



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

ENERGÍA – ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

**Estudio Energético-Ambiental del Sector Transporte
en la Zona Metropolitana del Valle de México**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

P R E S E N T A :

CARLOS CHÁVEZ BAEZA

Tutora principal:

Dra. Claudia Sheinbaum Pardo, Instituto de Ingeniería

Comité tutor:

Dr. José Luis Fernández Zayas, Instituto de Ingeniería

Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros, Instituto de Ingeniería

Dr. Javier Eduardo Aguillón Martínez, Instituto de Ingeniería

Dr. Fernando Gabriel Arroyo Cabañas, Programa de Maestría y Doctorado de Ingeniería

México, D.F. Junio de 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. José Luis Fernández Zayas
Secretario: Dra. Claudia Sheinbaum Pardo
Vocal: Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros
Primer suplente: Dr. Javier Eduardo Aguillón Martínez
Segundo suplente: Dr. Fernando Gabriel Arroyo Cabañas

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

Tutora de tesis:

Dra. Claudia Sheinbaum Pardo

AGRADECIMIENTOS

“El agradecimiento es la memoria del corazón”

Lao Tse

Mi profunda gratitud a la Dra. Claudia Sheinbaum por su confianza en mi trabajo. Su orientación crítica han sido claves para mi desarrollo personal y mi formación como investigador.

Al Dr. José Luis Fernández Zayas, un sincero agradecimiento por su apoyo para guiar mis ideas. Asimismo, deseo agradecer a la Dra. Blanca Jiménez y al Dr. Javier Aguillón por su disponibilidad y paciencia, pues sin duda su participación ha enriquecido el trabajo realizado.

Un agradecimiento especial a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por el apoyo institucional, al concederme el año sabático para culminar mi trabajo de tesis doctoral.

Igualmente, deseo agradecer a todos los organismos y personas que hicieron posible la realización de esta tesis doctoral, entre los que se debo mencionar:

- A nuestra casa de estudios por haberme dado la oportunidad de ingresar al Programa de Posgrado en Ingeniería y cumplir este gran sueño.
- A todas y todos quienes de una u otra forma han colocado un granito de arena para el logro de este trabajo de grado, agradezco de forma sincera su valiosa colaboración.

DEDICATORIA

*“No vivas para que tu presencia se note,
sino para que tu ausencia se sienta”*

Bob Marley

Es mi humilde deseo dedicar este trabajo de grado, en primera instancia a mis padres: Leobardo Chávez y María de Jesús Baeza, quienes han sido un espíritu alentador para lograr las metas y objetivos propuestos; y no obstante que han partido, los recuerdo con gran cariño y amor.

De igual manera, dedico este trabajo a mi gran amigo y compañero, el Dr. Gerardo Canizal, quien desafortunadamente también ha fallecido, pero que dejó en mi una muestra de grandeza enmarcada en la humildad y la amistad. Te recuerdo con admiración y respeto.

Dedico por supuesto este trabajo, a mi esposa Yuko y a mi hijo Carlos Keigo, que son la razón de mi vida y mi motivación a ser mejor cada día.

A mis hermanos: Yolanda, Irma, Sergio, Arturo, Luis, Elvia y Mario, porque son parte importante de mi vida, su cariño y apoyo los tengo siempre presentes. Con gratitud infinita.

RESUMEN

Este estudio analiza escenarios de transporte sustentable para disminuir el consumo de energía y mitigar las emisiones de gases contaminantes y gases de efecto invernadero (GEI) en el transporte de pasajeros de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), mediante el modelo MOVEE. Este modelo fue desarrollado para estimar la tendencia histórica de la demanda de energía, los contaminantes del aire y las emisiones de GEI durante 1990-2008, así como estimar escenarios futuros al 2028. Los escenarios de transporte sustentable comprenden: 1) Elevar el rendimiento de combustible promedio de la flota de vehículos particulares mediante la introducción de vehículos híbridos eléctricos y 2) Aumentar la red del sistema de transporte público masivo mediante el cambio modal del transporte privado y del microbús hacia los autobuses de transporte rápido (llamados “Metrobús” en el DF y “Mexibús” en el EdoMex). En comparación con el escenario Base, en el año 2028 los escenarios de transporte sustentable presentan una reducción de 29.5% en el consumo de energía para el transporte de pasajeros de la ZMVM, correspondiente a un ahorro anual de 2,896 millones de litros de gasolina (15% de las importaciones nacionales de gasolina de 2009) y una reducción aproximada de 6.5 millones de toneladas de emisiones de CO₂ equivalente. Asimismo, el consumo de energía se lograría abatir 8.8% en el 2028; es decir, 22 PJ menos que los registrados en el 2008, a pesar del continuo crecimiento de la flota vehicular.

ABSTRACT

This study analyzes sustainable transport scenarios aimed to reduce energy consumption and to mitigate air pollutants and greenhouse gas (GHG) emissions of passenger transport in the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico (MZVM) using a bottom-up model, namely MOVEE. This model was developed to estimate the historical trend of energy demand, air pollutants and GHG emissions during the period of 1990-2008, and to estimate future scenarios up to 2028. Sustainable transport scenarios include: 1) A raise in the average fuel efficiency of the private vehicle fleet through the introduction of Hybrid Electric Vehicles and 2) An increase in mass rapid transit systems through a modal shift from private cars and microbus to the Bus Rapid Transit, BRT (called “Metrobus” in DF and “Mexibus” in EdoMex). The sustainable transport scenarios proposed show a 29.5% reduction in energy consumption for passenger transport in the MZVM compared to the baseline scenario, which corresponds to savings of 2,896 million liters of gasoline (15% of the national imports of gasoline, 2009) per year, and a reduction of approximately 6.5 million tons of CO₂ equivalent emissions. Furthermore, the energy consumption would abate 8.8% in 2028, i.e., 22 PJ less than those recorded in 2008, despite the ongoing growth of the vehicle fleet.

Contenido

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT	iv
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I. Antecedentes.....	4
1. Energía y el Sector Transporte	4
2. Impactos ambientales del Sector Transporte	7
3. Movilidad urbana y el Sector Transporte	12
Capítulo II. Normas de eficiencia vehicular	15
1. Situación internacional.....	15
2. Situación nacional	19
3. Evolución del rendimiento vehicular en México	21
3.1. El parque vehicular en México	21
3.2. Ventas de vehículos en México	22
3.3. Rendimientos de combustible	27
3.4. Correlación ventas - rendimientos de combustible.....	32
3.5. Análisis de los cambios en el rendimiento de combustible.....	35
Capítulo III. Metodología y fuentes de información.....	38
1. Zona de estudio	40
2. Emisiones de contaminantes criterio	46
3. Emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI)	51
3.1. Emisiones de CH ₄ y N ₂ O	51
3.2. Emisiones de CO ₂	56
4. Consumo energético	59
Capítulo IV. Prospectiva 2008 - 2028. Transporte de pasajeros de la ZMVM.....	60
1. Escenario Base.....	60
2. Escenarios de transporte sustentable en la ZMVM	71
2.1. Elevar el rendimiento de combustible promedio de la flota de vehículos particulares mediante la introducción de autos híbridos	71

2.2. Aumentar la red del sistema de transporte público: Autobuses de transporte rápido (ATR)	75
Capítulo V. Análisis de resultados	77
1. Consumo de energía	77
2. Emisiones de GEI	79
3. Emisiones de contaminantes criterio	81
Capítulo VI. Conclusiones	83
Glosario	86
Abreviaturas y acrónimos	87
Bibliografía	89
Anexo 1. Artículo: “Fuel economy of new passenger cars in Mexico: Trends from 1988 to 2008”	97
Anexo 2. Artículo: “Sustainable passenger road transport scenarios to reduce fuel consumption, air pollutants and GHG (greenhouse gas) emissions in the Mexico City Metropolitan Area”	108

Índice de Figuras

Figura 1. Consumo mundial de líquidos de petróleo por sector de uso final.....	4
Figura 2. Evolución del consumo energético en México por sector, 1965-2012.....	5
Figura 3. Evolución del consumo de combustibles líquidos, población y número de vehículos de la ZMVM, 1990-2008.....	6
Figura 4. Proceso de emisión de contaminantes en vehículos automotores.....	8
Figura 5. Reparto modal estimado para la ZMVM 1986 – 2009 (en porcentaje de viajes).	13
Figura 6. Comparación del rendimiento de combustible real y proyectado para vehículos de pasajeros nuevos en diferentes partes del mundo.	17
Figura 7. Evolución de las ventas de vehículos particulares en México.	24
Figura 8. Ventas de autos subcompactos en México, 1988-2008.....	25
Figura 9. Ventas de vehículos de uso múltiple en México, 1988-2008.....	26
Figura 10. Evolución del PRECCA, Automóviles Subcompactos, 1988-2008.....	30
Figura 11. Evolución del PRECCA en vehículos de transporte de personas Base EPA nuevo..	31
Figura 12. Muestra de falta de especificaciones técnicas, Ejemplo marca Dodge.	32
Figura 13. Diagrama esquemático del modelo MOVEE.....	38
Figura 14. Mapa de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2006.	42
Figura 15. Distribución de la Flota vehicular de la ZMVM por tipo de vehículo.....	47
Figura 16. Distribución de la Flota vehicular de la ZMVM por tipo de combustible.....	48
Figura 17. Crecimiento Histórico y proyección del crecimiento ajustado de vehículos particulares a gasolina en el DF, periodo 1990-2028.....	64
Figura 18. Crecimiento histórico y proyección del crecimiento ajustado de vehículos particulares a gasolina en la ZMVM, DF y EdoMex, periodo 1990-2028.	65
Figura 19. Tendencia de la edad promedio de la flota de vehículos particulares a gasolina de la ZMVM, DF y EdoMex, periodo 1990-2028.	65
Figura 20. Proyección de la flota de vehículos particulares a gasolina en la ZMVM, agrupados por edad, periodo 2008-2028.....	66
Figura 21. Consumo de energía (PJ). Transporte de pasajeros de la ZMVM, 2008-2028.	67
Figura 22. Escenario base de emisiones de CO ₂ eq por tipo de vehículo (Ton/año). Transporte de pasajeros de la ZMVM, periodo 2008-2028.	68
Figura 23. Escenario base de emisiones contaminantes criterio de material particulado (PM ₁₀ y PM _{2.5}), SO ₂ y CO por tipo de vehículo (Ton/año). Transporte de pasajeros de la ZMVM, periodo 2008-2028.....	69
Figura 24. Escenario base de emisiones contaminantes criterio de los compuestos orgánicos (volátiles y totales), NH ₃ y NO _x por tipo de vehículo (Ton/año). Transporte de pasajeros de la ZMVM, periodo 2008-2028.....	70
Figura 25. Mejora del rendimiento promedio de combustible en Ciudad por la introducción gradual de VHE, periodo 2009-2028.....	73
Figura 26. Escenarios de consumo de energía en el transporte de pasajeros de la ZMVM (en PJ/año), periodo 2008-2028.....	77
Figura 27. Escenarios de emisiones de GEI del transporte de pasajeros ZMVM (en Ton/año de CO ₂ eq), periodo 2008-2028.	79

Figura 28. Escenarios de emisiones de GEI (CH ₄ , N ₂ O y CO ₂) del transporte de pasajeros ZMVM (en Ton/año), periodo 2008-2028.....	80
Figura 29. Escenarios de emisiones de contaminantes criterio del transporte de pasajeros ZMVM (en Ton/año), periodo 2008-2028.....	81

Índice de Tablas

Tabla 1. Normas de rendimientos de combustible y GEI para vehículos en el mundo.	16
Tabla 2. Vehículos particulares por habitante en México.....	22
Tabla 3. Comparativo de Rendimientos (km/l) CONUEE-EPA, Focus sedán de Ford.....	28
Tabla 4. Clasificación de vehículos: Autos y Camionetas.	34
Tabla 5. Análisis de índices de cambio: Datos y Relaciones.....	37
Tabla 6. Conformación de la ZMVM de acuerdo con diferentes autores.....	41
Tabla 7. Delegaciones y municipios de la ZMVM y su crecimiento de población.	43
Tabla 8. Clasificación del transporte de pasajeros de la ZMVM, 2008.	47
Tabla 9. Datos de actividad para los autos particulares.	48
Tabla 10. Actividad de la flota vehicular de la ZMVM por tipo de holograma.....	49
Tabla 11. Datos generales de la ZMVM, requeridos por el Mobile6-Mexico.	50
Tabla 12. Transporte de pasajeros de la ZMVM por tecnología de control de emisiones.	53
Tabla 13. Factores de emisión de N ₂ O y CH ₄ para los vehículos a gasolina y diesel de los Estados Unidos.	54
Tabla 14. Factores de emisión para los vehículos que funcionan con combustibles alternativos.....	55
Tabla 15. Rendimientos promedio de combustible para Ciudad por tipo de vehículo (km/litro).	57
Tabla 16. Factores de emisión de CO ₂ por defecto del transporte terrestre y rangos de incertidumbre.....	58
Tabla 17. Flota de vehículos particulares a gasolina del DF, inventarios 1990-2008.	61
Tabla 18. Flota de vehículos particulares a gasolina del EdoMéx, inventarios 1990-2008.	62
Tabla 19. Flota del transporte de pasajeros en la ZMVM. Escenario Base 2008-2028.....	67
Tabla 20. Rendimientos de combustible de autos híbridos – eléctricos (con motor de combustión interna a gasolina).....	72
Tabla 21. Valores Max., Min., Prom. del rendimiento de combustible – Autos híbridos	72
Tabla 22. Factores de Reducción (FR) de los recorridos de autos particulares vs crecimiento de la red del ATR.....	75
Tabla 23. Escenario II. Crecimiento total de la red del ATR en la ZMVM, 2010-2028.....	76

INTRODUCCIÓN

El petróleo es aún la fuente de energía primaria más usada en el mundo, cubriendo en los últimos años alrededor de 32% del mercado; el sector transporte es el principal consumidor de los productos de petróleo. En los próximos 20 años se espera que la demanda mundial de combustibles líquidos de petróleo aumente más rápidamente en el sector del transporte que en cualquier otro sector de uso final (IEA, 2013).

El desarrollo del sector transporte y su creciente dependencia del petróleo, no sólo está en problemas por el descenso de la producción de petróleo y el consecuente aumento de sus costos, sino por los impactos ambientales causados por las emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero, generadas por la quema de combustibles fósiles, que ponen en duda la posibilidad de un desarrollo sostenible.

Continuar con el modelo de transporte urbano basado en el auto particular obliga al sector transporte a enfrentar grandes desafíos para reducir al mínimo las emisiones de los centros urbanos y abatir la creciente demanda de combustible. Esta problemática se agudiza con la transformación de las ciudades en grandes urbes como sucede en la Zona Metropolitana del Valle de México.

En respuesta, los gobiernos plantean instrumentos para reducir el consumo de combustibles fósiles, tales como elevar los precios de los combustibles, fijar nuevas normas de rendimiento de combustible e implantar controles de emisiones más rigurosos. Distintos organismos internacionales consideran que la movilidad urbana y el transporte sostenible deberán basarse en una combinación de políticas públicas para reducir el consumo de combustibles y mitigar las emisiones de CO₂ en el sector transporte. Estas políticas están relacionadas con un uso del suelo que incorpore las necesidades de movilidad, la restricción del uso del vehículo privado, la promoción de un sistema de transporte público eficaz, mejorar la eficiencia, hacer un mayor uso de los biocombustibles, adoptar vehículos eléctricos a base de hidrógeno, entre otras.

En este trabajo se realiza un análisis de la situación energético-ambiental del transporte de pasajeros de la ZMVM, a través de un modelo computacional desarrollado sobre la plataforma del Modelo de Energía y Emisiones para México (MEEM) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con el cual se estiman los impactos futuros (escenarios) de diversas alternativas de transporte sustentable, a fin de que sea de utilidad en la toma de decisiones para un uso eficiente de la energía en el sector transporte, así como para su gestión ambiental.

En el capítulo I se examina la evolución del sector transporte y su correlación con el aumento de la demanda de combustibles fósiles, la problemática ambiental y la movilidad urbana sustentable. Situación que se reproduce a nivel mundial, a nivel país y a nivel local en la Zona Metropolitana del Valle de México.

El capítulo II describe las normas vehiculares, las cuales han demostrado ser uno de los instrumentos más eficaces de política pública aplicados en el sector transporte por diferentes gobiernos en el mundo para el control de la demanda de combustible y reducir las emisiones de contaminantes locales; así como mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), cuya presencia en la atmósfera constituyen un elemento esencial del calentamiento global.

Asimismo, en el capítulo II se realiza una evaluación detallada de la evolución histórica del rendimiento de combustible de los vehículos particulares vendidos en México desde 1988 hasta el 2008, asociada con el volumen de ventas por tipo de vehículo: subcompacto, compacto, deportivo, de lujo y camionetas para el transporte de pasajeros (llamadas comúnmente SUV), con el propósito de obtener una eficiencia global del parque vehicular. La evaluación contempla un análisis del impacto que tiene la composición de las ventas de vehículos con mayor o menor rendimiento de combustible en la eficiencia global del parque, calculada mediante la aplicación de los métodos índices de descomposición multiplicativa y de índices de descomposición de Laspeyres.

El capítulo III describe la metodología y las fuentes de información empleadas en el modelo MOVEE (Modelo Vehicular de Escenarios de Emisiones), el cual fue desarrollado para estimar la tendencia histórica de la demanda de energía, los contaminantes del aire y las emisiones de GEI causadas por los vehículos de pasajeros que circulan en la Zona Metropolitana del Valle de México durante el periodo de 1990-2008, y generar escenarios futuros al 2028.

El análisis prospectivo del transporte de pasajeros de la ZMVM, se presenta en el capítulo IV, en donde se elaboraron 4 escenarios. En primer lugar se construye un Escenario Base llamado BAU (*Business As Usual*), escenario sin políticas adicionales a las políticas actuales de emisiones y consumo energético. Y en segundo lugar, tres escenarios de transporte sustentable vinculados con la innovación tecnológica y el cambio modal del transporte de pasajeros, público y privado.

En el capítulo V se muestran los resultados obtenidos de los diferentes escenarios por concepto de demanda de energía, emisiones contaminantes criterio y emisiones de GEI del transporte de pasajeros en la ZMVM. Y en el capítulo VI se dan las conclusiones para cada uno de los escenarios y de la implementación conjunta de las estrategias dirigidas al transporte sustentable.

Capítulo I. Antecedentes

Desde una perspectiva ambiental y energética, el modelo de transporte urbano basado en el auto particular obliga al sector transporte a enfrentar grandes desafíos para reducir al mínimo las emisiones de los centros urbanos y abatir la creciente demanda de combustible. Esta problemática se agudiza con la transformación de las ciudades en grandes urbes donde los medios de transporte terrestre se convierten en una de las principales fuentes que degradan el medio ambiente y la salud de sus habitantes debido al acelerado crecimiento demográfico y sus necesidades de movilidad, que incrementan a su vez, el tránsito vehicular y el consumo de combustibles fósiles.

1. Energía y el Sector Transporte

El petróleo es aún la fuente de energía primaria más usada en el mundo, cubriendo en los últimos años alrededor de 32% del mercado (IEA, 2013), siendo el sector transporte el principal consumidor de los productos de petróleo. La Agencia de Administración de Información en Energía (US-EIA, 2008), pronostica que en los próximos 20 años la demanda mundial de combustibles líquidos de petróleo aumentará más rápidamente en el sector del transporte que en cualquier otro sector de uso final (Figura 1), pasando de 52.1% en 2005 a 57.9% en 2030.

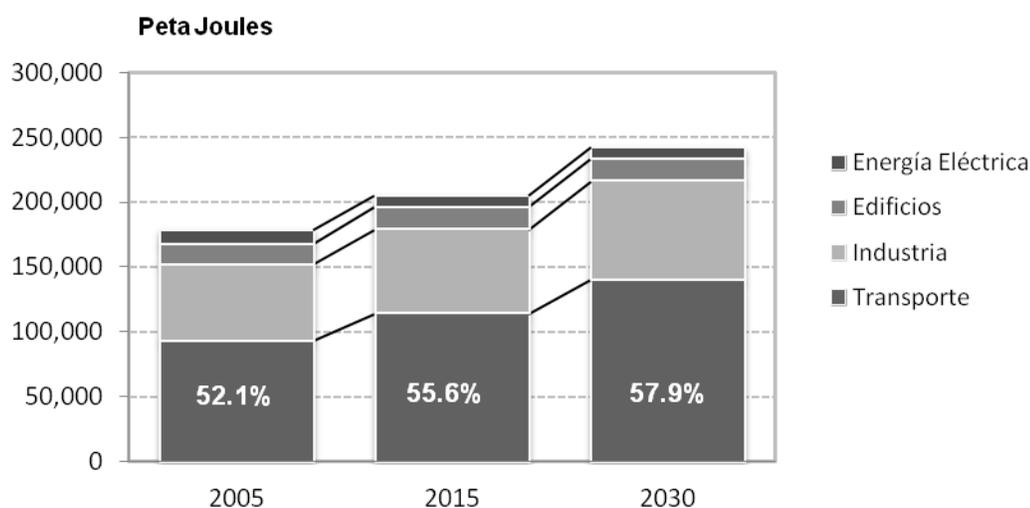


Figura 1. Consumo mundial de líquidos de petróleo por sector de uso final.

Fuente: (US-EIA, 2008).

En México, el sector transporte se convirtió en el principal consumidor de energía a partir de los años 90 con más del 40% del consumo total (Figura 2), incluso con un crecimiento sostenido por delante de los sectores industrial y doméstico, al pasar de 1,527 PJ en 1998 a 2,282 PJ en 2012; es decir, un crecimiento de 49% en los últimos 14 años (SENER-SIE, 2014).

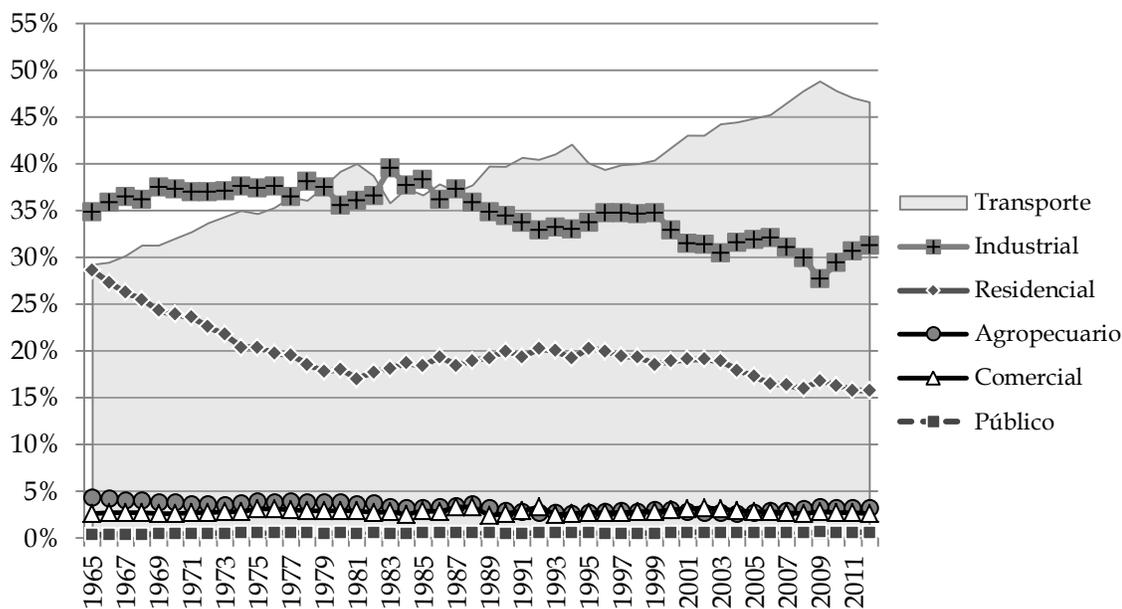


Figura 2. Evolución del consumo energético en México por sector, 1965-2012.

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Energética, SENER.

En el caso de la Zona Metropolitana del Valle de México, la energía destinada al sector transporte, y en específico el subsector automotor, alcanzó los 344 PJ durante 2008 (SMA-GDF, 2010a); es decir, 60% del consumo final y 20% más que la participación registrada a nivel nacional. El empleo de combustibles fósiles en los vehículos automotores es la fuente antropogénica individual más importante en la generación de gases de efecto invernadero. Entre los combustibles fósiles utilizados en el transporte se encuentran las gasolinas (Magna y Premium) con 73.8% y el diesel con 22.8%, que en su conjunto representan el 96.6%, el restante 3.4% lo constituyen el gas licuado de petróleo y el gas natural comprimido.

El consumo de energía en el sector transporte en la ZMVM, de acuerdo con información de Pemex, y reportada en el inventario de emisiones, presenta un incremento de 19% entre 1990 y 2008 (Figura 3); sin embargo, la flota vehicular matriculada en ese mismo periodo se duplicó, alcanzando para el 2008 más de 4 millones de vehículos, incluyendo los vehículos de carga (Delgado, 2008). De este parque vehicular, 82% corresponde a vehículos de uso particular, registrado anualmente un promedio de 185,000 vehículos nuevos en los últimos cinco años, solo en el Distrito Federal. Si a esta cifra se le suman los vehículos nuevos registros en los municipios vecinos del Estado de México, el parque vehicular de la metrópoli aumenta a 270,000 unidades al año en promedio (SMA-GDF, 2007) con excepción de los años de desaceleración económica. Este desfase entre el reporte del consumo de combustibles para transporte y el incremento de la flota vehicular, hace suponer que existen deficiencias en la contabilización del primero, pues cómo se verá más adelante, el aumento en la eficiencia del uso de combustibles en autos nuevos, ha sido mínimo.

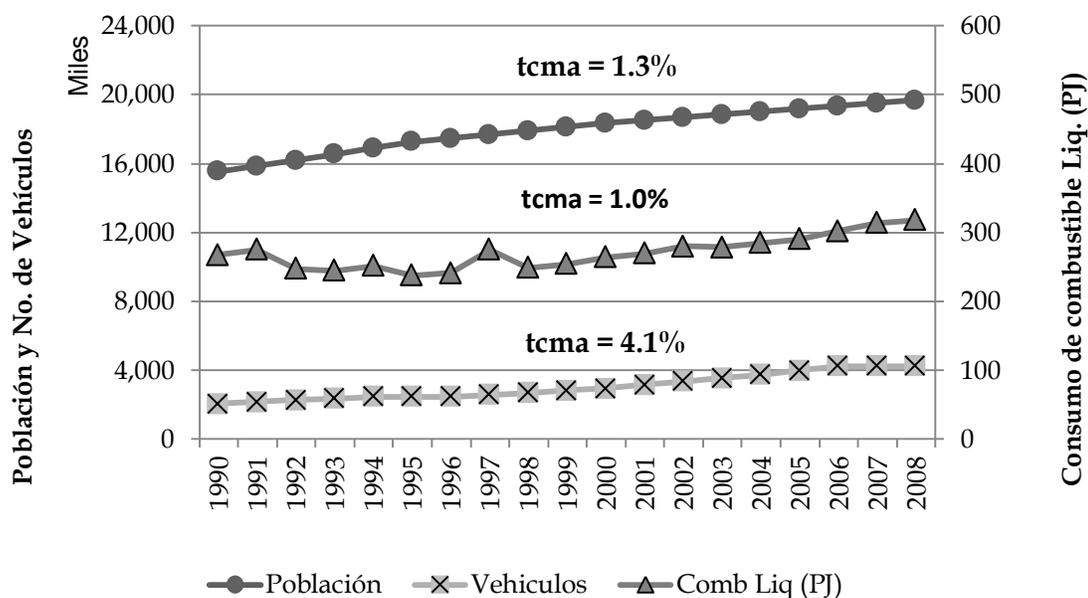


Figura 3. Evolución del consumo de combustibles líquidos, población y número de vehículos de la ZMVM, 1990-2008.

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema Información Energética, SENER (Consumo de combustible), INEGI (Población), SMA-GDF (Número de vehículos).

Inclusive, los pocos estudios que vinculan el consumo de energía con los inventarios de emisiones de la ZMVM, presenten deficiencias debido a que los inventarios se desarrollan con base en factores de emisión que sólo consideran el consumo de combustibles y no los kilómetros recorridos (Sheinbaum, García, Solís, & Chávez, 2009) (SMA-GDF, 2010a).

2. Impactos ambientales del Sector Transporte

Con la transformación de las ciudades en grandes urbes, los medios de transporte terrestre se han convertido en una de las principales fuentes que degradan la calidad del aire local y regional debido al acelerado crecimiento demográfico y sus necesidades de movilidad que incrementan a su vez el tránsito vehicular y el consumo de combustibles fósiles. Esta situación está vinculada con múltiples problemas de salud para los habitantes de las urbes al estar expuestos a altos grados de contaminación atmosférica.

Al respecto, la Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas (INE, 2009) hace referencia a diversos estudios llevados a cabo en México en donde se ha identificado una asociación entre la contaminación atmosférica, en particular por partículas y ozono, y el aumento en las visitas a salas de emergencia por ataques de asma (Romieu, et al., 1995) (Rosas, et al., 1998), la incidencia de infecciones respiratorias (Tellez-Rojo, Romieu, Polo-Peña, Ruiz-Velazco, Meneses-González, & Ávila, 1997) (Torres-Meza, 2000) (Hernández-Cadena, Tellez-Rojo, Sanin-Aguirre, Lacasana-Navarro, Campos, & Romieu, 2000), los casos de bronquitis crónica (Romano, 2000), el ausentismo escolar (Romieu, Cortez-Lugo, Ruiz-Velasco, Sanchez, Meneses, & Hernandez, 1992), la presencia de síntomas respiratorios (Constanza, 1999), así como la disminución de la función pulmonar en niños (Castillejos, Gold, D, Tosteson, Baum, & Speizer, 1992) (Gold, et al., 1999), la reducción en la variabilidad cardiaca (Holguin, et al., 2003), y un incremento en la mortalidad en adultos (Borja-Aburto, Castillejos, Gold, Bierzwinski, & Loomis, 1998) (Castillejos, Borja-Aburto, Dockery, Gold, & Loomis, 2000) (Tellez-Rojo, Romieu, Ruiz-Velasco, Lezana, & Hernandez-Avila, 2000) (O'Neill, Loomis, & Borja-Aburto, 2004) e infantes (Loomis, Castillejos, Gold, McDonnell, & Borja-Aburto, 1999).

La quema del combustible en un vehículo automotor (sea gasolina, diesel u otros como gas licuado o gas natural) provoca principalmente emisiones de COT, CO, NO_x, SO₂, PM; contaminantes tóxicos del aire y contaminantes que reducen la visibilidad. En términos de volumen de contaminantes, las emisiones de un solo vehículo no representan mayor conflicto, la gravedad del problema es cuando las emisiones son multiplicadas por el número de vehículos en circulación, convirtiéndose para muchas megaciudades, en la fuente principal de contaminación. En México, de acuerdo con el primer Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999 (INE, 2006), los vehículos automotores representaron el 31% de las emisiones de óxido de nitrógeno (NO_x), 62% de monóxido de carbono (CO) y 22% de las emisiones totales estimadas de compuestos orgánicos volátiles (COV).

Los procesos de emisión de contaminantes de los vehículos automotores propulsados por motores de combustión interna se pueden catalogar básicamente en dos tipos: a) Emisiones evaporativas y b) emisiones por el tubo del escape (Figura 4), aunque existen también emisiones de partículas por el desgaste tanto de los frenos como de las llantas.

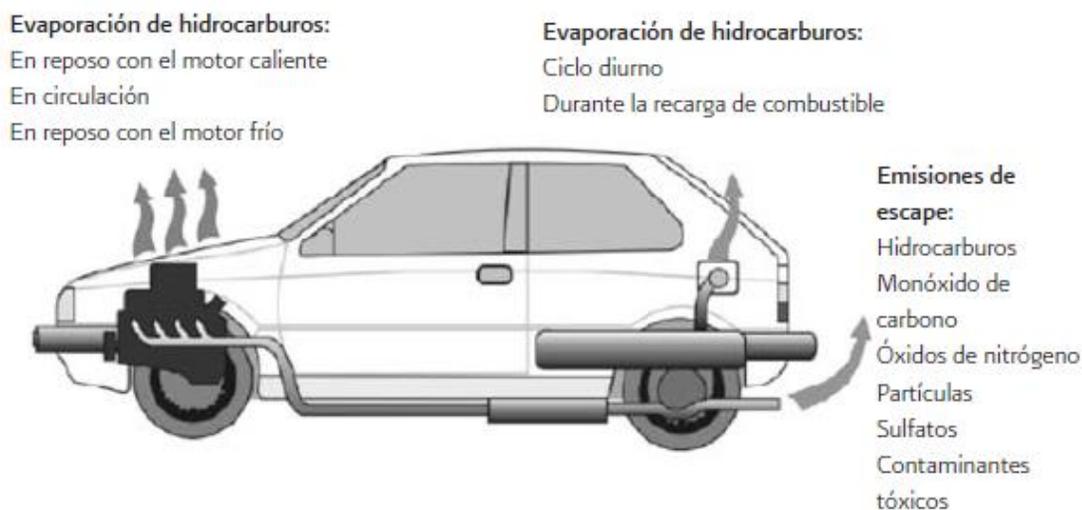


Figura 4. Proceso de emisión de contaminantes en vehículos automotores.
Fuente: INE, 2005.

Las emisiones evaporativas se deben a las fugas de combustible en forma de vapores que se dan durante la recarga del tanque de combustible y por la misma operación del motor cuando está en circulación o en reposo, ya sea con el motor caliente o en frío; lo cual genera compuestos orgánicos volátiles.

Por otro lado, las emisiones por el tubo del escape son producto de la quema del combustible, por lo que las emisiones dependen directamente de las características del combustible, aunque también influyen las características del vehículo, su tecnología y su sistema de control de emisiones (los vehículos más pesados o más potentes tienden a generar mayores emisiones por kilómetro recorrido); así como el estado de mantenimiento del vehículo y los factores operativos, la velocidad de circulación y la frecuencia e intensidad de las aceleraciones.

Entre los contaminantes que se liberan por el tubo de escape se encuentran: el monóxido y bióxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno, partículas y ciertos elementos químicos contenidos en el combustible como el azufre que reaccionan para formar óxidos de azufre y, hasta hace algunos años, el plomo.

A continuación se describen los impactos en la salud y el ambiente que presentan algunos de los contaminantes que son emitidos por las fuentes vehiculares (INE, 2009):

- **Compuestos Orgánicos Totales (COT) o Hidrocarburos (HC):** Las emisiones de hidrocarburos resultan cuando no se quema completamente el combustible en el motor y son conocidos como compuestos orgánicos totales (COT). Estos compuestos son precursores del ozono y algunos de ellos, como el benceno, formaldehído y acetaldehído, tienen una alta toxicidad para el ser humano. La parte más importante de los COT son los compuestos orgánicos volátiles (COV) que se dividen en metano (CH_4) y COV no metano. (COVNM).
- **Monóxido de carbono (CO):** El monóxido de carbono es un producto de la combustión incompleta y ocurre cuando el carbono en el combustible se oxida sólo parcialmente. El monóxido de carbono se adhiere con facilidad a la hemoglobina de la sangre y reduce el flujo de oxígeno en el torrente

sanguíneo ocasionando alteraciones en los sistemas nervioso y cardiovascular.

- Óxidos de nitrógeno (NO_x): Bajo las condiciones de alta temperatura y presión que imperan en el motor, los átomos de nitrógeno y oxígeno del aire reaccionan para formar monóxido de nitrógeno (NO), bióxido de nitrógeno (NO₂) y otros óxidos de nitrógeno menos comunes, que se conocen de manera colectiva como NO_x. Los óxidos de nitrógeno, al igual que los hidrocarburos, son precursores de ozono. Asimismo, con la presencia de humedad en la atmósfera se convierten en ácido nítrico, contribuyendo de esta forma al fenómeno conocido como lluvia ácida. La exposición aguda al NO₂ puede incrementar las enfermedades respiratorias, especialmente en niños y personas asmáticas. La exposición crónica a este contaminante puede disminuir las defensas contra infecciones respiratorias.
- Bióxido de azufre (SO₂): El SO₂ es un gas incoloro de fuerte olor, que se produce debido a la presencia de azufre en el combustible. Al oxidarse en la atmósfera produce sulfatos, que forman parte del material particulado. Este compuesto es irritante para los ojos, nariz y garganta, y agrava los síntomas del asma y la bronquitis. La exposición prolongada al bióxido de azufre reduce el funcionamiento pulmonar y causa enfermedades respiratorias.
- Partículas o material particulado (PM): Las partículas también son producto de los procesos de combustión en el motor de los vehículos. Este contaminante es uno de los que tiene mayores impactos en la salud humana; ha sido asociado con un aumento de síntomas de enfermedades respiratorias, reducción de la función pulmonar, agravamiento del asma, y muertes prematuras por afecciones respiratorias y cardiovasculares.
- Plomo (Pb) y otros aditivos metálicos: Su empleo como antidetonante en la gasolina ha propiciado durante mucho tiempo emisiones que han demostrado tener impactos nocivos en el coeficiente intelectual de los niños. Sin embargo, desde 1998 las gasolinas que se comercializan en México no contienen plomo.

- Amoníaco (NH_3): Las emisiones de amoníaco cobran importancia ambiental por el hecho de que este contaminante suele reaccionar con SO_x y NO_x para formar partículas secundarias tales como el sulfato de amonio [$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$] y el nitrato de amonio ($\text{NH}_4 \text{NO}_3$), las cuales tienen un impacto significativo en la reducción de la visibilidad. La exposición a concentraciones altas de este contaminante puede provocar irritación de la piel, inflamación pulmonar e incluso edema pulmonar.
- Bióxido de carbono (CO_2): El bióxido de carbono no atenta contra la salud pero es un gas con importante efecto invernadero que atrapa el calor emitido por la superficie de la tierra y contribuye seriamente al calentamiento global.
- Metano (CH_4): El metano es también un gas de efecto invernadero generado durante los procesos de combustión en los vehículos. Tiene un potencial de calentamiento de 21 a 25 veces mayor al del bióxido de carbono.
- Óxido nítrico (N_2O): Este contaminante, que pertenece a la familia de los óxidos de nitrógeno, también contribuye al efecto invernadero y su potencial de calentamiento es de 298 a 310 veces mayor que el bióxido de carbono.
- El ozono (O_3): Gas tóxico reactivo de olor fuerte y color azul pálido. El ozono es el oxidante fotoquímico más abundante en la atmósfera; sin embargo, el ozono y otros oxidantes fotoquímicos no son emitidos directamente a la atmósfera, sino que son formados por las reacciones químicas entre hidrocarburos, CO y NO_x en presencia de luz solar. Por lo tanto, en los inventarios de emisiones, la estimación no se hace específicamente para el ozono, sino para sus precursores (INE, 2005).

3. Movilidad urbana y el Sector Transporte

La problemática del sector transporte y su creciente dependencia del petróleo, no sólo está en problemas por el descenso de la producción de petróleo y el consecuente aumento de sus costos, sino por los impactos ambientales causados por las emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero, generadas al quemar combustibles fósiles.

Las proyecciones de la Agencia Internacional de la Energía, basadas en las tendencias actuales del sector transporte, prevén que en este sector el consumo de energía y las emisiones de CO₂ aumentarán en casi un 50% en 2030 y más del 80% en 2050 (IEA, 2009). Bajo este escenario, el sector transporte jugará un papel imprescindible para alcanzar un desarrollo sustentable en el futuro. Cambiar sustancialmente las tendencias del transporte requerirá la adopción de la mejor tecnología disponible, apostar por los modos con menor consumo energético por unidad transportada y con la posibilidad de utilizar energías que no dependan necesariamente del petróleo.

En los últimos decenios se han producido profundos cambios sociales, económicos y tecnológicos que han derivado en un nuevo modo de movilidad urbana, la cual se caracteriza por el aumento de las distancias medias recorridas al ampliarse la mancha urbana, los cambios en los motivos de los desplazamientos y las modificaciones en la participación modal del transporte (Figura 5).

La movilidad urbana sostenible se define en función de la existencia de un sistema y estándares de transporte capaces de proporcionar los medios y oportunidades para cubrir las necesidades económicas, ambientales y sociales, de manera eficiente y equitativamente, evitando los innecesarios impactos negativos y sus costos asociados. En la Agenda 21 de la Cumbre de Río de 1992 se establecieron una serie objetivos para que el transporte fuera considerado sostenible o menos insostenible; entre ellos se incluía la reducción de la demanda de transporte privado y el incremento del uso del transporte público (Lizárraga, 2006).



Figura 5. Reparto modal estimado para la ZMVM 1986 - 2009 (en porcentaje de viajes).
Fuente: (GDF, 2010).

El transporte sostenible, además de reducir las emisiones de CO₂ y los contaminantes del aire, tiene co-beneficios económicos, ambientales, sociales y de otra índole (Chavez & Sheinbaum, 2014). Por ejemplo, reducir la congestión del tráfico tiene co-beneficios económicos, sociales y de salud en las zonas urbanas (Bulkeley, 2010) (Hallegatte, Henriët, & Corfee-Morlot, 2012) (Levy, Buonocore, & Stackelberg, 2010). En un estudio realizado por Solís y Sheinbaum (Solís & Sheinbaum, 2013), indican que el paradigma Evitar, Cambiar, Mejorar y Financiamiento (ASIF2, por sus siglas en inglés), proporciona estrategias encaminadas a lograr un transporte sostenible (Dalkmann & Brannigan, 2007, re-edition December 2010) (Mani, Pai, & Aggarwal, 2012) (Schipper, Marie-Lilliu, & Gorham, 2000) (Tiwari, Cervero, & Schipper, 2011) (Ajanovic, Schipper, & Haas, 2012), tales como: (1) Evitar desplazamientos innecesarios; por ejemplo, mediante tecnologías de la información; (2) Cambiar a los modos de transporte más sostenibles; por ejemplo, transporte público y de mercancías por ferrocarril; (3) Mejorar el rendimiento de todos los modos; y (4) Financiamiento de inversiones en el desarrollo urbano y el transporte para lograr la sostenibilidad y reducidos niveles de CO₂.

De acuerdo con datos de la Administración de Información Energética de Estados Unidos (US-EIA, 2011), durante el periodo de 2002 a 2008, México incrementó un 16% aproximadamente sus emisiones de CO₂ por la quema de combustibles fósiles con una tasa de crecimiento media anual (TCMA) de 2.5%, mientras que países industrializados como Estados Unidos, Japón, Alemania e Italia registran una TCMA casi nula de 0.1%; aunque también hay países que presentan una TCMA más elevada: China 11%, Indonesia, India y Arabia Saudita 7%, Irán 6% y Brasil 4%.

En respuesta los gobiernos plantean elevar los precios de los combustibles, fijar nuevas normas de rendimiento de combustible e implantar controles de emisiones más rigurosos. Además de mejorar la eficiencia en los vehículos convencionales, hacia 2050 se espera una mayor penetración de los vehículos híbridos que utilizan un motor de combustión interna combinado con un motor eléctrico y sistemas de tránsito masivo rápido (Heywood, 2008) (Bandivadekar, et al., 2008) (IEA, 2008a) (IEA, 2008b) (GFEI, 2009) (IEA, 2009) (WEC, 2011).

Capítulo II. Normas de eficiencia vehicular

Las normas vehiculares típicamente se clasifican en dos tipos: las normas referidas al rendimiento de combustible del vehículo, expresadas en kilómetros por litro (o millas por galón); y las normas que limitan las emisiones de GEI del tubo de escape del vehículo, algunas establecidas en gramos de CO₂ equivalente por kilómetro (gCO₂e/km), y otras sólo incluyen la verificación de CO₂.

En el caso del rendimiento de combustible de un vehículo, éste se puede mejorar mediante el aumento de la eficiencia energética de la transmisión (motor y transmisión) y por la disminución de la cantidad de energía necesaria para mover el vehículo a través de la reducción de peso, mejoras en la resistencia aerodinámica, mejoras en la resistencia a la rodadura de neumáticos, mejor iluminación, la mejora de los sistemas de acondicionamiento de aire y la optimización de la carrocería del vehículo con materiales compuestos (WEC, 2011). Aunque estas mejoras tienen un doble efecto, reducen tanto el consumo de combustible como las emisiones de gases de efecto invernadero, debido a que las emisiones de GEI están íntimamente relacionadas con el consumo de combustible.

1. Situación internacional

Las normas vehiculares han demostrado ser uno de los instrumentos más eficaces de política pública aplicados en el sector transporte, por diferentes gobiernos en el mundo, para el control de la demanda de combustible y mitigar las emisiones de contaminantes del aire y de los de gases de efecto invernadero.

