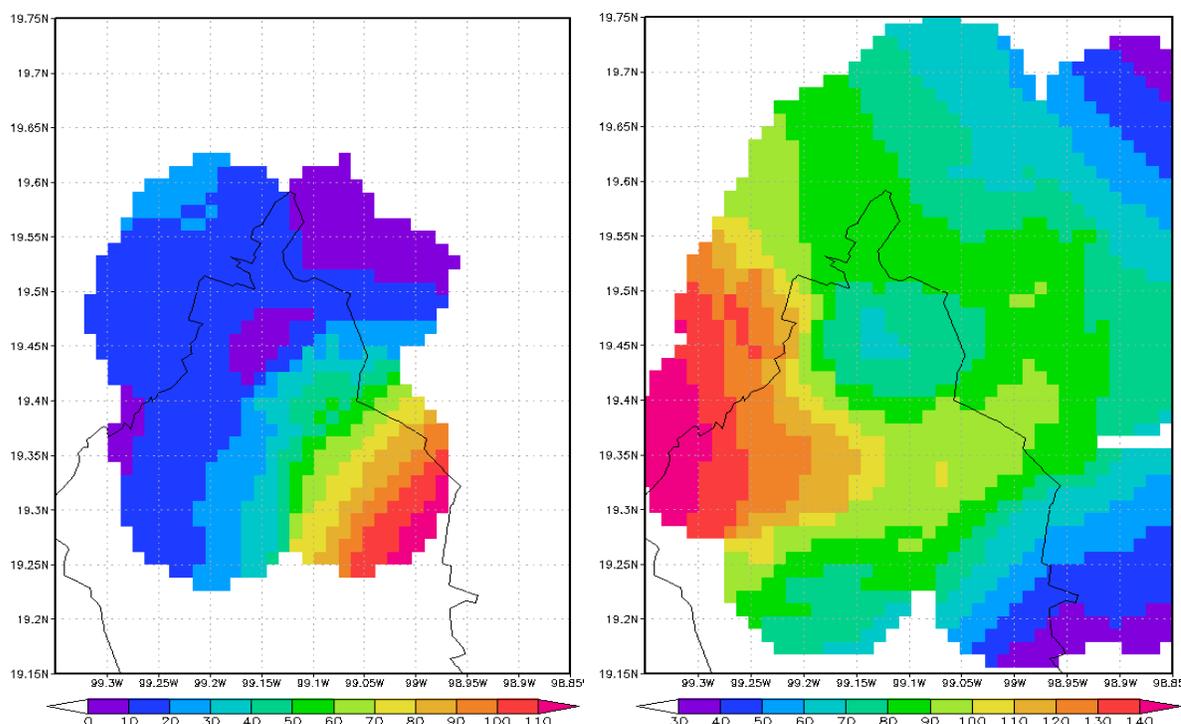


Figura 10 Mapas de Concentraciones de Ozono en ppb. Para una hora de 1991 (Izq.) Para una hora de 2001(Der.)

Concentración Ponderada por población (CPP)

En la Tabla 14 se muestran las CPP máximas de cada año considerando una distribución de población móvil a lo largo del día (obtenidas en el presente trabajo) y se comparan con las CPP que toman en cuenta una distribución de población fija (obtenidas en estudios previos).

Los resultados indican que al ponderar las concentraciones de ozono, éstas disminuyen respecto al valor registrado por las estaciones de monitoreo de la RAMA. Además en todos los casos la concentración ponderada de población móvil es menor respecto a la concentración ponderada tomando en cuenta una distribución de población fija.

Tabla 14. Máximos Anuales de las Concentraciones Horarias de Ozono Ambiental vs Concentración Ponderada por Población Móvil vs Concentración Ponderada por Población Fija

Año	Concentración Máxima Anual de Ozono (ppb)		
	Ozono Ambiental RAMA	Ponderada por Población Móvil	Ponderada por Población Fija
1991	404	253	325
1992	475	240	327
1993	370	217	297
1994	312	196	256
1995	349	196	277
1996	323	181	263
1997	318	186	248
1998	309	204	256
1999	321	168	239
2000	282	174	234
2001	271	170	212
2002	284	169	210
2003	243	164	206
2004	226	155	190
2005	222	162	185
2006	211	143	172
2007	203	138	164
2008	189	146	170
2009	198	142	163
2010	208	144	172
2011	184	141	145

En la Figura 13 puede notarse a simple vista que se mantuvo una tendencia favorablemente decreciente de las concentraciones de ozono independientemente de cual fuera el caso analizado.

