



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DOCTORADO EN INGENIERÍA EN ENERGÍA

Análisis del consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero
del sector transporte en México y escenarios de mitigación

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

Doctor en Ingeniería

PRESENTA:

Juan Carlos Solís Ávila

TUTOR PRINCIPAL

Claudia Sheinbaum Pardo, Instituto de Ingeniería, UNAM

COMITÉ TUTOR

Blanca Elena Jiménez Cisneros, Instituto de Ingeniería, UNAM

Claudia Sheinbaum Pardo, Instituto de Ingeniería, UNAM

Víctor Rodríguez Padilla, Facultad de Ingeniería, UNAM

Juan Pablo Antún Callaba, Instituto de Ingeniería, UNAM

David Morillón Gálvez, Instituto de Ingeniería, UNAM

México, D. F., junio de 2014.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Blanca Elena Jiménez Cisneros

Secretario: Claudia Sheinbaum Pardo

Vocal: Víctor Rodríguez Padilla

1^{er}. Suplente: Juan Pablo Antún Callaba

2^o. Suplente: José Luis Fernández Zayas

Lugar donde se realizó la tesis: Distrito Federal, México

TUTOR DE TESIS:

Claudia Sheinbaum Pardo.

Índice

Lista de Tablas	5
Lista de Figuras.....	7
Abreviaturas utilizadas.....	10
1. Introducción.....	12
1.1. El consumo de energía y el cambio climático.....	17
1.2. Importancia del transporte en el consumo energético y en las emisiones de GEI.....	24
2. Antecedentes.....	31
2.1. Proyecciones del consumo de energía mundial en el transporte y sus emisiones.....	31
2.2. Las medidas de mitigación de emisiones de GEI para el transporte.....	38
Vehículos Eléctricos e Híbridos.....	43
Biocombustibles.....	46
Gas natural en el transporte.....	48
Tecnologías y sistemas para promover el cambio modal.....	49
2.3. Medidas de mitigación en curso en el sector transporte e intervenciones potenciales.....	50
Las normas de eficiencia para los vehículos ligeros.....	50
La NOM-163 de México.....	56
Las normas de eficiencia vehicular en los vehículos pesados (HDV).....	57
Las políticas para los vehículos eléctricos.....	60
Las políticas sobre los Biocombustibles.....	60
Las políticas sobre cambio modal y de reducción de la actividad.....	62
2.4. Publicaciones sobre el tema.....	66
3. El autotransporte en México.....	70
3.1. El autotransporte y la economía.....	70
3.2. Consumo de energía y emisiones de GEI del autotransporte en México.....	77
4. Metodología y fuentes de información.....	82
4.1. Variables de actividad y rendimiento energético.....	82
4.2. Metodología para el cálculo del consumo de energía y de las emisiones de GEI.....	87
4.3. Metodología para el cálculo de la elasticidad de la demanda.....	88
4.4. Análisis de sensibilidad.....	88
4.5. Metodología para los escenarios base y de mitigación.....	89
Escenario base.....	89
Escenarios de mitigación.....	90

4. Resultados: 1990-2010.....	99
Flota vehicular por categoría	99
Rendimiento de combustible	104
Actividad vehicular	107
Consumo de combustibles del autotransporte en México en 1990-2010.....	108
Emisiones de CO ₂ por categoría	111
Elasticidad para el consumo de gasolina	115
5. Resultados: 2010-2050.....	116
Venta de vehículos.	116
Flota vehicular por categoría	118
Consumo de combustibles del autotransporte en México en 2010-2050. Escenario Base.	120
Emisiones de CO ₂ por categoría para 2010-2050	123
Análisis de sensibilidad	125
6. Escenarios de mitigación del consumo de energía y de emisiones de CO ₂	127
Mayor rendimiento de combustible en los vehículos nuevos a gasolina.	127
Mayor rendimiento de combustible en los camiones nuevos a diésel.....	130
Restricción al crecimiento de las camionetas de pasajeros.	131
Uso de automóviles eléctricos.	132
Cambio modal a sistemas BRT.....	137
Uso de la mezcla etanol-gasolina.....	140
Uso de la mezcla biodiésel-diésel	146
Aplicación simultánea de los escenarios de mitigación.	152
Escenario de reducción de la tasa de crecimiento de los vehículos ligeros.....	156
Más opciones de mitigación.	160
7. Conclusiones.....	165
8. Referencias	168
9. Anexo: Artículo publicado.	177