Los países más destacados en el desarrollo de normas vehiculares se encuentran: la Unión Europea, Estados Unidos, Japón, Canadá, Australia, Taiwán, y recientemente China y Corea del Sur (An & Sauer, 2004). Las normas vehiculares en cada país presentan muchas variantes dependiendo del objetivo o meta a alcanzar. Por ejemplo, si se desea establecer una única norma para el promedio de la flota o dar un enfoque gradual con múltiples estándares desglosados de acuerdo con la huella del vehículo, peso, clase, tamaño del motor, o el tamaño interior; aunque también hay que considerar el método de prueba del ciclo que se

aplicará, y si la norma debe ser voluntaria o incorporar sanciones formales por incumplimiento. En la Tabla 1 se resumen los enfoques de políticas específicas adoptadas por los países más destacados.

Tabla 1. Normas de rendimientos de combustible y GEI para vehículos en el mundo.

País o región	Tipo de Norma	Medida	Estructura	Flota objetivo	Método de Prueba	Norma
Japón	Combustible	km/l	Basado en peso	Nueva	JC08	Obligatoria
Unión Europea *	CO ₂	g/km	Norma única	Nueva	NEDC	Voluntaria
China	Combustible	l/100-km	Basado en peso	Nueva	NEDC	Obligatoria
Canadá *	GEI (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs)	Reducción 5.3 Mt	Basado en la clase del vehículo	En uso y nueva	CAFE US	Voluntaria
California	GEI (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs)	g/milla	Basado en la clase del vehículo	Nueva	CAFE US	Obligatoria
Estados Unidos	Combustible	mpg	Norma única para coches y normas basadas en el tamaño de los camiones ligeros	Nueva	CAFE US	Obligatoria
Australia	Combustible	l/100-km	Norma única	Nueva	NEDC	Voluntaria
Corea del Sur	Combustible	km/l	Tamaño del motor	Nueva	EPA Ciudad US	Obligatoria
Taiwán, China	Combustible	km/l	Tamaño del motor	Nueva	CAFE US	Obligatoria

* Europa y Canadá se están cambiando a los programas de regulación obligatorios.

Fuente: An, Gordon, He, & Kodjak, 2007.

La Unión Europea y Japón se caracterizan por tener las normas más estrictas en el sector transporte. La Unión Europea utiliza una norma voluntaria en gramos de CO₂/km, mientras que Estados Unidos aplica una norma obligatoria en gCO₂e/milla complementaria al rendimiento de combustible corporativo promedio (CAFE, por sus siglas en inglés).

De los 30 países de la OCDE, en 2007 se reportó que sólo Islandia, México, Noruega, Suiza y Turquía no contaban con programas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero o el uso de combustible en los vehículos de pasajeros (An, Gordon, He, & Kodjak, 2007). Sin embargo, en junio de 2013, el gobierno mexicano publicó finalmente una Norma obligatoria que regula las emisiones de CO₂ y su equivalencia en términos de rendimiento de combustible

para vehículos nuevos de pasajeros con un peso de hasta 3,857 kg (SEMARNAT, 2013). Cabe resaltar que la norma mexicana fue alineada a los objetivos establecidos en la Norma de Estados Unidos, y repicada en Canadá, para el periodo 2012-2016, como un paso para la armonización de las normas de rendimiento de combustible o gases de efecto invernadero en vehículos de pasajeros de toda América del Norte (US-EIA, 2013).

En la Figura 6 se muestra el rendimiento de combustible proyectado para los vehículos de pasajeros en diferentes partes del mundo. En el 2020, la Unión Europea estima alcanzar 25.8 km/l, 47% más que en 2010; en el caso de Japón planea llegar a 23.4 km/l, 18% más que en el 2010; y en Estados Unidos se estima alcanzar 20.9 km/l en 2025, 74% más que en el 2010 (An & Sauer, Updated 2012).

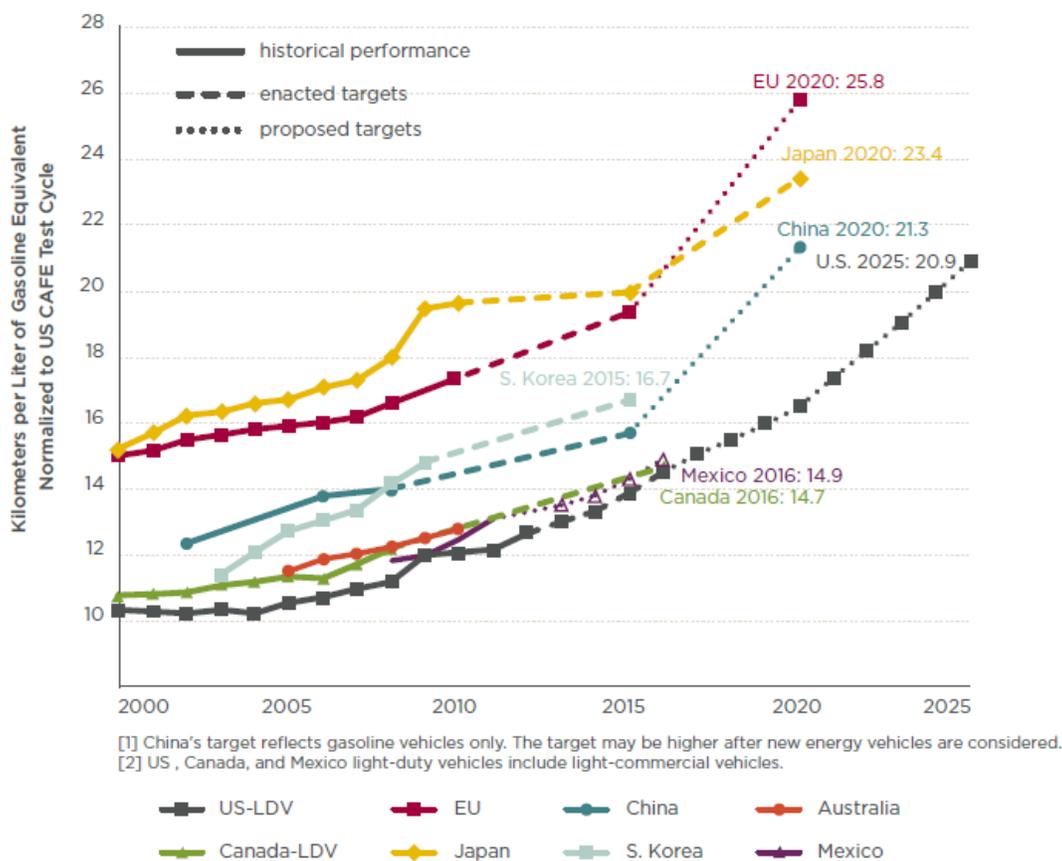


Figura 6. Comparación del rendimiento de combustible real y proyectado para vehículos de pasajeros nuevos en diferentes partes del mundo.

Fuente: (Blumberg K., 2012)

En el caso de México, y con la implementación de la norma NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013, la expectativa es alcanzar un rendimiento de combustible del parque de vehículos nuevos de 14.9 km/l en el 2016, 25% más que en el 2008 (Figura 6), y un poco más de lo proyectado para Estados Unidos, debido posiblemente a que en comparación con los Estados Unidos, los vehículos vendidos en México tienden a ser más pequeños (huella promedio de 4.1 m² en lugar de 4.5 m²) y menos potentes (aproximadamente un 25% más bajo para modelos 2008) (Blumberg K. , 2012).

2. Situación nacional

Los primeros esfuerzos realizados en México para racionalizar el consumo de combustible y diversificar las fuentes primarias de energía aprovechando y desarrollando nuevas tecnologías, se remontan a 1981 cuando la Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial¹ (SEPAFIN, 1981) exigió niveles mínimos de rendimiento de combustible para los automóviles nuevos de fabricación nacional, mediante un decreto conocido como el PREMCE.

El PREMCE representa el Promedio de Rendimiento Mínimo de Combustible por Empresa, durante un año modelo, calculado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$PREMCE = \frac{\sum^N [VPM (RC)]}{VTE} \dots \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

PREMCE expresado en kilómetros por litro (km/l).
VPM = Volumen total proyectado de venta para cada modelo de automóvil.
RC = Rendimiento combinado de combustible de cada modelo (km/l).
VTE = Volumen total proyectado de venta de automóviles por empresa.
N = Número de modelos a producir por la empresa.
 \sum = Sumatoria de los productos de todos los modelos.

El Rendimiento Combinado de combustible (*RC*) es el que se obtiene al sumar los productos de los rendimientos de ciudad y carretera de cada modelo por un factor específico, conforme se establece en la Ecuación 2.

$$RC = 0.55 (RCI) + 0.45 (RCA) \dots \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

RCI = Rendimiento de combustible de cada modelo en ciclo ciudad.
RCA = Rendimiento de combustible de cada modelo en ciclo carretera.

¹ El 29 de diciembre de 1982, la Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial se transformó en la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP), transfiriendo a la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI) las funciones relacionadas con el fomento industrial. Fuente: Historia, SENER, www.sener.gob.mx.

El decreto del PREMCE establecía que las pruebas de certificación de rendimiento de combustible de los modelos se realizaran en los laboratorios certificados de las empresas automotrices ante la presencia de SEPAFIN, aunque también tenía la facultad de realizar pruebas de verificación de consumo de combustible a cualquiera de los vehículos producidos con menos de 50 kilómetros recorridos, permitiéndose una tolerancia de hasta 20% con respecto a los valores obtenidos en la certificación del modelo correspondiente.

En el PREMCE se estableció como meta que a partir de 1982 las empresas automotrices incrementaran anualmente 0.5 kilómetros por litro el rendimiento de combustible del conjunto de sus modelos (con excepción del año 1985) para alcanzar en el año de 1990 el valor de 11.0 km/l.

El PREMCE fue derogado en 1994 para no contravenir el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (CMM, 2007); y en su lugar la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía impulsó un convenio de concertación, el cual presenta una formulación similar pero actuando sólo como un instrumento informativo sin llegar a ser normativo (CONAE, 2002). El convenio inicia en 2002 con la participación de las Secretarías de Energía, Economía, De Medio Ambiente y Recursos Naturales, así como la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz.

La información que entregan las empresas automotrices a la CONAE² sobre rendimientos de combustible de los vehículos, es la misma que se obtiene de la certificación de emisiones de vehículos nuevos reportada a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) antes de su comercialización.

Finalmente, en junio de 2013, el gobierno mexicano publicó la Norma obligatoria NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013, que regula las emisiones de CO₂ y su equivalencia en términos de rendimiento de combustible para vehículos nuevos de pasajeros con peso de hasta 3,857 kg (SEMARNAT, 2013). Con la implementación de la norma, la expectativa es alcanzar un rendimiento de combustible del parque de vehículos nuevos de 14.9 km/l en el 2016 (US-EIA, 2013).

² A partir del 28 de noviembre de 2008, la CONAE se convierte en la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE).

3. Evolución del rendimiento vehicular en México

La evolución del rendimiento de combustible promedio del parque de vehículos particulares nuevos que se comercializaron en México durante el periodo de 1988 a 2008, contempla dos aspectos inherentes. Por un lado, la composición del parque de vehículos vendidos; y por otro lado, el rendimiento de combustible ponderado por tipo de vehículo.

La nula o endeble legislación del gobierno mexicano en el sector transporte durante el periodo de análisis, significó un mayor trabajo para la determinación del rendimiento de combustible de la flota vehicular, la cual fue subsanada mediante correlaciones técnicas con bases de información internacionales, principalmente de Estados Unidos.

3.1. El parque vehicular en México

Año con año se integran al parque vehicular nuevas marcas y modelos, algunos de estos modelos permanecen por varios años con algunas modificaciones; sin embargo, otros desaparecen del mercado. Entre 1990 y 2008, el parque de vehículos particulares registra un crecimiento vertiginoso al pasar de 6.3 millones a 18.7 millones de autos; es decir, un incremento de casi 300% (Tabla 2). En términos de vehículos por habitante significa que mientras en 1990 había 75 vehículos particulares por cada mil habitantes, en 2008 la tasa aumentó a 175.

Tabla 2. Vehículos particulares por habitante en México.

Año	Flota de vehículos particulares (miles)	Población (miles)	Vehículos particulares por cada 1000 Hab.
1990	6,260	83,971	75
1991	6,643	85,583	78
1992	7,079	87,185	81
1993	7,411	88,752	84
1994	6,897	90,266	76
1995	7,184	91,725	78
1996	7,508	93,130	81
1997	8,086	94,478	86
1998	8,714	95,790	91
1999	9,213	97,115	95
2000	9,786	98,439	99
2001	10,948	99,716	110
2002	11,845	100,909	117
2003	12,336	102,000	121
2004	12,983	103,002	126
2005	13,846	103,947	133
2006	15,897	104,874	152
2007	17,146	105,791	162
2008	18,691	106,683	175

Fuente: (CONAPO, 2010); (INEGI, 2010).

3.2. Ventas de vehículos en México

En México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía publica anualmente un compendio estadístico de la evolución de la industria automotriz, en donde se presentan las ventas de vehículos, con la información más reciente generada por la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz, AC, la Asociación Mexicana de Distribuidores de Automotores, AC, la Asociación Nacional de Productores de Autobuses, Camiones y Tractocamiones, AC, la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos, Petróleos Mexicanos, la Secretaría de Economía, la Comisión Nacional de Seguros y Fianzas, la Bolsa Mexicana de Valores, SA de CV, el Banco de México, la Organización de las Naciones Unidas y por el propio INEGI.

La consultora Melgar de México realiza un registro histórico del parque vehicular en México desde 1972 que incluye vehículos regularizados, vehículos ilegales y vehículos legales, este último representa las ventas de vehículos registrados por INEGI con la salvedad que considera una tasa de desecho de dicho parque, información que la consultora Melgar actualiza año con año. En nuestro caso de estudio se utilizó la publicada en 2008.

a) Bases de información

En relación con la venta de autos, se recopiló los datos estadísticos del INEGI, en su publicación anual que reside en su página de Internet sobre la Industria Automotriz en México para el periodo 2000-2009 (INEGI, 2000-2009).

La publicación más antigua que aparece en Internet es del año 2000, y cuenta con datos históricos a partir de 1994, por lo que la información cubre en su mayor parte el periodo 1994-2008. La información restante, de 1988 a 1993, se obtuvo de la misma publicación de La Industria Automotriz en México pero con la diferencia que sólo está disponible en versión impresa y para consulta interna en la biblioteca del INEGI.

Los datos recopilados son: Compañía, marca, procedencia (nacional o importado), categoría (compacto, subcompacto, de lujo o deportivo) y la cantidad de autos vendidos por año.

En la recopilación de datos de las distintas publicaciones, así como de las distintas secciones de una misma publicación, se encontraron invariablemente errores en las cantidades de vehículos vendidos y su procedencia, lo cual fue corregido al hacer una comprobación desglosada por totales y subtotales de ventas, ya sea a nivel nacional, por marca y categoría, etc.

En el caso específico del periodo 1988-1993, la información de las ventas nacionales de camionetas se encuentra agrupada por fabricante, por lo que para hacer el desglose por modelo de vehículo se recurrió a la base de datos de la consultora Melgar de México, la cual difiere de la base del INEGI por contemplar una tasa de desecho vehicular pero con un mayor desglose para el periodo en cuestión, por lo que fue utilizada como base para determinar los porcentajes de ventas de cada vehículo por fabricante.

En la publicación de la IAM, también se tiene las ventas totales por entidad federativa y categoría, donde se puede obtener el porcentaje correspondiente para el Distrito Federal y el Estado de México; no obstante, se solicitó al INEGI un tabulador especial en donde se especifican los mismos datos que se tienen a nivel nacional pero sólo para el DF y el EdoMex.

b) Características de las ventas de vehículos nuevos

El análisis de la evolución de las ventas de vehículos nuevos de pasajeros por categoría, se realizó mediante la aplicación de un filtro a la base de datos de vehículos (elaborada en Excel), a fin de obtener subtotales por año-categoría. En el cálculo del total de vehículos de pasajeros fueron excluidas las camionetas de las clases CL1, CL2, CL3 y CL4, por considerarse transporte de carga, quedando sólo los vehículos clasificados como: subcompactos, compactos, deportivos, de lujo y de uso múltiple. Finalmente la información obtenida es tabulada de manera que sea posible graficar los datos.

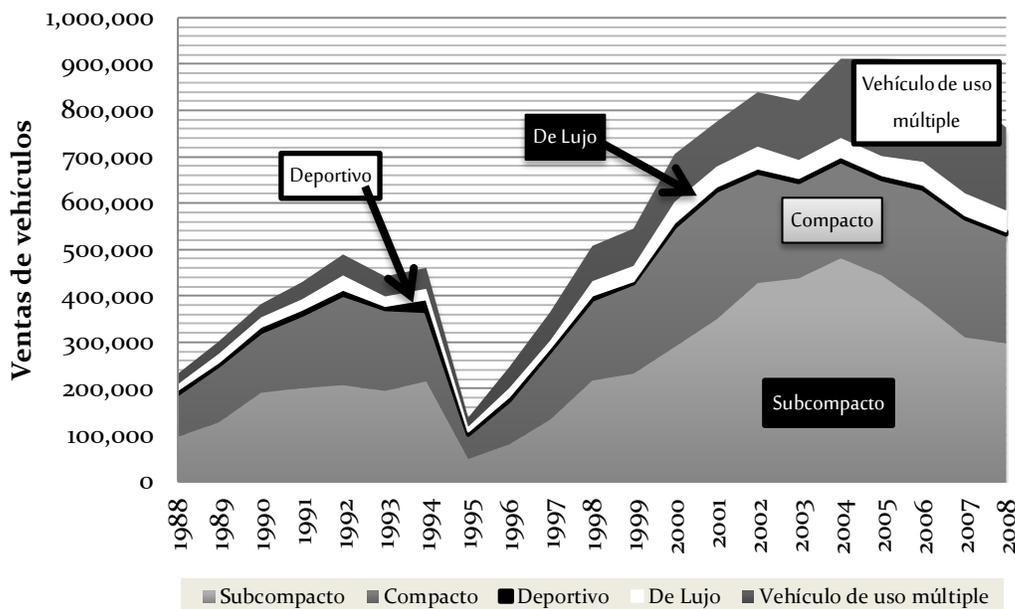


Figura 7. Evolución de las ventas de vehículos particulares en México.

En los 20 años del periodo de análisis (1988-2008), las ventas de vehículos de pasajeros en el país se compone principalmente de autos subcompactos y compactos, con 77% de las ventas totales en promedio (Figura 7); una pequeña proporción de autos de lujo y deportivos, con 8% en promedio; y los vehículos de uso múltiple con 15% de las ventas totales en promedio, aunque los vehículos de uso múltiple poco a poco han incrementando su participación en el mercado mexicano al pasar de 9% en 1988 a 24% en 2008, disminuyendo esencialmente la participación de los autos subcompactos y compactos al caer de 81% en 1988 a 70% en 2008, en su conjunto.

En un análisis más detallado sobre las características del mercado de la venta de autos nuevos en el país, se realizaron mayores filtros para determinar los cambios en la evolución del número de fabricantes, distribuidores, modelos y versiones para cada categoría. En las Figuras 8 y 9 se presentan los casos más interesantes, autos subcompactos y vehículos de uso múltiple, respectivamente.

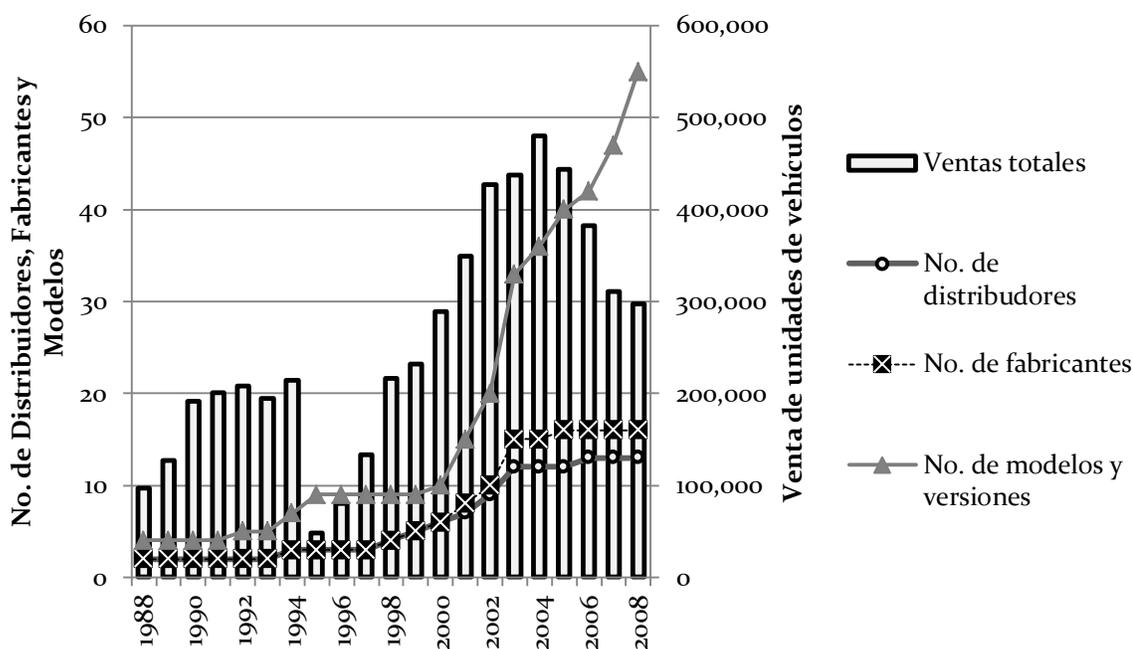


Figura 8. Ventas de autos subcompactos en México, 1988-2008.

En 1988 había sólo dos marcas que vendían autos subcompactos con tres modelos básicamente: el legendario “vochito” (sedan) y el Golf de VW y el Tsuru de Nissan (Figura 8), al paso de varios años se fueron agregando algunos modelos americanos de Chevrolet y Ford, presentando un crecimiento exponencial en 2003 con 33 modelos y 15 marcas provenientes de Estados Unidos (Pontiac, Opel, Smart), Europa (Peugeot, Seat, Mini, Renault, Fiat), y Asia (Toyota, Mitsubishi, Hyundai), sin dejar de matizar el tema de consorcio entre las marcas que distorsionan su origen. A finales de 2008 se cuenta con 55 modelos y 16 marcas.

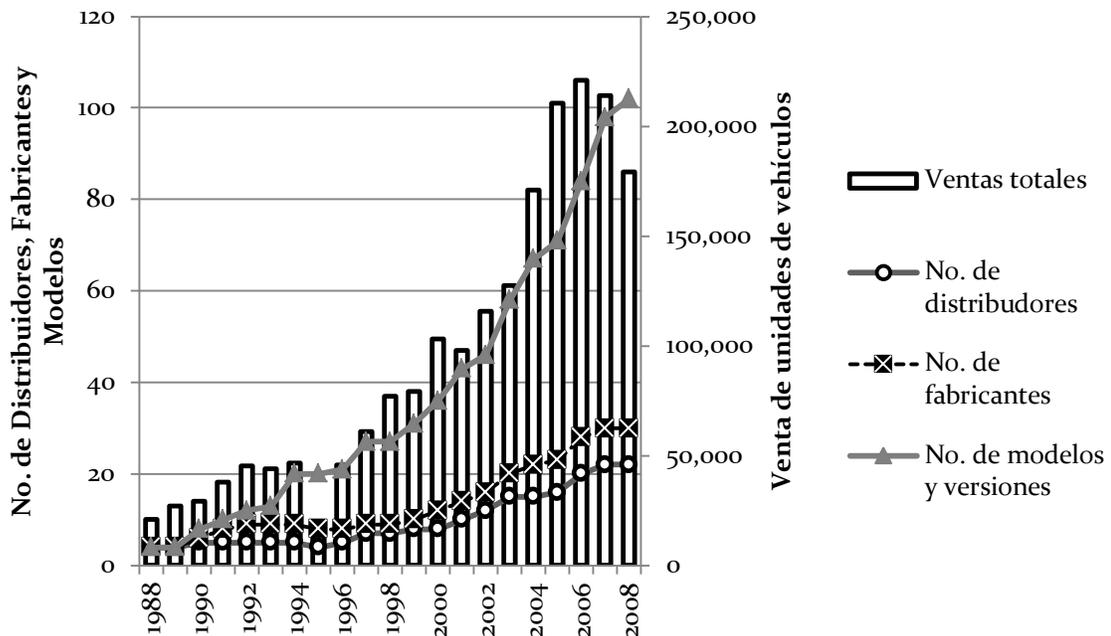


Figura 9. Ventas de vehículos de uso múltiple en México, 1988-2008.

Por su parte, la cantidad de modelos y marcas de vehículos de uso múltiple presenta un crecimiento continuo, que inicia con 4 modelos y 4 marcas en 1988, hasta alcanzar la disponibilidad de 106 modelos y 30 marcas en 2008 (Figura 9), lo que representa aproximadamente el doble de marcas y modelos que se ofrecen en el segmento de autos subcompactos.

3.3. Rendimientos de combustible

La información de rendimientos oficiales de combustible de automóviles y camiones ligeros comercializados en México es conjuntada por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, dentro del marco del Convenio de Concertación sobre Eficiencia Energética de Vehículos Automotores Comercializados en el País, firmado por la SENER, SE, SEMARNAT, CONAE y la AMIA.

Otra fuente importante de rendimientos de combustible es la realizada por la U.S. *Environmental Protection Agency* y U.S. *Department of Energy* en su publicación anual de *Fuel Economy Guide*.

a) Bases de información

Con respecto a los rendimientos de combustible de automóviles y camiones ligeros comercializados en México, se analizó en primera instancia la información recabada por la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE, 2002-2008).

Al realizar la correlación de las bases de datos de ventas con rendimientos de vehículos de CONUEE, reveló que existe una amplia variedad de vehículos vendidos en México que no son considerados en la base de datos de rendimientos oficiales, por lo que fue necesario buscar otras fuentes de información como la realizada por la EPA y el DOE (EPA-DOE, 2000-2008), en su publicación anual de *Fuel Economy Guide* (Guía de Rendimiento de Combustible).

Cabe mencionar que en la práctica muchos de los fabricantes ofrecen un nuevo modelo meses antes de iniciar el año, encontrándose datos de ventas de vehículos un año antes de salir dicho modelo, por lo que en estos casos se tomaron los mismos valores de rendimiento de combustible. Una situación similar sucede cuando un modelo deja de producirse y se encuentran aún datos de ventas en años posteriores, de uno a dos años normalmente, aplicándose el mismo criterio.

A partir de 2008, la EPA introdujo una nueva metodología para estimar los rendimientos de combustible que reflejan los efectos de: mayor velocidad y aceleración, uso del aire acondicionado y las temperaturas más frías en el exterior. La modificación de la metodología redujo los rendimientos en un promedio de 10% para la ciudad, 7% para carretera y 8% en el combinado (ver ejemplo en la Tabla 3).

Tabla 3. Comparativo de Rendimientos (km/l) CONUEE-EPA, Focus sedán de Ford.

Características técnicas	Año	Rendimiento CONUEE			Rendimiento EPA oficial			Rendimiento EPA nuevo		
		Ciudad	Carretera	Combinado	Ciudad	Carretera	Combinado	Ciudad	Carretera	Combinado
110 HP – 5,000 rpm, 2.4 litros – 4L, Manual 5 velocidades.	2002	11.20	18.00	14.26	9.35	13.18	11.07	8.50	12.33	10.22
110 HP – 5,000 rpm, 2.4 litros – 4L, Manual 5 velocidades.	2003	11.20	18.00	14.26	9.35	13.18	11.07	8.50	12.33	10.22
130 HP – 5,300 rpm, 2.4 litros – 4L, Manual 5 velocidades.	2004	11.60	19.30	15.07	9.35	13.18	11.07	8.50	12.33	10.22
136 HP – 6,000 rpm, 2.4 litros – 4L, Manual 5 velocidades.	2005	8.55	14.70	11.32	9.35	13.18	11.07	8.50	12.33	10.22
136 HP – 6,000 rpm, 2.4 litros – 4L, Manual 5 velocidades.	2006	11.40	15.60	12.80	9.78	14.45	11.88	8.50	13.18	10.61
136 HP – 6,000 rpm, 2.4 litros – 4L, Manual 5 velocidades.	2007	10.20	13.50	10.80	9.78	14.45	11.88	8.50	13.18	10.61
140 HP – 6,000 rpm, 2.4 litros – 4L, Manual 5 velocidades.	2008	10.83	17.43	13.80	8.50	13.18	10.61	8.50	13.18	10.61

Al comparar los rendimientos oficiales de combustible de CONUEE y los rendimientos oficiales de combustible de EPA (nueva metodología), se encontró que CONUEE reporta un rendimiento de combustible (km/litro) para la ciudad 14% mayor al reportado por EPA, 23% mayor para carretera y 20% mayor para el combinado. Estos porcentajes se utilizarán como factores de homologación entre las diferentes bases de información.

b) Determinación de los rendimientos de combustible

El rendimiento de combustible (RC) y las ventas de vehículos de pasajeros es analizada por tipo de automóvil (subcompacto, compacto, de lujo y deportivo), y vehículo de uso múltiple; mediante la introducción del Promedio de Rendimiento de Combustible por Categoría (PRECCA).

El Promedio de Rendimiento de Combustible por Categoría "PRECCA" (Ecuación 3), se calcula de manera similar al PREMCE (Ecuación 1), pero en lugar de hacerlo por empresa se realiza por categoría, además se emplean las ventas reales en lugar de las ventas proyectadas y para el caso del RC de cada modelo se utilizan las tres bases de información: a) Con datos de RC Mezcla (EPA-CONAE) sin la aplicación de los factores de homologación; b) Con datos RC EPA Nvo., es decir que los modelos con datos de CONAE son transformados a su equivalente de EPA Nvo. mediante los factores de homologación; y c) Con datos de RC CONAE, donde los modelos con datos de EPA Nvo. son transformados a su equivalente de CONAE mediante los factores de homologación.

$$PRECCA = \sum_i RCi \left(\frac{Vi}{Vt} \right) = \sum_i RCi (Pi) \dots \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

PRECCA expresado en km/litro

RCi = Rendimiento combinado de combustible del modelo *i*

Vi = Ventas del modelo *i*

Vt = Ventas totales de la categoría

Pi = Participación del modelo *i* en las ventas totales (= Vi/Vt)

En la Figura 10 se presentan los escenarios del PRECCA para automóviles subcompactos con las tres bases de información de RC. En primer lugar se resaltan los cambios engañosos que experimenta el PRECCA con base RC Mezcla, donde en el periodo de 1988-1993 se muestra cargado a la curva de RC EPA Nvo., incluso con incrementos cuando hay una disminución en las otras curvas, para luego desplazarse con un fuerte incremento a la curva de RC CONAE que persiste hasta el final del periodo (1995-2008), lo que denota que en los primeros años los

modelos más vendidos cuentan con datos de rendimiento que provienen de los informes de EPA y luego de CONAE, por lo que los cambios se deben básicamente a la influencia de las bases de información y no a cambios reales en el RC.

En segundo lugar se resalta la diferencia del PRECCA con datos de RC CONAE que varía entre 14.4 y 16.0 km/l, y del PRECCA con datos de RC EPA Nvo. que varía entre 11.7 y 13.0 km/l, lo que significa que en el caso de los automóviles subcompactos, el PRECCA base RC CONAE está entre 17 y 26% por encima del PRECCA base EPA Nvo.

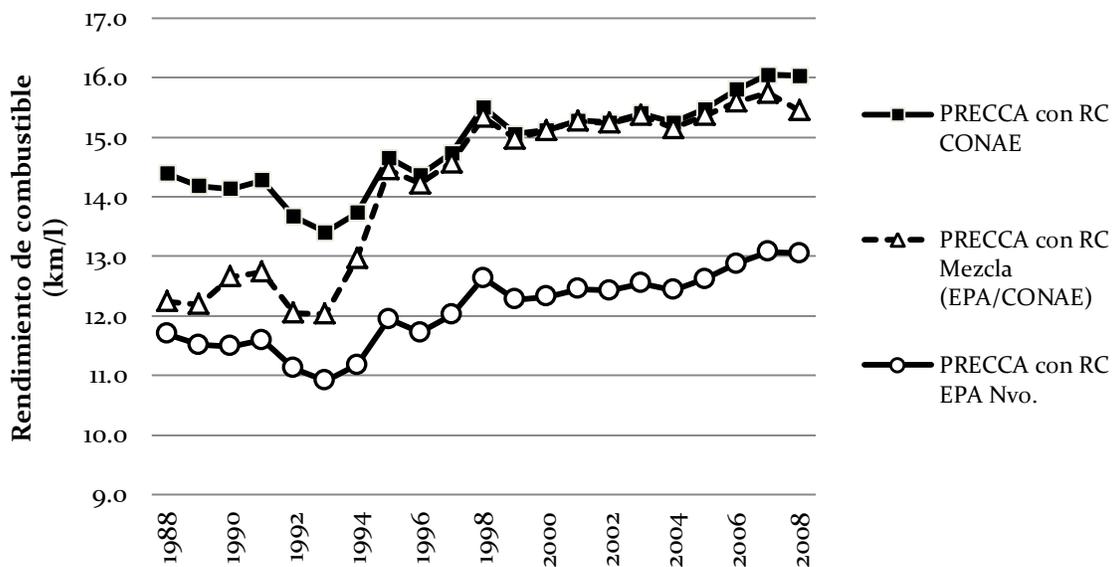


Figura 10. Evolución del PRECCA, Automóviles Subcompactos, 1988-2008.

Aunque no se encontraron argumentos oficiales sobre las diferencias de rendimientos entre las bases de información de EPA y CONAE, es posible pensar que en los primeros años (de 1988 a 1991) los valores de rendimiento que se reportaban en México eran ajustados hacia arriba con el propósito de cumplir con el decreto del PREMCE, pues éste permitía una tolerancia de hasta 20% con respecto al valor real; sin embargo, la duda surge cuando el PREMCE deja de surtir efecto a principios de los 90 y aún así los reportes que entregan las empresas automotrices a la CONAE (de 2002 a 2008) continúan por encima de los registrados por la EPA.

En este sentido, los rendimientos de combustible reportados por la EPA se aceptan como válidos para la evaluación del PRECCA, dado que mientras EPA realiza las pruebas en sus propios laboratorios para obtener los valores de rendimiento, en México son las empresas automotrices las que reportan los valores a la CONAE, no obstante que los resultados de las pruebas están certificados por la PROFEPA.

En la Figura 11 se presenta la evolución del PRECCA con base EPA Nvo., en donde se observa que todos los vehículos de pasajeros han aumentado su rendimiento aproximadamente 1 (uno) km/l en un lapso de 20 años. En el caso de los autos subcompactos, los valores superan en la mayor parte del periodo la meta de 11 km/l que establecía el PREMCE para 1990; seguidos muy de cerca de los autos compactos con valores que fluctúan alrededor de 11 km/l. En el otro extremo, se encuentran los vehículos de uso múltiple (VUM) que presentan el rendimiento más bajo.

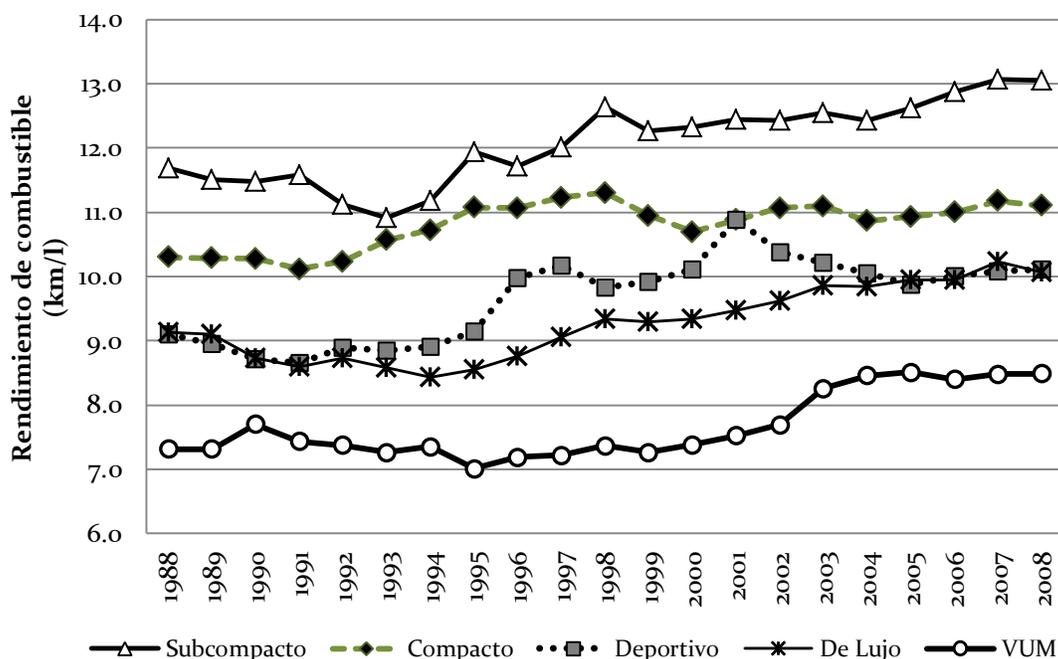


Figura 11. Evolución del PRECCA en vehículos de transporte de personas Base EPA nuevo.

3.4. Correlación ventas - rendimientos de combustible

La correlación de las ventas con los rendimientos de combustible demandó el registro de más datos sobre las especificaciones técnicas del sistema motriz a fin de identificar con mayor precisión el modelo y la versión de vehículo, dado que el rendimiento de combustible se ve afectado según la potencia y revoluciones del motor; número, tamaño y alineación de los cilindros; tipo de aspiración (natural, turbocargado o supercargado); tipo de transmisión (manual o automática); entre otros como el tipo de carrocería (sedán, coupe, hatchback, van, etc.).

Las especificaciones técnicas del sistema motriz que presenta la CONUEE en sus bases de datos no cuentan con toda la información, puesto que algunos fabricantes reportan datos de potencia del motor, tamaño y número de cilindros, mientras que otros sólo el modelo (Figura 12), incluso en algunos años no aparecen datos de un fabricante o modelo en específico, dificultando la identificación del vehículo año con año; mientras que en el caso de la EPA, además de contar con una base de datos que cubre un amplio periodo (1984-2010), las especificaciones técnicas las presenta de manera consistente, quedando a deber sólo los datos de potencia y revoluciones del motor.

Modelo 2002	Versiones				Rendimiento en Laboratorio [km/l] *		
	Transmisión	Motor [L]	Cilindros	+	Ciudad	Carretera	Combinado*
Dodge							
Atos by Dodge					14.43	20.08	16.97
Neon SE					11.50	16.02	13.53
Neon LE, LX					10.07	14.03	11.85
Neon R/T					11.25	15.66	13.23
Stratus SE	Manual				11.88	16.53	13.97
Stratus SE	Automático				8.73	12.15	10.27
Stratus R/T					9.07	12.64	10.68

Figura 12. Muestra de falta de especificaciones técnicas, Ejemplo marca Dodge.

Fuente: Rendimientos Oficiales de Combustible 2002, CONUEE.

La información complementaria, de potencia y revoluciones del motor, se obtuvo de las propias páginas electrónicas de los fabricantes de vehículos y de empresas especializadas en ventas de vehículos, como: Top Car Guide y Autos Yahoo, las cuales contienen una recopilación histórica de las especificaciones de vehículos usados y sus datos técnicos.

Cabe señalar que los vehículos más vendidos en México no son ofrecidos en Estados Unidos, tales como el Astra de GMC, Tsuru de Nissan o el Sedán de VW; por lo que a pesar de que se tomó como fuente principal la información presentada en la EPA, los reportes de rendimientos oficiales de combustible de CONUEE cobran singular importancia en el momento de hacer el análisis global, debido al peso específico que tienen con respecto a las ventas.

La base de datos de ventas de vehículos de la Industria Automotriz en México fue tomada como guía para la captura de las especificaciones técnicas de los diferentes modelos de vehículos vendidos a lo largo de 1988 a 2008, generando una base de 681 modelos, entre autos y camionetas. Cantidad suficientemente elevada si consideramos los tiempos que lleva realizar la correlación de la información de cada uno de los modelos, por lo que se tomó la decisión de registrar sólo los modelos que representen el mayor porcentaje de unidades vendidas durante el periodo analizado.

Para el establecimiento del porcentaje, se utiliza el principio de Pareto, también conocido como la regla del 80/20, que en nuestro caso significaría que la correlación se aplicará sólo al 20% de los modelos que en su conjunto representen el 80% de las ventas. No obstante, en los autos como en las camionetas existen modelos (p.e. autos compactos y autos deportivos) que presentan diferencias significativas en el rendimiento de combustible, por lo que la aplicación de la regla 80/20 se realiza con base en la clasificación definida por la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de vehículos: Autos y Camionetas.

Clasificación	Definición	Aplicando la regla 80/20
Autos Subcompactos	Unidades con una distancia entre ejes hasta 2,475 mm; con un motor de 4 cilindros de hasta 1,800 cm ³ de desplazamiento y potencia hasta 110 HP.	Modelos con ventas mayor o igual a 50 mil unidades, lo que representa el 88% del total (cumplen 21 de 75 modelos).
Autos Compactos	Unidades con una distancia entre ejes de 2,476 hasta 2,700 mm; con motores de 4 ó 6 cilindros de 2,500 hasta cm ³ de desplazamiento y potencia de 110 hasta 135 HP.	Modelos con ventas mayor o igual a 20 mil unidades, lo que representa el 83% del total de ventas (cumplen 32 de 119 modelos)
Autos de Lujo	Unidades con una distancia entre ejes de 2,601 hasta 3,000 mm; con motores de 4, 6, 8 ó 12 cilindros de 3,200 a 6,000 cm ³ de desplazamiento y potencia de 136 hasta 394 HP.	Modelos con ventas mayor o igual a 3 mil unidades, lo que representa el 85% del total (cumplen 33 de 192 modelos).
Autos Deportivos	Unidades con una distancia entre ejes de 2,601 hasta 3,000 mm; con motores de 4, 6 u 8 cilindros de 2,000 a 4,600 cm ³ de desplazamiento y potencia de 160 a 295 HP, estas unidades también poseen dispositivos especiales en su motor como: turbo cargadores o un mayor número de válvulas en cada cilindro.	Modelos con ventas mayor o igual a 3 mil unidades, lo que representa el 83% del total (cumplen 15 de 42 modelos).
Camiones ligeros (CL1)	Camiones ligeros (grupo uno) cuyo peso bruto vehicular es de hasta 2,722 kg y con peso de prueba (PP) de hasta 1,701 kg.	Modelos con ventas mayor o igual a 25 mil unidades, lo que representa el 82% del total (cumplen 12 de 39 modelos).
Camiones ligeros (CL2)	Camiones ligeros (grupo dos) cuyo peso bruto vehicular es de hasta 2,722 kg y con peso de prueba (PP) mayor de 1,701 y hasta 2,608 kg.	Modelos con ventas mayor o igual a 20 mil unidades, lo que representa el 86% del total (cumplen 10 de 29 modelos).
Camiones ligeros (CL3)	Camiones ligeros (grupo tres) cuyo peso bruto vehicular es mayor de 2,722 y hasta 3,856 kg y con peso de prueba (PP1) de hasta 2,608 kg.	Modelos con ventas mayor o igual a 15 mil unidades, lo que representa el 84% del total (cumplen 7 de 33 modelos).
Camiones ligeros (CL4)	Camiones ligeros (grupo 4) cuyo peso bruto vehicular es mayor de 2,722 y hasta 3,856 kg y con peso de prueba (PP1) mayor de 2,608 y hasta 3,856 kg.	No se presentan
Vehículo de uso múltiple o utilitario (VU)	Vehículo automotor diseñado para el transporte de personas y/o productos, con o sin chasis o con equipo especial para operar ocasionalmente fuera del camino. Para efectos de prueba se clasificarán igual que los camiones ligeros.	Modelos con ventas mayor o igual a 10 mil unidades, lo que representa el 84% del total (cumplen 43 de 144 modelos).

Fuente: Asociación Mexicana de la Industria Automotriz.