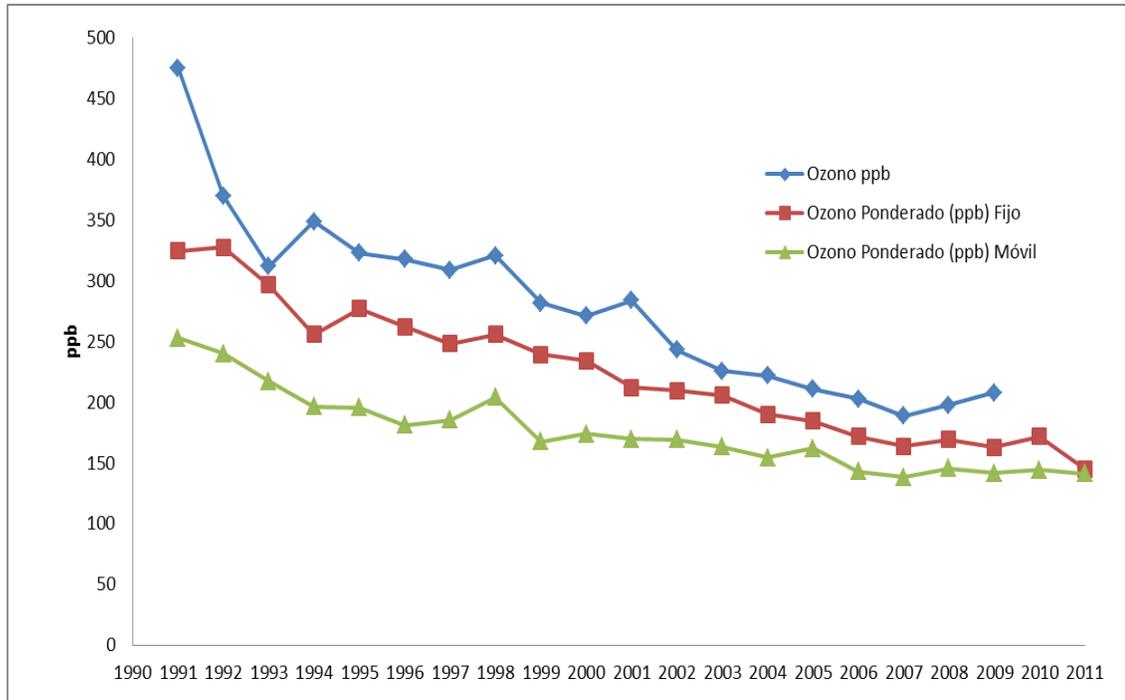


Figura 11 Concentraciones de Ozono (RAMA) vs Ozono Ponderado por Población Fija y Móvil

El hecho de que las concentraciones ponderadas de ozono para población móvil sean menores que para población fija, sugiere que involuntariamente, en las horas que las concentraciones de ozono presentan sus máximos en toda la ZMVM, la población se concentra en regiones de la ZMVM donde las concentraciones de ozono son menores.

Esta observación es lógica si consideramos que:

- 1) La población, generalmente se desplaza durante el día hacia las regiones centro-norte de la ZMVM para desempeñar sus labores en las horas en las que se presentan las concentraciones de ozono máximas.

- 2) De acuerdo a la base de datos de la RAMA, las concentraciones máximas anuales de ozono, generalmente se presentaron al Sur de la ZMVM.
- 3) El efecto combinado de los dos puntos anteriores resulta ser que: al haber una mayor fracción de la población en la región Centro-Norte de la ZMVM, las concentraciones de ozono de dicha región adquirieron un mayor peso ponderado, en comparación con las concentraciones de ozono al Sur que aunque son mayores, la población expuesta es menor.

En base a lo mencionado anteriormente, se puede establecer que: *La exposición de la población a ozono se ve mitigada al considerar su movilidad durante el día, debido a que involuntariamente, las personas se desplazan hacia lugares dentro de la ZMVM con concentraciones bajas de Ozono. Sin embargo, habría que evaluar su exposición a otros contaminantes que pudieran estar presentes en las regiones hacia las cuales se desplazan.*

Disminución de Impactos en la Salud

La Tabla 15 muestra la ΔC (diferencia de concentración) de cada año calculada a partir de las concentraciones de la Tabla 14. La ΔC obtenida en cada año sirvió como base para evaluar la disminución anual de impactos a la salud, así como los beneficios económicos obtenidos. Un ΔC negativo implica que entre esos dos años hubo una disminución en la concentración de ozono respecto al año anterior. En esta tabla, también se incluye la ΔC total del periodo 1991-2011, cuyo valor absoluto es menor para la población móvil (112 ppb) en comparación con el valor absoluto de la ΔC para una distribución de población fija (180 ppb). A partir de lo anterior se explica el hecho de que la exposición a ozono e impactos a la salud asociados fueron menores para población móvil. En la Tabla 16 se muestra la disminución de los impactos a la salud del periodo estudiado.

Tabla 15. ΔC empleadas para el cálculo de la disminución de impactos en la Salud

Año	ΔC Población Fija	ΔC Población Móvil
1991-1992	3	-13
1992-1993	-31	-23
1993-1994	-41	-21
1994-1995	21	-1
1995-1996	-15	-14
1996-1997	-14	4
1997-1998	8	18
1998-1999	-16	-36
1999-2000	-5	6
2000-2001	-22	-4
2001-2002	-3	-1
2002-2003	-4	-6
2003-2004	-16	-9
2004-2005	-6	7
2005-2006	-13	-19
2006-2007	-8	-5
2007-2008	6	7
2008-2009	-7	-4
2009-2010	9	2
2010-2011	-27	-3
Total	-180	-112