Lista de Tablas

Tabla 1. Relación entre las concentraciones de CO ₂ y el cambio global de temperatura.	22
Tabla 2. Estrategias de reducción de emisiones.	39
Tabla 3. Progreso del rendimiento de combustible contra los objetivos de 2DS.....	41
Tabla 4. Comparación de tres opciones para transporte masivo de pasajeros.....	49
Tabla 5. Resumen de políticas de eficiencia para vehículos ligeros.....	52
Tabla 6. Otras políticas vigentes en 2011	55
Tabla 7. Rendimiento de combustible equivalente según la NOM-163, vehículos de pasajeros.....	57
Tabla 8. Rendimiento de combustible equivalente según la NOM-163, camionetas ligeras.	57
Tabla 9. Resumen de políticas de eficiencia para vehículos pesados.....	58
Tabla 10. Resumen de políticas para el cambio modal y para la reducción de la actividad	63
Tabla 11. Cambios modales del transporte de pasajeros bajo las políticas vigentes y próximas a adoptarse.	64
Tabla 12. Potencial de cambios modales en el transporte de pasajeros.	65
Tabla 13. Participación del sector Transportes en el Valor Agregado Bruto Nacional.	71
Tabla 14. Mercancías importadas por modo de transporte (LAB).....	73
Tabla 15. Mercancías exportadas por modo de transporte (LAB)	73
Tabla 16. Evolución de la inversión pública y privada en el sector transporte, según modo	75
Tabla 17. Consumo de combustibles en México por sector.....	77
Tabla 18. Emisiones equivalentes de CO ₂ asociadas al consumo de energía nacional por sector....	79
Tabla 19. Información del autotransporte disponible en el país.	84
Tabla 20. Factores por defecto para emisiones móviles de CO ₂	87
Tabla 21. Flota vehicular en México según tipo.	99
Tabla 22. Estructura de la flota de vehículos ilegales según tipo	101
Tabla 23. Estructura de la flota vehicular de México en 2012 por antigüedad y procedencia legal.	101
Tabla 24. Estructura de la flota vehicular de México en 2012 por antigüedad y segmento.	102
Tabla 25. Tasa de motorización para México.....	102
Tabla 26. Tasa de motorización para algunos países y regiones.....	103
Tabla 27. Distancia media anual recorrida en el autotransporte por modo	107
Tabla 28. Consumo de combustibles (en petajoules) para el autotransporte en México.	108
Tabla 29. Consumo de energía en el autotransporte, según combustible y modo.....	111
Tabla 30. Participación de las diferentes categorías del autotransporte en las emisiones de CO ₂ . 112	
Tabla 31. Estimación de la intensidad modal para los modos de transporte de pasajeros en 2010.	113
Tabla 32. Estimación de la intensidad modal para los modos de transporte de carga en 2010. ...	114
Tabla 33. Estimación de las elasticidades para la demanda de gasolina (1990-2010).....	115
Tabla 34. Tasas medias anuales de crecimiento de las ventas y de la población vehicular.....	117
Tabla 35. Evolución de la población vehicular en México para 2010-2050.....	119
Tabla 36. Estructura de la población vehicular en México para 2010 y 2050.	119
Tabla 37. Estructura por edad de los automóviles privados.....	120
Tabla 38. Evolución del consumo de combustibles (en PJ) del autotransporte en México.	121
Tabla 39. Estructura del consumo de combustibles del autotransporte en México en 2010, 2030 y 2050.	123
Tabla 40. Variación en el consumo total de combustibles.	123
Tabla 41. Contribución de los modos de autotransporte a las emisiones de CO ₂	124