3.5. Análisis de los cambios en el rendimiento de combustible

En el análisis de los cambios en el rendimiento de combustible del parque de vehículos nuevos de pasajeros que se comercializaron en México durante 1988 – 2008, se contemplan dos aspectos inherentes. Por un lado, la endeble legislación en energía del gobierno federal en la industria automotriz, como el decreto del PREMCE; y por otro lado, el impacto que tiene la composición de las ventas de vehículos con mayor o menor rendimiento de combustible en los cambios de la eficiencia global del parque, calculada mediante la aplicación de los métodos índices de descomposición multiplicativa y de índices de descomposición de Laspeyres.

a) Metodología de índices de cambio

Con la aplicación de la metodología de índices de cambio se busca valorar el efecto de las ventas por categoría de los autos con mayor o menor rendimiento de combustible sobre el rendimiento global del parque de autos nuevos en un periodo dado. En primer lugar, aplicando el método de descomposición multiplicativa (Ang & Zhang, 2000); y posteriormente, utilizando el método de índices de descomposición de Laspeyres (Ang & Zhang, 2000) para expresar los cambios en términos de estructura y de eficiencia.

De la Ecuación 3 se deduce la ecuación del Rendimiento Total (RT) para el parque de vehículos de pasajeros nuevos:

$$RT = \sum_i Ri (Pi) \dots \text{(Ecuación 4)}$$

Donde:

Ri = Rendimiento promedio de combustible de la categoría de vehículos i

Pi = Participación de la categoría de vehículos i en las ventas totales del parque (= V_i/V_t)

V_i = Ventas de la categoría i

V_t = Ventas totales del parque de vehículos

Aplicando el método de descomposición multiplicativa (Dm) en la Ecuación 4 para el periodo de 1988-2008:

$$\left[\frac{RT,t}{RT,0} \right]_{Dm} = \frac{\sum_i Ri,t (Pi,t)}{\sum_i Ri,0 (Pi,0)} \dots \text{(Ecuación 5)}$$

Donde:

0 = periodo base o inicial = 1988

t = periodo final = 2008

Mediante el método de índices de Laspeyres, se aísla el impacto de una variable permitiendo el cambio de la variable específica y manteniendo las demás variables en sus valores respectivos del periodo base. En el índice de cambio estructural (St) se aísla el impacto de la variable de rendimiento (Ri) de la Ecuación 5 y se permite el cambio de la variable de participación en ventas (Pi):

$$\left[\frac{RT,t}{RT,0} \right]_{St} = \frac{\sum_i Ri,0 (Pi,t)}{\sum_i Ri,0 (Pi,0)} \dots \text{(Ecuación 6)}$$

En el índice de cambio de eficiencia (Ef) se aísla el impacto de la variable de participación en ventas (Pi) de la Ecuación 5 y se permite el cambio de la variable de rendimiento (Ri):

$$\left[\frac{RT,t}{RT,0} \right]_{Ef} = \frac{\sum_i Ri,t (Pi,0)}{\sum_i Ri,0 (Pi,0)} \dots \text{(Ecuación 7)}$$

b) Análisis de resultados

La determinación de los índices de cambio Dm , St y Ef , para el periodo 1988-2008, se realiza con los datos y relaciones presentas en la Tabla 5. En las columnas de participación (Pi) del año 1988 y 2008, se resalta el aumento que tienen las camionetas de uso múltiple al pasar de 9.04 a 23.53%, lo cual se ve reflejado en las ponderaciones de las columnas de Relación del periodo inicial y final con 0.66 y 2.00, respectivamente.

La ejecución de la Ecuación 5 nos da como resultado que el índice de cambio Dm es igual a 1.06, que en términos porcentuales significa que la eficiencia de los vehículos nuevos de pasajeros aumentó 6%. Sin embargo, al calcular el índice de cambio estructural (St) con la Ecuación 6 se obtiene un valor de 0.96, lo que representa una disminución de 4% en la eficiencia de los vehículos nuevos de pasajeros, debido a una mayor participación de vehículos con rendimientos bajos, conclusión que se confirma con el cálculo del índice de cambio de eficiencia (Ef) mediante la Ecuación 7, donde el resultado de 1.10 nos indica que si se hubiera mantenido la misma participación en las ventas de 1988, la eficiencia de los vehículos nuevos de pasajeros en el 2008 hubiera aumentado 10%.

Tabla 5. Análisis de índices de cambio: Datos y Relaciones.

Categoría de vehículo	Año 1988			Año 2008			Relaciones			
	Rend. $R_{i,0}$	Ventas $V_{i,0}$	Part. $P_{i,0}$	Rend. $R_{i,t}$	Ventas $V_{i,t}$	Part. $P_{i,t}$	P. inicial $R_{i,0} * P_{i,0}$	P. final $R_{i,t} * P_{i,t}$	Estruct. $R_{i,0} * P_{i,t}$	Efic. $R_{i,t} * P_{i,0}$
Subcompacto	11.69	96,797	41.9%	13.05	297,607	39.0%	4.90	5.10	4.57	5.47
Compacto	10.30	91,079	39.4%	11.11	233,866	30.7%	4.06	3.41	3.16	4.38
Deportivo	9.10	8,172	3.5%	10.12	6,272	0.8%	0.32	0.08	0.07	0.36
De lujo	9.14	14,018	6.0%	10.07	45,115	5.9%	0.55	0.60	0.54	0.61
Uso múltiple	7.31	20,888	9.0%	8.49	179,383	23.5%	0.66	2.00	1.72	0.77
Total	---	230,954	100%	---	762,243	100%	10.50	11.18	10.06	11.59

Los resultados demuestran que de 1988 a 2008, la eficiencia de los vehículos nuevos de pasajeros aumentó en términos reales 6%; sin embargo, la penetración de las camionetas de uso múltiple (con bajo rendimiento de combustible) en el mercado mexicano le han venido ganando terreno a los autos subcompactos y compactos (con mayor rendimiento), por lo que el índice de cambio estructural de Laspeyres de 0.96, nos dice que si se hubiera mantenido la misma composición de ventas de 1988, la eficiencia de los vehículos nuevos de pasajeros hubiera sido 4% mayor, es decir, 10% en lugar de 6% en términos reales. Sin embargo, ahora con el establecimiento de la NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013 (SEMARNAT, 2013), la estructura de la flota de vehículos podría cambiar con miras a lograr estándares internacionales de rendimientos de combustible, así como de emisiones contaminantes en vehículos nuevos de pasajeros.

Capítulo III. Metodología y fuentes de información

La metodología comprende el desarrollo de un modelo de abajo hacia arriba para estimar la tendencia histórica de la demanda de energía, los contaminantes del aire y las emisiones de GEI causadas por los vehículos de pasajeros que circulan en la Zona Metropolitana del Valle de México durante el periodo de 1990-2008, y generar escenarios futuros al 2028 (Figura 13).

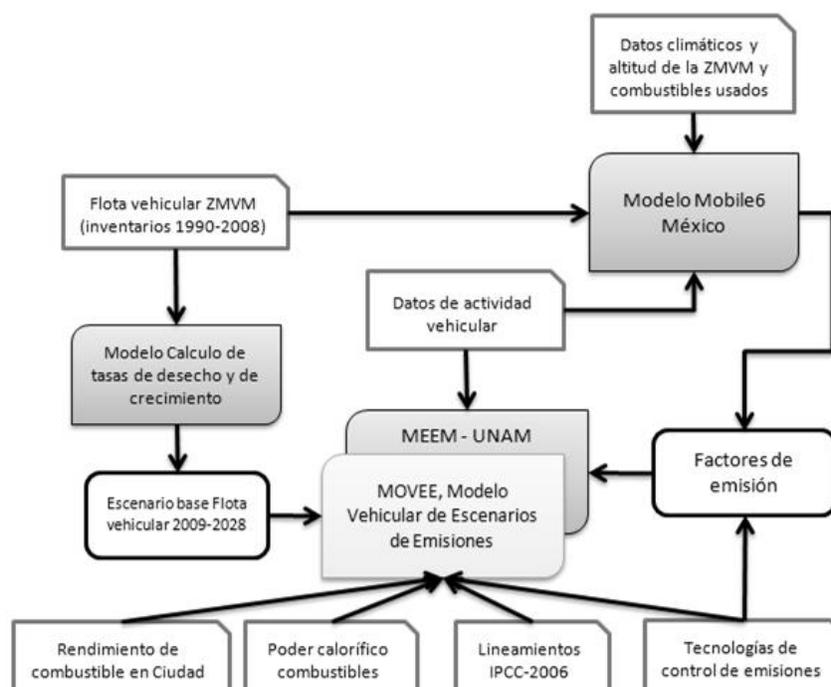


Figura 13. Diagrama esquemático del modelo MOVEE

El modelo denominado Modelo Vehicular de Escenarios de Emisiones (MOVEE), utiliza como plataforma el Modelo de Energía y Emisiones para México (MEEM) desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Sheinbaum & Masera, 2000), así como diferentes fuentes de información (CONUEE, 2002-2008) (EPA-DOE, 2000-2008) (INE, 2006) (INEGI, 2000-2009) (INEGI, 2004-2006) (SENER-SIE, 2014) (SMA-GDF, 2010a) (SMA-GDF, 2010b) (Sheinbaum-Pardo & Chavez-Baeza, 2011), así como metodologías relacionadas con la energía, contaminantes del aire y las emisiones de GEI del sector transporte (Harikesh & Chandra, 2000) (NARSTO, 2005) (IPCC, 2006a) (IPCC, 2006b) (INE, 2009) (Sheinbaum, García, Solís, & Chávez, 2009).

Los datos insumo del modelo MOVEE son los inventarios y prospectivas de la flota vehicular del Distrito Federal y de la zona conurbada del Estado de México desagregados por año modelo, tipo de vehículo, tipo de combustible, características tecnológicas, el nivel de actividad vehicular y otros factores locales para determinar tanto los factores de emisión de GEI como otros factores de emisión de gases contaminantes que se obtienen mediante el modelo denominado Mobile6-México³ que fue adaptado y modificado a las características de la flota vehicular del país.

Asimismo, en la evaluación de la flota vehicular de la ZMVM se desglosa los diferentes tipos de vehículos para el transporte de pasajeros: automóviles particulares, motocicletas y vehículos de servicio público y privado: taxis, combis, microbuses, autobuses concesionados, autobuses escolares y de personal, autobuses RTP (Red de Transporte de Pasajeros del Distrito Federal), autobuses para discapacitados, autobuses de turismo, autobuses de pasaje y el Metrobús.

Mediante el modelo MOVEE se obtienen los escenarios de los siguientes productos:

- **Emisiones de contaminantes Criterio:**
 - ✓ Material Particulado (PM₁₀ y PM_{2.5})
 - ✓ Bióxido de Azufre (SO₂)
 - ✓ Monóxido de Carbono (CO)
 - ✓ Óxidos de nitrógeno (NO_x)
 - ✓ Compuestos Orgánicos Totales (COT)
 - ✓ Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)
 - ✓ Amoníaco (NH₃)
- **Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI):**
 - ✓ Metano (CH₄)
 - ✓ Óxido nitroso (N₂O)
 - ✓ Bióxido de carbono (CO₂)
- **Consumo energético**

³ Los factores de emisión obtenidos del Mobile6-México fueron proporcionados por la SMA-GDF.

1. Zona de estudio

Comúnmente el término de Ciudad de México se refiere solamente al Distrito Federal integrada por sus 16 delegaciones; sin embargo, derivado de la urbanización y expansión física del éxodo campo-ciudad, algunos autores utilizan el término para referirse a la Zona Metropolitana del Valle de México, integrada por las 16 delegaciones del DF y los municipios conurbados del Estado de México e incluso del Estado de Hidalgo, variando la cantidad de municipios según la fuente y la fecha en que se establezca.

De acuerdo con la asociación mundial de las grandes metrópolis, para 2003 la metrópolis de la Ciudad de México ocupó el segundo lugar en población total metropolitana con 18.7 millones, sólo después de Tokio que contaba con 35 millones y antes que Nueva York con 18.3 millones. Cabe señalar que la población de la metrópolis de la Ciudad de México, incorpora los habitantes de las 16 delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios conurbados del Estado de México (COESPO, 2009).

Ante la necesidad de establecer la delimitación sistemática de las zonas metropolitanas en México, en 2004 se crea un grupo interinstitucional conformado por la Secretaría de Desarrollo Social, el Consejo Nacional de Población, y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2007), que define como zona metropolitana:

“... al conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica; en esta definición se incluyen además aquellos municipios que por sus características particulares son relevantes para la planeación y política urbanas”

Asimismo, este grupo interinstitucional señala que la importancia de identificar y delimitar las zonas metropolitanas obedece a tres objetivos generales:

- Establecer un marco de referencia común que contribuya a fortalecer y mejorar las acciones de los tres órdenes de gobierno en la planeación y gestión del desarrollo metropolitano.
- Contar con una base conceptual y metodológica, que dé cuenta en forma exhaustiva y sistemática de la configuración territorial de las zonas metropolitanas y proporcione criterios claros para su actualización.
- Disponer de una definición común que permita la generación de información estadística y geográfica, así como de estudios y proyectos de investigación relevantes para la toma de decisiones en diferentes ámbitos del desarrollo.

Conforme a la definición y criterios de las zonas metropolitanas, a la fecha se tienen tres diferentes delimitaciones de la Zona Metropolitana del Valle de México realizadas por distintos autores y autoridades en la materia (Tabla 6); no obstante, todos coinciden en que la ZMVM está integrada por las 16 delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios del Estado de México; variando sólo en el caso del Estado de Hidalgo, en cuanto al número de municipios que la integran.

Tabla 6. Conformación de la ZMVM de acuerdo con diferentes autores.

	Municipios y delegaciones por entidad federativa		
	DF	EdoMex	Hidalgo
Declaratoria *	16	59	0
SEDESOL-CONAPO-INEGI **	16	59	1
Comisión Ejecutiva de Coordinación Metropolitana ***	16	59	29

*Se refiere a la Declaratoria de la Zona Metropolitana del Valle de México publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal con fecha 23 de enero de 2005.

**Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2004.

***Primera Sesión Plenaria de la Comisión Ejecutiva de Coordinación Metropolitana Nueva Época con fecha 17 de junio de 2008, realizada por los gobiernos del Estado de México, del Estado de Hidalgo y del Distrito Federal.

Fuente: COESPO, 2009.

En nuestro caso de estudio, y dada la información recopilada, se toma la definición establecida en la Declaratoria de la Zona Metropolitana del Valle de México publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal con fecha 23 de enero de 2005 (GDF, 2005), que considera 16 delegaciones del DF y 59 municipios del Estado de México (Figura 14 y Tabla 7).



Figura 14. Mapa de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2006.
Fuente: (SMA-GDF, 2008).

De los 59 municipios del Estado de México, 35 se encuentran inmersos en el proceso de conurbación físico - espacial con el territorio del Distrito Federal, y 24 municipios más que, aun cuando no están conurbados físicamente, presentan un alto grado de crecimiento urbano con tendencia, influencia funcional, movilidad poblacional y relación directa con las actividades de la metrópoli, generando una interdependencia de operación social y regional que los convierte en parte de la zona metropolitana, en especial por su importancia en la planeación del escenario objetivo metropolitano en su conjunto durante los próximos 20 años (GDF, 2005).

Tabla 7. Delegaciones y municipios de la ZMVM y su crecimiento de población.

No.	Clave	Delegación/ Municipio	Población (en miles)					Sup. (Km ²)	DMU* (hab/ha)	
			1990	1995	2000	2005	2010		2000	2005
Zona Metropolitana del Valle de México			15,534	17,258	18,350	19,183	20,019	7,746	170.7	166.0
			<i>TCMA**</i>	2.1%	1.2%	0.9%	0.9%	---	---	---
16 Delegaciones del Distrito Federal			8,236	8,489	8,605	8,721	8,851	1,484	---	---
			<i>TCMA**</i>	0.6%	0.3%	0.3%	0.3%	---	---	---
1	09002	Azcapotzalco	475	455	441	425	415	34	205.4	196.8
2	09003	Coyoacán	640	653	640	628	620	54	194.3	193.4
3	09004	Cuajimalpa de Morelos	120	137	151	174	186	70	84.6	89.3
4	09005	Gustavo A. Madero	1,268	1,257	1,236	1,193	1,186	88	211.7	204.8
5	09006	Iztacalco	448	419	411	395	384	23	226.9	218.1
6	09007	Iztapalapa	1,490	1,697	1,773	1,821	1,816	114	211.7	216.2
7	09008	La Magdalena Contreras	195	212	222	229	239	64	151.6	157.4
8	09009	Milpa Alta	64	81	97	116	131	287	36.8	42.7
9	09010	Álvaro Obregón	643	677	687	707	727	96	193.0	188.8
10	09011	Tláhuac	207	256	303	344	360	86	127.1	134.7
11	09012	Tlalpan	485	553	582	608	651	310	119.3	121.1
12	09013	Xochimilco	271	332	370	404	415	119	88.0	90.9
13	09014	Benito Juárez	408	370	360	355	385	26	149.7	145.7
14	09015	Cuauhtémoc	596	540	516	521	532	33	214.7	214.1
15	09016	Miguel Hidalgo	407	364	353	354	373	46	174.9	180.2
16	09017	Venustiano Carranza	520	486	463	447	431	34	222.8	215.7
59 Municipios del Estado de México			7,298	8,769	9,745	10,462	11,168	6,262	---	---
			<i>TCMA**</i>	3.7%	2.1%	1.4%	1.3%	---	---	---
1	15002	Acolman	43	54	61	77	137	82	32.5	39.4
2	15009	Amecameca	36	42	45	48	48	176	45.4	45.5
3	15010	Apaxco	19	21	24	26	28	79	41.4	40.7
4	15011	Atenco	21	28	34	43	56	136	48.2	48.6
5	15013	Atizapán de Zaragoza	315	427	468	473	490	84	127.8	128.0
6	15015	Atlautla	19	23	26	24	28	132	37.7	37.9
7	15016	Axapusco	16	18	21	22	26	196	26.3	23.3
8	15017	Ayapango	4	5	6	6	9	32	29.9	28.9
9	15020	Coacalco de Berriozábal	152	205	253	286	278	38	185.5	166.5
10	15022	Cocotitlán	8	9	10	12	12	27	46.1	47.0
11	15023	Coyotepec	24	31	35	39	39	50	43.8	41.5
12	15024	Cuautitlán	49	57	76	110	140	27	111.9	108.5

No.	Clave	Delegación/ Municipio	Población (en miles)					Sup. (Km ²)	DMU* (hab/ha)	
			1990	1995	2000	2005	2010		2000	2005
13	15025	Chalco	283	176	218	257	310	224	85.2	90.8
14	15028	Chiautla	15	17	20	23	26	24	22.6	20.7
15	15029	Chicoloapan	57	71	78	170	175	34	129.8	112.2
16	15030	Chiconcuac	14	15	18	20	23	5	50.8	47.6
17	15031	Chimalhuacán	242	412	491	525	614	56	154.3	160.0
18	15033	Ecatepec de Morelos	1,218	1,457	1,623	1,688	1,656	158	177.5	171.9
19	15034	Ecatzingo	6	7	8	8	9	90	9.1	10.1
20	15035	Huehuetoca	26	33	38	60	100	105	81.4	83.0
21	15036	Hueyoxtlá	26	31	33	37	40	232	18.3	19.0
22	15037	Huixquilucan	132	168	193	224	242	143	90.6	112.0
23	15038	Isidro Fabela	5	7	8	9	10	70	15.7	16.0
24	15039	Ixtapaluca	137	188	298	429	467	276	131.5	152.4
25	15044	Jaltenco	23	26	32	26	26	16	186.2	187.7
26	15046	Jilotzingo	9	12	15	14	18	117	17.1	17.8
27	15050	Juchitepec	14	17	19	21	23	137	64.5	68.4
28	15053	Melchor Ocampo	26	33	38	38	50	20	56.5	48.4
29	15057	Naucalpan de Juárez	787	840	859	821	834	151	205.3	195.8
30	15058	Nezahualcóyotl	1,256	1,234	1,226	1,141	1,111	70	257.2	231.6
31	15059	Nextlalpan	11	15	20	23	34	68	19.1	20.4
32	15060	Nicolás Romero	184	237	270	307	367	224	74.6	83.6
33	15061	Nopaltepec	5	6	8	8	9	82	13.6	14.9
34	15065	Otumba	22	25	29	30	34	198	20.4	19.5
35	15068	Ozumba	18	21	24	24	27	42	46.5	46.6
36	15069	Papalotla	2	3	3	4	4	4	17.6	18.0
37	15070	La Paz	135	179	213	233	254	34	141.2	129.9
38	15075	San Martín de las Pirámides	14	17	20	22	25	74	43.8	42.8
39	15081	Tecámac	123	148	173	271	365	152	67.9	184.9
40	15083	Temamatla	5	8	9	10	11	18	38.4	41.2
41	15084	Temascalapa	19	24	29	33	36	196	19.3	19.6
42	15089	Tenango del Aire	6	7	8	9	11	58	35.1	36.7
43	15091	Teoloyucán	42	54	67	74	63	46	41.8	45.0
44	15092	Teotihuacán	30	39	45	47	53	76	35.3	34.4
45	15093	Tepetlaoxtoc	16	19	23	26	28	148	13.1	13.7
46	15094	Tepetlixpa	13	15	17	17	18	45	33.9	30.3
47	15095	Tepetzotlán	40	54	62	68	89	195	68.0	59.9
48	15096	Tequixquiac	21	25	28	31	34	141	16.9	17.9
49	15099	Texcoco	140	173	204	209	235	404	46.9	44.3
50	15100	Tezoyuca	12	16	19	25	35	13	30.9	35.7

No.	Clave	Delegación/ Municipio	Población (en miles)					Sup. (Km ²)	DMU* (hab/ha)	
			1990	1995	2000	2005	2010		2000	2005
51	15103	Tlalmanalco	33	38	43	44	46	202	51.2	51.6
52	15104	Tlalnepantla de Baz	703	713	721	684	664	74	174.2	181.1
53	15108	Tultepec	47	76	93	110	92	28	109.4	112.1
54	15109	Tultitlán	246	361	432	473	524	65	169.9	163.8
55	15112	Villa del Carbón	27	31	38	40	45	310	18.8	18.4
56	15120	Zumpango	71	92	100	128	160	209	35.6	42.1
57	15121	Cuautitlán Izcalli	327	418	453	498	512	112	147.4	130.8
58	15122	Valle de Chalco Solidaridad	---	287	323	332	358	49	146.9	150.1
59	15125	Tonanitla	---	---	---	8	10	8	---	51.2

* DMU, Densidad Media Urbana

** TCMA, Tasa de crecimiento media anual con respecto al periodo inmediato anterior.

Fuente: Elaboración propia con datos de (SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2004) (SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2007).

De acuerdo con esta definición, la ZMVM se sitúa dentro del sistema formado por las siguientes coordenadas geográficas: al Norte, 20° 03', al Sur, 18° 56'; de latitud Norte al Este 98° 36', al Oeste 99° 40' de longitud Oeste. Abarca una superficie que representa el 0.39% del total nacional, 81% por parte del Estado de México y 19% del Distrito Federal. Gran parte de la ZMVM presenta alturas que van desde los 2,240 metros sobre el nivel del mar (msnm) en sus partes planas, hasta sus elevaciones principales, el Cerro Telapón con 4,030 msnm y el Volcán Ajusco con 3,930 msnm (Sheinbaum C. , 2008).

2. Emisiones de contaminantes criterio

Las emisiones de contaminantes criterio, debidas principalmente al proceso de emisiones del tubo del escape del vehículo, se determinan con la siguiente expresión:

$$\mathbf{EGC} = \sum_{i,j} [(FV_{i,j}) \cdot (KRV_{i,j}) \cdot (FE_{i,j})] \dots \text{(Ecuación 8)}$$

Donde:

- EGC = Emisiones de contaminantes criterio: PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO, NO_x, COV, COT, NH₃.
- FV_{*i,j*} = Flota Vehicular, cantidad de vehículos del tipo *i* que utilizan combustible *j*.
- KRV_{*i,j*} = Actividad vehicular, expresada en kilómetros anuales recorridos por vehículo de tipo *i*, que usan combustible *j*.
- FE_{*i,j*} = Factor de Emisión para el contaminante criterio, expresado en unidades de masa por distancia recorrida (g/km) por vehículos de tipo *i* que utilizan combustible *j*.
- i* = Tipo de vehículo (p. ej. automóvil, taxi, autobús).
- j* = Tipo de combustible (p. ej. gasolina, diesel, gas natural, GLP).

a) Flota vehicular (FV)

En el año 2008, la flota vehicular del transporte de pasajeros de la ZMVM estaba compuesta por más de 4.2 millones de vehículos, 68% registrados en el Distrito Federal y 32% en el Estado de México (Tabla 8). En la

Figura 15 se muestra la distribución de la flota vehicular de la ZMVM por tipo de vehículo y en la Figura 16 por tipo de combustible.

Tabla 8. Clasificación del transporte de pasajeros de la ZMVM, 2008.

Uso modal	Número de vehículos por tipo de combustible, ZMVM					No. vehículos por región	
	Gasolina	Diesel	GLP	GNC	Total	DF	EdoMex
Total	4,159,159	49,402	20,468	312	4,229,341	2,860,982	1,368,358
Auto particular	3,717,684	6,728	2,578	30	3,727,020	2,473,300	1,253,719
Taxis	156,589	38	---	---	156,627	109,308	47,319
Combis	29,021	822	20	---	29,863	2,695	27,168
Microbuses	15,774	240	17,800	282	34,096	21,427	12,669
Motocicletas	237,808	---	---	---	237,808	219,201	18,607
Metrobús	221	221	---	---	221	221	---
Autobús (total)	2,283	41,353	70	---	43,706	34,830	8,876
RTP	---	1,199	---	---	1,199	1,199	---
Discapacit.	---	71	---	---	71	71	---
Escolar	37	178	1	---	216	52	164
Concesionado	774	12,742	69	---	13,585	7,442	6,143
Turismo	1,472	9,475	---	---	10,947	10,097	850
Pasaje	---	17,688	---	---	17,688	15,969	1,719

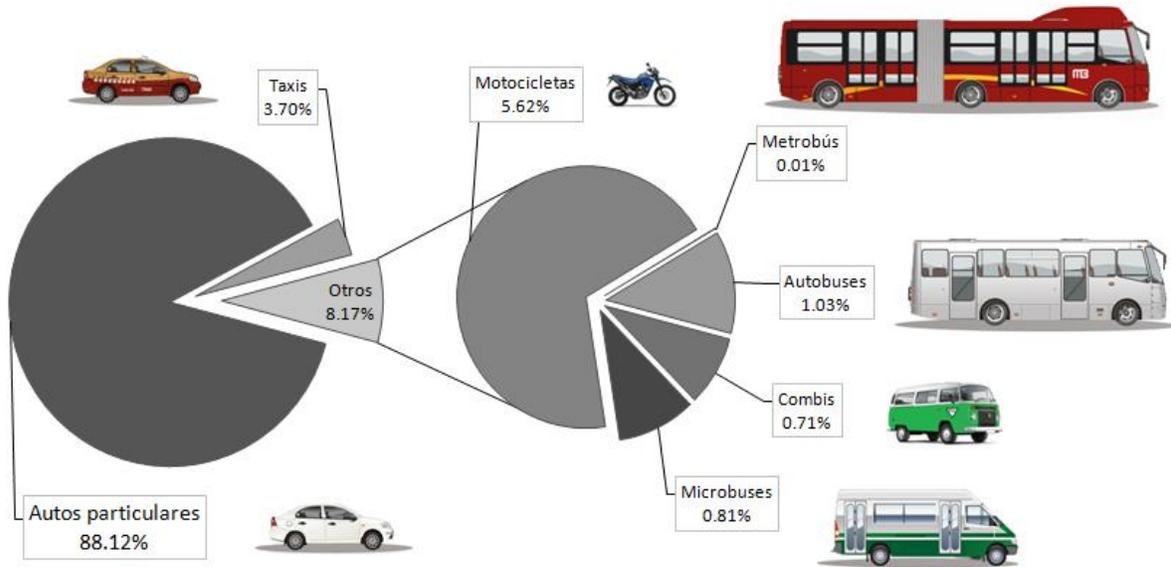


Figura 15. Distribución de la Flota vehicular de la ZMVM por tipo de vehículo.

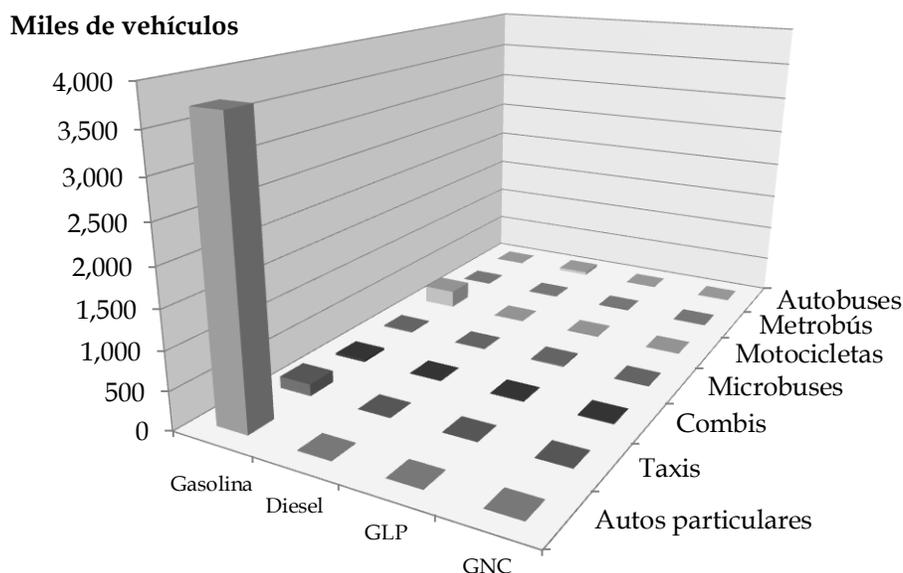


Figura 16. Distribución de la Flota vehicular de la ZMVM por tipo de combustible.

b) Actividad Vehicular (KRV)

La evaluación de la actividad vehicular considera dos factores: la actividad diaria (Tabla 9) y el tipo de holograma que muestra el vehículo (doble cero, cero y dos), debido al programa ambiental para mejorar la calidad del aire de la Ciudad de México: Hoy No Circula, también conocido como un día sin auto.

Tabla 9. Datos de actividad para los autos particulares.

Año Modelo	Recorrido promedio [km/día]
1988 y anteriores	22.78
1989-1992	31.92
1993-1994	33.76
1995 y posteriores	35.84

Fuente: SMA-GDF, 2010a.

Los vehículos con holograma 2 (vehículos con más de 8 años de antigüedad) dejan de circular un día a la semana más un sábado al mes, lo que representa un máximo de 299 días en circulación al año, y los hologramas cero y doble cero circulan los 365 días del año. El Programa Hoy No Circula aplica a los vehículos particulares y vehículos para el Servicio Público de Pasajeros (taxis, microbuses y camiones del Distrito Federal y del Estado de México), con excepción de los autobuses, motocicletas y Metrobús (Tabla 10).

Tabla 10. Actividad de la flota vehicular de la ZMVM por tipo de holograma.

Tipo de vehículo	km/día	Días/año		
		Doble Cero / Cero	Dos	Sin Holograma
Autos particulares de uso intensivo	100	365	299	NA
Taxis	200	365	299	NA
Microbuses	200	365	299	NA
Vagonetas y combis	200	365	299	NA
Autobuses RTP (día hábil / inhábil), 223 / 241	232	NA	NA	365
Autotransporte Federal de Turismo	60	NA	NA	365
Autotransporte Federal de Pasaje	48	NA	NA	365
Autobuses Concesionados	223	NA	NA	365
Motocicletas	79	NA	NA	365
Metrobús (día hábil / inhábil), 166,28/191,87	179	NA	NA	365

NA.- No Aplica.

Fuente: Elaboración propia con información de la SMA-GDF.

c) Factores de emisión (FE)

Los factores de emisión para los contaminantes del aire son obtenidos mediante el modelo Mobile6-Mexico. Las corridas del modelo se realizan por separado para el Distrito Federal y para el Estado de México, variando las fracciones de participación de la flota por tipo de vehículo y año-modelo y las fracciones de los kilómetros recorridos por tipo de vehículo y año-modelo. Los datos generales requeridos por el Mobile6-Mexico para la ZMVM se indican en la Tabla 11.

Tabla 11. Datos generales de la ZMVM, requeridos por el Mobile6-Mexico.

Parámetro	Datos proporcionados
Altitud	2 (alta)
Año calendario a evaluar	2008
Velocidad promedio (km/h)	24.1
Temperatura ambiente (°C)	24.9
RVP de gasolina Psi	7.5
Temperatura máxima (°C)	31.9
Temperatura mínima (°C)	12.8
%S Gasolina	0.036
%S Diesel	0.028

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente del GDF.

3. Emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI)

Las emisiones de gases de efecto invernadero de los vehículos automotores están enfocados a los principales gases compuestos que son: el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O).

3.1. Emisiones de CH₄ y N₂O

En la evaluación de las emisiones del CH₄ y N₂O son consideradas las directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2006a). Los cálculos consideran el proceso de emisiones del tubo de escape y el proceso de emisiones evaporativas debidas al arranque en frío de los vehículos.

A diferencia de las emisiones de contaminantes criterio, las emisiones de CH₄ y N₂O dependen principalmente de la distribución de los dispositivos de reducción de las emisiones en la flota. El IPCC recomienda como buena práctica utilizar el método de abajo hacia arriba tomando en cuenta los diversos factores de emisión correspondientes a las distintas tecnologías de reducción de la contaminación (IPCC, 2006b). La fórmula utilizada es la siguiente:

$$EGEI_x = \sum_{i,j,k} [(FV_{i,j,k})(KRV_{i,j,k})(FE_{i,j,k})] + \sum_{i,j,k} [(FV_{i,j,k})(FC_{i,j,k})(AF_{i,j,k})] \dots \text{(Ec. 9)}$$

Donde:

EGEI_x = Emisiones de GEI para: CH₄, N₂O.

FV_{i,j,k} = Flota Vehicular, cantidad de vehículos del tipo *i* que utilizan combustible *j* y tecnología de control de emisiones *k*.

KRV_{i,j,k} = Actividad vehicular, expresada en kilómetros anuales recorridos por vehículo de tipo *i*, que usan combustible *j* y tecnología de control de emisiones *k*.

FE_{i,j,k} = Factor de Emisión para el GEI, expresado en unidades de masa por distancia recorrida (g/km) por vehículos de tipo *i* que utilizan combustible *j* y tecnología de control de emisiones *k*.

FC_{i,j,k} = Factor de Emisión durante la fase de calentamiento (arranque en frío), expresado en unidades de masa por arranque (g/arranque) por vehículos de tipo *i* que utilizan combustible *j* y tecnología de control de emisiones *k*.

$AF_{i,j,k}$ = Arranques en frío, cantidad de arranques al año por vehículos del tipo i que utilizan combustible j y tecnología de control de emisiones k .
 i = Tipo de vehículo (p. ej. automóvil, taxi, autobús).
 j = Tipo de combustible (p. ej. gasolina, diesel, gas natural, GLP).
 k = Tecnología de control de emisiones (p. ej. convertidor catalítico no controlado, etc.).

a) Flota vehicular (FV) y Actividad Vehicular (KRV)

Las consideraciones aplicadas a la flota vehicular (FV) y la actividad vehicular (KRV) son análogas a las establecidas en la evaluación de las emisiones de contaminantes criterio, con la diferencia de que ahora se distingue el tipo de tecnología de control de emisiones que se encuentra correlacionada con antigüedad de la flota vehicular.

b) Factores de Emisión FE y FC

Los factores de emisión (FE) para el CH₄ y para N₂O están vinculados a las distintas tecnologías de reducción de la contaminación (Tabla 12) y son obtenidos de las directrices (Tabla 13 y Tabla 14) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2006b). Los cálculos incluyen los factores de emisión durante la fase de calentamiento (FC) de los vehículos (IPCC, 2006a).

c) Patrones de arranque del vehículo

Entre 10% y 30% de las emisiones de vehículos provienen del arranque de los vehículos en los Estados Unidos (Lents, Osses, Davis, & Nikkila, 2004). Estudios realizados en zonas urbanas indican que el número de arranques en vehículos de pasajeros varía entre 6 a 10 veces por día (Davis, Lents, Nikkila, & Osses, 2004). En la Ciudad de Hangzhou, China, se ha encontrado que el número de arranques diarios para vehículos particulares es de 7.1, de 5.5 para camiones y 3.2 para taxis (Guo, Sung, Dai, & Zhang, 2004).

En un estudio de la Ciudad de México, revela que los vehículos particulares arrancan 5.6 veces por día (Davis, Lents, Nikkila, & Osses, 2004). En el caso de los taxis y combis se considera conservadoramente 2.5 arranques por día, microbuses 4.3; autobuses 2 y motocicletas 2. El número de arranques por año depende del número de días que circula cada tipo de vehículo, según el programa “Hoy No Circula”. Bajo estas consideraciones, las emisiones por arranques en frío de la flota vehicular de la ZMVM durante 2008 representaron 20% de las emisiones de CH₄ y 51% de las emisiones de N₂O.

Tabla 12. Transporte de pasajeros de la ZMVM por tecnología de control de emisiones.

Tipo de vehículo	Año Modelo	Tecnología de control de emisiones	Cantidad de vehículos
Vehículos ligeros a gasolina (autos, taxis, combis)	1990 y anteriores	Sin control de emisiones	496,505
	1991-1992	Catalizador de oxidación (2 vías)	198,678
	1993-2008	Catalizador tridireccional avanzado (3 vías)	3,208,111
	----	Vehículo de bajas emisiones	0
Vehículos ligeros diesel (autos, taxis, combis)	1993 y anteriores	Sin control de emisiones	127
	1994-1997	Moderada	87
	1998-2008	Avanzada	7,374
Camiones ligeros a gasolina (micros)	1990 y anteriores	Sin control de emisiones	4,425
	1991-1992	Catalizador de oxidación (2 vías)	7,435
	1993-2008	Catalizador tridireccional avanzado (3 vías)	3,914
	----	Vehículo de bajas emisiones	0
Camiones ligeros diesel (micros)	1993 y anteriores	Sin control de emisiones	10
	1994-1997	Moderada	4
	1998-2008	Avanzada	226
Vehículos pesados a gasolina (autobuses)	1990 y anteriores	Sin control de emisiones	357
	1991-1992	Catalizador de oxidación (2 vías)	215
	1993-2008	Catalizador tridireccional avanzado (3 vías)	1,711
	----	Vehículo de bajas emisiones	0
Vehículos pesados ligeros diesel (autobuses)	1993 y anteriores	Sin control de emisiones	11,728
	1994-1997	Moderada	3,702
	1998-2008	Avanzada	25,923
Motocicletas (gasolina)	2008 y anteriores	Sin control de emisiones	237,808
Metrobús (diesel)	2008 y anteriores	Adecuaciones mecánicas para cumplir estándares de emisión EURO II, III, IV	221

Tabla 13. Factores de emisión de N₂O y CH₄ para los vehículos a gasolina y diesel de los Estados Unidos.

Tipo de vehículo	Tecnología de control de emisiones	Óxido nitroso (N ₂ O)		Metano (CH ₄)	
		En Marcha, caliente (mg/km)	Arranque en frío (mg/arranque)	En Marcha, caliente (mg/km)	Arranque en frío (mg/arranque)
Vehículos ligeros a gasolina (autos, taxis, combis)	Sin control de emisiones	8	28	101	62
	Catalizador de oxidación	20	72	82	9
	Catalizador tridireccional avanzado	9	113	7	55
	Vehículo de bajas emisiones	0	90	6	32
Vehículos ligeros diesel (autos, taxis, combis)	Sin control de emisiones	1	-1	1	-3
	Moderada	1	0	1	-3
	Avanzada	1	0	1	-3
Camiones ligeros a gasolina (micros)	Sin control de emisiones	9	32	116	71
	Catalizador de oxidación	26	93	81	99
	Catalizador tridireccional avanzado	25	200	14	82
	Vehículo de bajas emisiones	1	59	7	46
Camiones ligeros diesel (micros)	Sin control de emisiones	1	-1	1	-4
	Moderada	1	-1	1	-4
	Avanzada	1	-1	1	-4
Vehículos pesados a gasolina (autobuses)	Sin control de emisiones	21	74	263	162
	Catalizador de oxidación	55	194	111	215
	Catalizador tridireccional avanzado	52	409	15	163
	Vehículo de bajas emisiones	1	120	14	94
Vehículos pesados ligeros diesel (autobuses)	Sin control de emisiones	3	-2	4	-11
	Moderada	3	-2	4	-11
	Avanzada	3	-2	4	-11
Motocicletas (gasolina)	Sin control de emisiones	4	15	53	33
Metrobús (diesel)	EURO II, III, IV	3	-2	4	-11

Notas:

- Se han redondeado estos datos para obtener números enteros.
- Los factores de emisión negativos indican que un vehículo que arranca en frío produce menos emisiones que uno que arranca en caliente o calienta en marcha.

Fuente: IPCC, 2006b, así como adecuaciones del autor para la vinculación con los datos de México.

Tabla 14. Factores de emisión para los vehículos que funcionan con combustibles alternativos.

Tipo de vehículo Tecnología de control del vehículo	Factor de emisión de N₂O (mg/km)	Factor de emisión de CH₄ (mg/km)
Vehículos para servicio ligero		
Metanol	39	9
Gas natural comprimido (GNC)	27 - 70	215 - 725
Gases licuados de petróleo (GLP)	5	24
Etanol	12 - 47	27 - 45
Vehículos para servicio pesado		
Metanol	135	401
Gas natural comprimido (GNC)	185	5,983
Gas natural licuado (GNL)	274	4,261
Gases licuados de petróleo (GLP)	93	67
Etanol	191	1,227
Autobuses		
Metanol	135	401
Gas natural comprimido (GNC)	101	7,715
Etanol	226	1,292

Fuente: IPCC, 2006b.

3.2. Emisiones de CO₂

En la evaluación de las emisiones de bióxido de carbono procedentes del transporte por carretera, se utiliza el método "de abajo hacia arriba", evaluando las emisiones en dos pasos.

El primer paso consiste en calcular el Rendimiento Vehicular (RV) por tipo de vehículo i que usan combustible tipo j para el año t , expresado en MJ por km, utilizando la siguiente expresión:

$$RV_{i,j,t} = (PC_{j,t}) / (RC_{i,j,t}) \dots \text{(Ecuación 10)}$$

Donde:

PC = Poder Calorífico del combustible tipo j para el año t , expresado en MJ/litro.

RC = Rendimiento de Combustible en Ciudad promedio anual por tipo de vehículo i que usan combustible tipo j para el año t , expresado en km/litro.

i = Tipo de vehículo.

j = Tipo de combustible.

t = Año.

El segundo paso consiste en calcular las emisiones totales de CO₂ multiplicando el rendimiento vehicular por un factor de emisión apropiado para el tipo de combustible, el tipo de vehículo y la actividad vehicular, con la siguiente expresión:

$$EGEI_y = \sum_{i,j} [(FV_{i,j}) \cdot (KRV_{i,j}) \cdot (FE_j) \cdot (RV_{i,j})] \dots \text{(Ecuación 11)}$$

Donde:

EGEI_y = Emisiones del GEI para CO₂.

FV _{i,j} = Flota Vehicular, cantidad de vehículos del tipo i que utilizan combustible j .

KRV _{i,j} = Actividad vehicular, expresada en kilómetros anuales recorridos por vehículo de tipo i , que usan combustible j .

FE _{j} = Factor de Emisión para CO₂, expresado en unidades de masa por energía (kg/TJ) para el combustible tipo j .

RV _{i,j} = Rendimiento vehicular, expresada en MJ/km promedio anual por vehículo de tipo i , que usan combustible j .

i = Tipo de vehículo (p. ej., automóvil, taxi, autobús).

j = Tipo de combustible (p. ej., gasolina, diesel, gas natural, GLP).

a) Rendimientos de combustible (RC)

Los rendimientos de combustible se obtuvieron del modelo MEEM; sin embargo, la flota vehicular del transporte de pasajeros de la ZMVM está integrada principalmente por vehículos a gasolina (98%) y vehículos de uso particular (88%). En este sentido, se llevó a cabo un análisis más detallado de los rendimientos combustible por categoría de los vehículos particulares a gasolina (compacto, subcompacto, deportivo, de lujo y camionetas SUV) durante el periodo 1988–2008, en primera instancia para toda la República Mexicana (Sheinbaum-Pardo & Chavez-Baeza, 2011) y posteriormente para la ZMVM (Tabla 15).

Tabla 15. Rendimientos promedio de combustible para Ciudad por tipo de vehículo (km/litro).