Tabla 16 Disminución de Impactos en la Salud

Impacto	Disminución de Impactos a la Salud considerando una distribución de Población Móvil las 24 horas del día			Disminución de Impactos a la Salud considerando una distribución de Población Fija durante el día		
	Periodo 1991-2001	Periodo 2001-2011	Total	1991-2001	2001-2011	Total
Mortalidad	2,335	845	3,179	3,015	1,941	4,956
Hospitalizaciones	8,949	3,239	12,188	11,559	7,440	18,999
Emergencias de Asma	2,942	1,065	4,006	3,799	2,446	6,245
Días de Actividad Restringida	14,321,892	5,183,336	19,505,229	18,498,343	11,907,184	30,405,528
Días Perdidos de Escuela	36,844,584	13,334,681	50,179,266	47,588,946	30,632,492	78,221,438

Evaluación del beneficio económico

En las Tablas 17 y 18 se muestran los beneficios económicos obtenidos durante el periodo 1991-2011 por la reducción de los impactos a la salud. Con el fin de tener en cuenta el valor del dinero en el tiempo, el beneficio económico de cada año se cambió de dólares a precios corrientes a dólares a precios constantes de 2000.

Tabla 17 Beneficios Económicos (USD) Obtenidos en el Periodo 1991-2011 por reducción de ozono ambiental, considerando una Distribución de Población Fija

Impactos	Casos Evitados	Beneficio Económico a precios Corrientes	Beneficio Económico a Precios Constantes de 2000
Mortalidad	4,956	US\$ 1,486,890,197	US\$1,523,093,577
Hospitalizaciones	18,999	US\$ 40,107,211	US\$ 41,083,757
Emergencias de Asma	6,245	US\$ 1,979,646	US\$ 2,027, 847
Días Actividad Restringida Menor	30,405,528	US\$ 364,866,333	US\$ 373, 750, 240
Días Perdidos de Escuela	78,221,438	US\$ 938,657,261	US\$ 961, 512, 052
Total	—	US\$ 2,832,500,648	US\$ 2,901, 467,473

Tabla 18 Beneficios Económicos (USD) Obtenidos en el Periodo 1991-2011 por reducción de ozono ambiental, tomando en cuenta la movilidad de la Población

Impacto	Casos Evitados	Beneficio Económico a Precios Corrientes	Beneficio Económico a Precios Constantes de 2000
Mortalidad	3,179	US\$ 953,844,112	US\$ 1,050,065,183
Hospitalizaciones	12,188	US\$ 25,728,885	US\$ 28,324,342
Emergencias de Asma	4,006	US\$ 1,296,948	US\$ 1,398,057
Días Actividad Restringida Menor	19,505,229	US\$ 234,062,747	US\$ 257,674,328
Días Perdidos de Escuela	50,179,266	US\$ 602,151,190	US\$ 662,894,482
Total	—	US\$ 1,817,056,883	US\$ 2,000,356,392

En la Tabla 19 y en la Figura 14 se puede apreciar que a pesar de que en algunos años del periodo de estudio hubieron pérdidas económicas (debidas a un aumento de la concentración máxima de ozono respecto al año anterior), existe una tendencia positiva en cuanto al beneficio económico acumulado obtenido por la reducción de ozono ambiental, independientemente del tipo de distribución de la población evaluada (fija o móvil). En la

Tabla 19 Beneficios Económicos Acumulados a precios Constantes en USD para los casos de distribución de Población Fija y distribución de Población Móvil a lo largo del día

Periodo	ΔC Fijo	Beneficio del Periodo a precios de 2000 Población Fija	Beneficio Acumulado Población Fija	ΔC Móvil	Beneficio del Periodo a precios de 2000 Población	Beneficio Acumulado Población Móvil
91-92	3	\$ -46,492,292	\$ -46,492,292	-13	\$ 249,549,993	\$ 249,549,993
92-93	-31	\$ 534,504,223	\$ 488,011,931	-23	\$ 428,527,487	\$ 678,077,480
93-94	-41	\$ 736,751,183	\$ 1,224,763,114	-21	\$ 398,410,717	\$ 1,076,488,197
94-95	21	\$ -401,780,562	\$ 822,982,552	-1	\$ 13,757,267	\$ 1,090,245,464
95-96	-15	\$ 268,473,004	\$ 1,091,455,556	-14	\$ 280,511,637	\$ 1,370,757,101
96-97	-14	\$ 251,934,353	\$ 1,343,389,909	4	\$ 80,065,272	\$ 1,290,691,829
97-98	8	\$ -130,021,842	\$ 1,213,368,067	18	\$ -342,872,735	\$ 947,819,094
98-99	-16	\$ 279,988,928	\$ 1,493,356,995	-36	\$ 654,153,709	\$ 1,601,972,803
99-00	-5	\$ 83,533,062	\$ 1,576,890,057	6	\$ -108,125,347	\$ 1,493,847,456
00-01	-22	\$ 360,419,429	\$ 1,937,309,486	-4	\$ 71,192,916	\$ 1,565,040,371
01-02	-3	\$ 39,298,852	\$ 1,976,608,338	-1	\$ 8,302,076	\$ 1,573,342,447
02-03	-4	\$ 58,794,421	\$ 2,035,402,759	-6	\$ 91,546,892	\$ 1,664,889,340
03-04	-16	\$ 238,049,389	\$ 2,273,452,148	-9	\$ 138,825,515	\$ 1,803,714,855
04-05	-6	\$ 80,711,524	\$ 2,354,163,672	7	\$ -115,650,800	\$ 1,688,064,055
05-06	-13	\$ 181,000,365	\$ 2,535,164,037	-19	\$ 285,495,283	\$ 1,973,559,338
06-07	-8	\$ 110,045,800	\$ 2,645,209,837	-5	\$ 73,065,942	\$ 2,046,625,280
07-08	6	\$ -77,043,641	\$ 2,568,166,197	7	\$ -108,277,595	\$ 1,938,347,685
08-09	-7	\$ 89,050,795	\$ 2,657,216,992	-4	\$ 53,168,093	\$ 1,991,515,778
09-10	9	\$ -123,182,733	\$ 2,534,034,259	2	\$ -32,277,585	\$ 1,959,238,193
10-11	-27	\$ 367,433,213	\$ 2,901,467,473	-3	\$ 41,118,199	\$ 2,000,356,393
Total	-180		\$ 2,901,467,473	\$ -112		\$ 2,000,356,393