Año	Subcompacto		Compacto		Deportivo		De Lujo		SUV		General sin SUV		General con SUV	
	México	ZMVM	México	ZMVM	México	ZMVM	México	ZMVM	México	ZMVM	México	ZMVM	México	ZMVM
1988	10.2	10.2	8.8	8.8	7.8	7.8	7.6	7.6	6.4	6.4	9.4	9.4	9.1	9.2
1989	9.9	9.9	8.7	8.6	7.5	7.5	7.5	7.5	6.5	6.5	9.1	9.2	8.9	9.0
1990	10.0	10.0	8.7	8.7	7.4	7.4	7.3	7.3	6.9	6.9	9.3	9.4	9.1	9.2
1991	9.9	9.9	8.4	8.4	7.3	7.3	7.1	7.1	6.6	6.6	9.1	9.2	8.9	9.1
1992	9.8	9.8	8.6	8.6	7.5	7.5	7.3	7.3	6.5	6.5	9.1	9.2	8.8	9.0
1993	9.7	9.7	9.0	9.0	7.5	7.5	7.1	7.1	6.4	6.4	9.2	9.3	9.0	9.1
1994	9.9	9.9	9.2	9.2	7.3	7.3	7.0	7.0	6.4	6.7	9.3	9.3	9.0	9.0
1995	10.9	10.9	9.3	9.3	7.5	7.5	7.0	7.3	6.1	6.2	9.7	9.6	9.1	9.2
1996	10.8	10.8	9.3	9.3	8.3	8.3	7.2	7.6	6.1	6.2	9.7	9.7	9.0	9.1
1997	11.0	11.0	9.5	9.5	8.6	8.6	7.6	7.9	6.2	6.4	10.0	10.1	9.4	9.6
1998	11.4	11.3	9.6	9.6	8.2	8.5	8.0	8.2	6.4	6.4	10.4	10.3	9.8	9.9
1999	11.2	11.1	9.5	9.5	8.3	8.5	7.8	8.0	6.3	6.4	10.2	10.2	9.6	9.7
2000	11.2	11.1	9.3	9.3	8.4	8.4	7.9	8.0	6.4	6.5	10.1	10.1	9.6	9.6
2001	11.3	11.2	9.5	9.5	9.0	9.4	8.0	8.0	6.6	6.7	10.3	10.3	9.8	9.9
2002	11.3	11.2	9.6	9.7	8.5	9.0	8.1	8.2	6.7	6.7	10.5	10.5	10.0	10.0
2003	11.3	11.2	9.6	9.7	8.4	8.5	8.3	8.3	7.2	7.2	10.6	10.6	10.1	10.2
2004	11.3	11.2	9.5	9.6	8.2	8.3	8.3	8.3	7.4	7.3	10.6	10.6	10.0	10.1
2005	11.6	11.5	9.5	9.5	8.4	8.6	8.4	8.4	7.5	7.5	10.7	10.7	10.0	10.0
2006	11.7	11.6	9.4	9.4	8.2	8.5	8.3	8.3	7.4	7.4	10.6	10.5	9.8	9.8
2007	11.8	11.7	9.6	9.4	8.4	8.6	8.5	8.5	7.4	7.4	10.6	10.5	9.8	9.8
2008	11.7	11.7	9.5	9.4	8.4	8.6	8.4	8.3	7.4	7.4	10.5	10.4	9.8	9.8

b) Factores de emisión (FE)

Los factores de emisión de CO₂, se obtuvieron de las Directrices para los inventarios nacionales de Gases de Efecto Invernadero (Tabla 16).

Tabla 16. Factores de emisión de CO₂ por defecto del transporte terrestre y rangos de incertidumbre.

Tipo de combustible	Por defecto (kg/TJ)	Inferior	Superior
Gasolina para motores	69,300	67,500	73,000
Gas/Diesel Oil	74,100	72,600	74,800
Gases licuados de petróleo (GLP)	63,100	61,600	65,600
Gas natural comprimido (GNC)	56,100	54,300	58,300
Gas natural licuado (GNL)	56,100	54,300	58,300

Nota: Los valores representan el 100 por ciento de oxidación del contenido de carbono del combustible.

Fuente: IPCC, 2006a.

4. Consumo energético

La cuantificación del consumo energético de la flota vehicular debido al transporte de personas que circulan en la ZMVM, es producto del rendimiento vehicular promedio anual, la flota vehicular y la actividad vehicular, expresado en PJ por año. Se utiliza la siguiente expresión:

$$CE = \sum_{i,j} [(FV_{i,j}) \cdot (KRV_{i,j}) \cdot (RV_{i,j})] \dots \text{(Ecuación 12)}$$

Donde:

CE = Consumo Energético de la flota vehicular.

$FV_{i,j}$ = Flota Vehicular, cantidad de vehículos del tipo i que utilizan combustible j .

$KRV_{i,j}$ = Actividad vehicular, expresada en kilómetros anuales recorridos por vehículo de tipo i , que usan combustible j .

$RV_{i,j}$ = Rendimiento vehicular, expresada en PJ/km promedio anual por vehículo de tipo i , que usan combustible j .

i = Tipo de vehículo (p. ej., automóvil, taxi, autobús).

j = Tipo de combustible (p. ej., gasolina para motores, diesel, gas natural, GLP).

Capítulo IV. Prospectiva 2008 – 2028. Transporte de pasajeros de la ZMVM

En el análisis prospectivo del transporte de pasajeros de la ZMVM, se presentan 4 escenarios. En primer lugar se construye un Escenario Base llamado BAU (*Business As Usual*), escenario sin política adicional de restricción en las emisiones y consumo energético. Posteriormente, tres escenarios de transporte sustentable vinculados con la innovación tecnológica y el cambio modal del transporte de pasajeros, público y privado.

1. Escenario Base

Un elemento clave en la elaboración del escenario base, es la proyección de la cantidad de vehículos de pasajeros que circularán en la ZMVM durante el periodo de estudio. En este trabajo, la proyección de la flota vehicular se determinó mediante un modelo de cálculo desarrollado para cada tipo de vehículo (autos particulares, taxis, combis, autobuses, etc.) y por el tipo de combustible que utilizan (gasolina, diesel, etc.) tanto para el DF como para la zona conurbada del Edo. de México.

Las bases de información son los inventarios de vehículos de 1990 al 2008 del Distrito Federal y del Estado de México proporcionados por la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del DF; y en el caso específico de los vehículos particulares, adicionalmente se cuenta con las ventas de vehículos nuevos registradas desde 1990 por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2000-2009) para ambas entidades.

A manera de ejemplo, en la Tabla 17 se muestra los inventarios 1990-2008 de los vehículos particulares a gasolina del DF y, en la Tabla 18 los inventarios 1990-2008 de los vehículos particulares a gasolina del Edo. de México. Ambos inventarios constituyen en su conjunto los inventarios de la ZMVM.

Tabla 17. Flota de vehículos particulares a gasolina del DF, inventarios 1990-2008.

Modelo	Censo										
	Año	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008
1966 y ant.	29,765									4,867	3,610
1967	6,648									1,160	843
1968	8,797	40,049								1,514	1,096
1969	10,425	9,267								1,843	1,377
1970	13,268	11,786	53,302							2,284	1,619
1971	15,224	13,517	11,809							2,671	1,962
1972	21,128	18,792	16,456	69,723						3,995	3,012
1973	31,025	27,606	24,188	20,769						6,050	4,699
1974	36,667	32,611	28,554	24,498	95,663					6,992	5,271
1975	44,190	39,265	34,341	29,416	24,490					8,326	6,226
1976	44,394	39,459	34,523	29,588	24,652	115,625				8,309	6,266
1977	34,464	30,588	26,712	22,836	18,958	15,081				6,088	4,424
1978	44,119	39,150	34,182	29,213	24,243	19,269	110,340			7,494	5,364
1979	60,658	53,860	47,062	40,264	33,447	26,648	19,356			10,400	7,671
1980	82,780	73,588	64,396	55,204	45,995	36,806	27,056	116,966		14,729	10,595
1981	102,151	90,900	79,648	68,397	57,123	45,866	33,910	25,741		19,266	14,093
1982	98,295	87,602	76,909	66,216	55,502	44,805	33,559	25,687		19,502	14,305
1983	56,637	50,536	44,436	38,335	32,233	26,130	19,489	15,303		11,801	8,772
1984	69,140	61,731	54,321	46,912	39,500	32,077	24,092	18,866		14,732	10,952
1985	81,978	73,453	64,929	56,404	47,873	39,337	30,088	23,587		18,629	13,929
1986	75,806	68,001	60,196	52,391	44,578	36,771	28,591	22,946		18,741	14,283
1987	51,748	46,623	41,499	36,374	31,227	26,100	20,731	17,100		14,304	11,282
1988	72,840	65,747	58,654	51,561	44,442	37,349	29,847	24,916		21,167	16,974
1989	112,302	101,301	90,299	79,298	68,272	57,264	45,555	37,858		32,288	26,209
1990	140,432	127,130	113,828	100,526	87,168	73,789	59,669	50,346		44,094	36,440
1991		148,567	133,052	117,536	101,967	86,392	70,226	59,220		54,125	46,036
1992		167,360	149,763	132,167	114,489	96,871	78,137	66,189		61,796	53,811
1993			161,796	142,545	123,262	103,940	83,778	70,470		63,125	56,133
1994			166,058	146,629	127,156	107,669	87,498	73,406		66,446	60,744
1995				94,094	81,830	69,570	56,727	48,169		47,368	46,440
1996				65,811	57,440	49,184	40,881	34,722		40,791	44,008
1997					108,528	93,206	78,642	67,042		60,449	67,519
1998					190,545	165,415	141,549	124,207		114,195	113,927
1999						147,720	127,700	113,139		104,983	95,880
2000						253,353	164,106	151,897		143,487	135,059
2001							246,869	181,864		178,111	169,971
2002							240,323	205,625		184,408	178,539
2003								202,807		158,107	158,117
2004								221,259		163,218	172,239
2005										191,130	194,014
2006										208,286	261,138
2007											181,675
2008											120,223
Total	1,344,881	1,518,489	1,670,913	1,616,707	1,680,583	1,806,237	1,898,719	1,999,332	2,141,271	2,386,747	

Fuente: SMAGDF

Tabla 18. Flota de vehículos particulares a gasolina del EdoMéx, inventarios 1990-2008.

Modelo	Censo										
	Año	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008
1966 y ant.	8,274									6,401	3,306
1967	2,376									1,662	825
1968	3,195	13,397								2,249	1,086
1969	3,531	3,434								2,728	1,387
1970	5,061	4,861	20,947							3,409	1,616
1971	5,800	5,589	5,378							3,975	1,973
1972	7,865	7,613	7,361	32,475						5,688	2,823
1973	10,514	10,326	10,137	9,949						8,507	4,566
1974	13,557	13,247	12,937	12,627	53,337					10,562	5,597
1975	16,729	16,317	15,904	15,491	15,072					12,844	6,731
1976	16,179	15,810	15,440	15,070	14,700	80,616				12,522	6,617
1977	12,407	12,132	11,857	11,583	11,308	11,033				9,659	4,873
1978	15,535	15,306	15,077	14,847	14,615	14,385	112,070			12,810	6,359
1979	19,367	19,219	19,072	18,924	18,756	18,610	19,938			16,948	8,723
1980	24,139	24,189	24,238	24,288	24,325	24,375	26,506	150,615		22,819	11,606
1981	31,190	30,827	30,465	30,102	29,714	29,352	32,023	31,627		28,446	15,155
1982	33,339	32,209	31,080	29,950	28,791	27,663	30,377	31,427		28,327	16,149
1983	10,751	11,639	12,527	13,415	14,296	15,183	17,423	18,043		16,750	9,936
1984	9,471	11,087	12,704	14,321	15,933	17,550	20,737	22,423		20,878	13,079
1985	8,307	10,762	13,217	15,672	18,117	20,571	24,956	27,359		25,567	16,383
1986	4,100	6,865	9,631	12,396	15,154	17,919	22,333	25,107		24,413	17,253
1987	3,741	3,741	3,741	6,499	9,249	12,005	16,074	19,046		18,875	14,251
1988	2,972	2,972	2,972	7,354	11,723	16,100	22,034	27,215		26,956	21,100
1989	4,181	4,181	4,181	10,093	15,983	21,884	29,570	36,716		36,936	29,327
1990	2,865	2,865	2,865	10,423	17,931	25,469	35,216	44,318		44,129	36,268
1991		5,892	5,892	5,892	15,398	24,930	36,757	48,841		49,508	42,345
1992		3,612	3,612	3,612	14,326	25,055	38,127	51,691		53,645	48,052
1993			1,061	1,061	11,051	21,044	32,651	45,482		48,589	48,357
1994			6,068	6,068	13,400	20,778	30,110	38,985		42,867	46,141
1995				3,868	7,866	11,905	17,090	21,681		27,902	38,138
1996				4,777	6,732	8,738	11,051	13,837		20,433	36,410
1997					9,987	14,217	19,556	24,239		25,521	40,332
1998					57,328	32,419	33,427	39,859		41,784	54,354
1999						18,103	28,201	33,314		35,259	32,025
2000						24,601	37,839	42,613		45,125	41,726
2001							47,600	60,642		62,312	56,858
2002							77,010	68,820		70,835	63,944
2003								66,701		68,913	65,108
2004								88,801		80,217	77,219
2005										104,242	97,566
2006										67,214	73,360
2007											83,963
2008											94,381
Total	275,446	288,092	298,364	330,757	465,092	554,505	818,676	1,079,402	1,248,426	1,297,268	

Fuente: SMAGDF

En general, el número de vehículos tiende a disminuir con el transcurso de los años debido a que los vehículos sufren algún siniestro o simplemente dejan de circular en la entidad y quedan fuera de su registro. En el caso del DF, por ejemplo, el inventario de 1990 registra 140,432 vehículos modelo 1990 y en el inventario de 2008 registró sólo 36,440 vehículos modelo 1990 (Tabla 17); lo que significa una reducción a una tasa anual de 6.98% (denominada Tasa de Desecho). Al graficar la tasa de desecho (TD) de cada modelo de vehículo se encontró que varía en función de su edad, a mayor edad, mayor es la TD.

Cabe señalar que en el inventario del Edo. de México (Tabla 18), el número de vehículos de algunos modelos registra un aumento de autos usados. Tal es el caso del modelo de 1990, el cual registró 2,865 vehículos en 1990 y 36,268 vehículos en 2008; es decir, en lugar de una tasa de desecho se presenta un incremento anual de 18.64%. Una porción de este incremento podría deberse a la coyuntura con el programa de legalización de autos usados importados principalmente de los Estados Unidos; sin embargo, hay que tener en cuenta que el programa de legalización de autos usados inició en el 2005 (TLCAN, 1994), mientras que los incrementos de autos usados en el inventario se presentan desde 1996. Por otro lado, es factible que parte de los autos usados que son desechados del DF sean vendidos en el Edo. de México, situación que se fortalece en la evaluación a nivel ZMVM (DF + EdoMex), dado que estos incrementos no se presentan.

En este sentido, y considerando la tasa de desecho (TD) de la ZMVM y del DF, en el modelo de cálculo se llevó a cabo un ajuste a la TD del EdoMex. Una vez que se han determinado las funciones matemáticas de la TD según la edad del vehículo y tasa de crecimiento (TC) debida a las ventas de vehículos nuevos, se efectúa la proyección de vehículos para el periodo 2009 al 2028, utilizando la siguiente ecuación:

$$V_{i,j} = (V_{i,j-1}) \cdot (TC_n) \cdot (1 - TD_k) \dots \text{(Ecuación 13)}$$

Donde:

$V_{i,j}$ = Número de vehículos del año modelo i en el año j .

$V_{i,j-1}$ = Número de vehículos del año modelo i en el año $j-1$.

TC_n = Tasa de crecimiento de las ventas de vehículos nuevos para el año n , donde n toma el valor inicial de 0 en el año 2008.

TD_k = Tasa de desecho de vehículos usados con k años de edad.

En el modelo de cálculo es posible determinar la proyección con tasa de desecho (Proy TD) y la proyección con tasa de crecimiento (Proy TC), las cuales en su conjunto representan la proyección del crecimiento ajustado de la flota vehicular (Proy TD+TC). En el caso de los vehículos particulares a gasolina del Distrito Federal (Figura 17), la proyección TD+TC muestra que la flota pasará de 2.5 millones de autos en el 2008 a 3.3 millones en el 2028.

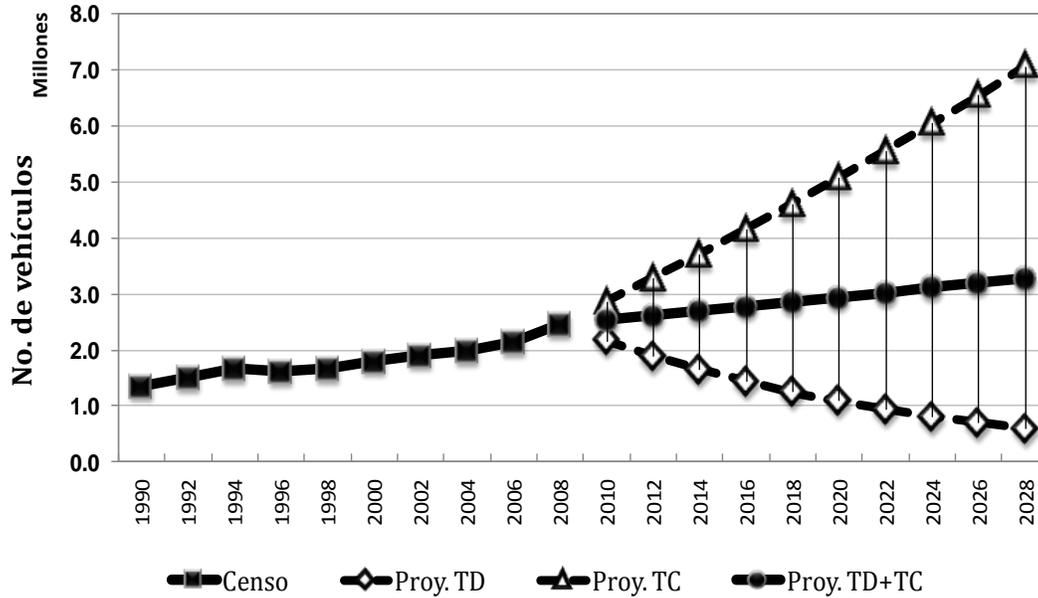


Figura 17. Crecimiento Histórico y proyección del crecimiento ajustado de vehículos particulares a gasolina en el DF, periodo 1990-2028.

En la Figura 18, se muestran la proyección del crecimiento ajustado de la flota de vehículos particulares a gasolina para la ZMVM, incluyendo el DF y el Edo. de México, reflejando en suma un incremento de 1.8 millones de vehículos en la ZMVM con respecto al 2008, alcanzando la cifra de 5.2 millones para el 2028.

En un análisis de las proyecciones, se encontró que las tasas de desecho, particularmente, tienen un impacto en la tendencia de la edad promedio de la flota vehicular (Figura 19). En este sentido, la flota del Edo. de México llegaría a una edad promedio de 14.5 años en el 2028, aunque en 1996 registró una edad promedio de 15.2 años. En el DF, sería menor a la del Edo. de México (10.3 años en el 2028) pero mayor a los 7.7 años registrada en el 2008.

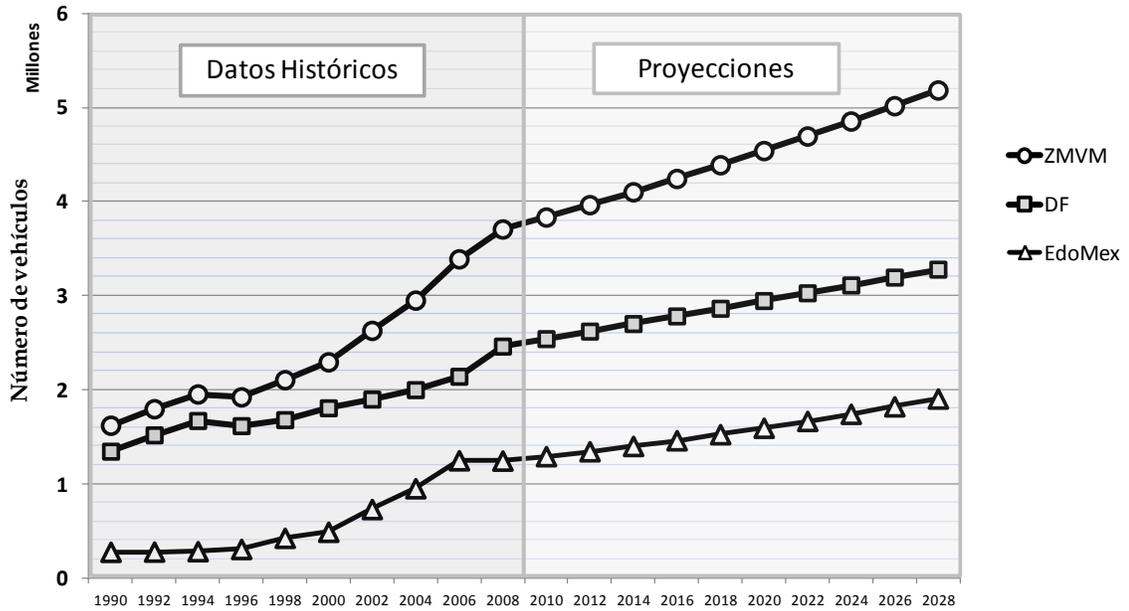


Figura 18. Crecimiento histórico y proyección del crecimiento ajustado de vehículos particulares a gasolina en la ZMVM, DF y EdoMex, periodo 1990-2028.

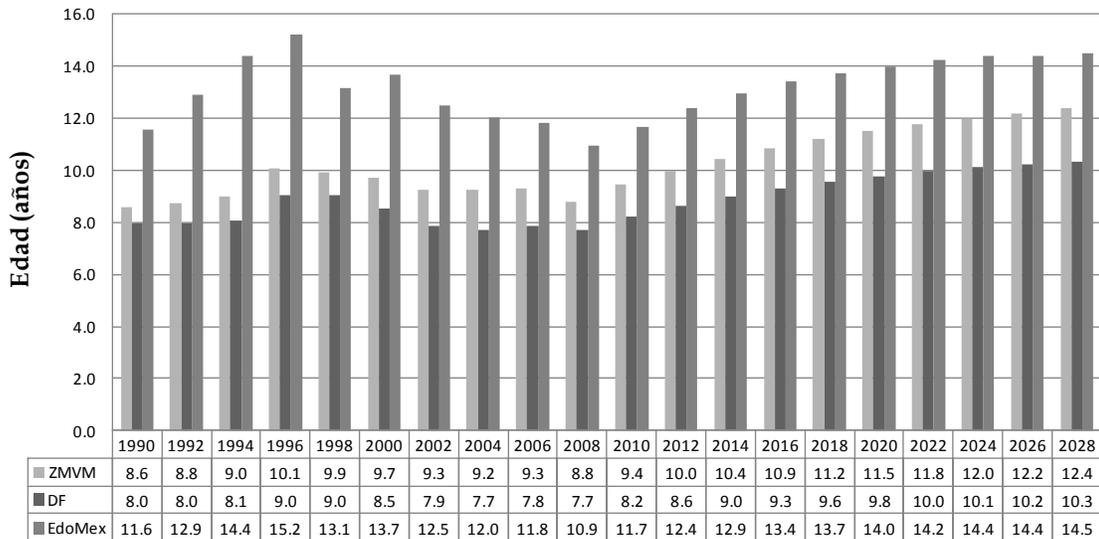


Figura 19. Tendencia de la edad promedio de la flota de vehículos particulares a gasolina de la ZMVM, DF y EdoMex, periodo 1990-2028.

La importancia de conocer la edad de la flota de los vehículos particulares está relacionada con el programa ambiental “Hoy No circula”, en donde se establecen restricciones en el número de días que pueden circular al año aquellos vehículos con más de 8 años. En el 2008 se registraron casi 1.5 millones (39%) de autos particulares con más de 8 años; mientras que en el 2028 serán alrededor de 2.8 millones (53%) de autos particulares (Figura 20), aproximadamente el doble de vehículos que en el 2008.

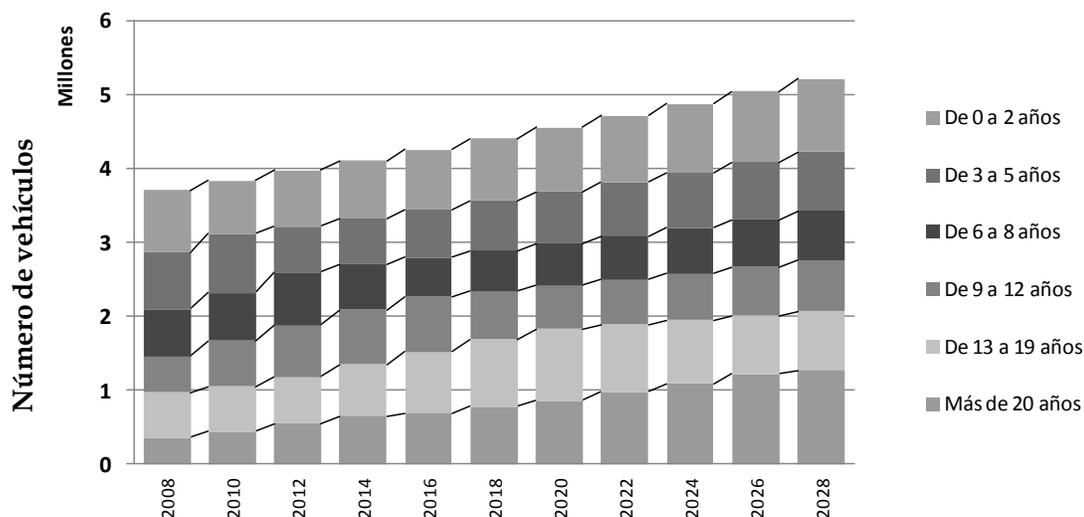


Figura 20. Proyección de la flota de vehículos particulares a gasolina en la ZMVM, agrupados por edad, periodo 2008-2028.

En el escenario base se toman las siguientes consideraciones:

- El número de taxis se mantiene igual año con año. Limitante establecida por el gobierno local, sólo se permite la renovación de las unidades viejas.
- En los microbuses no se permite la renovación de las unidades viejas. La tasa de crecimiento media anual (TCMA) es negativa.
- Uso de diesel de ultra bajo azufre en autobuses y Metrobús a partir del año 2014. Los factores de emisión se reducen 10% para PM_{10} y $PM_{2.5}$ (Blumberg, Walsh, & Pera, 2003) y 95% para SO_2 (IPCC, 2006a).

De acuerdo con el escenario base, en el 2028 la flota vehicular para el transporte de pasajeros en la ZMVM alcanzará casi los 6 millones de unidades; es decir, 40% más que en el 2008 (Tabla 19). El auto particular continuará siendo el vehículo con mayor número de unidades (88% del total).

Tabla 19. Flota del transporte de pasajeros en la ZMVM. Escenario Base 2008-2028

Tipo de vehículo	Número de vehículos (en miles de unidades)											TCMA (2028-2008)
	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022	2024	2026	2028	
Autos Part.	3,716	3,844	3,978	4,116	4,260	4,408	4,561	4,719	4,881	5,047	5,217	1.7%
Taxis	157	157	157	157	157	157	157	157	157	157	157	0.0%
Combis	30	31	32	34	35	36	37	38	39	40	40	1.5%
Microbuses	34	33	32	31	29	28	26	24	23	21	19	-2.8%
Autobuses	44	49	53	57	60	64	67	69	72	74	76	2.8%
Motocicletas	238	257	276	294	311	328	344	359	373	387	399	2.6%
Metrobús	0.221	0.292	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	3.2%
Total	4,219	4,372	4,528	4,688	4,853	5,021	5,192	5,367	5,545	5,726	5,909	1.7%

El consumo energía del transporte de pasajeros de la ZMVM presentará un aumento de 29% al pasar de 246 PJ (42 bpe) en 2008 a 318 PJ (54 bpe) en 2028 (Figura 21), mientras que en el DF el incremento será de 22% y en el EdoMex de 43%. No obstante, estas cifras que están por debajo de las expectativas del *World Energy Council* (WEC, 2011), en su escenario base (*Freeway*).

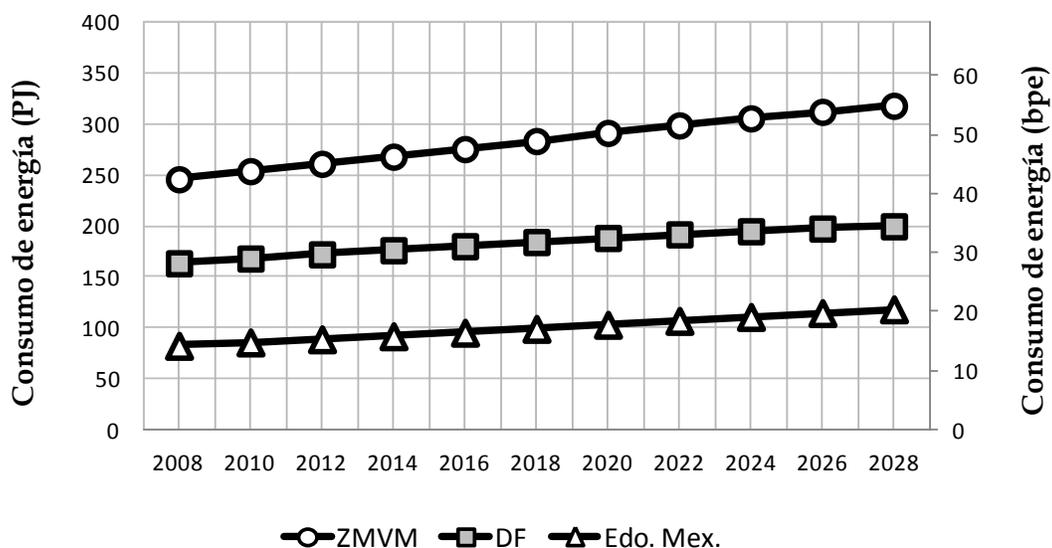


Figura 21. Consumo de energía (PJ). Transporte de pasajeros de la ZMVM, 2008-2028.

Nota: 1 barril de petróleo equivalente (bpe) = 5.86152 PJ

El escenario base de las emisiones de GEI, muestra que en el 2028 el transporte de pasajeros de la ZMVM generará alrededor de 23 millones de toneladas de CO₂ equivalente, siendo el auto particular el responsable del 59% de las emisiones con 13.5 millones de toneladas de CO₂ equivalente en 2028 (Figura 22). La flota en su conjunto incrementará sus emisiones 30% de 2008 al 2028.

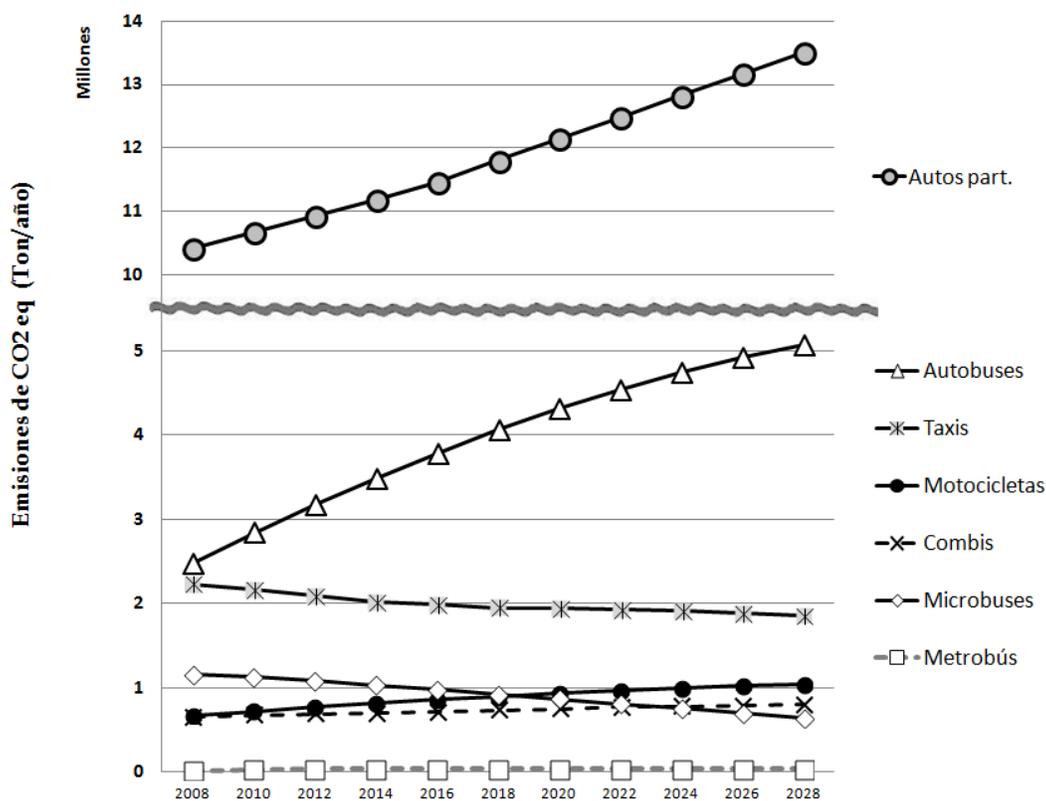


Figura 22. Escenario base de emisiones de CO₂ eq por tipo de vehículo (Ton/año). Transporte de pasajeros de la ZMVM, periodo 2008-2028.

En cuanto a las emisiones de los contaminantes criterio, en la Figura 23 se muestran el escenario base para el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), SO₂ y CO, y en la Figura 24 para los compuestos orgánicos (volátiles y totales), NH₃ y NO_x; en donde, independientemente de la gran aportación que tiene auto particular en todos los contaminantes, se destaca la aportación de los autobuses en material particulado, mientras que las motos lo hacen en los compuestos orgánicos, y los autobuses y taxis en NO_x.

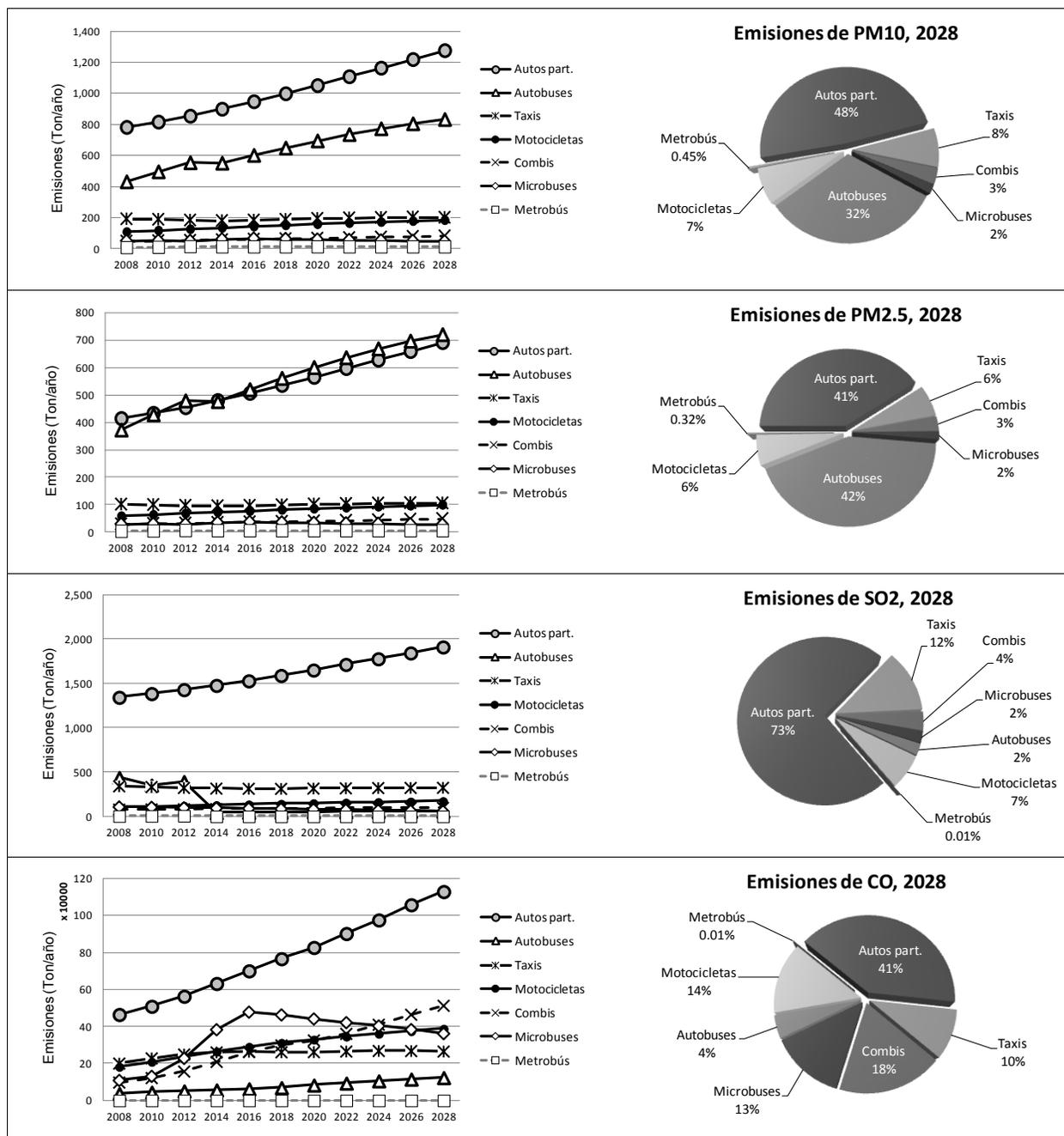


Figura 23. Escenario base de emisiones contaminantes criterio de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), SO₂ y CO por tipo de vehículo (Ton/año). Transporte de pasajeros de la ZMVM, periodo 2008-2028.

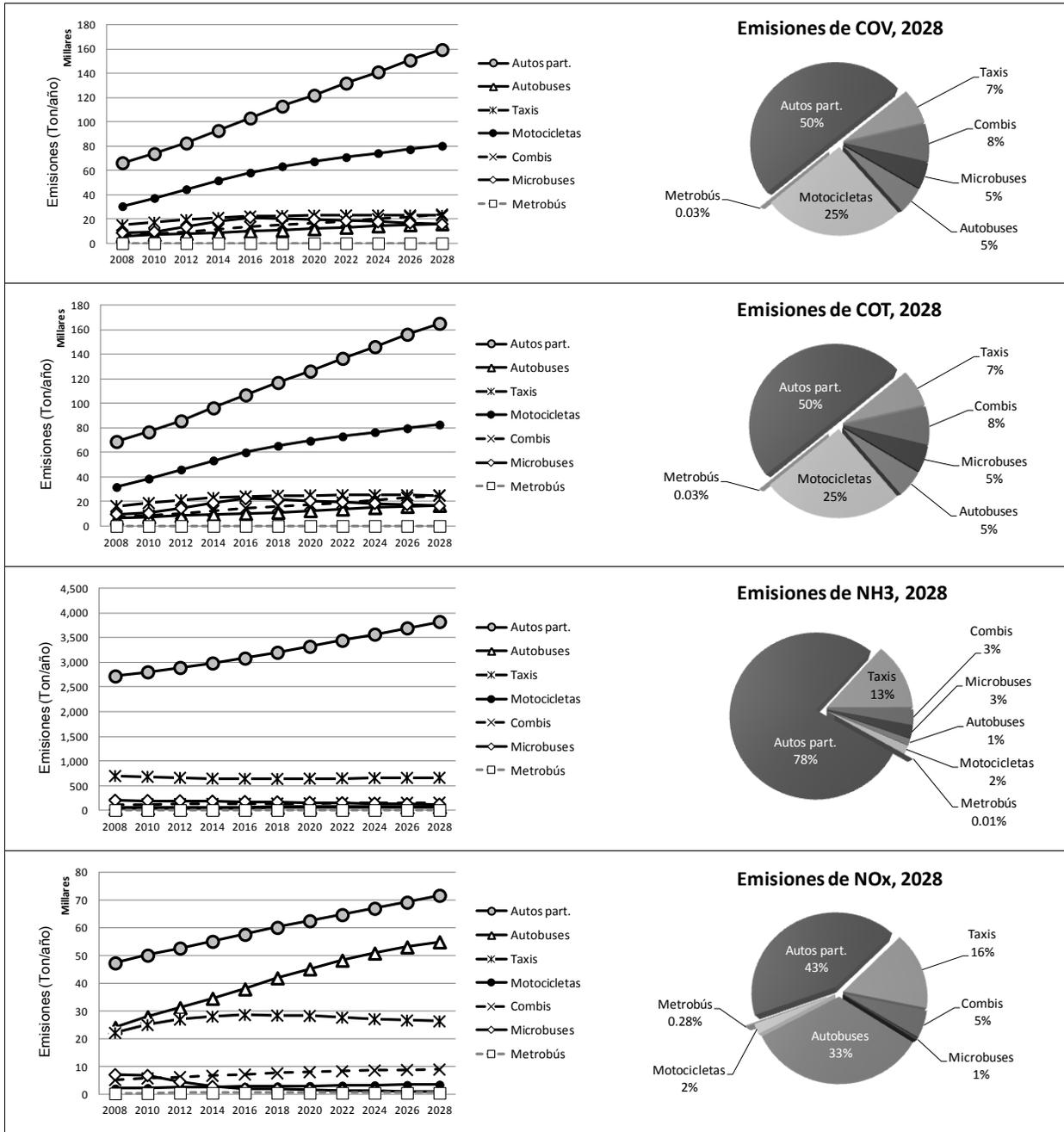


Figura 24. Escenario base de emisiones contaminantes criterio de los compuestos orgánicos (volátiles y totales), NH₃ y NO_x por tipo de vehículo (Ton/año). Transporte de pasajeros de la ZMVM, periodo 2008-2028.

2. Escenarios de transporte sustentable en la ZMVM

Dentro de la gama de alternativas que existen en el transporte sustentable para disminuir el consumo de energía y mitigar las emisiones de gases contaminantes criterio y gases de efecto invernadero en el transporte de pasajeros de la ZMVM, en este trabajo se desarrollaron dos escenarios: 1) elevar el rendimiento de combustible promedio de la flota de vehículos particulares mediante la introducción de vehículos híbridos eléctricos; y 2) aumentar la red del sistema de transporte público mediante el cambio modal del transporte privado hacia el Metrobús y la sustitución de una parte de la flota de microbuses por autobuses articulados de mayor capacidad (Metrobús). Los beneficios potenciales son determinados en relación con el Escenario Base.

2.1. Elevar el rendimiento de combustible promedio de la flota de vehículos particulares mediante la introducción de autos híbridos

Las tecnologías híbridas son parte de las nuevas tecnologías vehiculares que están disponibles en el mercado mexicano para disminuir el consumo de energía al recorrer el doble de la distancia que un vehículo convencional con la misma cantidad de combustible y que a la par son menos nocivos al medio ambiente (Heywood, 2008) (UNEP, 2009).

En la determinación de los rendimientos de combustible de autos híbridos - eléctricos con motor de combustión interna a gasolina, se toma como base la información proporcionada por el *Fuel Economy: How Hybrids Work* (EPA-DOE, 2012). De los datos obtenidos (Tabla 20), se obtuvieron valores máximo, mínimo y promedio para diferentes tipos de vehículos (Tabla 21).

Tabla 20. Rendimientos de combustible de autos híbridos – eléctricos (con motor de combustión interna a gasolina)

Marca	Modelo	Categoría	Año	Auto/Camioneta	Cil	Lt	Vel	Precio (US)	Rendimiento (km/l)		
									Ciudad	Carretera	Combinado
Toyota	Prius	Subcompacto	2012	Auto	4	1.5	Auto	23,230	23	20	21
Toyota	Prius	Compacto	2012	Auto	4	1.8	Auto	29,805	22	20	21
Toyota	Camry Hybrid LE	Compacto	2012	Auto	4	2.5	Auto		18	17	18
Honda	Civic Hybrid	Subcompacto	2012	Auto	4	1.5	Auto	24,050	19	19	19
Honda	Lexus CT 200h	Subcompacto	2012	Auto	4	1.8	Auto	31,750	18	17	18
Honda	Insight	Subcompacto	2012	Auto	4	1.3	Auto	23,690	17	19	18
Honda	Insight	Subcompacto	2012	Auto	4	1.3	Auto	23,690	17	19	18
Honda	CR-Z	Deportivo	2012	Auto	4	1.5	Auto	23,705	15	17	16
Honda	CR-Z	Deportivo	2012	Auto	4	1.5	M-6	23,705	13	16	14
Ford	Fusion Hybrid FWD	Compacto	2012	Auto	4	2.5	Auto	28,775	17	15	16
Hyundai	Sonata Hybrid	Compacto	2012	Auto	4	2.4	M-6	25,850	15	17	16
Kia	Optima Hybrid	Compacto	2012	Auto	4	2.4	M-6	25,700	15	17	16
Chevrolet	Malibu eAssist	Compacto	2013	Auto	4	2.4	A6	26,845	11	16	13
Buick	LaCrosse eAssist	Compacto	2012	Auto	4	2.4	A6	32,440	11	15	13
Buick	LaCrosse eAssist	Compacto	2013	Auto	4	2.4	A6		11	15	13
Buick	Regal eAssist	Compacto	2013	Auto	4	2.4	A6		11	15	13
Ford	Escape Hybrid FWD	SUV - 2WD	2012	Camioneta	4	2.5	Auto	33,080	14	13	14
Ford	Escape Hybrid AWD	SUV - 4WD	2012	Camioneta	4	2.5	Auto	34,830	13	11	12
Lexus	RX 450h	SUV - 2WD	2012	Camioneta	6	3.5	Auto	45,235	14	12	13
Toyota	Highlander Hybrid	SUV - 4WD	2012	Camioneta	6	3.5	Auto	44,370	12	12	12
Porsche	Cayenne S Hybrid	SUV - 4WD	2012	Camioneta	6	3.0	A8	69,000	9	10	9
VW	Touareg Hybrid	SUV - 4WD	2012	Camioneta	6	3.0	A8	61,995	9	10	9
Cadillac	Escalade Hybrid 2WD	SUV - 2WD	2012	Camioneta	8	6.0	Auto	83,295	9	10	9
Chevrolet	Tahoe Hybrid 2WD	SUV - 2WD	2012	Camioneta	8	6.0	Auto	51,970	9	10	9
GMC	Yukon 1500 Hybrid 2WD	SUV - 2WD	2012	Camioneta	8	6.0	Auto	52,470	9	10	9
GMC	Yukon Denali Hybrid 4WD	SUV - 2WD	2012	Camioneta	8	6.0	Auto	63,130	9	10	9

Fuente: <http://www.fueleconomy.gov/feg/hybridtech.shtml>

Tabla 21. Valores Max., Min., Prom. del rendimiento de combustible – Autos híbridos

Vehículos híbridos por categoría	Rendimiento de Combustible en Ciudad (km/l)		
	Máximo	Mínimo	Promedio
Auto híbrido, tipo subcompacto	22.5	17.4	18.9
Auto híbrido, tipo compacto	21.7	10.6	14.4
Auto híbrido, tipo deportivo	14.9	13.2	14.0
Camioneta híbrida, tipo SUV	14.5	8.5	10.4

Nota: Dadas sus características y volumen de ventas, los autos híbridos de lujo y deportivos se considerarán con el mismo rendimiento de combustible.

De la Tabla 21, se desprende que algunos autos híbridos presentan valores muy contrastantes entre el rendimiento de combustible máximo y mínimo, que en el caso específico del auto híbrido de tipo compacto representa una diferencia del doble del rendimiento, además el valor mínimo se encuentra en un rango muy cercano al rendimiento de los vehículos del tipo convencional.

En este sentido, y con el propósito de reflejar una verdadera ventaja de sustituir las ventas de autos nuevos de tipo convencional por autos híbridos, se tomarán los rendimientos de combustible máximos que presentan los vehículos híbridos, rendimiento que crecerá al mismo ritmo que el proyectado para los vehículos convencionales. Cabe señalar, como se puede observar en la Tabla 20, los modelos con los mayores rendimientos de combustible (como el Toyota - Prius en autos y el Ford - Escape en camionetas), son de fabricantes automotrices que se encuentran bien posicionados en el mercado mexicano.

Escenario I: Sustituir gradualmente las ventas de autos particulares nuevos de tipo convencional por vehículos híbridos eléctricos (VHE), comenzando en el año 2014 hasta alcanzar el 100% en 2028. La introducción de los VHE a la flota de vehículos de pasajeros que circulan en la ZMVM tendrá un impacto directo en la mejora del rendimiento promedio de combustible de todo el parque vehicular (Figura 25).

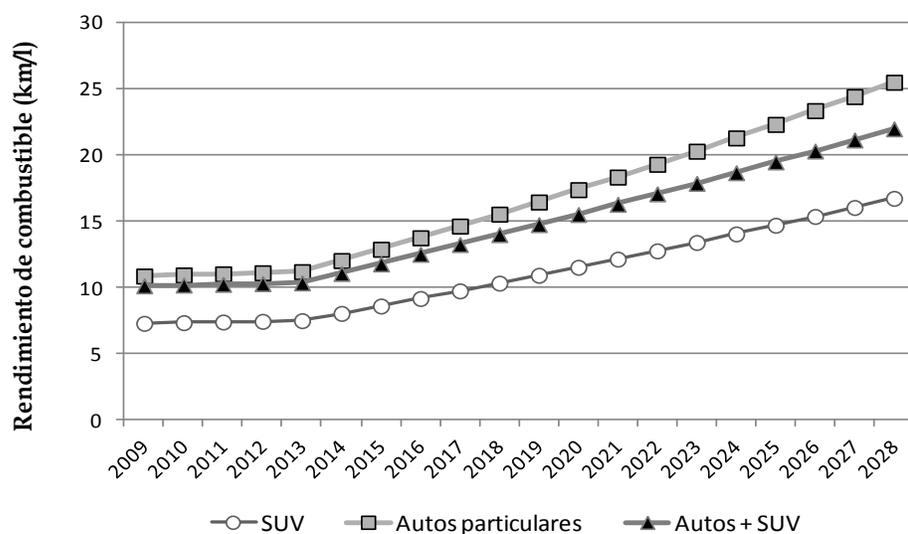


Figura 25. Mejora del rendimiento promedio de combustible en Ciudad por la introducción gradual de VHE, periodo 2009-2028.

El efecto de aumentar el rendimiento de combustible de la flota de vehículos particulares induce una reducción en el consumo de combustible y por ende una reducción de emisiones de CO₂. Con respecto a los demás factores de emisión se considera que la reducción en el consumo de combustible tendrá un impacto inversamente proporcional en los factores de emisión considerados en el modelo MOVEE, conforme a la siguiente ecuación:

$$\mathbf{FEH}_i = \frac{\mathbf{Rend\ auto\ convencional}}{\mathbf{Rend\ auto\ conv.+ hib.}} * (\mathbf{FE}_i) \dots(\text{Ecuación 14})$$

Donde:

- FEH_i = Factor de emisión de la mezcla de autos convencionales e híbridos, para el contaminante o gas de efecto invernadero tipo i , expresado en unidades de masa por distancia recorrida (g/km).
- FE_i = Factor de emisión de autos convencionales, para el contaminante o gas de efecto invernadero tipo i , expresado en unidades de masa por distancia recorrida (g/km).
- i = Tipo de contaminante o gas de efecto invernadero (p. ej., PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO_x), excepto CO₂.

2.2. Aumentar la red del sistema de transporte público: Autobuses de transporte rápido (ATR)

a) Cambio modal de transporte privado hacia el ATR

La Encuesta Origen-Destino 2007 de la ZMVM (SETRAVI - DF, 2007) muestra que 34.3% de los recorridos fijos se realizan en auto particular; 25.5% con el propósito ir al trabajo y 8.8% para ir a la escuela. Los autos particulares tienen un factor de ocupación de 1.73 pasajeros por vehículo, mientras que el Metrobús (autobús de transporte rápido o BRT por sus siglas en inglés) tiene un factor de ocupación de 160 pass/veh (Calderón, 2006), al igual que el Mexibús (Mexibús, 2012).

Propuesta 1: Sustituir el 80% de los recorridos fijos de los autos particulares por el ATR. El 20% continuará realizándose en auto privado hasta un estacionamiento donde se toma el ATR. La sustitución reducirá los recorridos de los autos privados (pass-km/año) pero aumentará el número de ATR (Tabla 22). La incorporación del ATR se realiza gradualmente a partir del 2014 hasta cubrir el 80% de los recorridos.

Tabla 22. Factores de Reducción (FR) de los recorridos de autos particulares vs crecimiento de la red del ATR.

Año	Distrito Federal		Estado de México	
	No. Metrobús	FR recorrido autos	No. Mexibús	FR recorrido autos
2010	0	0.0%	0	0.0%
2012	0	0.0%	0	0.0%
2014	160	2.9%	80	3.0%
2016	480	8.3%	240	8.4%
2018	800	13.4%	400	13.2%
2020	1,120	18.1%	560	17.5%
2022	1,440	22.5%	720	21.3%
2024	1,760	26.6%	880	24.7%
2026	1,873	27.4%	1,032	27.4%
2028	1,929	27.4%	1,087	27.4%

b) Cambio modal de microbuses hacia el ATR

El microbús fue concebido originalmente para el transporte de carga. A mediados de los 80's fue adaptado para el transporte de pasajeros con una capacidad de 40 pasajeros por vehículo en promedio. Actualmente, el microbús es considerado un transporte contaminante, inseguro, obsoleto e ineficiente (López Olvera, 2009).

Las políticas locales buscan eliminar el uso del microbús mediante la prohibición de nuevas concesiones y la nula renovación de la flota, consideración establecida en el escenario base. En el 2008, la flota de microbuses registra más de 30 mil unidades en la ZMVM; y a pesar de las políticas, en el 2028 habrá un poco más de 19 mil unidades (Tabla 19).

Propuesta 2: Acelerar la eliminación de los microbuses al sustituir parte de la flota por autobuses articulados de mayor capacidad (ATR). Considerando que a partir del 2014 y hasta el 2028, la red del ATR aumentará 2 líneas por año con 80 unidades por línea, y que cada línea sustituye 300 microbuses.

Escenario II: Aumentar la red del ATR bajo las consideraciones establecidas en las propuestas 1 y 2 (Tabla 23).

Tabla 23. Escenario II. Crecimiento total de la red del ATR en la ZMVM, 2010-2028.

Año	Número de autobuses articulados (Metrobús y Mexibús)		
	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuestas 1 y 2 (Integradas)
2010	0	0	0
2012	0	0	0
2014	240	160	400
2016	720	480	1,200
2018	1,200	800	2,000
2020	1,680	1,120	2,800
2022	2,160	1,440	3,600
2024	2,640	1,760	4,400
2026	2,905	2,080	4,985
2028	3,016	2,400	5,416

Capítulo V. Análisis de resultados

1. Consumo de energía

El escenario base advierte un aumento de la demanda de energía en el transporte de pasajeros de la ZMVM de 29.3% para el 2028 con respecto al 2008. Este aumento será causado por la adición de más de 84 mil unidades que se suman en promedio a la flota vehicular cada año (89% vehículos particulares), reflejando un crecimiento de la flota vehicular a una TCMA de 1.7%.

En este trabajo se presentan dos escenarios vinculados con la innovación tecnológica y el cambio modal del transporte de pasajeros, público y privado, como estrategias para aminorar la tendencia del escenario base y promover un transporte sustentable en la ZMVM. La implementación conjunta, a partir del 2014, abatiría el crecimiento de la demanda de energía hasta un valor de 224 PJ/año, representando una reducción de 94 PJ (29%) con respecto al 2028 del escenario base (Figura 26).

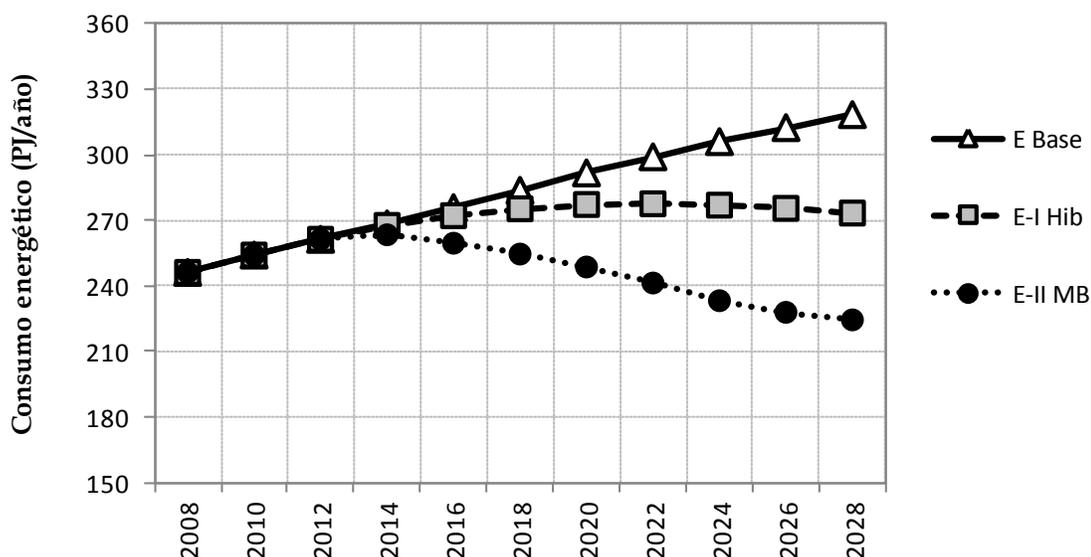


Figura 26. Escenarios de consumo de energía en el transporte de pasajeros de la ZMVM (en PJ/año), periodo 2008-2028.

El Escenario I plantea incrementar gradualmente el rendimiento global de combustible de los vehículos nuevos de uso particular (de 10 km/l en el 2014 a 22 km/l en el 2028), reduciendo la demanda de energía 45 PJ (14%) en el 2028 con respecto al escenario base. Esta reducción se logra mediante la sustitución progresiva de las ventas de vehículos nuevos convencionales por vehículos híbridos; sin embargo, resultados similares podrían obtenerse mediante el establecimiento de una norma de rendimiento de combustible. Tal es el caso de los Estados Unidos, en donde su norma vehicular planea alcanzar un rendimiento de combustible de 20.9 km/l en el 2025 (Figura 6).

Particularmente, la reducción de 45 PJ en el consumo de energía del transporte de pasajeros de la ZMVM; 32 PJ (71%) corresponden al DF y 13 PJ (29%) al Estado de México. Los resultados en el Estado de México son menores que en el Distrito Federal, porque su flota vehicular es menor y cuenta con un mayor número de vehículos usados. Este hecho afecta negativamente el rendimiento global de combustible de la flota vehicular.

El Escenario II busca dar preferencia al uso del transporte público de pasajeros sobre el auto particular y mejorar el ordenamiento vial con la sustitución parcial del microbús por autobuses de transporte rápido. En la primera propuesta, se establece la posibilidad de que los usuarios del auto particular efectúen el 80% de sus viajes (que realizan a la escuela y al trabajo) en transporte público, lo que implica adicionar 1,929 unidades a la red del Metrobús en el DF y 1,087 unidades a la red del Mexibús en el Edo. Méx., haciendo un total de 3,016 autobuses de transporte rápido para la ZMVM (Tabla 22). Aunado con la segunda propuesta de sustituir parte de la flota de microbuses por autobuses de transporte rápido (Tabla 23), la ZMVM requerirá la compra de 5,416 autobuses de transporte rápido y crear 69 líneas adicionales (con 80 unidades cada línea) en el lapso de 14 años; es decir, a partir del 2014 se necesitan inaugurar aproximadamente 5 líneas nuevas cada año.

Con la red extendida del Metrobús y del Mexibús (Escenario II), el transporte de pasajeros de la ZMVM reduciría 49 PJ (15%) el consumo de energía en el 2028, alcanzando junto con el Escenario I, una reducción de 94 PJ con respecto al Escenario Base, equivalente a un ahorro anual de 2,896 millones de litros de gasolina (15% de las importaciones nacionales de gasolina registradas en 2009). Asimismo, se lograría invertir la tendencia creciente del consumo de combustible, a pesar del continuo aumento de la flota vehicular.

2. Emisiones de GEI

Los escenarios de emisiones de GEI (ó CO_2 equivalente) para el transporte de pasajeros de la ZMVM se comportan de manera similar al consumo de energía (Figura 27). El Escenario Base muestra un crecimiento de las emisiones de GEI de 30.2% del 2008 al 2028. Con respecto al Escenario Base, los escenarios de transporte sustentable muestran una reducción de las emisiones de GEI en 13.8% en el Escenario I; y 14.8% en el Escenario II. En su conjunto, las emisiones de GEI disminuyen 28.6%, equivalente a 6.6 millones de ton/año de CO_2 eq, con el beneficio de abatir las emisiones de GEI a partir del 2016.

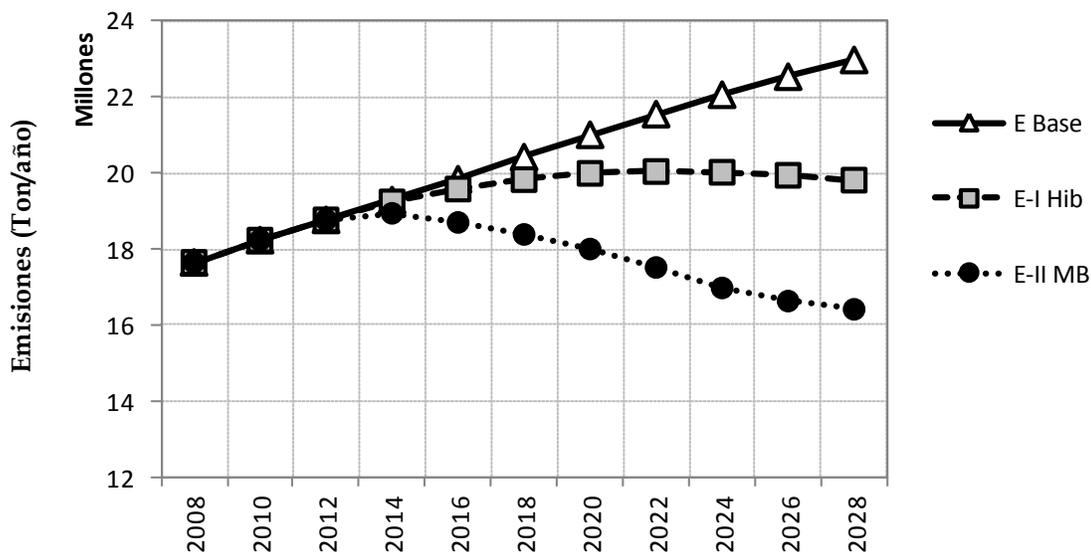


Figura 27. Escenarios de emisiones de GEI del transporte de pasajeros ZMVM (en Ton/año de CO_2 eq), periodo 2008-2028.

Nota: Equivalencia en CO_2 de una medida de gas (CO_2e). Dióxido de Carbono (CO_2), 1; Metano (CH_4), 25; Óxido Nitroso (N_2O), 298.

En la Figura 28 se muestran los resultados de los escenarios de emisiones para cada uno de los GEI considerados (CO_2 , CH_4 y N_2O). En el Escenario Base, las emisiones de CH_4 presentan el menor crecimiento (4.5%), y con la aplicación de los Escenarios I y II se logra abatir el crecimiento hasta un 16%, atribuible principalmente por la introducción de autobuses de transporte rápido que utilizan diesel en lugar de microbuses que utilizan gasolina y gas LP, así como la parte correspondiente de los viajes de autos particulares que utilizan gasolina. Las

emisiones de N₂O presentan el mayor crecimiento (31.7%) y a diferencia del CO₂ y CH₄, las emisiones del N₂O no se logran abatir con la implementación de las estrategias propuestas para el transporte sustentable.

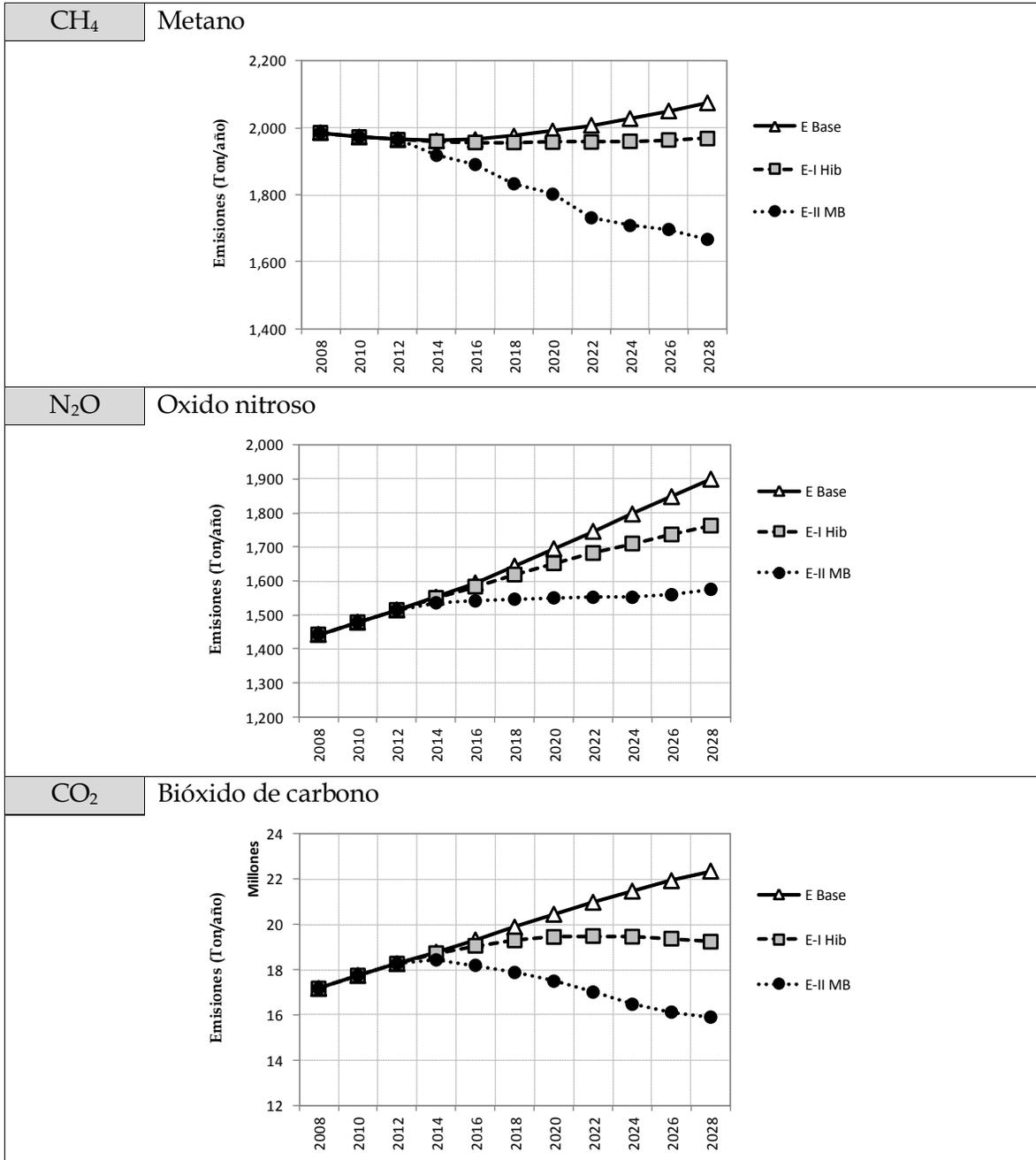


Figura 28. Escenarios de emisiones de GEI (CH₄, N₂O y CO₂) del transporte de pasajeros ZMVM (en Ton/año), periodo 2008-2028.

3. Emisiones de contaminantes criterio

En la Figura 29 se muestran los resultados de los escenarios de emisiones de cada uno de los contaminantes criterio seleccionados (PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , CO , NO_x y COV). En el caso de las emisiones de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y NO_x , se espera que la implementación conjunta del Escenario I y II reduzcan cerca de la mitad el crecimiento de las emisiones del Escenario Base en el 2028.

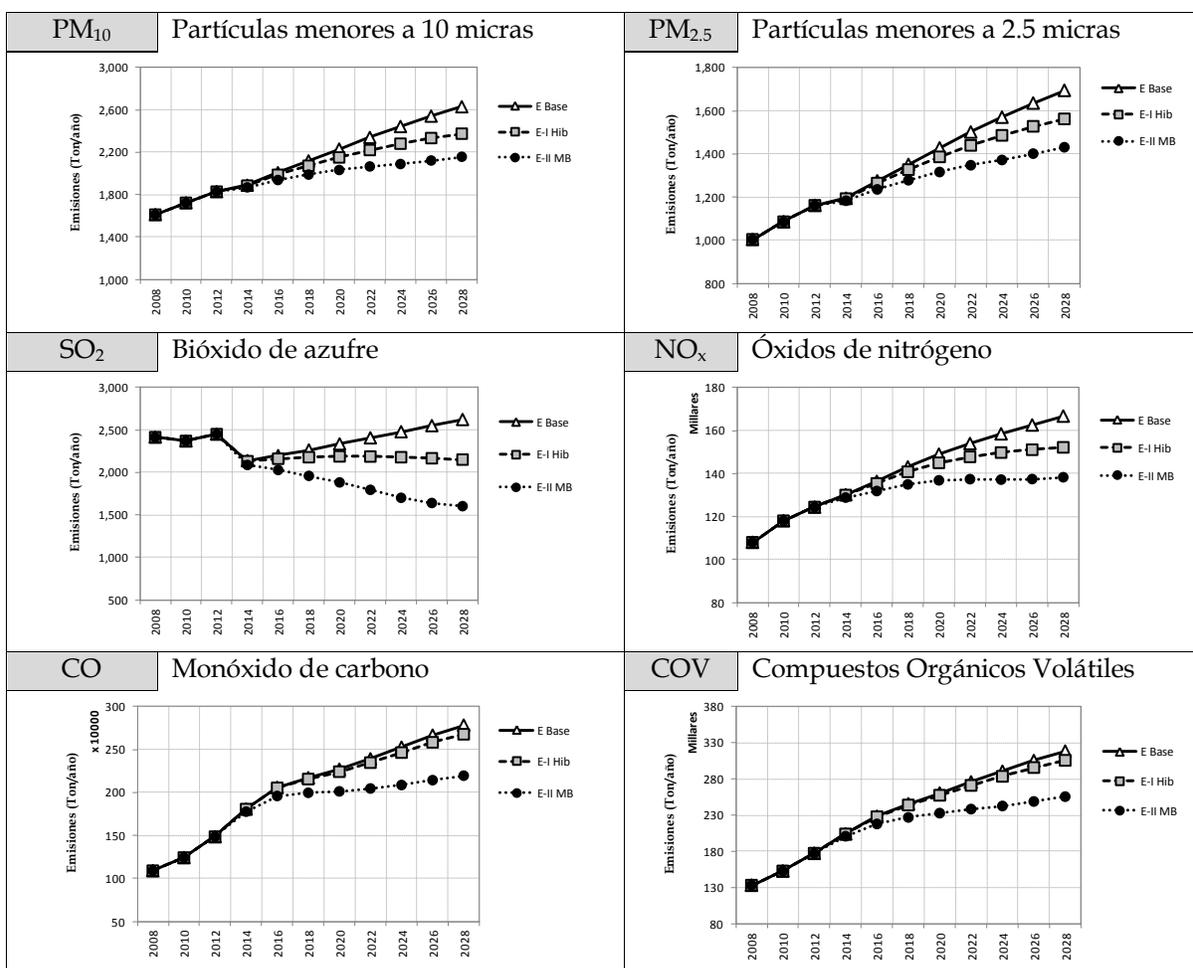


Figura 29. Escenarios de emisiones de contaminantes criterio del transporte de pasajeros ZMVM (en Ton/año), periodo 2008-2028.

Con respecto a las emisiones de CO y COV, el Escenario II muestra un descenso mayor que el Escenario I, al reducir 17.3% las emisiones de CO y 15.7% las emisiones de COV del Escenario Base; mientras que en el Escenario I, sólo se reducen aproximadamente 4% ambos contaminantes.

Las emisiones de SO₂, presentan el menor crecimiento (de 8.6%) en el escenario base y con la implementación de los Escenarios propuestos para el transporte sustentable, el crecimiento de las emisiones de SO₂ sería negativo. Estos resultados son causados por el uso de diesel de ultra bajo azufre en autobuses y Metrobús a partir del 2014.

Capítulo VI. Conclusiones

El desarrollo del Modelo Vehicular de Escenarios de Emisiones (MOVEE), implicó la construcción e integración de robustas bases de datos sobre el transporte de pasajeros de México y de la Zona Metropolitana del Valle de México. Entre ellas, la base de datos sobre las ventas de vehículos nuevos a nivel nacional durante los últimos 20 años (periodo 1988 - 2008), la cual muestra el vigoroso crecimiento que ha tenido la industria automotriz al triplicar sus ventas, compuestas principalmente por autos subcompactos y compactos, con 77% de las ventas totales en promedio.

En los últimos años, el mercado mexicano de vehículos nuevos presenta un cambio en la composición del parque, en donde los vehículos de uso múltiple, que en promedio registran el rendimiento de combustible más bajo (de 8.5 km/l en 2008), han ganado terreno en el porcentaje de ventas a los autos subcompactos y compactos, con rendimientos de 13.0 y 11.1 km/l en 2008, respectivamente; por lo que el cálculo del índice de cambio estructural advierte una pérdida de 4 puntos porcentuales en la eficiencia global; es decir, si la constitución del parque hubiera permanecido igual a la que se tenía en 1988, la eficiencia del parque presentaría un crecimiento de 10% en lugar del 6% que se obtuvo en términos reales, resultando una pérdida efectiva de la eficiencia del parque vehicular mexicano, situación que se asemeja a lo sucedido en otros países como Estados Unidos y Canadá, aunque en menor proporción.

Por muchos años, los escasos esfuerzos por legislar la eficiencia vehicular en México, se hacen evidentes al constatar la falta de una estructura institucional que cuente con los recursos necesarios para dar seguimiento veraz y permanente a las regulaciones establecidas por el gobierno. La falta de laboratorios de prueba donde se pueda verificar y certificar la información de los rendimientos vehiculares de las empresas ha consentido que los rendimientos de combustible reportados en México sean sensiblemente superiores a los reportados por la EPA en Estados Unidos.

En los datos históricos se encontraron discrepancias entre los datos oficiales de rendimiento de combustible de CONUEE y EPA, del orden de 20%; no obstante, ambas fuentes de información tienen un peso específico importante en el análisis global del rendimiento de combustible, debido a que EPA cubre la mayor parte de los modelos vendidos, mientras que la CONUEE cubre los modelos más vendidos en México. Ahora, con la reciente publicación de la norma NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013, la expectativa es la armonización de las normas de rendimiento de combustible o gases de efecto invernadero en vehículos nuevos de pasajeros de Estados Unidos, Canadá y México, en donde el gobierno mexicano tiene proyectado alcanzar en el 2016 un rendimiento de combustible de 14.9 km/l en el parque de vehículos nuevos de pasajeros.

Los escenarios 2008-2028 de demanda de energía, emisiones contaminantes y emisiones de GEI del transporte de pasajeros de la Zona Metropolitana del Valle de México, fueron construidos mediante el modelo desarrollado de abajo hacia arriba, denominado MOVEE. En este trabajo se presentan 3 escenarios, un escenario base y dos propuestas de escenarios para el transporte sustentable vinculados con la innovación tecnológica y el cambio modal del transporte de pasajeros, público y privado.

El Escenario Base advierte que las tendencias en el consumo de energía y la generación de emisiones contaminantes y GEI, debidas al transporte de pasajeros en la ZMVM, tendrán un fuerte impacto negativo en la economía al incrementar sus necesidades de energía (29.3% más en el 2028 con respecto al 2008). El consumo de energía está basada en combustibles fósiles; y por tanto también tendrá un impacto en la salud de sus habitantes, el medio ambiente y el calentamiento global, este último afectado por el incremento de 30.2% del CO₂ equivalente en el 2028.

Con respecto a los escenarios de transporte sustentable, la estrategia de elevar el rendimiento de combustible promedio de la flota de vehículos particulares mediante la introducción de autos híbridos (Escenario I), disminuye aproximadamente 14% el crecimiento del consumo de energía y las emisiones de GEI para el 2028. Resultados similares podrían obtenerse con la ampliación de la norma de rendimiento de combustible mexicana hasta el 2028, considerando la misma proyección de la Norma de Estados Unidos al 2025 (de 20.9 km/l).

Dar preferencia al uso del transporte público de pasajeros sobre el auto particular y mejorar el ordenamiento vial con la sustitución parcial del microbús por autobuses de transporte rápido (Escenario II), reduciría 15% más el consumo de energía en el 2028.

La implementación conjunta de los escenarios I y II, alcanzaría en el 2028 una reducción en el consumo de energía de 29.5% con respecto al Escenario Base, equivalente a un ahorro anual de 2,896 millones de litros de gasolina (15% de las importaciones nacionales de gasolina de 2009) y una reducción aproximada de 6.5 millones de toneladas de emisiones de CO₂ equivalente. Además, se lograría abatir el consumo de energía 8.8% en el 2028 (22 PJ menos que los registrados en el 2008); no obstante que en el 2028 se espera que la flota vehicular del transporte de pasajeros de la ZMVM aumente casi 1.7 millones de unidades; es decir, 40% más que en el 2008.

Frente a un escenario donde el auto particular seguirá siendo el principal transporte de pasajeros en la ZMVM, con 88% de los casi 6 millones de vehículos estimados para el 2028, se requiere de soluciones integrales que impulsen con mayor fuerza a la movilidad sustentable en la ZMVM, en donde se contemple: utilizar los modos de transporte más eficientes o de menor consumo energético por unidad transportada, promoviendo el no motorizado (ciclovías) o transporte público multimodal, de alta capacidad, eficiente, poco contaminante, seguro, cómodo y accesible; evitar o reducir los viajes a través de la integración del uso de suelo, planeación de transporte e incluso con tecnologías de comunicación; incentivos económicos y financieros para vehículos verdes o cero emisiones (híbridos y eléctricos); precios reales que incluyan las externalidades (precio verde); fondos para la innovación tecnológica; capacitación a operadores (conducción inteligente); concientización a la ciudadanía para modificar sus comportamientos de consumo y de movilidad; y finalmente, medición y seguimiento de los resultados, mediante laboratorios, estudios e indicadores de cumplimiento de objetivos.

Glosario

Antropogénico (INE, 2003).- Que es de origen humano, que es producido por el hombre.

Carburador (INE, 2009).- es el dispositivo que hace la mezcla de aire-combustible en los motores a gasolina.

Ciclo de manejo (INE, 2009).- es un perfil de velocidades trazado en un plano velocidad-tiempo, que representa una forma de conducir en una ciudad o autopista, tomando en cuenta la tecnología del vehículo, las características del tráfico, de las carreteras, características climáticas y geográficas y también características de los mismos conductores.

Ciclo de manejo LA4 (INE, 2009).- la prueba FTP 75 es empleada en los Estados Unidos para la certificación de las emisiones de vehículos livianos, empleando el ciclo de prueba conocido como LA4, que simula una ruta urbana con rangos de velocidad que oscilan entre 0 y 91.2 km/h y una duración de 2,475 segundos (41 minutos con 15 segundos) y 17.77 km recorridos durante los cuales se pueden distinguir cuatro diferentes etapas: una de arranque en frío (después de mantener el motor apagado por un mínimo de 12 horas), otra de circulación a temperatura estabilizada, otra con el motor apagado, y la última de arranque.

Convertidor catalítico (INE, 2009).- este término designa genéricamente a un reactor instalado luego del múltiple de escape. Tiene una cubierta de acero inoxidable que contiene en su interior al catalizador, que es una sustancia químicamente activa, soportada por un elemento tipo panel de material cerámico o metálico, recubierto por una capa amortiguadora que lo protege de golpes. Es usado para el control de la emisión de los gases de combustión.

Convertidor catalítico de dos vías (INE, 2009).- convertidores catalíticos diseñados específicamente para llevar a cabo reacciones químicas de oxidación que disminuyen los niveles de emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos.

Convertidor catalítico de tres vías (INE, 2009).- convertidores catalíticos diseñados para llevar a cabo reacciones químicas de oxidación que disminuyen los niveles de emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno.

Factor de emisión, FE (INE, 2003).- El factor de emisión es la cantidad de emisiones que se tiene por nivel de actividad unitario.

Método de nivel 1, Tier 1 (INE, 2003).- Es un método que utiliza la menor información que se tiene disponible para la estimación de emisiones.

Método de nivel 2, Tier 2 (INE, 2003).- Es un método que descompone un proceso o actividad económica en sus etapas esenciales para estimar en cada una de ellas las emisiones.

Abreviaturas y acrónimos

AMIA: Asociación Mexicana de la Industria Automotriz.

CAM: Comisión Ambiental Metropolitana.

CH₄: Metano.

CO: Monóxido de carbono.

CO₂: Bióxido de carbono.

COESPO: Consejo Estatal de Población.

CONAE: Comisión Nacional para el Ahorro de Energía.

CONAPO: Consejo Nacional de Población.

CONUEE: Comisión Nacional para el Usos Eficiente de la Energía.

COT: Compuestos orgánicos totales.

COV: Compuestos orgánicos volátiles.

CMM: Centro Mario Molina.

DF: Distrito Federal.

DOE: Department of Energy.

EdoMex: Estado de México.

EPA: Environmental Protection Agency.

gCO₂e/km: gramos de CO₂ equivalente por kilómetro.

GDF: Gobierno del Distrito Federal.

GEI: Gases de efecto invernadero.

GODF: Gaceta Oficial del Distrito Federal.

HC: Hidrocarburos.

HNC: Programa Hoy No Circula.

IAM: Industria Automotriz en México.

IEA: Agencia Internacional de Energía.

INE: Instituto Nacional de Ecología.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas.

km/l: kilómetros por litro.

Mton: Millón de toneladas.

mpg: millas por galón.

NO_x: Óxidos de Nitrógeno.

N₂O: Oxido nitroso.

OCDE: Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo.

O₃: Ozono.

PICCA: Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica.

PJ: Petajoule = $1 \cdot 10^{15}$ Joules.

PM_{2.5}: Partículas menores a 2.5 micrómetros de diámetro.

PM₁₀: Partículas menores a 10 micrómetros de diámetro.

PRECCA: Promedio de rendimiento de combustible por categoría.

PREMCE: Promedio de rendimiento mínimo de combustible por empresa.

Proaire: Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la ZMVM.

PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

PST: Partículas Suspendidas Totales.

SE: Secretaría de Economía.

SETRAVI: Secretaría de Transportes y Vialidad del Distrito Federal.

SEMARNAT: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SENER: Secretaría de Energía.

SMA-GDF: Secretaría del Medio Ambiente del GDF.

SO₂: Bióxido de azufre.

SEPAFIN: Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial

TLCAN: Tratado de Libre Comercio de América del Norte.

TCMA: Tasa de crecimiento media anual.

VHE: Vehículos híbridos eléctricos.

ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.

Bibliografía

- Ajanovic, A., Schipper, L., & Haas, R. (2012). The impact of more efficient but larger new passenger cars on energy consumption in EU-15 countries. *Energy*, 1 (48), 346-55.
- An, F., & Sauer, A. (2004, December). *Comparison of passenger vehicle fuel economy and GHG emission standards around the world*. Retrieved from Pew Center on Global Climate Change: http://www.pewclimate.org/global-warming-in-depth/all_reports/fuel_economy/index.cfm
- An, F., & Sauer, A. (Updated 2012, June). *Global Comparison of Light-Duty Vehicle Fuel Economy/GHG Emissions Standards*. Retrieved 2013, from The International Council on Clean Transportation, ICCT: <http://www.theicct.org/global-passenger-vehicle-standards-update>
- An, F., Gordon, D., He, H., & Kodjak, D. a. (2007). *Passenger Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards: A Global Update*. Washington, DC: The International Council on Clean Transportation.
- Ang, B., & Zhang, F. (2000). A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy*, 25, 1149-1176.
- Bandivadekar, A., Bodek, K., Cheah, L., Evans, C., Groode, T., Heywood, J., et al. (2008). *On the Road in 2035*. Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Energy and the Environment, July 2008.
- Blumberg, K. (2012, July 19). *Mexico light-duty vehicle CO2 and fuel economy standards*. Retrieved Feb 2014, from The International Council on Clean Transportation: <http://www.theicct.org/mexico-ldv-co2-standards>
- Blumberg, K. O., Walsh, M. P., & Pera, C. (2003). *Low-sulfur gasoline & diesel: The key to lower vehicle emissions*. International Council on Clean Transportation. Published May 30, 2003.
- Borja-Aburto, V. H., Castillejos, M., Gold, D. R., Bierzwinski, S., & Loomis, D. (1998). Mortality and ambient fine particles in southwest Mexico City, 1993-1995. *Environmental Health Perspectives*, 106 (12), 849-856.
- BP. (2008). *BP Statistical Review of World Energy 2008*. London, UK: British Petroleum.
- Bulkeley, H. (2010). Cities and the Governing of Climate Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 229-53.