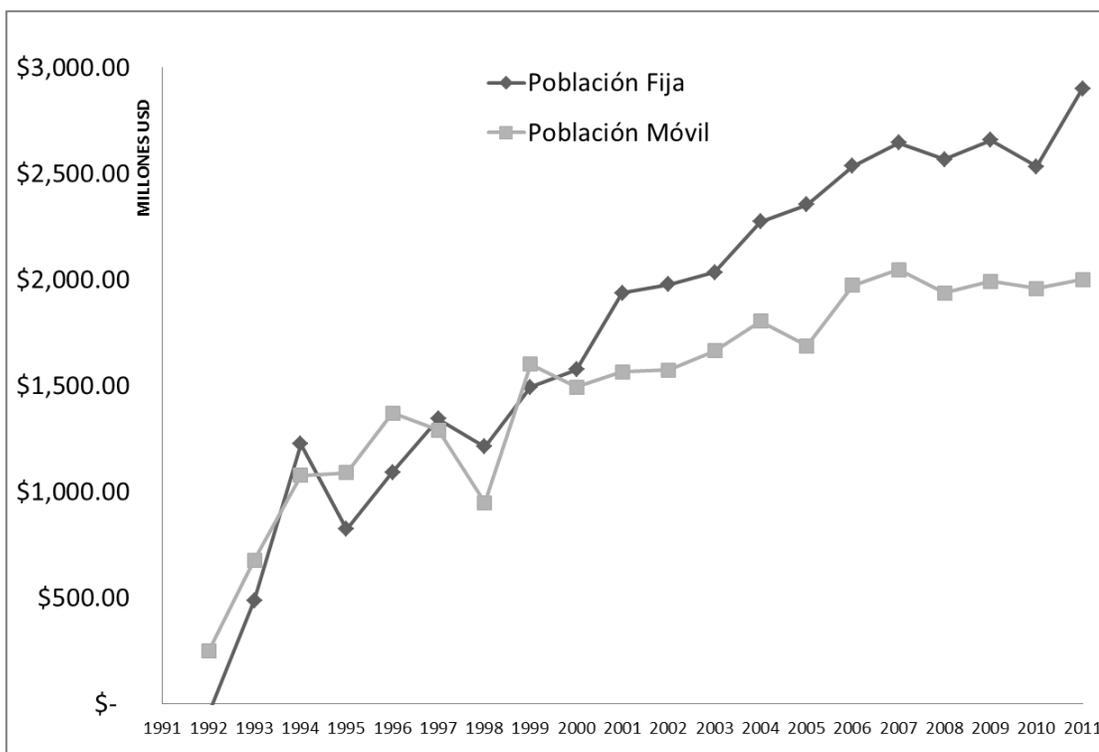


Figura 12 Beneficio Acumulado en USD a Precios Constantes de 2000 para Población Fija y Población Móvil

En el análisis de los beneficios es importante determinar la contribución que cada impacto evaluado aporta al beneficio económico total. De esta manera se puede evaluar la implementación de estrategias enfocadas a mitigar el impacto que genere mayores beneficios tanto en la salud de la población como económicos. En la Tabla 20 y en la Figura 15 se presenta la distribución de los beneficios económicos y se notó que la disminución de la Mortalidad Prematura tiene la mayor aportación al beneficio económico, contabilizando un 52%. Los beneficios económicos intermedios se obtienen por Reducción en los Días Perdidos de Escuela (33%), y por la disminución de Días de Actividad Restringida (13%). Por último, la reducción de Hospitalizaciones contribuye con un 1%, mientras que la disminución en las Emergencias de Asma con un 0.07%.