- Calderón, G. (2006). Resultados del Metrobús en la reducción de emisiones. México. Sept. 29, 2006: Presentado en Power Mex Clean Energy & Efficiency.
- Castillejos, M., Borja-Aburto, V. H., Dockery, D. W., Gold, D. R., & Loomis, D. (2000). Airborne coarse particles and mortality. *Inhalation Toxicology*, 12, 61-72.
- Castillejos, M., Gold, D. R., D, D. W., Tosteson, T., Baum, T., & Speizer, F. E. (1992). Effects of ambient ozone on respiratory function and symptoms in Mexico City schoolchildren. *American Review Respiratory Disease*, 145, 276-282.
- Chavez, C., & Sheinbaum, C. (2014). Sustainable passenger road transport scenarios to reduce fuel consumption, air pollutants and GHG (greenhouse gas) emissions in the Mexico City Metropolitan Area. *Energy* (66), 624-634.
- CMM. (2007). *Proyecto: Formulación de lineamientos de política en materia de eficiencia energética en sectores clave de la economía mexicana para el programa especial de cambio climático*. Centro Mario Molina. México: Preparado para el Instituto Nacional de Ecología.
- COESPO. (2009). *Conformación de las zonas metropolitanas: panorama demográfico*. . Gobierno del Estado de México, México: Consejo Estatal de Población.
- Colomer Ferrándiz, J. V., & Insa Franco, R. (2006). El consumo energético en el transporte urbano y metropolitano: Los modos ferroviarios. *Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, 76, 48-51.
- CONAE. (2002). *Convenio de concertación que tiene por objeto de establecer un marco de concertación general para la eficiencia energética de vehículos automotores comercializados en el país y los rendimientos de combustible de automóviles nuevos que incorporan M.C.I.* Firmado el 12 de febrero de 2002. México, DF: Comisión Nacional para el Ahorro de Energía.
- CONAPO. (2010). *México en cifras, indicadores demográficos básicos 1990-2030*. Obtenido de Consejo Nacional de Población, México: <http://www.conapo.org.mx>
- Constanza, S. (1999). *Evaluación de índices de exposición en el estudio de efectos a la salud por contaminantes atmosféricos del sistema de vigilancia epidemiológica ambiental en la zona metropolitana de la Ciudad de México*. Instituto Nacional de Salud Pública, Secretaría de Salud, En: Conserva. Reporte de estudios financiados, Capítulo 2: Salud. Mexico: Centro Nacional de Salud Ambiental.
- CONUEE. (2002-2008). *Rendimientos oficiales de combustible: Automóviles y camiones ligeros comercializados en México*. Recuperado el Agosto de 2009, de Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía: http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/Rendimientos_combustible

- Dalkmann, H., & Brannigan, C. (2007, re-edition December 2010). *Transport and climate change, module 5e, sustainable transport, a sourcebook for policy-makers in developing cities*. Eschborn: GTZ global.
- Davis, N., Lents, J., Nikkila, N., & Osses, M. (2004). *Mexico City vehicle activity study. Final Report Submitted July 6, 2004*. 21573 Ambushers St. Diamond Bar, CA 91765: International Sustainable Systems Research.
- Delgado, M. (2008). *Transporte y Medio Ambiente en un mundo globalizado: Experiencias en la Ciudad de México*. Mexico, DF: Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
- EPA-DOE. (2000-2008). *Annual Fuel Economy Guide*. (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, EERE) Recuperado el Agosto de 2009, de Environmental Protection Agency and Department of Energy, US: <http://www.fueleconomy.gov>
- EPA-DOE. (2012). *Fuel Economy: How Hybrids Work*. Environmental Protection Agency and Department of Energy.
- Fulton, L. (2004). *Reducing Oil Consumption in Transport: Combining Three Approaches*. Paris: AIE/ Office of Energy Efficiency, Technology and R&D Working Paper.
- GDF. (2005). *Declaratoria de la Zona Metropolitana del Valle de México*. . México, DF: Gaceta Oficial del DF, publicado el 23 de enero de 2005.
- GDF. (2010). *Programa Integral de Transporte y Vialidad 2007 – 2012*. . México, DF: Gaceta Oficial del DF, publicado el 22 de marzo de 2010.
- GFEI. (2009). *Making cars 50% more fuel efficient by 2050 worldwide*. FIA Foundation, International Energy Agency, International Transport Forum and United Nations Environment Programme. Paris: 50by50: The Global Fuel Economy Initiative.
- Gold, D. R., Damokosh, A., III, C. A., Dockery, D. W., McDonnell, W. F., Serrano, P., et al. (1999). Particulate and ozone pollutant effects on the respiratory function of children in southwest Mexico City. *Epidemiology* , 10, 8-16.
- Guo, H., Sung, H.-M., Dai, W., & Zhang, Q.-Y. (2004). *Development of high-resolution motor vehicle emission inventories for city-wide air quality impact analysis in China*. Trinity Consultants Inc., Dallas, TX; and College of Environmental & Resource.
- Hallegatte, S., Henriot, F., & Corfee-Morlot, J. (2012). *The economics of climate change impacts and policy benefits at city scale: A conceptual framework*. Retrieved from OECD environment Working Papers No. 4: <http://www.environmentportal.in/files/climate-economics.pdf>

- Harikesh, S. N., & Chandra, E. B. (2000). *Modeling soak-time distribution of trips for mobile source emissions forecasting: Techniques and applications*. The University of Texas at Austin: Center for Transportation Research.
- Hernández-Cadena, L., Tellez-Rojo, M. M., Sanin-Aguirre, L. H., Lacasana-Navarro, M., Campos, A., & Romieu, I. (2000). Relationship between emergency consultations for respiratory diseases and air pollution in Juarez City, Chihuahua. *Salud Pública de México* , 42 (4), 288-97.
- Heywood, J. M. (2008). *More sustainable transport: the role of energy efficient vehicle technologies*. Leipzig: Report prepared for the International Transport Forum.
- Heywood, J. M. (2008). *More sustainable transport: the role of energy efficient vehicle technologies*. Leipzig : Report prepared for the International Transport Forum.
- Holguin, F., Tellez-Rojo, M. M., Hernández, M., Cortez, M., Chow, J. C., Watson, J., et al. (2003). Air pollution and heart rate variability among the elderly in Mexico City. *Epidemiology* , 14 (5), 521-7.
- IEA. (2008b). *Energy Technology Perspectives 2008 – Scenarios and strategies to 2050*. Paris: International Energy Agency.
- IEA. (2013). *Key World Energy Statistics*. Retrieved 2014, from International Energy Agency: <http://www.iea.org>
- IEA. (2009). *Transport, energy and CO2: Moving toward sustainability*. France, October 2009: International Energy Agency. OECD Publishing.
- IEA. (2008a). *World Energy Outlook 2008*. Paris: International Energy Agency.
- INE. (2005). *Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones*. Instituto Nacional de Ecología. México, DF: INE - SEMARNAT - Western Governors' Association.
- INE. (2009). *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas*. Instituto Nacional de Ecología. México, DF: INE - SEMARNAT - Western Governors' Association.
- INE. (2003). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Energía, Sector Transporte 2000-2001*. México, DF: Elaborado por el Instituto Mexicano del Petróleo. Noviembre 2003.
- INE. (2006). *Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999*. Instituto Nacional de Ecología. México, DF: INE - SEMARNAT - Western Governors' Association.
- INEGI. (2004-2006). *Eficiencia energética de vehículos nuevos por modelo*. Obtenido de INEGI, México: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mamb154>

- INEGI. (2010). *Estadísticas de vehículos de motor registrados en circulación 1980-2008. Sistema de Información Económica*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México: <http://www.inegi.org.mx>
- INEGI. (2000-2009). *La Industria Automotriz en México. Serie Estadísticas Sectoriales*. Recuperado el Agosto de 2009, de Biblioteca digital de INEGI, México: <http://www.inegi.org.mx>
- IPCC. (2006a). *Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 2: Energy, Chapter 3: Mobile Combustion*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2006b). *Orientation of the IPCC good practice and uncertainty management in national greenhouse gas. Chapter 2: Energy*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Lents, J., Osses, M., Davis, N., & Nikkila, N. (2004). Comparison of on-road vehicle profiles collected in seven cities worldwide. In *Proceedings of the 13th International Symposium on Transport and Air Pollution*. Boulder, CO, September 13-15, 2004.
- Levy, J., Buonocore, J., & Stackelberg, K. (2010). Evaluation of the public health impacts of traffic congestion: a health risk assessment. *Environmental Health* , 9, 65.
- Lizárraga, C. (2006). Movilidad urbana sostenible: un reto para las ciudades del siglo XXI. *Economía, Sociedad y Territorio* , VI (22), 283-321.
- Loomis, D., Castillejos, M., Gold, D. R., McDonnell, W., & Borja-Aburto, V. (1999). Air pollution and infant mortality in Mexico City. *Epidemiology* , 10, 118-123.
- López Olvera, M. A. (2009). El Transporte de pasajeros y el sistema vial en la Ciudad de México. En UNAM (Ed.), *Régimen jurídico del urbanismo, Memoria del Primer Congreso de Derecho Administrativo Mexicano* (págs. 259-281). México: Instituto de Investigaciones Jurídicas .
- Mani, A., Pai, M., & Aggarwal, R. (2012). *Sustainable urban transport in India: role of the auto-rickshaw sector*. Retrieved from World Resources Institute, EMARQ: http://pdf.wri.org/sustainable_urban_transport_india.pdf
- Mexibús. (2012). *TransMasivo*. Recuperado el Febrero de 2014, de Nuestros autobuses: <http://www.transmasivo.com.mx/autobuses.html>
- NARSTO. (2005). *Improving Emission Inventories for Effective Air Quality Management Across North America*. Pasco, Washington, US: North American Research Strategy for Tropospheric Ozone.
- O'Neill, M., Loomis, D., & Borja-Aburto, V. H. (2004). Ozone, area social conditions, and mortality in Mexico City. *Environmental Research* , 24, 234-242.

- Romano, S. P. (2000). *Sintomatología respiratoria asociada a partículas menores de 10 µg (PM10) en el centro de la Ciudad de México*. Morelos, México: Instituto Nacional de Salud Pública.
- Romieu, I., Cortez-Lugo, M., Ruiz-Velasco, S., Sanchez, S., Meneses, F., & Hernandez, M. (1992). Air pollution and school absenteeism among children in Mexico City. *American Journal of Epidemiology* , 136, 1524-1531.
- Romieu, I., Meneses, F., Sienna-Monge, J. J., Huerta, J., Velasco, S. R., White, M. C., et al. (1995). Effects of urban air pollutants on emergency visits for childhood asthma in Mexico City. *American Journal of Epidemiology* , 141, 546-553.
- Rosas, I., McCartney, H. A., Payne, R. W., Calderon, C., Lacey, J., Chapela, R., et al. (1998). Analysis of the relationships between environmental factors (aeroallergens, air pollution, and weather) and asthma emergency room visits to a hospital in Mexico City. *Allergy* , 53, 394-401.
- Schipper, L., Marie-Lilliu, C., & Gorham, R. (2000). *Flexing the link between transport and greenhouse gas emissions: a path for the World Bank*. Paris: International Energy Agency.
- SEDESOL-CONAPO-INEGI. (2004). *Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2004*. México: Consejo Nacional de Población, Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- SEDESOL-CONAPO-INEGI. (2007). *Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2005*. México: Consejo Nacional de Población, Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- SEMARNAT. (21 de Junio de 2013). Emisiones de bióxido de carbono (CO₂) provenientes del escape y su equivalencia en términos de rendimiento de combustible, aplicable a vehículos automotores nuevos de peso bruto de hasta 3,857 kg. *NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013* . DF, México: Diario Oficial de la Federación.
- SENER-SIE. (2014). *Sistema de Información Energética*. Recuperado el 2014, de Secretaría de Energía. México: <http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController>
- SEPAFIN. (1981). *Decreto que establece rendimientos mínimos de combustible para automóviles*. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. México: Diario Oficial del 21 de diciembre de 1981.
- SETRAVI - DF. (2007). *Encuesta Origen - Destino 2007 de la ZMVM*. Recuperado el 2011, de <http://www.setravi.df.gob.mx/work/sites/stv/docs/EOD2007.pdf>
- Sheinbaum, C. (2008). *Problemática ambiental de la Ciudad de México*. México, DF: Limusa-Instituto de Ingeniería, UNAM.

- Sheinbaum, C., & Masera, O. (2000). Mitigating Carbon Emissions while Advancing National Development Priorities: The Case of Mexico. *Journal of Climatic Change*, 47 (3), 259-282.
- Sheinbaum, C., García, C., Solís, J. C., & Chávez, C. (2009). *Escenarios de consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de pasajeros en la Zona Metropolitana del Valle de México*. UNAM, Instituto de Ingeniería. México, DF: Reporte preparado para el Centro Virtual de Cambio Climático.
- Sheinbaum-Pardo, C., & Chavez-Baeza, C. (2011). Fuel economy of new passenger cars in Mexico: Trends from 1988 to 2008 and prospects. *Energy Policy* (39), 8153-8162.
- SMA-GDF. (2007). *Agenda Ambiental de la Ciudad de México. Programa de Medio Ambiente, 2007-2012*. México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
- SMA-GDF. (2008). *Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM 2006*. México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
- SMA-GDF. (2010b). *Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM 2008*. México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
- SMA-GDF. (2010a). *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero y carbón negro de la ZMVM 2008*. México, DF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.
- Solis, J., & Sheinbaum, C. (2013). Energy consumption and greenhouse gas emission trends in Mexican road transport. *Energy for Sustainable Development* (17), 280-7.
- Tellez-Rojo, M. M., Romieu, I., Polo-Peña, M., Ruiz-Velazco, S., Meneses-González, F., & Ávila, M. H. (1997). Efecto de la contaminación ambiental sobre las consultas por infecciones respiratorias en niños de la Ciudad de México. *Salud Pública de México*, 39, 513-522.
- Tellez-Rojo, M. M., Romieu, I., Ruiz-Velasco, S., Lezana, M., & Hernandez-Avila, M. (2000). Daily respiratory mortality and PM10 pollution in Mexico City: importance of considering place of death. *European Respiratory Journal*, 16 (3), 391-6.
- Tiwari, R., Cervero, R., & Schipper, L. (2011). Driving CO2 reduction by integrating transport and urban design strategies. *Cities* (28), 394-405.
- TLCAN. (1994). *Tratado de Libre Comercio de América del Norte (North American Free Trade, NAFTA)*. EEUU, Canadá y México, entró en vigor el 1 de enero de 1994.

- Torres-Meza, V. (2000). *Acute morbidity at primary care settings and air pollution in Mexico City*. Cuernavaca, Morelos, México: Master in Sciences, National Institute of Public Health.
- UITP. (2003). *Ticket to the Future: 3 Stops to Sustainable Mobility*. Union Internationale des Transports Publics. Bruselas: International Association of Public Transport.
- UNEP. (2009). *Hybrid Electric Vehicles: An overview of current technology and its application in developing and transitional countries*. United Nations Environment Programme.
- US-EIA. (2008). *International Energy Outlook 2008*. Office of Integrated Analysis and Forecasting. Washington, DC: Energy Information Administration, US Department of Energy.
- US-EIA. (2013, July). *International energy outlook 2013 with projections to 2040*. Retrieved from U.S. Energy Information Administration: www.eia.gov/ieo
- US-EIA. (2011). *U.S. Energy Information Administration*. Retrieved 2011, from <http://www.eia.gov/>
- WBCSD. (2004). *Mobility 2030: Meeting the Challenges to Sustainability*. Génova: World Business Council for Sustainable Development.
- WEC. (2011). *Global Transport Scenarios 2050*. London: World Energy Council.

Anexo 1. Artículo: "Fuel economy of new passenger cars in Mexico: Trends from 1988 to 2008"



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Energy Policy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enpol

Fuel economy of new passenger cars in Mexico: Trends from 1988 to 2008 and prospects

Claudia Sheinbaum-Pardo ^{a,*}, Carlos Chávez-Baeza ^b

^a Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Delegación Coyoacán, México, D.F., Mexico

^b Programa de Energía, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Planteo Del Valle, C.P. 03100, Delegación Benito Juárez, México, D.F., Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 July 2010

Accepted 7 October 2011

Available online 22 October 2011

Keywords:

Fuel economy

Passenger cars

Mexico

ABSTRACT

This paper analyzes trends in fuel economy (kilometers per liter) of new passenger vehicles in Mexico over a period of 20 years from 1988 to 2008. Results show that in this period, fuel economy of the new passenger vehicle fleet, including multipurpose vehicles (a category similar to sport utility vehicles, SUVs), increased by only 6.3%. A simple Laspeyres index analysis was developed to evaluate both the impact of changes in vehicle sales structure by category and the changes in fuel economy. Results show that increased sales of heavier, multipurpose vehicles in place of subcompact and compact vehicles, impacted negatively on the fleet average fuel economy. If the structure of sales had continued in the same proportions across all categories as in 1988, fuel economy would have increased by 11.0%, instead of the actual 6.3%. This result coincides with trends in other countries. The paper also presents different scenarios of passenger car fuel economy for the year 2020, and its implications for gasoline consumption and CO₂ emissions. The results may influence the new passenger vehicle fuel economy standard that is currently under discussion in Mexico.

© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction and objectives

1.1. The international situation

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the transportation sector was responsible for about 23% of all energy-related greenhouse gas (GHG) emissions in 2004 (Kahn Ribeiro et al., 2007). Passenger vehicles account for about 45% of this total, and will remain the predominant source of CO₂ emissions for the expected future (Kahn Ribeiro et al., 2007). According to the International Council on Clean Transportation (ICCT, 2010a), vehicle numbers are predicted to triple worldwide by 2050, with over 80% of growth occurring in developing countries. Given these forecasts, the developing world will shift from accounting for roughly 35% of world transportation GHG emissions in 2000, to 52–63% by the year 2030 (Price et al., 2006; Zegras, 2007).

One approach for decreasing CO₂ emissions related to fuel consumption from passenger transport, is to improve vehicle technology in order to reduce fuel consumption per kilometer driven. Improved fuel economy translates into reduced GHG

emissions, as less carbon dioxide (CO₂) is emitted for the distance driven.

To increase fuel economy, one of the strategies that has been applied in various countries is to adopt automobile fuel economy standards, which according to An and Sauer (2004), has proven to be one of the most effective tools in controlling fuel demand and GHG emissions from the transportation sector in many regions around the world.

The ICCT describes global passenger vehicle fuel economy and GHG emissions standards updated for April 2010 (ICCT, 2010a). Examples of other published sources that analyze policies for passenger transport fuel economy standards in different regions of the world are: An and Sauer (2004), which develops an international comparison of Organization of Economic Cooperation and Development (OECD) countries; Zachariadis (2006), who compares US and European fuel economy standards in the process of developing a baseline evolution of automobile fuel economy in Europe; Plotkin (2009), who discusses the importance of fuel economy and carbon standards for light vehicles; Wagner et al. (2009), who present the structure and impact of fuel economy standards for passenger cars in China; Oliver et al. (2009), who also discuss China's fuel economy standards; and Mahlia et al. (2010), which develops a review of fuel economy standards for motor vehicles with the possibilities of implementation in Malaysia. Regions with recently updated fuel economy standards and CO₂ emission standards include the US, Europe and China.

* Corresponding author. Tel.: +5255 5623 36 00x3693;

fax: +5255 5623 36 00x8051.

E-mail address: csp@pumas.iingen.unam.mx (C. Sheinbaum-Pardo).

In the case of the US, in May 2010, the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) and the Environmental Protection Agency (EPA) issued a joint final rule establishing a new national program to regulate model year 2012 through 2016 passenger cars and light trucks, in order to improve fuel economy and reduce GHG emissions (NHTSA, 2010). The combined car and truck average required fuel economy was set out in mpg (km/l) as 27.6 (11.7) in 2011; 29.7 (12.6) in 2012; 30.5 (12.9) in 2013; 31.3 (13.2) in 2014; 32.6 (13.8) in 2015; and 34.1 (14.4) in 2016.

In December 2008, the European Commission adopted a new regulation to reduce the average CO₂ emissions of new passenger cars to 130 g/km through improvements in vehicle efficiency technology, together with an additional 10 g/km cut achieved through supplementary measures including changes to tire pressure, gear shift indicators and air conditioning, as well as an increased use of biofuels. The standard is a linear weight-based manufacturer average in terms of CO₂ emissions, with a target year of 2015 for the entire new vehicle fleet and a phase-in starting in 2012. A more far-reaching 2020 target of 95 gCO₂/km was also announced; however, the European Commission will have to consider the logistics of achieving this target by 2013 (ICCT, 2010a).

In December 2009, the Chinese Ministry of Industry and Information Technology (MIIT) issued its proposed Phase III fuel consumption regulation for passenger cars, aimed at reducing the fuel consumption of new passenger vehicles to 7 l/100 km (167 gCO₂/km) by 2015. The Chinese Automotive Technology and Research Center (CATARC) is now developing a detailed implementation and enforcement plan to shift from a per-vehicle standard to a manufacturer average standard (ICCT, 2010a).

1.2. The Mexican situation

The transportation sector is responsible for the greatest fuel consumption in Mexico. Fuel demand for this sector increased by 127% from 1988 to 2008. However, over the first 10 years of this period (1988–1998), transport fuel demand increased at an average rate of growth of 3.3% per year, and from 1998 to 2008, growth rose to 5.1% per year (SE, 1997, 2005, 2009). Fig. 1 illustrates energy consumption by fuel in Mexico. As shown, gasoline demand grew at a higher rate than the other transportation fuels. From 1988 to 2000, gasoline demand increased at an average rate of growth of 2.0% per year, while from 2000 to 2008, it rose to 6.1% per year.

GHG emissions related to energy consumption in Mexico increased by 53% from 1990 to 2008; however, GHG emissions associated with transport fuel consumption increased by 102% over the same period (Sheinbaum et al., 2009). From 1990 to 2000, the average rate of growth of CO₂ emissions related to transport fuel consumption was 2.6% per year; which increased to 5.8% per year from 2000 to 2008.

In 2008, the transport sector represented 42% of CO₂ equivalent emissions related to fuel consumption (Sheinbaum et al., 2009), followed by power generation (25%), the industrial sector (14%), energy industries (11%), the residential sector (5%), agriculture (2%) and commerce (1%).

Besides the environmental impact, the accelerated increase in the consumption of transport fuels has produced an expansion in gasoline and diesel imports causing an imbalance in the Mexican balance of payments. In the 1990s, Mexico used to be a net exporter of petroleum (including oil products). Yet in 2008, 43% of the gasoline and 18% of the diesel consumed in Mexico were imported. For the same year, crude oil exports represented an income of 43 billion US dollars while oil product imports represented an expenditure of 21 billion US dollars (SE, 2010).

In 2008, road transportation was responsible for 92% of transport fuel consumption, followed by air (5%), maritime (2%), and rail (1%). However, there is no official data that breaks this figure of 92% down into more specific energy consumption by use or by mode (freight and passenger, private and public, urban and interurban). Despite this lack of data, it is likely that passenger cars represent an important share of road transportation fuel, because gasoline represents 72% of fuel consumption in this category, and passenger cars mainly use this fuel.

On the other hand, the passenger car fleet has tripled in recent decades. From 1990 to 2008, it increased from 6.3 to 18.7 million cars, and the motorization rate increased from 75 to 175 private cars per 1000 inhabitants (INEGI, 2010a, 2010b; CONAPO, 2010). Like gasoline consumption, during the period 1990–2000, the number of registered private passenger cars in Mexico increased at an average annual rate of growth of 4.6%, while from 2000 to 2008, it rose to 8.4% per year (Table 1).

Given this context, it is necessary to adopt measures that promote a reduction in the growth of gasoline and diesel consumption. One of the suggested strategies is to adopt automobile fuel economy standards. This would bring Mexico in line with the other OECD countries: it is a fact that, of the 30 countries forming the OECD, only Mexico and Iceland do not currently have

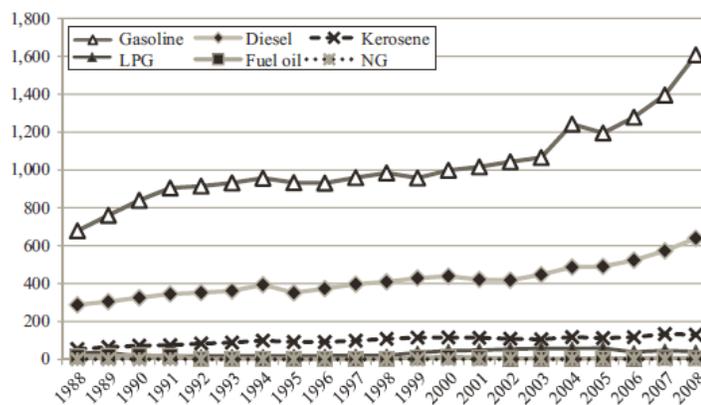


Fig. 1. Transport fuel consumption in Mexico (PJ).
Source: SE (1997, 2005, 2009).

Table 1
Motorization rate of private passenger cars in Mexico.
Source: INEGI (2010a, 2010b) and CONAPO (2010).

Year	Private car fleet (thousands)	Population (thousands)	Private car per 1000 inhabitants
1990	6260	83,971	75
1991	6643	85,583	78
1992	7079	87,185	81
1993	7411	88,752	84
1994	6897	90,266	76
1995	7184	91,725	78
1996	7508	93,130	81
1997	8086	94,478	86
1998	8714	95,790	91
1999	9213	97,115	95
2000	9786	98,439	99
2001	10948	99,716	110
2002	11,845	100,909	117
2003	12,336	102,000	121
2004	12,983	103,002	126
2005	13,846	103,947	133
2006	15,897	104,874	152
2007	17,146	105,791	162
2008	18,691	106,683	175

some form of fuel economy or GHG emission program for vehicles (An and Sauer, 2004; ICCT, 2007, 2010a).

Fuel economy standards are not new in Mexico. The country has a history where mandatory fuel economy standards for passenger cars are concerned. In 1981, the so-called *Promedio de Rendimiento Mínimo de Combustible por Empresa*, or PREMCE (Average minimum fuel economy by manufacturer), was published by the Mexican government (SEPAFIN, 1981), and was in force by 1982. The PREMCE's goal for 1990 was to reach an average fuel economy of 11 km/l. According to the evaluation criteria utilized in that year, this goal was achieved. Unfortunately, the PREMCE was withdrawn in 1990 in order to avoid contradiction with the North American Free Trade Agreement NAFTA (Fernández, 2004).

In early 2002, the National Commission for Energy Efficiency (*Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía*, CONUEE) succeeded in reaching a conciliation agreement with a document based on the PREMCE, but acting in an informative capacity only with no mandatory status. This agreement was signed by the secretaries for Energy, the Economy, and the Environment and Natural Resources, and by the Mexican Automotive Industry Association (CONUEE, 2002). Some of the characteristics of this agreement are described further in Section 2.3. More recently, due to the significant increase in gasoline consumption, and as a commitment to vehicle standards within the climate change agenda, the Mexican government has reinitiated the development of a new fuel economy standard for passenger cars, which is currently under discussion (SEMARNAT, 2009; ICCT, 2010b).

1.3. The objectives and structure of the paper

In this paper, we estimate and analyze trends in fuel economy of new passenger cars from 1988 to 2008. We also discuss the impacts on gasoline consumption and CO₂ emissions for different passenger car fuel economy scenarios for the year 2020. This study contributes in several areas. The information will help to explain the accelerated increase of fuel consumption in the Mexican transport sector; it will also allow us to build fuel and GHG emission scenarios; and it can provide support in the development of the new vehicle fuel standard mentioned above.

The paper is carried out in stages. After the introduction, Section 2 shows the methodology employed to estimate fuel

economy and the Laspeyres index used to evaluate sales structure and fuel economy impacts between 1988 and 2008. Section 3 discusses trends in car sales and evaluates the impact of new passenger car fuel economy on gasoline consumption and CO₂ emissions from 1990 to 2008, offering international comparisons. We also provide results for different fuel economy scenarios for the year 2020. In this section we also present a sensitivity analysis. Section 4 presents conclusions.

2. Methodology and data sources

2.1. Fuel economy of the new passenger vehicle fleet

The average fuel economy of new passenger vehicles is the result of multiplying the fuel economy of each model year commercialized in Mexico, by the proportion of sales of every model year in total passenger car sales. Car models can be grouped into categories according to general characteristics. The Mexican Automotive Industry Association (AMIA) grouped car models into five categories: subcompact, compact, luxury, sport and multipurpose vehicle (MPVs), which, according to the National Ecology Institute (INE-CONUEE-PROFECO, 2010), is a category similar to the sport utility vehicle (SUVs). Table 2 presents the classification according to the AMIA.

In addition, fuel economy varies according to city and highway driving cycles. In line with these considerations, fuel economy of the new passenger vehicle fleet can be calculated as follows:

$$FE_{nt} = \sum FE_{cnt} \left(\frac{S_{ct}}{St} \right) \tag{1}$$

where

$$FE_{cnt} = \sum FE_{int} \left(\frac{S_{ict}}{S_{ct}} \right) \tag{2}$$

where FE_{nt} is the fuel economy for cycle n for year t (in km/l), n is either city or highway, FE_{cnt} is the fuel economy for category c , cycle n and year t , S_{ct} is the sales of category c in year t , St is the total sales in year t , FE_{int} is the fuel economy of model year i that belongs to category n in year t and S_{ict} is the sales of model type i that belongs to category c in year t .

And according to USEPA (EPA, 2010a), the fuel economy of the combined driving cycle can be obtained by the following formula:

$$CFE = \frac{1}{(0.55/CiFE) + (0.45/HWFE)} \tag{3}$$

where CFE is the combined fuel economy, $CiFE$ is the city fuel economy and $HWFE$ is the highway fuel economy

Table 2
Classification of passenger cars in Mexico.
Source: INE-CONUEE-PROFECO (2010).

Classification	Definition
Subcompact	Wheelbase up to 2475 mm; 4 cylinders; 1800 cm ³ displacement; power up to 110 HP.
Compact	Wheelbase from 2476 to 2700 mm; 4 or 6 cylinders; 2500 cm ³ displacement; power from 110 to 135 HP.
Luxury	Wheelbase from 2601 to 3000 mm; 4, 6, 8 or 12 cylinders; 3200 to 6000 cm ³ displacement; power from 136 to 394 HP.
Sport	Wheelbase from 2601 to 3000 mm; 4, 6 or 8 cylinders; 2000 to 4600 cm ³ displacement; power from 160 to 295 HP. These cars can have special turbo chargers or a higher number of valves in each cylinder.
Multipurpose (MPV)	Vehicle designed to carry up to ten people; 4, 6 or 8 cylinders. Designed for passenger or freight, with or without chassis.

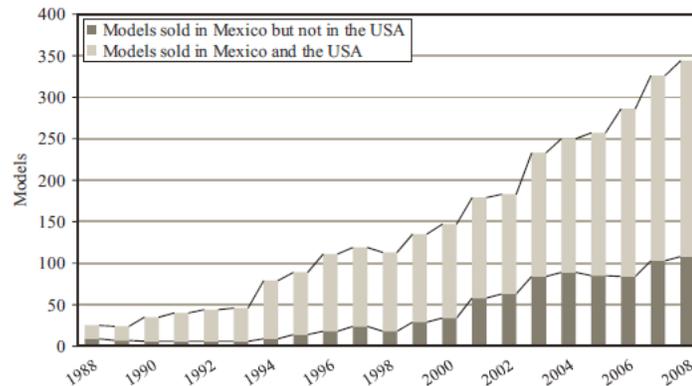


Fig. 2. Passenger cars by model year sold in Mexico and the USA. Source: EPA (2010a) and INEGI (1994, 2010a, 2010b).

2.2. Laspeyres index

Once the results for fuel economy by category are obtained, an evaluation of the importance of the sales structure by category and fuel economy is developed, based on Laspeyres index (Ang and Zhang, 2000). The decomposition method consists of separating or decomposing the dependent variable, in explanatory variables isolating its time change. In this case, the dependent variable is fuel economy of the new passenger car fleet, and the explanatory variables are car sales by category and fuel economy by category.

The change in fuel economy for cycle n , related to changes in the structure of sales by category, is calculated as follows:

$$A_{Str} = \frac{\sum FE_{cn}T_0(ScT/ST)}{\sum FE_{cn}T_0(ScT_0/ST_0)} \quad (4)$$

where A_{Str} is the change in sales structure, T_0 is the initial year 1988, T is the final year 2008, and the change in fuel economy for cycle n , related to changes in real fuel economy by category, is calculated as follows:

$$A_{FE} = \frac{\sum FE_{cn}T(ScT_0/ST)}{\sum FE_{cn}T_0(ScT_0/ST_0)} \quad (5)$$

The changes referred to in Eqs. (4) and (5) only account for changes in sales by category over time, and do not account for changes in sales by model within categories.

2.3. Data sources

Sales data for each model year is from official national statistics (INEGI, 1994, 2009). In the case of fuel economy, official Mexican data is only available from 1988 to 1990 (SECOFI, 1990) and from 2002 to 2008 (CONUEE, 2010) for certain model years. However, a comparison of fuel economy data provided by SECOFI and CONUEE with the fuel economy data provided by the USEPA (EPA, 2010a) for the same model years gives inconsistent numbers.¹ In all cases SECOFI–CONUEE reported higher values than USEPA.

The reason for this difference is unclear, but the Mexican data does not appear to be completely reliable, as passenger car

models and test procedures are very similar in Mexico and in the USA, especially since NAFTA was signed.

In the voluntary agreement signed in 2002 between the AMIA and the different federal government ministries, it was established that the information on fuel economy delivered to the CONUEE by automobile companies would be obtained from the certification of the vehicle emission standard, reported to the Federal Attorney for Environmental Protection (PROFEPA) before commercialization. According to the methodology stipulated in this standard, passenger car manufacturers need to report fuel economy based on either the USA Federal Test Procedure 75 (FTP 75) or the New European Driving Cycle (NEDC 70/220/EEC), although in practice 90% of new vehicle sales use the FTP 75 (INE–CONUEE–PROFECO, 2010).

The difference in the fuel economy values for passenger cars between CONUEE and USEPA might be related to the fact that in Mexico, fuel economy values are provided by the car manufacturers, and the Mexican governmental agency in charge of reviewing these data (PROFEPA), does not have the appropriate laboratory infrastructure to conduct tests to validate this information.

For these reasons (similar models and similar tests), the use of USEPA (EPA, 2010a) fuel economy data by model year is employed for Mexican passenger cars in this paper. However, it is important to bear in mind that since 2008, USEPA considers updated fuel economy ratings that reflect the effects of faster speeds and acceleration, air conditioning use and colder outside temperatures. The results presented in this paper are based on the new USEPA fuel economy ratings. Average adjustment factors to compare older and newer USEPA fuel economy ratings (for the US fleet) are 11% lower for city fuel economy and 8% lower for highway fuel economy (EPA, 2009).

Nevertheless, by considering USEPA (EPA, 2010a) as the main source of information for Mexican passenger car fuel economy by model year, we do not avoid the issue of missing information for passenger car model years sold in Mexico but not in the USA (Fig. 2). Such is the situation for 24% of the model years over the whole period (9 out of 25 models in 1988, and 108 out of 344 models in 2008). For these cases, fuel economy was calculated using SECOFI–CONUEE fuel economy ratings and adjusted to USEPA fuel economy ratings through an adjustment factor. This adjustment factor was calculated as the average of the difference (in percentage) between SECOFI–CONUEE and USEPA ratings, by category, for all the models where both data is available. Results are presented in Table 3.

¹ Different model years commercialized in each country can have different names and technological characteristics. For this reason, the comparison between the US passenger car models and their corresponding Mexican models was carried out comparing the main technical characteristics for each model year (power, revolutions, number and size of cylinders, transmission, chassis, etc.).

A sensitivity analysis has been conducted in order to examine the potential bias due to the fuel economy data used in the analysis, which is described in more detail in Section 3.6.

3. Results

3.1. Car sales

Fig. 3 presents the increase in the number of model years commercialized in Mexico from 1988 to 2008. As shown, in 1988 only 25 different models, produced by 9 manufacturers, were commercialized in Mexico, while in 2008 this number increased to 344 models, produced by 38 manufacturers.

Fig. 3 also shows total car sales by category from 1988 to 2008. In 1988, around 231 thousand vehicles were sold. This number increased to nearly 900 thousand in 2004, and then decreased to around 765 thousand in 2008, due to a decline in national economic activity. The dramatic decrease in 1995 was due to the Mexican economic crisis of that year. In 1995, the Mexican GDP decreased by 5.5%. This was reflected by a sharp drop (70%) in car sales (INEGI, 2010a, 2010b).

Fig. 4 illustrates total car sales by category and the increase in the share of MPVs in total sales. In 1988, 81% of car sales were subcompact (42%) and compact cars (39%), and 9% were MPVs. By 2008, 70% of car sales were subcompact (39%) and compact cars (31%), and 23% were MPVs. MPVs are heavier and more powerful than compact and subcompact cars, leading to more fuel consumption per kilometer (Schipper et al., 1993). This increase in the sales of heavier cars is not only a Mexican phenomenon. It is also occurring in different countries and it has been the subject of

several studies, for example Schipper and Lilliu (1999), Cuenot (2009), Plotkin (2009), Meyer and Wessely (2009), Gallachóir et al. (2009) and Wagner et al. (2009).

3.2. Fuel economy of new cars by category (1988–2008)

Table 4 presents trends in new passenger car fuel economy by category from 1988 to 2008 for city and highway cycles, while Fig. 5 presents trends for combined driving cycles across all categories. Both charts show the weighted average with and without MPVs.

As shown, fuel economy has not changed in one single direction over the 20 years, because the category average reflects the variation in sales of model years over time. In every case, however, a trend to decrease was observed after 1988 that lasted three to five years depending on the category. It is likely that this decrease reflects the withdrawal of the PREMCE and the growing diversification of car models due to the open market in the automotive industry in Mexico.

Over the whole period 1988–2008, passenger car fuel economy grew 12% for new subcompact cars, 8% for new compact cars, 11% for new sport cars, 10% for new luxury cars and 16% for new MPVs. However, fuel economy of the entire new car fleet, including MPVs, increased by only 6.3%; and without MPVs, by 10%.

Table 3 Adjustment factors for fuel economy between SECOFI–CONUEE data and USEPA data. Sources: Based on EPA (2010a), SECOFI (1990) and CONUEE (2010).

	CiFE	HWFE	CFE
Subcompact	0.87	0.68	0.77
Compact	0.84	0.76	0.80
Luxury	0.89	0.80	0.85
Sport	0.81	0.76	0.79
MPV	0.85	0.75	0.80

Note: CIFE, city fuel economy; HWFE, highway fuel economy; CFE, combined fuel economy. Real fuel economy=SECOFI–CONUEE fuel economy multiplied by adjustment factor.

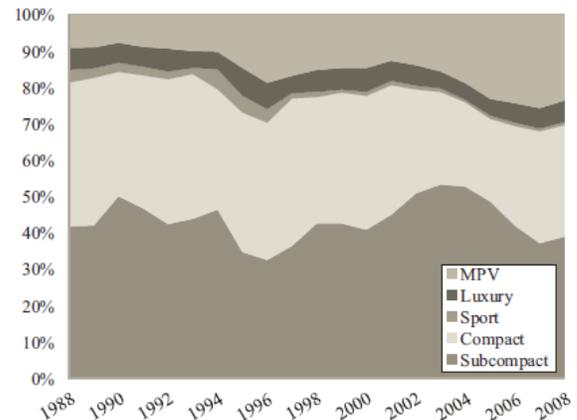


Fig. 4. Passenger car sales by category in Mexico. Source: INEGI (1994, 2010a, 2010b).

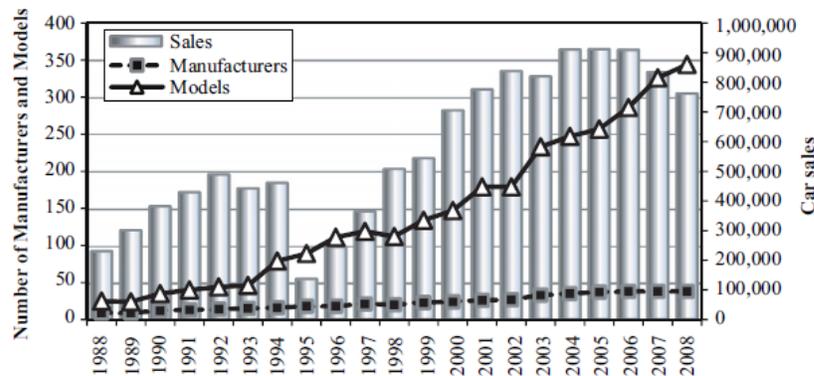


Fig. 3. Number of models, manufacturers and car sales in Mexico. Source: INEGI (1994, 2009).

Table 4
Fuel economy of new passenger vehicles by category in Mexico (km/l).

Source: Weighted average of sales by model year and fuel economy by model year. Sales are from INEGI (1994, 2010a, 2010b). Fuel economy is from EPA (2010a) for passenger car model year sold in Mexico and in the USA. For model years sold only in Mexico but not in the USA, an adjustment from the fuel economy reported by SECOFI (1990) and CONUEE (2010) is developed. This adjustment is calculated for models reported by EPA and CONUEE (2002 to 2008). The adjustment factor by category is presented in Table 3.

Year	Subcompact		Compact		Sport		Luxury		MPV		General without MPVs			General with MPVs		
	CiFE	HWFE	CiFE	HWFE	CiFE	HWFE	CiFE	HWFE	CiFE	HWFE	CiFE	HWFE	CFE	CiFE	HWFE	CFE
1988	10.2	13.5	8.8	12.2	7.8	10.7	7.6	11.0	6.4	8.4	9.4	12.8	11.3	9.1	12.3	10.3
1989	9.9	13.5	8.7	12.3	7.5	10.8	7.5	11.1	6.5	8.3	9.1	12.8	11.1	8.9	12.4	10.2
1990	10.0	13.3	8.7	12.2	7.4	10.3	7.3	10.5	6.9	8.7	9.3	12.7	11.2	9.1	12.4	10.3
1991	9.9	13.6	8.4	12.2	7.3	10.3	7.1	10.4	6.9	8.9	9.1	12.8	11.1	8.9	12.5	10.3
1992	9.8	12.7	8.4	12.0	7.5	10.6	7.3	10.5	6.9	8.9	9.0	12.2	10.8	8.8	11.9	10.0
1993	9.7	12.3	8.9	12.4	7.5	10.5	7.0	10.1	6.5	8.5	9.3	12.3	11.0	9.0	12.0	10.2
1994	9.9	12.7	9.2	12.6	7.3	10.8	7.0	10.2	6.4	8.5	9.3	12.4	11.1	9.0	12.0	10.2
1995	10.9	13.2	9.3	13.2	7.5	11.1	7.0	10.4	6.1	8.1	9.7	12.9	11.5	9.1	12.2	10.3
1996	10.8	12.9	9.3	13.2	8.3	12.0	7.2	10.6	6.1	8.5	9.7	12.8	11.5	9.0	12.0	10.1
1997	11.0	13.2	9.5	13.4	8.6	12.1	7.6	10.8	6.2	8.4	10.0	13.1	11.9	9.4	12.4	10.5
1998	11.4	14.1	9.6	13.4	8.2	11.8	8.0	11.0	6.4	8.6	10.4	13.6	12.3	9.8	12.8	10.9
1999	11.2	13.6	9.5	12.7	8.3	11.9	7.8	11.1	6.3	8.4	10.2	13.0	12.0	9.6	12.4	10.7
2000	11.2	13.7	9.3	12.4	8.4	12.2	7.9	11.1	6.4	8.5	10.1	12.9	11.9	9.6	12.3	10.6
2001	11.3	13.9	9.5	12.6	9.0	13.1	8.0	11.3	6.6	8.6	10.3	13.2	12.1	9.8	12.6	10.9
2002	11.3	13.8	9.6	12.9	8.5	12.6	8.1	11.4	6.7	8.9	10.5	13.3	12.3	10.0	12.7	11.0
2003	11.3	14.0	9.6	12.9	8.4	12.5	8.3	11.8	7.2	9.5	10.6	13.5	12.5	10.1	12.9	11.2
2004	11.3	13.8	9.5	12.6	8.2	12.3	8.3	11.7	7.4	9.7	10.6	13.3	12.3	10.0	12.7	11.0
2005	11.6	13.9	9.5	12.7	8.4	11.7	8.4	11.9	7.5	9.8	10.7	13.4	12.5	10.0	12.6	11.0
2006	11.7	14.3	9.5	12.9	8.2	12.2	8.3	11.9	7.4	9.7	10.6	13.6	12.5	9.8	12.6	10.9
2007	11.8	14.6	9.6	13.1	8.4	12.1	8.5	12.3	7.4	9.8	10.6	13.8	12.5	9.8	12.8	10.9
2008	11.7	14.7	9.5	13.1	8.4	12.2	8.4	12.1	7.4	9.9	10.5	13.8	12.5	9.8	12.9	11.0

Note: CiFE, city fuel economy; HWFE, highway fuel economy; CFE, combined fuel economy.

$$\text{Combined cycle according to USEPA} = \frac{1}{(0.55/CiFE) + (0.45/HWFE)}$$

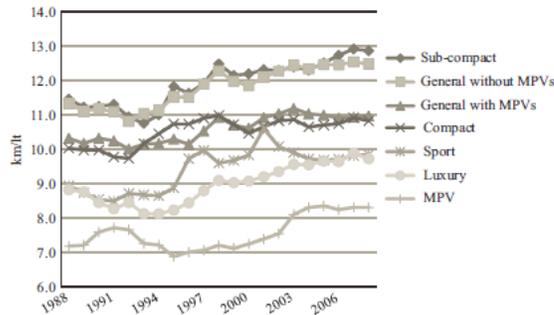


Fig. 5. Fuel economy of new passenger cars (combined driving cycle).

Average CO₂ emissions by distance traveled can be estimated using the average net calorific power value (SE, 2009) and the IPCC (2006) emission factor for gasoline, taking into account that most passenger cars use gasoline in Mexico. Table 5 presents CO₂ emissions by category, for selected years.

In comparison with other countries and regions of the world, the Mexican average specific CO₂ emission resulted higher than the EU average and lower than the US average. For example, in 2008, the average specific CO₂ emissions of all new cars added to the European Union fleet was 153.5 gCO₂/km (Commission of the European Communities (CEC), 2010). In the USA, USEPA (EPA, 2009) reported for 2009 an average of 422 grams per mile (274.6 gCO₂/km), whereas the adjusted fuel economy was 21.1 mpg (9.0 km/l) for new light-duty vehicles (cars, minivans, SUVs and pickup trucks). This comparison is pictured in Fig. 6.

Table 5
Average CO₂ emissions per distance traveled for new passenger cars in Mexico (gCO₂/km).
Source: Calculation based on fuel economy of new passenger vehicles (Table 4); average gasoline CP 32.12 MJ/l from SE (1997, 2005, 2009); and emission factor 69.3 tCO₂/TJ from IPCC (2006).

Year	Sub-compact	Compact	Sport	Luxury	MPV	General	
						Without MPVs	With MPVs
1988	194	222	251	252	310	196	216
1990	198	223	263	263	293	199	216
2000	182	213	228	245	307	188	210
2008	173	205	228	229	268	178	203

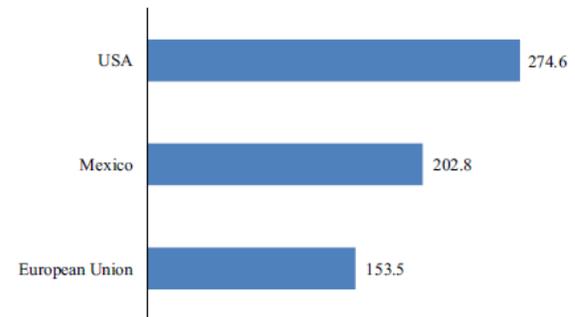


Fig. 6. Comparison of average specific CO₂ emissions (gCO₂/km) of all new passenger cars added to the fleet. Note: Data for the USA is for 2009, data for Mexico and the European Union is for 2008.
Source: Commission of the European Communities (CEC) (2010) and EPA (2009).

Table 6
Results of Laspeyres analysis (changes from 1988 to 2008).

Actual changes (%)		Changes in sales structure (%)		Changes in fuel economy (%)	
With MPVs	Without MPVs	With MPVs	Without MPVs	With MPVs	Without MPVs
6.3	10.2	11	10.6	-4.6	-0.2

For 2008, the average fuel economy for light-duty vehicles without pickups in the USA was 21.9 mpg (9.3 km/l), and for cars only it was 24.3 mpg (10.3 km/l) (EPA, 2010b, 2010c).

3.3. Decomposition analysis

Table 6 presents the results obtained with the application of Laspeyres index. The significance of these findings can be explained as follows: the variable effect represents the change in fuel economy of the new car fleet that would have occurred over the period 1988–2008, if the other explanatory variable had remained constant at the 1988 value.

Actual fuel economy of the new passenger car fleet in Mexico increased by 6.3% including MPVs, and by 10.2% excluding MPVs. However, if sales by category had maintained their 1988 structure, fuel economy would have increased by 11% including MPVs and 10.6% excluding MPVs. On the other hand, if fuel economy had continued at its 1988 value and the sales structure by category had changed, then fuel economy would have decreased by 4.6% including MPVs and 0.2% excluding MPVs.

3.4. Fuel economy impact on gasoline consumption and CO₂ emissions from 1990 to 2008

Gasoline consumption of new passenger cars can be calculated by the following equation:

$$F_t = S_t D_t (1/CFEt) CP \quad (6)$$

where F_t is the gasoline consumption for year t , S_t is the total sales of passenger cars in year t , D_t is the average distance traveled for year t , $CFEt$ is the average fuel economy of combined cycle (km/l) in year t and CP is the average calorific power of gasoline in MJ/l.

Data for the average distance traveled is not available at a national level, but to develop a rough approximation of the impact of fuel economy on energy consumption and CO₂ emissions, estimation can be made with a weighted average of the distance traveled in three main metropolitan areas in Mexico (Sheinbaum et al., 2010).² This is a rough approximation, but allows us to show the magnitude of the impact of fuel economy on energy consumption and CO₂ emissions. Because of the lack of data, average distance traveled is considered to be constant over the period, and has the value of 12,593 km per year.

Table 7 shows the results of this estimation. Given these considerations, gasoline consumption of new passenger cars represented 14.9 PJ (1.0 Tg of CO₂ emissions) in 1990 and 28.7 PJ in 2008 (2.0 Tg of CO₂ emissions). If all the cars sold from 1990 to 2008 had remained in the fleet (still continuing in circulation),³ total gasoline consumption for these cars would

² Passenger car sales of these three metropolitan areas represent around 45% of the national passenger car sales, and 32% of the national passenger car fleet (Sheinbaum et al., 2010).

³ This is also a rough estimation because in general, year by year, a percentage of vehicles do not remain in circulation. However there is no available data as to the rate of cars that leave the fleet each year by model year at a national level.

Table 7

Estimation of gasoline consumption and CO₂ emissions for new passenger cars (1990–2008).

Source: Sales are from INEGI (2010a, 2010b), INEGI (1994, 2009); fuel economy is from Table 4, average gasoline calorific power 32.12 MJ/l from SE (1997, 2005, 2009); and average distance traveled 12,593 km/year (Average distance traveled in main metropolitan areas: Sheinbaum et al., 2010). Gasoline emission factor is 69.3 tCO₂/TJ from IPCC (2006).

	Sales (thousand)	Gasoline consumption (PJ)	CO ₂ emissions (Tg)
1990	379.9	14.9	1.0
1995 ^a	137.0	5.4	0.4
2000	705.0	26.9	1.9
2005	911.1	33.5	2.3
2008	757.4	28.7	2.0
Total 1990–2008	11,407	429.9	29.8
National 2008		1607.5	114.4

^a The drop in car sales in 1995 is due to the Mexican economic crisis.

have been 429.9 PJ in 2008 (29.8 Tg of CO₂ emissions), representing 27% of national gasoline consumption for the same year.

3.5. Scenarios for the year 2020

To elaborate an estimation of gasoline consumption and related CO₂ emissions of new passenger cars for the year 2020, we again utilized Eq. (6). Total sales (S_t) are estimated as follows: in 2009, sales reflect a 23% reduction in relation to 2008, due to the economic crisis (INEGI, 2010a, 2010b). For 2010, it is assumed that sales would be similar to 2008, and from 2011 to 2020, sales increase annually at the same average annual rate of growth as the period 1990–2008, which is 3.9% per year.

The estimation of gasoline consumption and related CO₂ emissions for 2020 contemplates five scenarios for fuel economy and sales structure. The first scenario, business as usual (BAU), supposes the same annual rate of growth in fuel economy from 2008 to 2020 as from 1988 to 2008 for all categories. It represents an average increase of 4.4%. It also maintains the same trend in sales pattern by category.

The second and third scenarios (low and high with an increase in MPV sales share) consider the same structure of sales as for BAU but with a sharper growth in fuel economy for all categories of 20% and 40%, respectively, from 2008 to 2020. The technology already exists to make this increase in fuel economy feasible. The average fuel economy for the high scenario will be 14.9 km/l for 2020. This value is achievable: as we mentioned in the first section, the combined car and truck average required fuel economy as stipulated by the NHTSA and USEPA is 14.4 km/l for the year 2016 (NHTSA, 2010).

The fourth and fifth scenarios (low and high with a decrease in MPV sales share) assume the same increase in fuel economy as the second and third scenarios, respectively. In addition, both scenarios reflect a growth in the share of subcompact cars across the total sales (reducing the MPV share) of 2% and 4% per year. Assumptions for the five scenarios are presented in Table 8.

Calorific power and distance traveled are considered constant. Some studies show that distance traveled declined for older cars and increased for newer cars. However, due to the lack of data for Mexico we decided to maintain this variable constant (Schipper and Lilliu, 1999; EPA, 2009). Table 9 presents the results.

(footnote continued)

Taking this into consideration, energy consumption and CO₂ emissions will be lower in magnitude; but this analysis offers an idea of the implications of fuel economy changes for energy and CO₂ emissions.

Table 8
Suppositions for energy and CO₂ emission scenarios.

	2008	2020	Case 1: Increase in MPV sales		Case 2: Decrease in MPV sales	
			BAU	Low	High	Low
Structure of sales						
Subcompact	39.2%	33.2%	33.2%	33.2%	45.0%	53.6%
Compact	30.6%	28.4%	28.4%	28.4%	28.4%	28.4%
Sport	0.8%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%
Luxury	5.9%	6.2%	6.2%	6.2%	6.2%	6.2%
MPV	23.4%	31.7%	31.7%	31.7%	19.9%	11.4%
Fuel economy for 2020						
Subcompact	12.9	13.9	15.5	18.0	15.5	18.0
Compact	10.8	11.4	13.0	15.2	13.0	15.2
Sport	9.8	10.4	11.7	13.7	11.7	13.7
Luxury	9.7	10.4	11.7	13.6	11.7	13.6
MPV	8.3	9.2	10.0	11.6	10.0	11.6
Average	11.0	11.5	12.8	14.9	13.4	16.2
Fuel economy rate of growth by category (%)		6	20	40	20	40
Average fuel economy rate of growth ^a (%)		4.4	16.4	35.7	22.2	47.6

^a Because of the difference in car sales by category, the average fuel economy rate of growth is different.

Table 9
Scenarios of gasoline consumption and CO₂ emissions for different fuel economy values for passenger cars in Mexico.

	BAU		Case 1				Case 2			
	Gasoline consumption (PJ) CO ₂ emissions (Tg)		Gasoline consumption (PJ)		CO ₂ emissions (Tg)		Gasoline consumption (PJ)		CO ₂ emissions (Tg)	
	BAU		Low	High	Low	High	Low	High	Low	High
2008	28.7	2.0	28.7	28.7	2.0	2.0	28.7	28.7	2.0	2.0
2015	34.0	2.4	31.3	28.0	2.2	1.9	30.6	27.0	2.1	1.9
2020	40.4	2.8	36.3	31.1	2.5	2.2	34.5	28.4	2.4	2.0
Total (2008–2020)	426.2	29.5	396.5	359.6	27.5	24.9	387.8	346.9	26.9	24.0
Difference from BAU			29.7	66.6	2.1	4.6	38.3	79.3	2.7	5.5
Difference from BAU (%)			7	16	7	16	9	19	9	19

The total gasoline consumption and CO₂ emissions presented in Table 9 are calculated assuming that all the new passenger cars from 2008 to 2020 will remain in the fleet. For the *Case 1 low scenario*, results show that if present trends in car sales continue, meaning an increase in the share of MPVs, but fuel economy by category increased by 20% from 2008 to 2020, a 7% reduction in gasoline consumption and CO₂ emissions will be achieved in comparison with the BAU scenario. However, if the fuel economy increases by 40% (*Case 1 high scenario*) the reduction in gasoline and CO₂ emissions with respect to the BAU scenario will reach 16%.

If, in addition to improving fuel economy, the share of MPVs decreases in favor of subcompact cars as shown in Table 8 for *Case 2 low and high scenarios*, then the decrease in gasoline consumption and related CO₂ emissions will reach 9% and 19%, respectively, in comparison with the BAU scenario (Table 9 and Fig. 7). This is an important result in the actual revision of the fuel economy standard in Mexico.

Other scenarios can be analyzed depending on the suppositions and factors selected. The hypothesis proposed in this study presents possible futures and the potential range of reduction in gasoline consumption and related CO₂ emissions, when certain criteria are selected. This scenario analysis is particularly useful for decision makers, especially considering the current discussion of fuel economy standards in Mexico. A modest goal of 40% increase in fuel economy (14.9 km/l) will bring significant reductions in gasoline consumption and related CO₂ emissions.

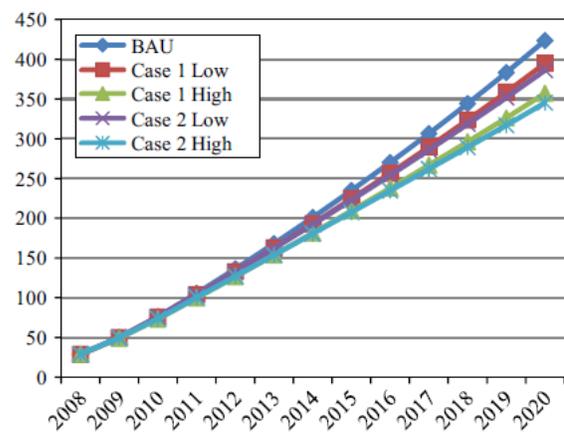


Fig. 7. Gasoline consumption of new passenger cars from 2008 to 2020 for different fuel economy and sales structure scenarios. Note: The decline in 2009 is due to the economic crisis. Scenarios are explained in Table 8.

3.6. Sensitivity analysis

A sensitivity analysis was conducted in order to examine the variation in results due to the fuel economy data used in the

analysis. Table 3 presents the adjustment factors between SECOFI–CONUEE data and USEPA data. If the first data only had been used, average fuel economy for the new fleet (taking all categories together) would have ranged from 12.5 km/l in 1988 to 13.3 km/l in 2008: 21% higher than the values reported in Table 4 for every year.

Thus all subsequent results presented would have been affected by this same percentage, used throughout the analysis. Therefore CO₂ emissions would also have resulted in a 21% difference; from 171 gCO₂/km in 1988 to 160 gCO₂/km in 2008 (instead of the 216 and 203 figures quoted: see Table 5). Laspeyres results are not affected: they would continue to be the same as those reported in Table 6, hence the percentage change in the different scenarios analyzed will be consistently 21% higher.

Although the results in fuel economy in absolute magnitudes from this study should be used with caution (they could be 21% higher), due to the associated uncertainties of the fuel economy data, the relative magnitude of changes in fuel economy, energy use and CO₂ emissions for the future can be used to provide a robust assessment of how the percentage of fuel economy changes will influence energy use and CO₂ emissions in the transportation sector in Mexico.

4. Conclusions

Transport fuel consumption in Mexico has increased very rapidly in the last decade, leading to important environmental and economic concerns. From 2000 to 2008, CO₂ emissions related to transport fuel consumption increased at an annual rate of growth of 5.8%, twice the rate of the previous decade, and gasoline imports reached 43% in 2008. One of the main reasons for this increase was the growing use of passenger cars. Given this context, it is important to study the factors influencing fuel consumption in passenger cars. One of the most important issues is fuel economy. In this paper, we analyzed the fuel economy of new private cars in Mexico. We found that fuel economy of new private cars (including MPVs) increased by 6.3%, from 10.3 km/l in 1988 to 11.0 km/l in 2008, which is equivalent to 216 gCO₂/km and 203 gCO₂/km, respectively. Comparing this result with other regions, CO₂ emissions per kilometer resulted 24% higher than in the EU, but 27% lower than in the USA.

The relatively low increase in fuel economy of Mexican passenger cars over the last two decades was due to a limited increase in fuel economy of individual models, compounded by the increased share in sales of heavier cars. The proportion of MPVs in total private car sales increased from 9% in 1988 to 23% in 2008. The application of a Laspeyres index analysis shows that if the sales structure had maintained its 1988 proportions, fuel economy would have risen by 11% instead of the actual 6.3%. This result coincides with trends in other countries.

A sensitivity analysis is included in order to examine the variation in results due to the fuel economy data used in the study. Results show that absolute magnitudes in fuel economy may be 21% higher, and therefore energy consumption and CO₂ emissions may be 21% lower. However, the percentage changes do not vary.

An estimation of different fuel economy scenarios for passenger cars for the year 2020 is also presented. The BAU scenario supposes the same annual rate of growth in fuel economy from 2008 to 2020 as for 1988 to 2008 for all categories. It also maintains the same trend in sales patterns by category. The second and third scenarios (low and high with increasing MPV sales) consider the same sales structure as BAU but with a growth in fuel economy for all categories of 20% and 40%, respectively, from 2008 to 2020. The fourth and fifth scenarios (low and high

with decreasing MPV sales) assume the same increase in fuel economy as the second and third scenarios, respectively. In addition, they reflect an increase in the share of subcompact cars within total sales (in place of MPVs) of 2% and 4% per year.

Under the assumption that all passenger cars sold between 2008 and 2020 will remain in circulation in the fleet until at least 2020, the reduction in gasoline consumption and CO₂ emissions with respect to the BAU scenario will be 16%, if trends in car sales structure are maintained and average fuel economy increases by 35.7%, from 11.0 km/l to 14.9 km/l. Moreover, an additional 3% reduction can be reached if subcompact car sales regain 12% of the ground MPV sales have gained in recent years (*Case 2 high scenario*). This will imply a fuel economy of 16.2 km/l.

These estimates have important implications for the design of a new fuel economy standard in Mexico. A 16% reduction in CO₂ emissions related to new passenger cars sold between 2011 and 2020 can be achieved if a fuel economy standard is set out at 14.9 km/l for the year 2020 (considering USEPA data as the basis of the fuel economy analysis), or around 21% higher if Mexican fuel economy data is used. This goal is feasible, especially bearing in mind that the combined car and truck average required fuel economy for the USA was set at 14.4 km/l for 2016 (NHTSA, 2010).

A further 3% reduction in fuel and emissions can be achieved if proper incentives are made to promote a 12% increase in the sales of subcompact cars in place of MPVs. This goal can be accomplished by setting adequate legislation in place to enforce an average fuel economy standard of 16.2 km/l (or 21% higher depending on which data for fuel economy is used), or via other policy initiatives such as higher taxes for heavier passenger vehicles, or other incentives.

Considering trends in fuel economy between 1988 and 2008, it is clear that passenger car manufacturers have to develop a strategy in order to compensate the increase in sales of heavier vehicles. Probably, a strategy that substantially increases the fuel economy of subcompact and compact cars, while also increasing fuel economy of MPVs, will be necessary.

Mexican fuel economy standards also have to resolve the problem of the inconsistency in the fuel economy data provided by car manufacturers. In order to do so, standard testing methods are needed, as well as the appropriate test laboratory infrastructure for PROFEPA.

The results of this paper also support the fact that additional measures and policies are needed in order to accomplish a higher reduction in CO₂ emissions related to the combustion of transport fuels, and a reduction in gasoline imports. Some of these measures will be incentives for new technologies such as hybrid vehicles and fuel substitution (biofuels for example), as well as a promotion of better public transportation in Mexican cities that reduce the distances traveled by passenger cars.

References

- An, F., Sauer, A., 2004. Comparison of Passenger Vehicle Fuel Economy and Greenhouse Gas Emission Standards Around the World. Pew Center on Global Climate Change.
- Ang, B.W., Zhang, F.Q., 2000. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. *Energy* 25, 1149–1176.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), 2002. Convenio de concertación para la eficiencia energética de vehículos automotores comercializados en el país y los rendimientos de combustible de automóviles y camiones nuevos que incorporan motores de combustión interna. Firman las Secretarías de Energía (SENER), Economía (SE), De Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), así como la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA), México. <http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/Convenio_Amia>.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), 2010. Rendimientos oficiales de combustible: Automóviles y camiones ligeros

- comercializadas en México. Ediciones 2002–2008. CONUEE, México. <http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/Rendimientos_combustible>.
- Commission of the European Communities (CEC), 2010. Average CO₂ Emissions of New Cars. <http://ec.europa.eu/environment/air/transport/co2/co2_monitoring.htm>.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2010. México en cifras, indicadores demográficos básicos 1990–2030. CONAPO, México. <<http://www.conapo.org.mx>>.
- Cuenot, F., 2009. CO₂ emissions from new cars and vehicle weight in Europe; How the EU Regulation could have been avoided and how to reach it? *Energy Policy* 37, 3832–3842.
- Environmental Protection Agency (EPA), 2009. Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2010 Appendix A Database Details and Calculation Methods. EPA420-R-09-014. <<http://www.epa.gov/otaq/cert/mpg/fetrends/420r09014-appx-a.pdf>>.
- Environmental Protection Agency (EPA), 2010a. Fuel Economy Guide. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). <<http://www.fueleconomy.gov>>.
- Environmental Protection Agency (EPA), 2010b. Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2010 Executive Summary. EPA-420-S-10-002. <<http://www.epa.gov/otaq/cert/mpg/fetrends/420s10002.pdf>>.
- Environmental Protection Agency (EPA), 2010c. APPENDIX D: Fuel Economy Data Stratified by Vehicle Type (Excel). <<http://www.epa.gov/otaq/fetrends.htm>>.
- Fernández, A., 2004. Hacia un mayor rendimiento de combustible en la flota vehicular de México. Taller sobre oportunidades para el consumo eficiente de combustibles del sector transporte William and Flora Hewlett Foundation. <http://www.theicct.org/documents/0000/0395/10_Fernandez_Mex_2004.pdf>.
- Gallaichoir, B.P.O., Howley, M., Cunningham, S., Bazilian, M., 2009. How private car purchasing trends offset efficiency gains and the successful energy policy response. *Energy Policy* 37, 3790–3802.
- Instituto Nacional de Ecología (INE)—Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE)—Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO), 2010. Ecovehículos-Portal de Indicadores de Eficiencia Energética y Emisiones Vehiculares. <<http://www.ecovehiculos.gob.mx/>>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1994. La Industria Automotriz en México. Aguascalientes, Mexico.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2009. La Industria Automotriz en México. Aguascalientes, Mexico.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010a. Estadísticas de vehículos de motor registrados en circulación 1980–2008. Sistema de Información Económica. <<http://www.inegi.org.mx>>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010b. La Industria Automotriz en México. Aguascalientes, Mexico.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol 2. Energy. <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>>.
- International Council on Clean Transportation (ICCT), 2007. Passenger Vehicle Greenhouse Gas and Fuel Economy Standards: A Global Update. <http://www.theicct.org/pubs/PV_standards_2007.pdf>.
- International Council on Clean Transportation (ICCT), 2010a. Global Passenger Vehicle Fuel Economy and GHG Emissions Standards: April 2010 update. <<http://www.theicct.org/2010/04/ghg-fe-standards-update>>.
- International Council on Clean Transportation (ICCT), 2010b. Climate Change Mitigation, Mexico City, Workshop, March 2010. <<http://www.theicct.org/mx-city-mar2010/>>.
- Kahn Ribeiro, S., Kobayashi, S., Beuthe, M., Gasca, J., Greene, D., Lee, D.S., Muromachi, Y., Newton, P.J., Plotkin, S., Sperling, D., Wit, R., Zhou, P.J., 2007. Transport and its infrastructure. In: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.), *Climate Change 2007: Mitigation*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change).
- Mahlia, T.M.I., Saidur, R., Memon, L.A., Zulkifli, N.W.M., Masjuki, H.H., 2010. A review on fuel economy standard for motor vehicles with the implementation possibilities in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 3092–3099.
- Meyer, L., Wessely, S., 2009. Fuel efficiency of the Austrian passenger vehicle fleet—analysis of trends in the technological profile and related impacts on CO₂ emissions. *Energy Policy* 37, 3779–3789.
- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), May 7 2010. Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards; Final Rule. Federal Register/vol. 75, No. 88/Friday.
- Oliver, H.H., Sims-Gallagher, K., Tian, D., Zhang, J., 2009. China's fuel economy standards for passenger vehicles: rationale, policy process, and impacts. *Energy Policy* 37, 4720–4729.
- Plotkin, S., 2009. Examining fuel economy and carbon standards for light vehicles. *Energy Policy* 37, 3843–3853.
- Price, L., de la Rue du Can, S., Sinton, J., Worrell, E., Nan, Z., Sathaye, J., Levine, M., 2006. Sectoral Trends in Global Energy Use and Greenhouse Gas Emissions LBNL-56144. Ernest Orlando Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division, Berkeley, CA July. <<http://ies.lbl.gov/iespubs/56144.pdf>>.
- Schipper, L., Figueroa, M.J., Price, L., Espey, M., 1993. Mind the gap the vicious circle of measuring automobile fuel use. *Energy Policy* 21, 1173–1190.
- Schipper, L., Lilliu, C., 1999. More Motion, More Speed, More Emissions: Will Increases in Carbon Emissions from Transport in IEA Countries Turn Around? In *Energy Efficiency and CO₂ Reductions: The Dimensions of the Social Challenge*, ECEEE 1999 Summer Study (LBNL-43747).
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI), 1990. Tabla de homologación de los automóviles modelo 1988, 1989 y 1990. SECOFI, México.
- Secretaría de Energía (SE), 1997. Balance Nacional de Energía. México DF.
- Secretaría de Energía (SE), 2005. Balance Nacional de Energía. México DF.
- Secretaría de Energía (SE), 2009. Balance Nacional de Energía 2008. México DF.
- Secretaría de Energía (SE), 2010. Sistema de Información Energética. <<http://sie.energia.gob.mx>>.
- Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial (SEPAFIN), 1981. Decreto que establece rendimientos mínimos de combustible para automóviles. Diario Oficial del 21 de diciembre de 1981. SEPAFIN, México, DF.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2009. Programa Especial de Cambio Climático. México, DF.
- Sheinbaum, C., Robles, G., Mar, E., 2009. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero en la categoría de Energía. Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, presentado al Instituto Nacional de Ecología (INE). México, DF.
- Sheinbaum, C., Solís, J.C., García, C., August 25–28 2010. GHG emission scenarios related to passenger road transport energy use in the main Mexican metropolitan areas. In: Proceedings of the Eleventh IAEE European Conference, Vilna, Lithuania. <http://www.iaee2010.org/sites/default/files/csp_0.pdf>.
- Wagner, D.V., An, F., Wang, C., 2009. Structure and impacts of fuel economy standards for passenger cars in China. *Energy Policy* 37, 3803–3811.
- Zachariadis, T., 2006. On the baseline evolution of automobile fuel economy in Europe. *Energy Policy* 34, 1773–1785.
- Zegras, C., 2007. As if Kyoto mattered: the clean development mechanism and transportation. *Energy Policy* 35, 5136–5150.

Anexo 2. Artículo: "Sustainable passenger road transport scenarios to reduce fuel consumption, air pollutants and GHG (greenhouse gas) emissions in the Mexico City Metropolitan Area"



Contents lists available at ScienceDirect

Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/energy

Sustainable passenger road transport scenarios to reduce fuel consumption, air pollutants and GHG (greenhouse gas) emissions in the Mexico City Metropolitan Area



Carlos Chavez-Baeza^a, Claudia Sheinbaum-Pardo^{b,*}

^aPrograma de Energía, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, C.P. 03100, Delegación Benito Juárez, México, D.F., México

^bInstituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Delegación Coyoacán, México, D.F., México

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 June 2013

Received in revised form

15 December 2013

Accepted 18 December 2013

Available online 24 January 2014

Keywords:

Sustainable transportation

Energy

Mexico City Metropolitan Area

GHG emissions

Air quality

ABSTRACT

This paper presents passenger road transport scenarios that may assist the MCMA (Mexico City Metropolitan Area) in achieving lower emissions in both criteria air pollutants (CO, NO_x, NMVOC (non-methane volatile organic compounds), and PM₁₀) and GHG (greenhouse gas) (CH₄, N₂O and CO₂), while also promoting better mobility and quality of life in this region. We developed a bottom-up model to estimate the historical trends of energy demand, criteria air pollutants and GHG emissions caused by passenger vehicles circulating in the Mexico City Metropolitan Area (MCMA) in order to construct a baseline scenario and two mitigation scenarios that project their impact to 2028. Mitigation scenario “eff” considers increasing fuel efficiencies and introducing new technologies for vehicle emission controls. Mitigation scenario “BRT” considers a modal shift from private car trips to a Bus Rapid Transport system. Our results show significant reductions in air pollutants and GHG emissions. Incentives and environmental regulations are needed to enable these scenarios.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The world is increasingly becoming an urban environment. The percentage of global population living in urban areas reached 50% at the beginning of the 21st century and is expected to reach 60% by 2030; the fastest rates of urbanisation are found in the developing world [1]. It has been calculated that urban areas consume more than 65% of the world's energy and emit 70% of GHG (greenhouse gas) emissions [2]. Vehicles are the largest source of GHG emissions in most urban areas [1]. Anthropogenic volatile organic compounds (VOCs), carbon monoxide (CO), and nitrogen oxides (NO_x), all of which are important precursor compounds to tropospheric ozone (O₃) and secondary organic aerosol formation, are predominantly emitted from vehicles in urban areas [3–7].

Many urban areas in industrialised countries have incorporated measures to improve air quality compared to cities in developing countries, particularly in middle-income countries such as México, China, and India [8–11]. It is essential to link air quality policies to measures that reduce GHG emissions related to energy

consumption. The MCMA (Mexico City Metropolitan Area) is one of the largest urban centres in the world. An analysis of opportunities for the reduction of the major pollutants and GHG emissions related to passenger transportation in a megacity, such as the MCMA, is not only a local matter; it can also provide insights that may be important (primarily for other middle income countries) in addressing similar air pollution problems and GHG emissions in other urbanised environments.

The MCMA has more than 20 million inhabitants. It represents approximately 18% of Mexico's population and produces 35% of the national GDP. The MCMA comprises two Mexican states with 75 municipalities (16 delegations of the Federal District—DF in Spanish—and 59 municipalities of the State of Mexico—EdoMex in Spanish) [12–14].

In the early 1990s, the MCMA experienced critical levels of O₃, carbon monoxide (CO), lead (Pb), nitrogen dioxide (NO₂) and sulphur dioxide (SO₂). Since then, several environmental measures and policies have been implemented to reduce pollution levels. As a result, of the seven air criteria pollutants that the Mexico City Atmospheric Monitoring System measures, four are considered “under control” (CO, SO₂, NO₂, Pb), while concentrations of tropospheric ozone (O₃), particulates less than 10 microns in diameter (PM₁₀) and less than 2.5 microns in diameter (PM_{2.5}) have decreased but are still critical [15].

* Corresponding author. Tel.: +52 5 623 36 00x3693; fax: +52 5 623 36 00x8051.
E-mail addresses: msp@pumas.iingen.unam.mx, csheinbaum@ii.unam.mx (C. Sheinbaum-Pardo).

The MCMA has a vehicle fleet of more than 4.5 million units. According to the emission inventory developed by the Metropolitan Environmental Commission, mobile sources are responsible for 16% of PM₁₀, 52% of PM_{2.5}, 99% of CO, 82% of NO_x, 31% of NMVOC (non-methane volatile organic compounds) and 22% of ammonia (NH₃) emissions [16]. Internal combustion engines are responsible for 44% of the MCMA greenhouse gas (GHG) emissions, representing 8% of the Mexico's energy related GHG emissions [17–19].

Air pollution and climate change primarily arise from the burning of fossil fuels. However, these environmental problems are handled by separate policies in many cases [20]. For this reason, it is important that more studies link the impacts and benefits that stem from fossil fuel burning in both specific air pollutant emissions that directly affect the health of the inhabitants of urban areas and GHG emissions that represent a global problem.

To accomplish this, it is important to understand that carbon dioxide (CO₂) emissions (the primary GHG) are directly linked to fossil fuel burning and the carbon content of the fuel. However, other GHG gases such as methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O), along with pollutant gases and particles such as NMVOC, NO_x, CO, PM₁₀, PM_{2.5}, and SO₂, also depend on other elements present in fuel such as sulphur (S), as well as the specific pollution control technology used in motor vehicles such as catalytic converters [21]. Therefore, to account for GHG and local pollutant reduction related to fossil fuel burning, the technologies involved in the combustion process must be considered.

There are numerous studies of GHG emissions and air pollution related to transportation in urban areas that argue for the importance of linking air quality and GHG policies. Woodcock et al. [22] used comparative risk assessment methods to estimate the GHG emissions, air pollution and health effects of alternative urban land transport scenarios in two settings—London, UK and Delhi, India. In both cities, they found that the reduction in carbon dioxide emissions through an increase in active travel and a decreased use of motor vehicles had greater health benefits per million population than from increasing the use of lower-emission motor vehicles. Nemet et al. [23] discussed the implications of incorporating air quality co-benefits into climate change policymaking. The authors argued that the inclusion of air quality co-benefits in the design and evaluation of climate policy would enhance social outcomes because these co-benefits were significant and policy analysis had yet to evaluate them. Muller [24] investigated a design for optimal climate policy with air pollution co-benefits. The paper estimated the welfare gain from adopting a policy that encompassed the spatially variant annual co-pollutant damage to fall between \$1 million and \$85 million in the US; Shabbir and Saeed Ahmad [25] developed a research associated with urban transportation in Rawalpindi and Islamabad to analyze the status of emission of air pollutants and energy demands. The study included a discussion of past trends and future scenarios in order to reduce the future emissions. Wagner et al. [26] presented marginal abatement cost curves by sector, implicating the mitigation pledges and air pollution co-benefits for Annex I countries. They outlined the co-effect of GHG mitigation on the emissions of local air pollutants and argued that these co-benefits offered strong local incentives for mitigation. Takeshita [27] analysed the co-benefits of CO₂ mitigation on air pollutant emissions from road vehicles. They highlighted the importance of promoting R&D for developing cost effective low carbon alternatives to heavy duty diesel trucks to achieve further reductions in global air pollutant emissions from road vehicles. Thambiran and Diabb [28] studied air pollution and climate change co-benefit opportunities in the road transport sector in Durban, South Africa. The results from their case study suggested that, in the short to medium term, local air quality management programs could be used to support climate change mitigation.

Along with CO₂ emissions and air pollutants, unsustainable transportation also has economic, social and other environmental impacts. For example, traffic congestion has economic, social and health impacts in urban areas [29–31]. As mentioned by Solis and Sheinbaum [32], the ASIF2 (Avoid–Shift–Improve–Finance) framework [33–37] provides aid for utilising the following strategies towards achieving sustainable transportation: (1) avoiding unnecessary trips, e.g., through information technologies; (2) shifting to more sustainable transport modes, e.g., public transport and rail for freight; (3) improving performance in all modes; and (4) financing investment in urban development and transport to achieve reduced CO₂ levels and sustainability.

The MCMA has an important record in the development of programs that address air quality and climate change. The Mexico City Government published the Climate Change Local Strategy in 2006 and the Climate Change Action Plan in 2008 [38,39]. Both documents contend that the mitigation of local pollution and GHG emissions must be part of the same long-term strategy. In 2012, the third Clean Air Act for the Metropolitan Area (PROAIRE 2011–2020) was published, which acknowledged the importance of solving both problems simultaneously [40]. Despite this commitment and the important number of studies developed to understand the air quality problems of the MCMA [41–44], there are few studies that estimate emission scenarios based on the introduction of different technologies and policies.

The aim of this paper is to present passenger road transport scenarios that can lead the MCMA to achieve lower emissions in both criteria air pollutants (CO, NO_x, NMVOC, and PM₁₀) and GHG (CH₄, N₂O and CO₂), while in the process promote better mobility and quality of life in this region. Compared to a baseline scenario, this paper presents two mitigation scenarios that address numbers 2 and 3 of the above-mentioned ASIF2 framework. The first mitigation scenario, called “eff,” considers improving the performance of different transportation modes by increasing fuel efficiencies (through a significant increase in hybrid vehicles) and introducing new technologies for vehicle emission controls that take advantage of low sulphur fuel content. The second mitigation scenario, called “BRT,” considers a modal shift from private car trips to a Bus Rapid Transport system. A comparative cost analysis is developed for the shift from hybrid to conventional vehicles and for the BRT project.

Plug-in electric hybrid vehicles and plug-in electric vehicles have a greater GHG and air pollutant mitigation potential than hybrid vehicles in the MCMA. The reduction potential of these technologies is presented in Section 4.2 by using actual electricity emission factors from the Mexican electricity generation fuel matrix. However, these technologies are not included in the scenarios because the mass introduction of electric vehicles requires electric smart grids and an analysis of power supply dispatches that is beyond this investigation [45,46]. Section 4.2 also presents a

Table 1
Vehicles by fuel, mode and region.

Type	Total	Vehicles by fuel type, MCMA (%)				Vehicles by region (%)	
		Gasoline	Diesel	LPG	CNG	Federal district	State of Mexico
Total	4,229,341	98.3	1.2	0.5	<0.5	67.6	32.4
Private cars	3,727,020	99.7	0.2	0.1	<0.5	66.4	33.6
Taxis	156,627	100.0	0.0	–	–	69.8	30.2
Motorcycles	237,808	100.0	–	–	–	92.2	7.8
Collective vans	29,863	97.2	2.8	0.1	–	9.0	91.0
Microbus	34,096	46.3	0.7	52.2	0.83	62.8	37.2
Buses	43,706	5.2	94.6	0.2	–	79.7	20.3
BRT	221	–	100.0	–	–	100.0	–

Source: SMA (2010)

discussion on ethanol potential based on previous studies, but this is not included in the scenario analysis because biofuel production in Mexico requires additional discussion that is also out of the scope of this research; it would, however, be important for future exploration.

2. The MCMA road passenger transportation for base year 2008

In 2008, 4.2 million road passenger vehicles circulated in the MCMA [47]. Most private cars, taxis, and collective vans use gasoline, while minibuses primarily use gasoline and LPG and buses use diesel. Table 1 shows the distribution by fuel, mode and state. Private vehicles represented 88% of the fleet, followed by motorcycles¹ (5.7%), buses and the Metrobus (1%), minibuses (0.8%), and collective vans (0.7%). In addition, the DF has a metro system that transported 4 million passengers per day in 2008 [48] and a trolley and light train system that transported almost 200 thousand passengers per day in the same year [49]. In 2005, a Bus Rapid Transport system called Metrobus began operations in the DF; in 2010, a similar system called Mexibus began operations in the EdoMex. By 2013, both systems were transporting nearly 800 thousand passengers per day [50,51]. A suburban train also began operations in the MCMA in 2008; it presently transports 140 thousand passengers per day [52]. Minibuses are small gasoline buses introduced in early 1990s. Collective vans are SUVs that are used for public transportation. In both cases, most of these vehicles are more than 15 years old. These vehicles operate through individual concessions from the city or state government and are poorly regulated, but they account for large percentage of passenger trips. In 2010, the DF government implemented “zero emission public transport corridors” for specific avenues. In these corridors, the only allowed public transportation is trolleys. Unfortunately, the same old trolleys that were already circulating in other avenues were concentrated in the new corridors, and conventionally fuelled buses were simply moved to other avenues.

According to the last origin-destination travel survey in the MCMA (which only accounted for the DF and the 35 municipalities of the EdoMex) developed in 2007, the total number of daily modal trips exceeded 30.4 million [53], of which 46% were made by minibuses and collective vans; 21% by private cars, 14% by metro, 9% by buses, 6% by taxis, 2% by motorcycles and bicycles, 1% by trolleys and light rail and 1% by other modes. Discounting the daily trips that have the purpose of returning home, 26% of the trips were to school and 23% were to either office or factory.

The distance travelled per mode is shown in Table 2, along with an estimation of passenger km by mode. The distance per year considers the actual version of the “one day without a car” program that has been in place since 2007. Based on this program, vehicles with hologram 2 (vehicles over 8 years old) do not run one day a week, in addition to one Saturday per month; this restricts these vehicles to a circulation maximum of 299 days a year, while vehicles with zero and double zero holograms can circulate 365 days a year [47].

The “one day without a car” program (in Spanish, “hoy no circula”) originated in 1991 and has changed through the years. At its inception and until 1996, all vehicles—regardless of age—did not circulate one day from Monday to Friday. From 1996 to 2001, the vehicle circulation (number of days) was dependent of the hologram obtained in the inspection program. In 2002, the maximum age for everyday circulation was set at 10 years. In 2007, the

¹ Some of the motorcycles are used for delivery; however there is no data that separates this transportation mode by use.

Table 2
Distance travelled and pass-km (2008).

	Distance travel per day	No of days	Distance travel per year	Pass-km ^a	Pass-km
	Km	Days/year	Km	Millions	%
Private vehicles				72,289	26.8
1988 and before	22.78	299	6811		
1989–1992	31.92	299	9544		
1993–1994	33.76	299	10,094		
1995 and after	35.84	299	10,716		
2000 and after	35.84	365	13,082		
Taxi				27,034	10.0
1999 and before	200	299	59,800		
2000 and after	200	365	73,000		
Microbus				65219	24.2
1999 and before	200	299	59,800		
2000 and after	200	365	73,000		
Collective vans				19041	7.1
1999 and before	200	299	59,800		
2000 and after	200	365	73,000		
Bus ^a	111	365	40,342	79344	29.4
Motorcycle	79	365	28,835	6857	2.5

^a Assumptions of load factor to calculate pass-km: private car: 1.7; taxi: 2.5; Microbus: 30; Collective vans: 10; Bus: 45; Motorcycle: 1.

program changed to the application described in the previous paragraph.

Fuel efficiency by mode is presented in Table 3 and Table 4. Fuel efficiency per model year for private vehicles is estimated by utilising the same methodology presented in Refs. [54]; it is based on vehicle sales data from the MCMA [55] and the city urban cycle. According to this data, energy consumption reached 246.6 PJ in 2008 (Fig. 1).

3. Methodology and data

3.1. Methodology

The methodology includes the development of a bottom-up model aimed at estimating the historical trends of energy demand, criteria air pollutants and GHG emissions caused by passenger vehicles circulating in the MCMA, along with projecting future scenarios up to 2028. Similar models for GHG emissions have been developed by Yan and Crookes [56] and Hao et al. [57]. He and Chen [58] based energy transport scenarios on models such as LEAP [25,59,60].

This model is called the Vehicle Emissions Scenario (MEV, for its acronym in Spanish) and is based on the Energy and Emissions Model for Mexico [58] combined with the Mobile6 adapted to the MCMA from USEPA (United States Environmental Protection Agency) and SMA [61,62]. A structure of the methodology is presented in Fig. 2.

The model is supported by the following expressions:

Table 3
Fuel efficiency for public transportation and motorcycles (MJ/Km).

Microbus	8
Bus	20
Motorcycle	1.22

Considered constant for all years.

Table 4
Average fuel efficiency of new vehicles in MCMA (MJ/Km).

	Private car	Taxis	Collective vans
1988	3.52	3.18	5.06
1989	3.60	3.27	4.99
1990	3.52	3.24	4.70
1991	3.56	3.27	4.91
1992	3.60	3.31	4.99
1993	3.56	3.34	5.06
1994	3.60	3.27	4.84
1995	3.52	2.97	5.23
1996	3.56	3.00	5.23
1997	3.38	2.95	5.06
1998	3.27	2.87	5.06
1999	3.34	2.92	5.06
2000	3.38	2.92	4.99
2001	3.27	2.89	4.84
2002	3.24	2.89	4.84
2003	3.18	2.89	4.50
2004	3.21	2.89	4.44
2005	3.24	2.82	4.32
2006	3.31	2.79	4.38
2007	3.31	2.77	4.38
2008	3.31	2.77	4.38

$$E_t = \sum_{j i t} V_{ijt} * d_{ijt} * fe_{ijt} \tag{1}$$

$$CO_{2,t} = \sum_{j i t} V_{ijt} * d_{ijt} * fe_{ijt} * EF_{ji} \tag{2}$$

$$G_{ty} = \sum_{j i t} V_{ijt} * d_{ijt} * F_{jijt} + \sum_{j i t} C \tag{3}$$

$$LP_{tq} = \sum_{j i t} V_{ijt} * d_{ijt} * F_{jijt} \tag{4}$$

where $E (J)$ is the energy demand for passenger road transport, t is the calendar year; i is the vehicle type, j is the fuel type, V_{ijt} is the vehicle population of the fuel type j for vehicle type i in the year t ; d_{ijt} (km) is the fleet average annual vehicle distance travelled of fuel type j for vehicle type i in the year t ; and fe_{ijt} (J/km) is the fleet average on-road fuel economy of fuel type j for vehicle type i in the year t . $CO_{2,t}$ is the CO_2 emissions in year t , EF_j is the emission factor (g/J) of fuel type j obtained from IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) [21]. G_{ty} is the emission of GHG gas y , where y could be N_2O or CH_4 ; F_{jijt} is the emission factor of gas y (g/km) of fuel j for vehicle type i in year t and C is the emissions during the

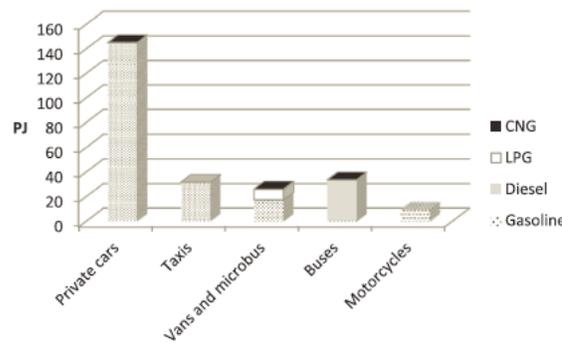


Fig. 1. Energy consumption for passenger transport in the MCMA (2008).

warm-up phase (cold start) (kg). Eq. (4) shows estimations of the following criteria air pollutant emissions (LP) where q could be PM, SO_2 , CO , NO_x or NMVOCs. The total CO_2 equivalent emissions are calculated by adding the emissions of the three gases multiplied by its global warming potential [63].

Passenger motor vehicles i are classified in numerous categories (Table 1). For pv (private vehicles), V_{ijt} is calculated through the following expression:

$$V_{pvijt} = \sum_{t=0} V_{pvijt} * (1 + S_{ij}) - OUT_{ijt} \tag{5}$$

where 0 is the base year (in this case 2008), S_{ij} is the historical annual rate of sales of new vehicles by type i , and OUT_{ijt} is the disposal rate that represents the number of type i vehicles of year model T that are no longer circulating in year t . In the case of public transportation, V_{ijt} is calculated based on the historical growth of the fleet.

3.2. Data

V_{ijt} data for years 1990 through 2008 was obtained from the MCMA emission inventory developed by the Mexico City Ministry of the Environment [16,17]. Sales data for new private vehicles (by type) from 1991 to 2010 in EdoMex and the DF was obtained from National Statistics [55]. The disposal rate was obtained from the DF vehicle fleet by year from 1990 to 2008. The EdoMex disposal rate was assumed to be the same as the DF. The distance travelled was regarded as constant and its value was taken from SMA [47].

The average private vehicle age has changed from 9.2 years in 1990 to 8.7 years in 2008, but with an increase in 1996 to 10.1 years. Fig. 3 shows the percentage of cars by age in the private vehicle fleet over several years. The composition of the vehicle fleet by age (the average vehicle age) depends on several factors, including car sales by year (that clearly respond to changes in GDP) and particular incentives for car renewal developed in the region. The “one day without a car” program, for example, positively contributed to average age reduction.

It is assumed that fuel efficiency is constant, regardless of vehicle age. Emission factors for GHG emissions are taken from the IPCC [21] and local pollutants from Mobile6 [17,64]. From 2007 forward, emission factors for lightweight vehicles of less than 80 thousand km are based on the Mexican emission standard NOM-042-SEMARNAT [65]. After 80 thousand km, emission factors are based on the Level II California standard [66]. According to the Mexican standard, the introduction of vehicles that meet the standard flows in stages from 30%, 50%, 70% and 100% of the new vehicle fleet each year. Emission factors for heavy duty vehicles before 2008 are from Mobile6; vehicles after 2008 use the Mexican standard NOM-041-SEMARNAT [67]. To estimate C in Eq. (3), it is assumed that MCMA vehicles start up 5.6 times in a day, according to Nicole et al. [68]. Taxis are conservatively estimated at 2.5 start-ups per day, while microbuses are set at 4.3, buses at 2 and motorcycles at 2 times per day [69–71].