Tabla 20 Contribución Porcentual al Beneficio Económico Total por Impacto Analizado

Impacto	Contribución Porcentual al Beneficio Económico Total (%)
Mortalidad	52
Hospitalizaciones	1
Emergencias de Asma	0.07
Días de Actividad Restringida Menor	13
Días Perdidos de Escuela	33
Total	100

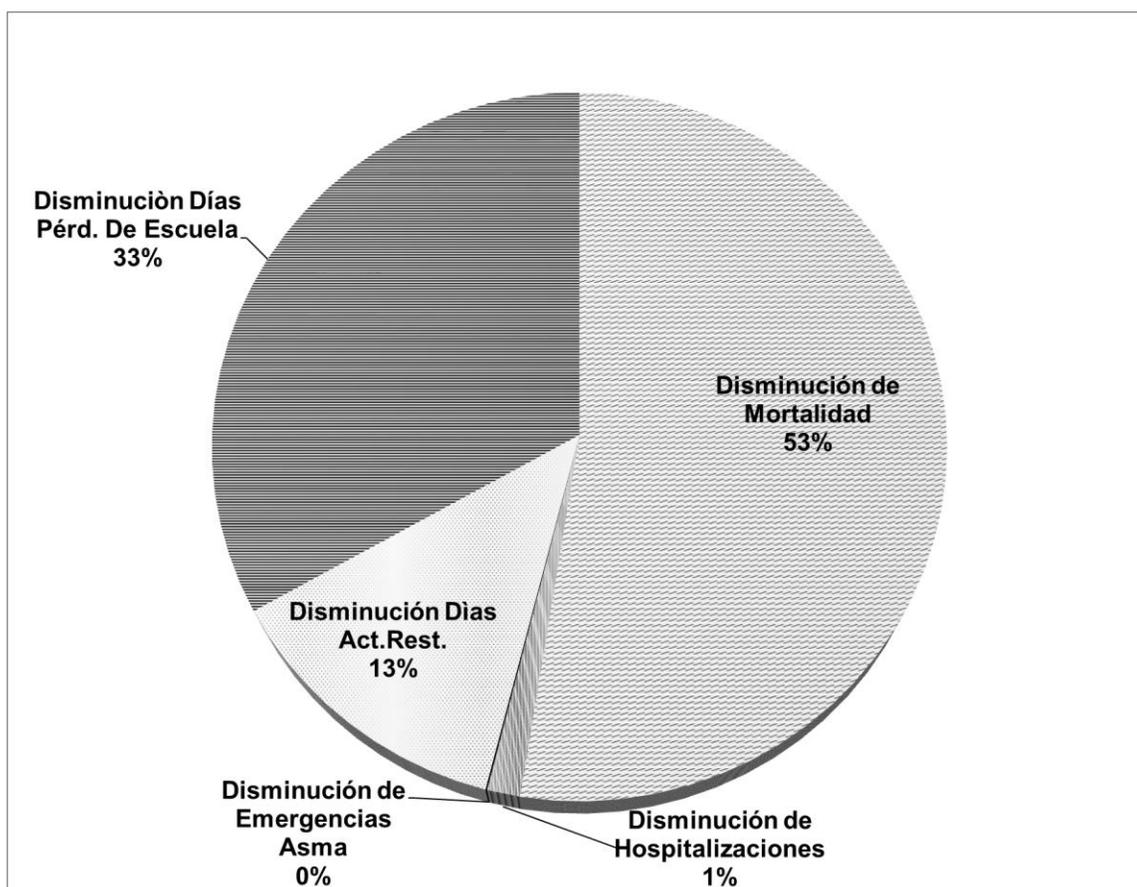


Figura 13 Contribución Porcentual al Beneficio Económico Total

En las tablas 21 y 22, se separó el beneficio económico por décadas, y se analizó el efecto de actualizar los precios corrientes a precios del año 2000. Para la primera década (1991-2001), en ambas tablas, el beneficio acumulado a precios de 2000 es mayor que aquel a precios corrientes, por efecto de la inflación. Mientras que para la segunda década (2001-2011) el beneficio acumulado a precios de 2000 es menor que a precios corrientes, este comportamiento también es por efecto también de la inflación.

También se aprecia en ambas tablas, que el beneficio obtenido es mayor para la primera década, respecto de la segunda, ya que la ΔC también es mayor. Por ejemplo, en la Tabla 21, donde se considera una distribución de Población Móvil, la ΔC de la primera década (83 ppb) es mayor que en la segunda década (29 ppb), por lo cual el beneficio económico obtenido es mayor en el periodo 1991-2001 que en el periodo 2001-2011. En la Tabla 22, es decir para población fija, se observa un comportamiento similar

Tabla 21. Beneficios Obtenidos Por Década para Población Móvil

Periodo	1991-2001	2001-2011	Total
$(C_f - C_o)$	(253-170)	(170-141)	(253,141)
ΔC (ppb)	83	29	112
Beneficio a precios corrientes	\$ 1,334,190,619	\$ 482,866,263	\$1,817,056,883
Beneficio a precios de 2000	\$ 1,565,040,371	\$ 435,316,021	\$2,000,356,393

Tabla 22. Beneficios Obtenidos Por Década para Población Fija

Periodo	1991-2001	2001-2011	Total
$(C_f - C_o)$	(325-212)	(212-145)	(325-145)
ΔC	113	67	180
Beneficio a precios corrientes	\$1,723,258,012	\$1,109,242,636	\$2,832,500,648
Beneficio a precios de 2000	\$1,937,309,486	\$964,157,987	\$2,901,467,473

Los beneficios económicos anuales promedio fueron de $\$9 \frac{USD}{habitante \cdot año}$, considerando una población fija, y de $\$6 \frac{USD}{habitante \cdot año}$ evaluando una distribución de población fija.