4. Considerations for baseline and mitigation scenarios

4.1. Baseline scenario

The baseline scenario includes the following considerations: a) private car fleet increases based on historic values of both the annual rate of sales growth and the annual disposal rate by car age; b) the total number of taxis remaining the same every year in the DF and a maximum taxi age of 10 years—this limitation is established by the local government; c) a static fuel structure by mode;

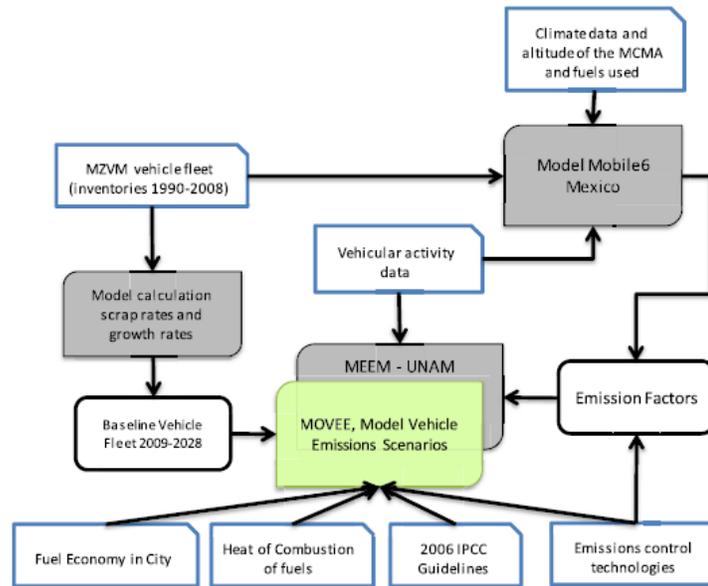
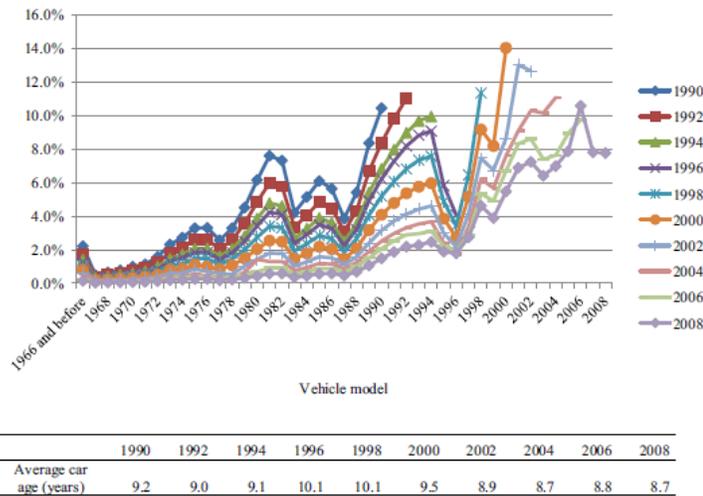


Fig. 2. Schematic view of the vehicle emission scenarios model.

d) fuel efficiency for new private vehicles (including SUVs) will increase until 2016 according to the new fuel efficiency standards published for public consideration in February 2013 (from 2017 to 2028, a moderate annual increase of 1% in fuel efficiency is considered (according to historic trends); for diesel buses, fuel efficiency is considered constant at its 2010 value); e) fuel efficiency is constant regardless of vehicle age; f) the total distance travelled is considered constant at its 2008 value; and g) the use of low sulphur

diesel (30 ppm) since 2011 (this implies that emission factors for diesel buses are reduced by 10% for PM) [72].

Mexico has developed emissions standards for light vehicles (less than 3857 kg) for both pollutants and CO₂. In the case of criteria pollutants, the emission standard considers the introduction of lower emission factors for new vehicles when low sulphur content fuels are available. However, although gasoline and low sulphur diesel are already available in the country, this standard has



Note: Drastic reductions correspond to low car sales because of low economic growth or GDP decrease such as 1976, 1987, 1995, and 2000.

Fig. 3. Composition of private vehicle fleet by age. Source: SMA, 2010.

not yet been realised. For this reason, the baseline scenario does not consider the new emission control technologies.

Because of its implications, it is important to highlight the fuel efficiency standards for lightweight vehicles in Mexico. After considerable deliberation between the federal government and the automotive industry, a project for public consideration was published in February 2013 regarding a standard for carbon dioxide emissions and its fuel efficiency equivalence for gasoline and diesel lightweight vehicles (PROY-NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2012) [72]. It is expected that the standard will be mandatory in 2014. According to this standard, the average private car fuel economy for years 2014, 2015 and 2016 will be 12.18 km/l, 12.64 km/l and 13.20 km/l (184, 178, and 170 gCO₂/km), respectively.

4.2. Mitigation scenarios

Two mitigation scenarios to reduce both GHG and criteria air pollutant emissions are proposed. In each case, the introduction of vehicles that utilise emission control technology that takes advantage of ultra-low sulphur content gasoline and diesel from 2015 onwards is considered. This implies a reduction in emission factors for CO, NMVOC, NO_x and PM₁₀ according to the Mexican NOM-042-SEMARNAT-2003 standard [65]. The introduction of particulate trap technology in new diesel engines is also considered from 2015 on for heavy diesel buses; this reduces PM₁₀ by 92% [71]. The introduction of new technology is gradual, taking four years to implement an entire new fleet according to the Mexican standard.

Mitigation scenario "eff" proposes a rise in the average fuel economy of new private vehicles and taxis; this implies a 40% introduction of hybrid vehicles (gasoline-electric) by 2028. Buses are not considered. The average fuel economy of the new vehicle fleet will increase by 3% per year, from an average of 13.2 km/l in 2016 to 18.8 km/l in 2028 (from 170 gCO₂/km to 119 gCO₂/km for gasoline cars). This goal is not difficult to achieve. The USEPA [74] passenger car and light-duty truck standards are projected to result in an average industry fleet-wide level of 163 gCO₂/mile of carbon dioxide (CO₂) in model year 2025, which is equivalent to 23.2 km/l (54.5 mpg) if achieved exclusively through fuel economy improvements. In addition, the average fuel economy of diesel buses will increase at an annual rate of 4%, from 1.8 km/l in 2016 to 3.2 km/l in 2028, based on a study developed by SENER-IEA (Secretaría de Energía-International Energy Agency) [75].

The introduction of hybrid vehicles also reduces criteria air pollutants. The emission factors for these vehicles are considered equal to the Level II California standard for Ultra Low Emission Vehicles [66].

The second mitigation scenario, "BRT," considers a modal shift from private cars and minibuses to the Bus Rapid Transit System. According to the last origin-destination survey of the MCMA, approximately 49% of all trips have a final destination to either a school or a job. It is assumed that 30% of passenger-km of these trips currently realised through private cars can shift to BRT. This will signify a reduction in pass-km of private vehicles from 2% in 2016 to 15% in 2028. This reduction is not estimated as a vehicle reduction but as a distance travel reduction. In addition, new BRT lines will substitute for minibuses at the same rate of the first DF-BRT line [50]. This will increase the number of dedicated BRT buses from 221 in 2008–2140 by 2028.

A Mexican biofuel introduction program published in 2008 stated that by 2010 the three largest Mexican cities would have gasoline blended with 6% ethanol available for the entire gasoline on-road vehicle fleet. However, this program was not implemented and at present all gasoline in Mexico is still 100% petroleum based (with MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether) as a fuel additive). Garcia

et al. [76] estimated that the introduction of a gasoline blended with 10% ethanol in major Mexican cities would reduce CO₂ emissions and most of the local criteria pollutants with the exception of PM₁₀ and acetaldehyde. A wider discussion of the prospects and barriers to ethanol and biodiesel production in Mexico, as well as the technologies that reduce pollutants and GHG emissions, though necessary for future work, is not included in this scenario analysis.

Incentives are now being directed toward the market penetration of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles in the US and Europe [77,78]. Electric vehicles do not produce exhaust emissions; any emissions are produced and accounted for during electricity production in power plants. In the case of the MCMA, 98% of the electricity consumed is produced outside the region [79]; for this reason, additional local pollutant emissions due to the electricity consumption of electric vehicles can be neglected. In the case of CO₂ emissions, electricity emissions are estimated based on the national electricity fuel mix (the electricity grid is interconnected for the entire country, with the exception of the Baja California peninsula). The national electricity emission factor was 152 tCO₂/TJ in 2010 [80]. Considering that the electricity emission factor is constant, electric vehicles would need an average electricity consumption of below 21 kWh/100 km (equivalent to 46.8 km/l) by 2025 in order to create fewer CO₂ emissions than gasoline vehicles (18.8 km/l). This is completely achievable. The electricity consumption of electric cars now ranges from 15 kWh/100 km for subcompact cars to 27 kWh/100 km for SUVs [81]. Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) and EVs are not included in the scenarios because the mass introduction of plug-in electric vehicles requires the introduction of electric smart grids and an analysis of the power supply dispatch that is beyond this investigation.

5. Results and discussion

5.1. Baseline scenario

According to the baseline scenario, the passenger vehicle fleet in the MCMA will reach 6.7 million units by 2028 (59% more than in 2008; Figs. 4 and 5). Private cars will continue to be largest segment (86% of total). Fig. 6 shows the baseline scenario of private cars grouped by age. In 2008, there were nearly 1.5 million private cars more than eight years old; by 2028, there will be approximately 3.7 million.

Energy consumption by 2028 will reach 321.1 PJ, 30% more than in 2008. By 2028, private cars will represent 55% of energy consumption, compared to 59% in 2008 (Fig. 7), and gasoline will represent 75% of energy consumption, compared to 83% in 2008.

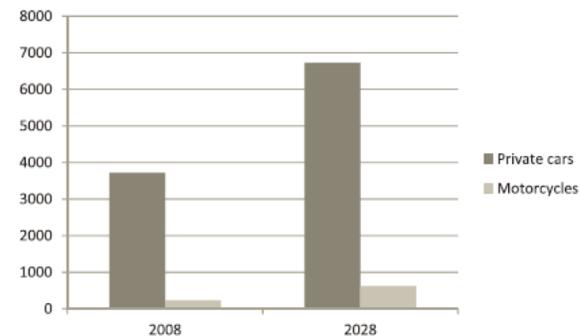


Fig. 4. Number of private vehicles by mode (thousands).

630

C. Chavez-Baeza, C. Sheinbaum-Pardo / Energy 66 (2014) 624–634

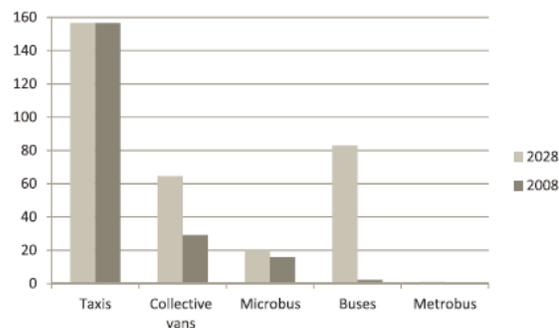


Fig. 5. Number of public vehicles by mode (thousands).

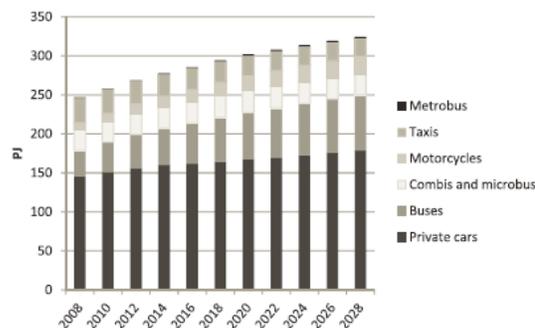


Fig. 7. Energy consumption by mode baseline scenario.

This decrease is due to increased fuel efficiency in passenger cars and the substitution of gasoline minibuses for diesel buses.

Baseline scenario emissions for criteria air pollutants and GHGs are shown in Table 5. Reductions in most of the air pollution emissions are due to an increase in new vehicles whose emissions satisfy the NOM-Semamat-042 Standard. Emissions from motorcycles for all gases and PM exhibit a significant increase because this vehicle mode increases at 4.9%/year and does not have emissions control technology or fuel efficiency standards in any of the scenarios. CO_{2eq} emissions will rise from 17.7 million tonnes in 2008 to 23.5 million tonnes by 2028. Private vehicles will represent 55% of CO_{2eq} emissions, compared to 59% in 2008.

5.2. Mitigation scenarios

The mitigation scenarios consider the same increase in vehicle fleets as the baseline scenario. The mitigation scenarios emissions for criteria air pollutants are presented in Tables 6 and 7 and Figs. 8–12.

The baseline scenario presents a significant reduction in CO and NMVOC because of the vehicle emission standards applied to vehicles since 2007. However, PM₁₀, NO_x and CO_{2eq} continue to increase. The “eff” scenario stabilises PM₁₀ and CO_{2eq} emissions by 2026 and reduces NO_x emissions due to the massive introduction of hybrid vehicles, which offer a significant reduction NO_x emission factor (ULEV-Level II according to CARB (California Environmental Protection Agency) regulations).

The “eff” + “BRT” provide a reduction for all emissions, including PM and CO_{2eq}, with respect to the baseline scenario as follows: 7%

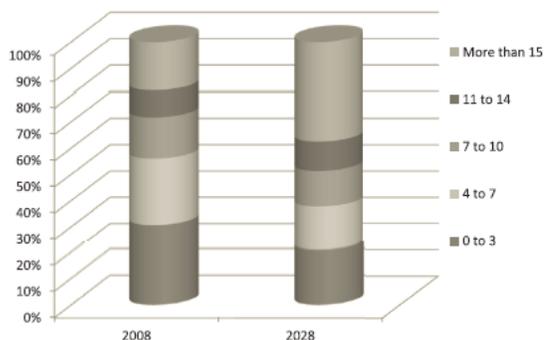


Fig. 6. Private cars by age.

in PM₁₀, 2.4% in CO, 3.9% in NMVOC, 15.4% in NO_x and 1.5% in CO_{2eq}. While the reduction in GHG emissions is slight, it is important to note that the tendency of emissions is negative, as shown in Fig. 12. The reduction of passenger transport emissions will have a significant impact in total emissions in the MCMA, considering that the average passenger transport represented approximately 61% of total criteria air pollutant emissions and 32% of GHG emissions in 2010 [16].

5.3. Cost comparison

A comparative cost analysis is developed for hybrid and conventional vehicles and for BRT systems. Investment costs were annualised with a vehicle lifetime of 10 years and a discount rate of 12% that is used in Mexico for this type of investment. The price of gasoline is considered to be constant at its 2012 value. Tables 8 and 9 present the results. The annual costs for hybrid vehicles are 1.5–1.7 times higher than gasoline conventional vehicles, including fuel costs and discounting the new vehicle tax. Even when duplicating the gasoline price, the costs of hybrid vehicles will be 1.4 to 1.5 times those of conventional gasoline vehicles. The major difference is in the investment costs. The next section discusses incentives and policies for technology implementation. Table 9 presents the costs

Table 5
Emissions in baseline scenario (thousands tonnes).

	Private car	Taxis	Motorcycles	Microbuses and collective vans	Buses	BRT	Total
PM							
2008	0.80	0.19	0.10	91.23	0.66	0.004	92.98
2018	0.96	0.17	0.19	99.91	0.90	0.01	102.14
2028	1.17	0.18	0.27	103.59	1.01	0.02	106.23
CO							
2008	641.27	119.24	182.25	246.22	43.51	0.21	1232.69
2018	449.54	71.31	71.31	129.28	134.61	0.72	856.76
2028	345.07	39.19	39.19	76.58	96.89	1.04	597.96
NMVOC							
2008	33.34	7.49	30.69	19.49	6.60	0.05	97.65
2018	23.37	4.53	40.48	8.78	10.11	0.17	87.44
2028	18.30	2.24	43.69	5.01	11.64	0.14	162.02
NO_x							
2008	54.57	12.68	2.06	9.66	33.36	0.28	112.60
2018	41.16	7.88	3.80	7.20	55.98	1.22	117.25
2028	35.84	4.45	5.32	4.20	70.79	1.97	122.56
CO_{2eq}							
2008	10,435	2242	675	1823	2474	21	17,670
2018	11,843	1895	1197	1976	4178	92	21,181
2028	12,903	1648	1630	1847	5279	147	23,454

Table 6
Emissions in "eff" scenario (thousands tonnes).

	Private car	Taxis	Motorcycles	Microbuses and collective vans	Buses	BRT	Total
PM							
2008	0.80	0.19	0.10	91.11	0.66	0.004	92.86
2018	0.96	0.17	0.19	99.55	0.87	0.01	101.75
2028	1.17	0.16	0.27	97.74	0.88	0.01	100.22
CO							
2008	641.27	119.24	182.25	246.22	43.51	0.21	1232.69
2018	449.54	70.77	70.77	128.93	134.61	0.72	855.34
2028	345.07	34.18	34.18	73.74	96.89	1.04	585.11
NMVOc							
2008	33.34	7.49	30.69	19.49	6.60	0.05	97.65
2018	23.37	4.43	40.48	8.75	9.50	0.14	86.66
2028	18.30	1.72	43.69	4.80	9.44	75.41	153.35
NO_x							
2008	54.57	12.68	2.06	9.66	33.36	0.28	112.60
2018	41.16	7.66	3.80	7.11	51.38	0.97	112.07
2028	35.84	2.94	5.32	3.64	54.03	1.11	102.88
CO₂eq							
2008	10,435	2242	675	1823	2474	21	17,670
2018	11,843	1890	1197	1974	4138	88	21,131
2028	12,903	1529	1630	1800	4909	126	22,897

Table 7
Emissions in "BRT" + "Eff" scenario (thousands tonnes).

	Private car	Taxis	Motorcycles	Microbuses and collective vans	Buses	BRT	Total
PM							
2008	0.80	0.19	0.10	91.11	0.66	0.004	92.86
2018	0.96	0.17	0.19	98.55	0.87	0.01	100.75
2028	1.17	0.16	0.27	96.30	0.88	0.02	98.79
CO							
2008	641.27	119.24	182.25	246.22	43.51	0.21	1232.69
2018	449.54	70.77	70.77	126.47	134.61	1.16	853.32
2028	345.07	34.18	34.18	70.42	96.89	2.99	583.75
NMVOc							
2008	33.34	7.49	30.69	19.49	6.60	0.05	97.65
2018	23.37	4.43	40.48	8.58	9.50	0.16	86.53
2028	18.30	1.72	43.69	4.57	9.44	72.18	149.90
NO_x							
2008	54.57	12.68	2.06	9.66	33.36	0.28	112.60
2018	41.16	7.66	3.80	6.99	51.38	1.17	112.16
2028	35.84	2.94	5.32	3.51	54.03	2.03	103.65
CO₂eq							
2008	10,435	2242	675	1823	2474	21	17,670
2018	11,843	1890	1197	1948	4138	157	21,174
2028	12,903	1529	1630	1761	4909	369	23,100

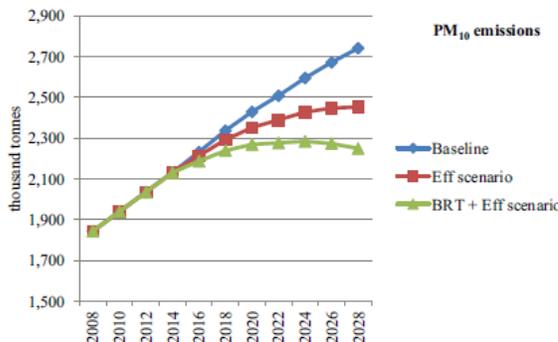


Fig. 8. PM10 emissions for baseline and mitigation scenarios.

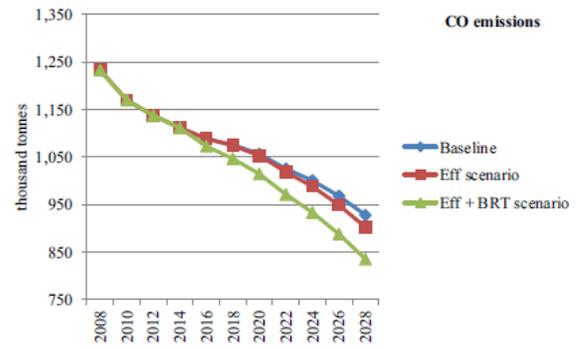


Fig. 9. CO emissions for baseline and mitigation scenarios.

of the BRT system implementation. The reductions in gasoline from private cars and microbuses are almost equivalent to the investment and fuel costs of one BRT line.

5.4. Discussion on policies for mitigation scenario implementation

Different incentives and regulations are required in order for hybrid vehicles to penetrate the MCMA vehicle market. The most important factor is the actualisation of the federal fuel economy standards for passenger and light truck vehicles, which today only covers models up to 2016. Because of the NAFTA (North American Free Trade Agreement) and the fact that the automobile firms that sell cars in Mexico are the same as in the US, it is questionable that fuel economy standards in Mexico are significantly different from those in the US. Furthermore, it would be easier for Mexico to achieve US standards because their share in total sales of sub-compact and compact cars (with higher efficiencies due to their weight) is higher than in the US.

In addition, hybrid vehicles are more expensive in the Mexico than in the US (without taxes). The market price for basic hybrid Toyota Prius is 19,080 US\$ (http://www.toyota.com/all-vehicles/); in the US, the same car costs 32,090 US\$ (http://www.toyota.com.mx). Considering NAFTA, it is not understandable this high difference in investment cost, which acts as a significant barrier for the promotion of hybrid vehicles in Mexico.

In addition, there is already a history of incentives, both in Europe and the US, to develop and promote higher efficiency, including low- and zero-emission vehicles. The U.S. federal, state and local governments provide incentives for consumer hybrid

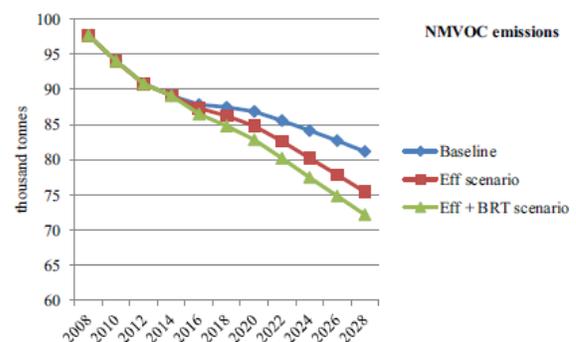


Fig. 10. NMVOc emissions for baseline and mitigation scenarios.

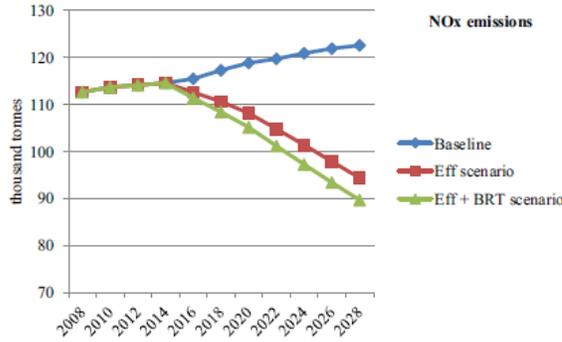


Fig. 11. NO_x emissions for baseline and mitigation scenarios.

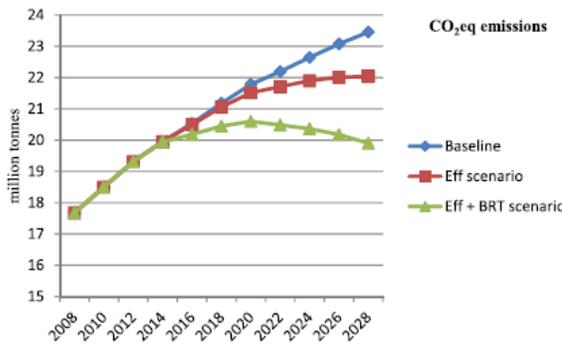


Fig. 12. CO_{2eq} emissions for baseline and mitigation scenarios.

vehicle purchases such as tax deductions, income tax credits and sales tax waivers. Other state and city incentives are related to the use of high-occupancy vehicle lane access [82]. Canadian provinces also offered tax rebates on the sales of hybrid electric vehicles [83]. More recently, additional incentives were promoted for PIEHVs and PIEVs. A recent report from the European Automobile Manufacturer's Association describes the incentives provided by different European Countries on the sales of HEVs, PIEHVs and PIEVs [78]; they include bonuses under the fuel consumption tax (Austria) to 50% reductions on registration taxes (Portugal) to exemptions from

Table 9
Costs estimation for implementation of a BRT system (Million of USdolls).

	Investment	Annual costs
<i>BRT system</i>		
Investment (infrastructure)	100	17.7
Investment (100 buses)	30.4	5.4
Diesel (USDolls/year)		4.1
Total	105.3	27.2
<i>Reductions in gasoline consumption</i>		
Gasoline microbuses		1.2
Gasoline private cars		28.6
Total		29.8

The system is evaluated for 100 articulated buses that substitute 150 microbuses (200 km per day) and 586 millions of private car - passenger-km, equivalent to avoid the circulation of 27,000 private cars. Diesel consumption of BRT is based on an average bus fuel economy of 1.8 km/l; and a distance travel of 200 km per day. Investment in infrastructure and buses is estimated from Metrobus lines in the DF [46].

the annual circulation tax for a period of ten years (Germany). In the case of the MCMA, local incentives for the promotion of hybrid vehicles can be oriented towards benefits for the inspection program and the "one day without a car" program.

Regarding the substitution of private trips by BRT, it is important to note that the Metrobus conducted several surveys of their users in order to report reductions in CO₂ emissions. Their 2010 survey reported that 16.2% of Metrobus users parked their private cars in order to use Metrobus [84]. This behaviour occurred without additional incentives or rider information—it was simply a result of the Metrobus operation. There are numerous studies on how to achieve reduced car usage [85] and promote public transportation [86]. In the case of the MCMA (which is an extended and expansive area), it is important to place emphasis on alternatives that can feed the major Metro and Metrobus lines such as parking lots in dedicated areas or public transportation modes.

6. Conclusions

The MCMA has critical concentrations of O₃, PM₁₀ and PM_{2.5} during more than one-third of the year. The primary sources of O₃ precursors and small particles are road passenger transport vehicles (SMA, 2012b). Furthermore, these sources are responsible for 37% of CO_{2eq} emissions [5,6].

A bottom-up model was developed to evaluate a baseline and two mitigation scenarios. The results show that a decrease in criteria air pollutants and CO₂ emissions is possible if three policies

Table 8
Costs estimation for conventional gasoline and hybrid private vehicles (2013USdolls).

	km/l	Investment	Investment wo tax	Tax (new car, first year)	Maintenance	Fuel costs	Annual costs	Annual costs wo tax
<i>Gasoline</i>								
Subcompact	14.1	12,244	11,915	329	171	826	3164	
Compact	11.7	17,010	16,517	493	228	991	4230	
Luxury	9.3	29,112	28,290	822	304	1245	6701	
Sport	9.3	35,843	34,035	1808	304	1245	7893	
SUV	7.9	29,573	25,078	4495	190	1467	6891	
<i>Hybrid</i>								
Subcompact	22.7	34,658	32,090	2568	171	512	6817	6363
Compact	17.5	43,151	39,037	4113	228	664	8528	7800
Luxury	18.2	72,408	63,321	9087	304	640	13,759	12,151
Sport	15.4	91,460	79,134	12,326	304	757	17,247	15,066
SUV	11.9	73,712	64,403	9309	190	978	14,214	12,566

Fuel economy is from Refs. [50,74,84]; Investment and maintenance costs are an average from Mexican manufacturing vehicle companies; Hybrid Luxury, Sport and SUV investment costs are estimated based on the difference for US manufacturing vehicle companies. Tax for new cars in Mexico depends on initial costs with a fix charged and a percentage of the difference with the less expensive category [88]; Exchange rate is an average of 2012 value: 1 USdolls = 13.17 pesos [89]. Average gasoline price is = 0.91 USdolls [90].

are accomplished. First, strict vehicle emission control standards for new vehicles must be introduced that take advantage of low sulphur content fuels. Second, strict CO₂ emission control standards or fuel economy standards must be in place to facilitate the introduction of lightweight hybrid vehicles at 40% of the new fleet by 2028, along with fuel economy standards for heavy-duty vehicles. As in other regions of the world, accomplishing this will require proper car tax incentive mechanisms to promote more efficient cars.

The third policy consists of promoting BRT systems that reduce the distance travelled by private cars through a modal switch to public transportation. This will require the support and expansion of the Metrobus and Mexibus systems, along with the development of a better public system network to feed the Metro and the Metrobus systems. We must study the impacts of parking systems that allow modal interchanges and other measures that incentive public transportation.

In addition, emission reductions can be further achieved through 1) mandatory standards for heavy-duty diesel vehicles that reduce NO_x (using catalytic converters); 2) the incorporation of plug-in hybrid and electric vehicles; 3) the possible use of electric trolleys rather than BRTs in public transportation systems (with an analysis of overall GHG emissions due to electricity use); 4) an additional promotion of non-motorised vehicles for short distances; and 5) the use of electric vehicles following an integrated analysis of grid and dispatch implications. Sustainable scenarios for passenger transportation are possible in the MCMA. Proper policies are needed to allow them to occur.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the support of the Air Quality Area of the Mexico City Ministry of the Environment, and in particular to Jorge Sarmiento and Saul Rodríguez. We also acknowledge the collaboration of Sonia Briceño and Guillermo Robles for the development of this paper and Sebastian Lelo de Larrea for the revision.

References

- [1] UNHabitat. Time to think urban. 24th session governing council; 2013 April [Nairobi].
- [2] Solecki W, Seto KC, Marcotullio PJ. It's time for an urbanization science. *Environ Sci Policy Sustain Dev* 2013;55:12–7.
- [3] Parrish DD, Kuster WC, Shao M, Yokouchi Y, Kondo Y, Goldan PD, et al. Comparison of air pollutant emissions among mega-cities. *Atmos Environ* 2009;43:6435–41.
- [4] Von Schneidmesser E, Monks PS, Plass-Duelmer C. Global comparison of VOC and CO observations in urban areas. *Atmos Environ* 2010;44:5053–64.
- [5] Baker AK, Beyersdorf KJ, Doezema LA, Katzenstein A, Meinardi S, Simpson JJ, et al. Measurements of nonmethane hydrocarbons in 28 United States cities. *Atmos Environ* 2008;42:170–82.
- [6] Bradley KS, Stedman DH, Bishop GA. A global inventory of carbon monoxide emissions from motor vehicles. *Chemosphere Global Change Sci* 1999;1:65–72.
- [7] Warneke C, McKeen SA, de Gouw JA, Goldan PD, Kuster WC, Holloway JS, et al. Determination of urban volatile organic compound emission ratios and comparison with an emissions database. *J Geophys Res* 2007;112:D10S47.
- [8] Parrish DD, Singh HB, Molina L, Madronich S. Air quality progress in North American megacities: a review. *Atmos Environ* 2011;45:7015–25.
- [9] Katsouyanni K, Samet J, Anderson H, Atkinson R, Le Tertre A, Medina S, et al. Air pollution and health: a European and North American approach (APHENA). *Res Rep Health Eff Inst* 2009;5–90.
- [10] Fang M, Chan CK, Yao X. Managing air quality in a rapidly developing nation: China. *Atmos Environ* 2009;43:79–86.
- [11] Sahu S, Beig G, Schultz M, Parkhi N, Stein O. Emissions inventory of anthropogenic PM_{2.5} and PM₁₀ in mega city, Delhi, India for air quality forecasting during CWG-2010. In: EGU general assembly conference abstracts. Presented at the EGU general assembly conference abstracts 2012. p. 6180.
- [12] Datos Tabulados Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) Censo Nacional de Población y Vivienda 2010; 2012.
- [13] <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>.
- [14] Gaceta Oficial del Distrito Federal (GODF). Declaratoria de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México http://www.paot.org.mx/centro/leyes/dff/pdf/GODF/GODF_11_12_2012.pdf; Jan 23, 2006.
- [15] Sheinbaum C. Problemática ambiental de la Ciudad de México. México DF: Limusa-Instituto de Ingeniería, UNAM; 2009.
- [16] Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA). Informe mensual de la Calidad del Aire-diciembre <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=28&opcioninfoproductos=13>; 2012.
- [17] Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA). Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM http://www.sma.df.gob.mx/inventario_emisiones/index.php?op=pub#; 2010.
- [18] Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA). Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero y carbón negro de la ZMVM http://www.sma.df.gob.mx/inventario_emisiones/index.php?op=pub#; 2010.
- [19] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México DF, http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=685; 2012.
- [20] ApSimon H, Amann M, Aström S, Oxley T. Synergies in addressing air quality and climate change. *Clim Policy* 2009;9:669–80.
- [21] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Guidelines for national greenhouse gas inventories. In: *Energy*, chapter 3: mobile combustion, vol. 2; 2006. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>; 2006.
- [22] Woodcock M, Edwards P, Tonne C, Armstrong BG, Ashiru O, Banister D, et al. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: urban land transport. *Lancet* 2009;374:1930–43.
- [23] Nemet GF, Holloway T, Meier P. Implications of incorporating air-quality co-benefits into climate change policymaking. *Environ Res Lett* 2010;24:1–9.
- [24] Muller NZ. The design of optimal climate policy with air pollution co-benefits. *Resour Energy Econ* 2012;34:696–722.
- [25] Shabbir R, Saeed Ahmad S. Monitoring urban transport air pollution and energy demand in Rawalpindi and Islamabad using leap model. *Energy* 2010;35:2323–32.
- [26] Wagner F, Amann M, Borken-Kleefeld J, Cofala J, Höglund-Isaksson L, Purohit P, et al. Sectoral marginal abatement cost curves: Implications for mitigation pledges and air pollution co-benefits for annex I countries. *Sustain Sci* 2012;7:169–84.
- [27] Takeshita T. Assessing the co-benefits of CO₂ mitigation on air pollutants emissions from road vehicles. *Appl Energy* 2012;97:225–37.
- [28] Thambiran T, Diab RD. The case for integrated air quality and climate change policies. *Environ Sci Policy* 2011;14:1008–17.
- [29] Bulkeley H. Cities and the governing of climate change. *Annu Rev Environ Resour* 2010;35:229–53.
- [30] Hallegatte S, Henriot F, Corfee-Morlot J. The economics of climate change impacts and policy benefits at city scale: a conceptual framework. OECD environment Working Papers No.4, <http://www.environmentportal.in/files/climate-economics.pdf>; 2012.
- [31] Levy J, Buonocore JJ, Stackelberg K. Evaluation of the public health impacts of traffic congestion: a health risk assessment. *Environ Health* 2010;9:65.
- [32] Solis JC, Sheinbaum C. Energy consumption and greenhouse gas emission trends in Mexican road transport. *Energy Sustain Dev* 2013;17:280–7.
- [33] Dalkmann H, Brannigan C. Transport and climate change, module 5e, sustainable transport, a sourcebook for policy-makers in developing cities, GTZ global, Eschborn.
- [34] Mani A, Pai M, Aggarwal R. Sustainable urban transport in India: role of the auto-rickshaw sector. World Resources Institute, EMARQ; 2012. http://pdf.wri.org/sustainable_urban_transport_india.pdf.
- [35] Schipper L, Marie-Lilliu C, Gorham R. Flexing the link between transport and greenhouse gas emissions: a path for the world Bank. Paris: International Energy Agency; 2000.
- [36] Tiwari R, Cervero R, Schipper L. Driving CO₂ reduction by integrating transport and urban design strategies. *Cities* 2011;28:394–405.
- [37] Ajanovic A, Schipper L, Haas R. The impact of more efficient but larger new passenger cars on energy consumption in EU-15 countries. *Energy* 2012;48(1):346–55.
- [38] Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA). Estrategia Local de Acción Climática http://www.sma.df.gob.mx/climatica/principal.php?op=acciones01_b; 2006.
- [39] Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA). Programa de Acción Climática <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=26&id=531>; 2008.
- [40] Comisión Ambiental Metropolitana. Programa de Calidad del Aire 2012–2020. México DF; 2012.
- [41] Molina L, Molina MJ. Air quality in the Mexico megacity: an integrated assessment. NY, USA: Springer; 2002.
- [42] Zavala M, Lei W, Molina MJ, Molina LT. Modeled and observed ozone sensitivity to mobile-source emissions in Mexico City. *Atmos Chem Phys* 2009;9:39–55.
- [43] Molina LT, Madronich S, Gaffney JS, Apel E, De Foy B, Fast J, et al. An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico city emissions and their transport and transformation. *Atmos Chem Phys* 2010;10:8697–760.
- [44] Bon DM, Ulbrich IM, de Gouw JA, Warneke C, Kuster WC, Alexander ML, et al. Measurements of volatile organic compounds at a suburban ground site (T1) in Mexico city during the MILAGRO 2006 campaign: measurement

- comparison, emission ratios, and source attribution. *Atmos Chem Phys* 2011;11:2399–421.
- [45] Smith WJ. Can EV (electric vehicles) address Ireland's CO₂ emissions from transport? *Energy* 2010;35:4514–21.
- [46] Ovidiu Varga B. Electric vehicles, primary energy sources and CO₂ emissions: Romanian case study. *Energy* 2013;49:61–70.
- [47] Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA). Inventario de emisiones de contaminantes criterio de la ZMVM http://www.sma.df.gob.mx/inventario_emisiones/index.php?op=pub#; 2008.
- [48] Sistema de Transporte Colectivo Metro (SCT). Datos de operación <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/cifrasoperacion.html#4>; 2010.
- [49] Sistema de Transportes Eléctricos (STE). Antecedentes <http://www.ste.df.gob.mx/index.html?page=3>; 2012.
- [50] Metrobús. Fichas técnicas <http://www.metrobus.df.gob.mx/fichas.html>; 2013.
- [51] Transmasivo. Mexibus <http://www.transmasivo.com.mx/index.php>; 2013.
- [52] Ferrocarril Suburbano (FC). Operación <http://www.fsuburbanos.com/#>; 2013.
- [53] Islas V, Hemández S, Attoyo J, Lelis M, Rivalcaba I. Implementing sustainable urban travel policies in Mexico. Discussion Paper 2011-14 OECD/ITF, <http://www.internationaltransportforum.org/jtrc/DiscussionPapers/DP201114.pdf>; 2011.
- [54] Sheinbaum-Pardo C, Chávez-Baheza C. Fuel efficiency of new cars in Mexico: trends from 1988 to 2008. *Energy Policy* 2011;39:8153–62.
- [55] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2000-2009). La industria automotriz en México. Serie Estadísticas Sectoriales, http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/automotriz/2011/iam-2011.pdf; 2011.
- [56] Yan X, Crookes JR. Reduction potentials of energy demand and GHG emissions in China's road transport sector. *Energy Policy* 2009;37:658–68.
- [57] Hao H, Wang H, Ouyang M. Fuel conservation and GHG (Greenhouse gas) emissions mitigation scenarios for China's passenger vehicle fleet. *Energy* 2011;36:6520–8.
- [58] He L-Y, Chen Y. Thou shalt drive electric and hybrid vehicles: scenario analysis on energy saving and emission mitigation for road transportation sector in China. *Transp Policy* 2013;25:30–40.
- [59] Ma Z, Wang YX, Duan HY, Wang XE, Dong DM. Study on the passenger transportation Energy demand and carbon emission of Jilin province based on LEAP model. *Adv Mater Res* 2012;518-523:2243–6.
- [60] Zhang Q, Sun G, Fang S, Tian W, Li X, Wang H. Air pollutant emissions from vehicles in China under various energy scenarios. *Sci Total Environ* 2013;450:250–8.
- [61] Sheinbaum C, Masera M. Mitigating carbon emissions while advancing national development priorities: the case of Mexico. *Clim Change* 2000;47:259–82.
- [62] EPA and NHTSA Set standards to reduce greenhouse gases and improve fuel economy for model years 2017–2025 cars and light trucks <http://www.epa.gov/otaq/climate/documents/420f12051.pdf>.
- [63] Hegerl GC, Zwiers FW, Braconnot P, Gillett NP, Luo Y, Marengo Orsini JA, et al. Understanding and attributing climate change. In: Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2007.
- [64] United States Environmental Protection Agency (USEPA). MOBILE6 vehicle emission modeling Software. Modeling and inventories <http://www.epa.gov/otaq/m6.htm>; 2013.
- [65] Diario Oficial de la Federación (DOF). Norma Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003: Que establece los límites máximos permisibles de emisión. México, http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=20911968&fecha=07/09/2005; Sept 7, 2005.
- [66] California Air Resources Board, California Environmental Protection Agency (CARB). The California low-emission vehicle regulations. In: http://www.arb.ca.gov/msprog/levprog/test_proc.htm; April 2013.
- [67] Diario Oficial de la Federación (DOF). Norma Oficial Mexicana NOM-041-SEMARNAT-2011: Que establece los límites máximos permisibles de emisión. México, http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5215015&fecha=20/10/2011; Nov 20, 2011.
- [68] Nicole D, Lents J, Nikkila N, Osses M. Mexico city vehicle activity study. 21573 Ambushers St. Diamond Bar, CA 91765: International Sustainable Systems Research; July 6, 2004.
- [69] Lents JM, Osses M, Davis NC, Nikkila N. Comparison of on-road vehicle profiles collected in seven cities worldwide. In: Proceedings of the 13th international symposium on transport and air pollution; Boulder, CO Sept 13–15, 2004.
- [70] Hui G, Sung HM, Dai W, Zhang QY. Development of high-resolution motor vehicle emission inventories for city-wide air quality impact analysis in China. Dallas, TX/China: Trinity Consultants Inc/College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University; 2004.
- [71] Blumberg KO, Walsh MP, Pera C. Low-sulfur gasoline & diesel: the key to lower vehicle emissions. UNEP Report, <http://www.unep.org/transport/pcfv/PDF/PubLowSulfurPaper.pdf>; 2004.
- [72] Diario Oficial de la Federación (DOF). PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCF-2012. Emisiones de bióxido de carbono (CO₂) provenientes del escape. México, http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5288407&fecha=20/02/2013; Feb 2, 2013.
- [73] United States Environmental Protection Agency (USEPA). Transportation and air quality. Emission standards reference guide <http://www.epa.gov/otaq/standards/index.htm>; 2013.
- [74] Secretaría de Energía-International Energy Agency (SENER-IEA). Indicadores de eficiencia energética en México: 5 sectores, 5 retos. British Embassy; 2011.
- [75] García CA, Manzini F, Islas J. Air emissions scenarios from ethanol as a gasoline oxygenate in Mexico city metropolitan area. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:3032–40.
- [76] United States Department of Energy (USDOE). Alternative fuel data center <http://www.afdc.energy.gov/vehicles/electric.html>; 2013.
- [77] European Automobile Manufacturers Association (EAMA). Incentives for buying electric cars http://www.acea.be/news_detail/increasing_number_of_incentives_for_buying_electric_vehicles/; 2013.
- [78] Comisión Federal de Electricidad (CFE). Programa de Obras e Infraestructura del Sector Eléctrico 2012–2025. CFE, México DF.
- [79] Sheinbaum-Pardo C, Calderón-Iraozque A, Ramírez-Suárez M. Potential of biodiesel from waste cooking oil in Mexico. *Biomass Bioenergy* 2013;56:230–8.
- [80] Environmental Protection Agency (EPA). Fuel economy guide. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE); 2013. <http://www.fueleconomy.gov/s>.
- [81] Gallagher KS, Muehlegger E. Giving green to get green? incentives and consumer adoption of hybrid vehicle technology. *J Environ Econ Manag* 2011;61:1–15.
- [82] Chandra A, Gulati S, Kandlikar M. Green drivers or free riders? an analysis of tax rebates for hybrid vehicles. *J Environ Econ Manag* 2010;60:78–93.
- [83] Metrobús. Reporte de Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por el sexto año de operación del Corredor Metrobús Insurgentes. Metrobús, México DF, http://www.metrobus.df.gob.mx/transparencia/documentos/art15/X/X01_Informe_Reducion_Emisiones_2010-2011.pdf; 2010–11.
- [84] Graham-Rowe E, Skippon S, Gardner B, Abraham C. Can we reduce car use and, if so, how? A review of available evidence. *Transp Res Part Policy Pract* 2011;45:401–18.
- [85] Hu X, Chang S, Li J, Qin Y. Energy for sustainable road transportation in China: challenges, initiatives and policy implications. *Energy* 2010;35:4289–301.
- [86] Ley Federal de Impuestos sobre Automóviles Nuevos. <http://www.adiuanas-mexico.com.mx/claa/ctar/leyes/lisan.html>; 2013.
- [87] Banco de México. Mercado cambiario. <http://www.banxico.org.mx/portal-mercado-cambiarior/>.
- [88] Pemex. Precio al público de productos petrolíferos. www.ri.pemex.com/files/dcpetro/epublico_esp.pdf.