Tabla 23 Beneficio Económico (USD/hab*año) desglosado para cada impacto a la salud

Impacto	Beneficio económico promedio anual, considerando una distribución de población Fija (US\$/habitante*año)	Beneficio económico promedio anual, considerando la movilidad de la población a largo del día (US\$/habitante*año)
Mortalidad	5	3
Hospitalizaciones	0	0
Emergencias de Asma	0	0
Días de Actividad Restringida	1	1
Días Perdidos de Escuela	3	2
Beneficio Total	9	6

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue estimar el cambio en la incidencia de impactos a la salud por cambios en las concentraciones de ozono en el periodo 1991-2011, para lo cual, se propuso una nueva metodología, que toma en cuenta la movilidad de la población para el cálculo de dichos impactos y de los beneficios económicos asociados, colaborando con una de las metas establecidas en el Programa PROAIRE.

Al tomar en cuenta una distribución de población móvil se obtuvieron concentraciones ponderadas por población máximas de 253 ppb en 1991 y de 141ppb en 2011($\Delta C = -121$).

Con base en las concentraciones de ozono señaladas previamente, encontramos que tan solo en el periodo 1991-2011 se lograron evitar 3,179 muertes prematuras, 12,188 Hospitalizaciones, 4,006 Emergencias de Asma, 19, 505,229 Días de Actividad Restringida Menor y 78,221,438 Días Perdidos de Escuela, asociadas con exposición a ozono ambiental.

Dichas disminuciones representaron un beneficio económico de \$1,050,065,183; \$28,324,342; \$1,398,057; \$257,674,328 y \$662,894,482 USD respectivamente.

El beneficio acumulado de 1991 a 2011 fue de US\$ 2,000,356,393 que equivalen en promedio a 6 (US\$/hab*año) respectivamente.

Se determinó que la mortalidad prematura, a pesar de ser el impacto de menor incidencia, es el concepto que mayor beneficio económico aporta. Esto indica que sería conveniente que futuras investigaciones determinen con mayor precisión la función concentración-respuesta de la mortalidad y así como su valor económico.

La movilidad de la población sugiere que involuntariamente, la población se desplaza durante el día, hacia regiones donde las concentraciones de ozono son menores, dando como

resultado una disminución en su exposición a dicho contaminante y por lo tanto una reducción en los impactos a la salud y en el beneficio económico.

Al tomar en cuenta la movilidad de la población se obtuvo una reducción de 36 % en los impactos a la salud y de 34% en el beneficio económico respecto a los obtenidos utilizando una distribución de población fija.

Se debe considerar que en este análisis, existe la limitación de la imposibilidad de cuantificar todos los posibles beneficios a la salud relacionados con las reducciones de ozono, ya que los beneficios solo se obtuvieron para un subconjunto de los posibles impactos. Por ejemplo se podrían estimar los efectos de ozono en los cambios en la función pulmonar por exposición a corto y largo plazo. Sin embargo aunque hay evidencia epidemiológica de dichos efectos, la información epidemiológica disponible aún es inconsistente y escasa.

Los beneficios económicos obtenidos en este estudio podrían compararse contra los costos de implementar medidas de control de ozono en la ZMVM, y ayudar a tomar decisiones mejor informadas, orientadas a la implementación de medidas para reducir el ozono ambiental.

Tener en cuenta la movilidad de la población origina que este tipo de evaluaciones tenga una mejor representación de los procesos urbanos y de exposición de la población que si no se considerara.

Independientemente de cual sea el caso (móvil o fijo) se logró identificar un beneficio económico acumulado en el periodo de estudio, mismo que se obtuvo, en parte, por las medidas implementadas en el programa PROAIRE.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que en estudios posteriores se evalúe (siguiendo la metodología propuesta en este trabajo, la exposición a otros contaminantes, como $PM_{2.5}$ y PM_{10} que pudieran estar presentes en las regiones a donde se desplaza la población.

Sería conveniente que en estudios futuros se identifique por edades a los grupos que se desplazan durante el día, ya que es probable, que los grupos más vulnerables (ancianos y niños), solo se desplacen distancias muy pequeñas, permaneciendo, en cierta medida, inmóviles y por lo tanto con una exposición mayor a ozono.

Algunos de los valores empleados de Concentración-Respuesta (C-R) asociados a cada impacto empleado en este estudio, fueron recopilados de estudios de exposición a corto plazo llevados a cabo en distintas ciudades alrededor del mundo en un amplio rango de condiciones de exposición, clima y tipo de población. Aunque estos valores son consistentes, sería recomendable profundizar en investigaciones que evalúen la C-R para la población de la ZMVM.

REFERENCIAS

- ¹ **L.D. Reyes; J.A. García.** (2006). *Evaluación Preliminar de Beneficios Ambientales por cambios en la concentración de Ozono en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México empleando BenMap*. Tesis de Licenciatura. México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- ² **B. Metz; O.R. Davidson; P.R. Bosch; R. Dave; L.A. Meyer.** (eds.) (2007). *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC Fourth Assessment Report (AR4). University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. USA.
- ³ **F.L. García; A. Ramírez; S. Pérez.** *Informe Climatológico Ambiental del Valle de México 2005*, p. 5-10. [Disponible en <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=378> (consultada 29.10.12)].
- ⁴ **Instituto Nacional de Ecología (INE).** (2011). *Cuarto Almanaque de Datos y Tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009)*, México. ISBN: 978-607-790-858-6. [Disponible en http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=652 (consultada 20.09.12)].
- ⁵ **Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).** (2011) *Cuaderno Estadístico de la Zona Metropolitana del Valle de México 2010*. México. [Disponible en <http://www.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/sfi/detalle.aspx?c=265&s=inegi&upc=702825003318&pf=Prod&ef=&f=2&cl=0&tg=80> (consultada 17.08.12)].
- ⁶ **Secretaría del Medio Ambiente-Gobierno del Distrito Federal.** (2008). *Inventario de Emisiones de la ZMVM 2006*. 1a. ed. México. [Disponible en http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/ie06_criterio_pw.pdf (consultada 05.06.13)]
- ⁷ **Secretaría del Medio Ambiente-Gobierno del Distrito Federal.** (2006). *Gestión Ambiental del Aire en el Distrito Federal 2000-2006*. 1a. ed. México. [Disponible en <http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/gaa/> (consultada 30.11.12)].
- ⁸ **Shakhashiri.** (2007). *Ozone (O₃)*. Chemical of the Week: General Chemistry. [Disponible en <http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/PDF/Ozone.pdf>(consultada 15.10.12)].
- ⁹ **M.L. Davis; D.A. Cornwell.** (2008). *Introduction to Environmental Engineering*. Fourth Edition. Mc Graw-Hill. New York. p. 574,575.
- ¹⁰ **Chicón L.** *Ozono Atmosférico*. [Disponible en <http://ambientis.org/ozono.pdf> (consultada 18.11.12)].
- ¹¹ *El ozono en la Tropósfera*. [Disponible en <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=4&opcionrecursostecnicos=11> (consultada 30.05.13)]
- ¹² **Secretaría del Medio Ambiente –Gobierno del Distrito Federal.** (2012). *Calidad del Aire en la Ciudad de México: Informe 2011*. Creative Commons. México. p.106.
- ¹³ **US Environmental Protection Agency (EPA).** *Health Effects of ozone in the general population*. [Disponible en <http://www.epa.gov/apti/ozonehealth/population.html> (consultada 12.01.13)].

¹⁴ **M.L. Bell; F. Dominici; J.M. Samet.** (2005). *A meta-analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study*. *Epidemiology*. 16(4): 436-445.

¹⁵ **K. Ito; S.F. De Leon; M. Lippmann.** (2005). *Associations between ozone and daily mortality: analysis and meta-analysis*. *Epidemiology*. 16(4): 446–457.

¹⁶ **B. D. Ostro; Hien Tran & Jonathan I. Levy.** (2006): *The Health Benefits of Reduced Tropospheric Ozone in California*. *Journal of the Air and Waste Management Association*. 56:7: 1007-1021.

¹⁷ **Secretaría de Salud.** *Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993. Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente respecto al ozono (O₃). Valor normado para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población*. *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F. Tomo DLXXXIX, no. 25. pp. 47-53.

¹⁸ **Dirección de Monitoreo Atmosférico-Secretaría del Medio Ambiente.**

[<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=2&opcioninfoproductos=30> consultada 05.06.13]

¹⁹ **C. Scheinbaum.** (2005). *Avances en la Calidad del Aire y Cumplimiento del PROAIRE*. Foro de Calidad del Aire en el Distrito Federal y Cambio Climático. México D.F. 2-3 mayo de 2005. [Disponible en [http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/temporales/foroCACC/forocacc-01_avances_en_la_calidad_del_Aire_\(claudia_scheimbaum\).pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/temporales/foroCACC/forocacc-01_avances_en_la_calidad_del_Aire_(claudia_scheimbaum).pdf) (consultada 05.06.13)].

²⁰ **Secretaría del Medio Ambiente-Gobierno del Distrito Federal.** *Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020*. [Disponible en http://www.sma.df.gob.mx/proaire2011_2020/index.php?opcion=1 (Visitado 11.01.13)].

²¹ **Secretaría del Medio Ambiente.**

<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=4&opcionrecursostecnicos=4> (consultada 12.12.12).

²² <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/113/cap4.html> (consultada 06.06.13)

²³ **Encuesta Origen-Destino 2007. Principales Resultados.** [Disponible en

<http://igecem.edomex.gob.mx/descargas/estadistica/ENCUESTADEORIGEN/EOD2007.pdf> (consultada 25.08.12)].

²⁴ <http://iges.org/grads> (consultada 23.08.12).

²⁵ *Manual del Usuario de GrADS-Grid Analysis and Display System*. [Disponible en <http://www.iges.org/grads/> (consultada 11.12.12)].

²⁸ **BenMap** <http://www.epa.gov/airquality/benmap/basic.html> (consultada 05.06.13)

²⁹ **A. Jazcilevich et al.** (2011). *An evaluation of the hybrid car technology for the Mexico Mega City*. *Journal of Power Sources* 196: 5704-5718.

³⁰ **The World Bank.** *Urban Air Pollution. ESMAP. Economic Valuation of the Health Benefits of Reduction in Air Pollution*. [Disponible en http://www.undp.org/cu/eventos/aprotegidas/Briefing_Note_No_12.pdf (consultada 28.04.13)].

ANEXO

Índice de Precios al Consumidor 1980-2012 USA

Estados Unidos: Índice de Precios al Consumidor, 1980 - 2012													
(Base 1982-84=100, Serie Desestacionalizada)													
Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
1979	43.67	44.12	44.56	45.01	45.52	46.03	46.54	46.99	47.43	47.94	48.45	49.03	46.27
1980	78.00	79.00	80.10	80.90	81.70	82.50	82.60	83.20	83.90	84.70	85.60	86.40	82.38
1981	87.20	88.00	88.60	89.10	89.70	90.50	91.50	92.20	93.10	93.40	93.80	94.10	90.93
1982	94.40	94.70	94.70	95.00	95.90	97.00	97.50	97.70	97.70	98.10	98.00	97.70	96.53
1983	97.90	98.00	98.10	98.80	99.20	99.40	99.80	100.10	100.40	100.80	101.10	101.40	99.58
1984	102.10	102.60	102.90	103.30	103.50	103.70	104.10	104.40	104.70	105.10	105.30	105.50	103.93
1985	105.70	106.30	106.80	107.00	107.20	107.50	107.70	107.90	108.10	108.50	109.00	109.50	107.60
1986	109.90	109.70	109.10	108.70	109.00	109.40	109.50	109.60	110.00	110.20	110.40	110.80	109.69
1987	111.40	111.80	112.20	112.70	113.00	113.50	113.80	114.30	114.70	115.00	115.40	115.60	113.62
1988	116.00	116.20	116.50	117.20	117.50	118.00	118.50	119.00	119.50	119.90	120.30	120.70	118.28
1989	121.20	121.60	122.20	123.10	123.70	124.10	124.50	124.50	124.80	125.40	125.90	126.30	123.94
1990	127.50	128.00	128.60	128.90	129.10	129.90	130.50	131.60	132.50	133.40	133.70	134.20	130.66
1991	134.70	134.80	134.80	135.10	135.60	136.00	136.20	136.60	137.00	137.20	137.80	138.20	136.17
1992	138.30	138.60	139.10	139.40	139.70	140.10	140.50	140.80	141.10	141.70	142.10	142.30	140.31
1993	142.80	143.10	143.30	143.80	144.20	144.30	144.50	144.80	145.00	145.60	146.00	146.30	144.48
1994	146.30	146.70	147.10	147.20	147.50	147.90	148.40	149.00	149.30	149.40	149.80	150.10	148.23
1995	150.50	150.90	151.20	151.80	152.10	152.40	152.60	152.90	153.10	153.50	153.70	153.90	152.38
1996	154.70	155.00	155.50	156.10	156.40	156.70	157.00	157.20	157.70	158.20	158.70	159.10	156.86
1997	159.40	159.70	159.80	159.90	159.90	160.20	160.40	160.80	161.20	161.50	161.70	161.80	160.53
1998	162.00	162.00	162.00	162.20	162.60	162.80	163.20	163.40	163.50	163.90	164.10	164.40	163.01
1999	164.70	164.70	164.80	165.90	166.00	166.00	166.70	167.10	167.80	168.10	168.40	168.80	166.58
2000	169.30	170.00	171.00	170.90	171.20	172.20	172.70	172.70	173.60	173.90	174.20	174.60	172.19
2001	175.60	176.00	176.10	176.40	177.30	177.70	177.40	177.40	178.10	177.60	177.50	177.40	177.04
2002	177.70	178.00	178.50	179.30	179.50	179.60	180.00	180.50	180.80	181.20	181.50	181.80	179.87
2003	182.60	183.60	183.90	183.20	182.90	183.10	183.70	184.50	185.10	184.90	185.00	185.50	184.00
2004	186.30	186.70	187.10	187.40	188.20	188.90	189.10	189.20	189.80	190.80	191.70	191.70	188.91
2005	191.60	192.40	193.10	193.70	193.60	193.70	194.90	196.10	198.80	199.10	198.10	198.10	195.27
2006	199.30	199.40	199.70	200.70	201.30	201.80	202.90	203.80	202.80	201.90	202.00	203.10	201.56
2007	203.44	204.23	205.29	205.90	206.76	207.23	207.60	207.67	208.55	209.19	210.83	211.45	207.34
2008	212.20	212.62	213.44	213.97	215.21	217.47	219.09	218.75	218.87	216.97	213.07	211.40	215.26
2009	211.96	212.82	212.56	212.71	212.98	214.74	214.73	215.48	215.88	216.48	217.11	217.33	214.56
2010	217.47	217.40	217.44	217.37	217.18	217.21	217.65	218.06	218.36	219.02	219.44	220.41	218.08
2011	221.04	222.01	223.19	224.03	224.63	224.84	225.52	226.27	226.87	226.80	227.01	227.03	224.94
2012	227.51	228.43	229.10	229.18									228.55

Fuente: Elaborado por el Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la H. Cámara de Diputados con base a datos de U.S. Bureau of Labor Statistics.