<i>Tabla 42. Intensidades modales (g/pas-km) del autotransporte en 2010 y 2050 para el escenario base.</i>	125
<i>Tabla 43. Resultado del análisis de sensibilidad.</i>	126
<i>Tabla 44. Estimaciones sobre de la penetración de vehículos eléctricos en Europa, Estados Unidos, y Japón en 2030.</i>	133
<i>Tabla 45. Consumo energético en el ciclo combinado para algunos modelos de vehículos eléctricos.</i>	134
<i>Tabla 46. Parámetros de consumo usados en el escenario de mitigación por vehículos eléctricos.</i>	135
<i>Tabla 47. Cambio modal en el metrobus sobre Insurgentes en 2011 como porcentaje de sus usuarios.</i>	138
<i>Tabla 48. Parámetros considerados en el escenario de mitigación por BRT.</i>	138
<i>Tabla 49. Veh-km que debe absorber el BRT y autobuses necesarios.</i>	139
<i>Tabla 50. Etanol requerido en el escenario de mitigación.</i>	141
<i>Tabla 51. Producción de alcohol en México para consumo humano (salud y bebidas).</i>	143
<i>Tabla 52. Producción mundial de etanol para combustible (Cifras en millones de litros).</i>	144
<i>Tabla 53. Consumo de agua en la producción de etanol y gasolina en m³/GJ.</i>	144
<i>Tabla 54. Requerimientos de agua azul en millones de m³ bajo el escenario base y el de mitigación sólo por etanol.</i>	145
<i>Tabla 55. Requerimientos de agua azul en millones de m³ para el escenario base y el de mitigación conjunta.</i>	145
<i>Tabla 56. Biodiésel requerido en el escenario de mitigación.</i>	147
<i>Tabla 57. Principales productores de biodiésel en 2011 (en millones de litros anuales).</i>	148
<i>Tabla 58. Emisiones promedio de CO₂ debidas a cambio de uso de suelo, expresadas como kg CO₂/GJ de biocombustible y como porcentaje de las emisiones de carbón del combustible remplazado.</i>	150
<i>Tabla 59. Promedio mundial de la huella de agua para 10 cultivos para etanol y 3 para biodiésel, en (m³/GJ).</i>	151
<i>Tabla 60. Requerimientos de agua azul en millones de m³ para el escenario base y el de mitigación.</i>	152
<i>Tabla 61. Emisiones de CO₂ evitadas para la aplicación simultánea de los esquemas de mitigación.</i>	154
<i>Tabla 62. Reducción de la intensidad modal en el transporte de pasajeros debido a las mejoras en los rendimientos de combustible y de consumo eléctrico.</i>	156
<i>Tabla 63. TMCA de ventas de vehículos ligeros.</i>	157
<i>Tabla 64. Emisiones de CO₂ evitadas con los esquemas de mitigación (se incluye 30% de reducción en las TMCA de los vehículos ligeros).</i>	159
<i>Tabla 65. Requerimientos para los escenarios de mitigación con TMCA de los vehículos ligeros reducida.</i>	160
<i>Tabla 66. Potencial de recursos bioenergéticos evaluados en 2004.</i>	161

Lista de Figuras

Figura 1. Emisiones mundiales de CO ₂ debidas a la quema de combustibles fósiles.....	20
Figura 2. Efectos proyectados del cambio climático.....	20
Figura 3. Emisiones mundiales de CO ₂ por quema combustibles.....	21
Figura 4. Principales países emisores de CO ₂ en 2011.....	23
Figura 5. Cambio en las emisiones de CO ₂ en 2010-2011 por región.....	24
Figura 6. Emisiones de CO ₂ por sector en 2011.....	25
Figura 7. Uso mundial de la energía en el transporte por modo en 2011.....	26
Figura 8. Estructura de los viajes motorizados de pasajeros por modo en 2009.....	27
Figura 9. Viajes de pasajeros en vehículos ligeros para algunos países de la OCDE.....	28
Figura 10. Ventas mundiales de vehículos ligeros para pasajeros.....	28
Figura 11. Evolución de autotransporte de carga.....	29
Figura 12. Estructura modal del transporte de carga hacia el interior de algunos países (comercio doméstico).....	29
Figura 13. Evolución del consumo energético y de las emisiones de CO ₂ para los escenarios de la AIE.....	32
Figura 14. Ahorros de energía para el escenario de Nuevas Políticas de la AIE por área.....	32
Figura 15. Ahorros de energía para el escenario de Nuevas Políticas de la AIE por sector.....	33
Figura 16. Consumo total de energía e intensidad energética consistentes con un aumento global de temperatura de 2°C.....	34
Figura 17. Emisiones de CO ₂ por sector para distintos escenarios de la AIE.....	34
Figura 18. Ahorros de combustible por eficiencia energética en el autotransporte en el escenario de Nuevas Políticas de la AIE.....	35
Figura 19. Cambio en la intensidad energética por sector y región para 2005-2012.....	36
Figura 20. Demanda de petróleo para el transporte por subsector en el escenario de Nuevas Políticas.....	37
Figura 21. Crecimiento de la flota de vehículos ligeros de pasajeros por región en el escenario de políticas actuales y anunciadas (Nuevas Políticas).....	37
Figura 22. Marco ASI (-T) para los sistemas de transporte.....	39
Figura 23. Rendimiento de combustible y nuevos registros de vehículos ligeros.....	40
Figura 24. Metas globales gubernamentales y de los fabricante de autos EV.....	44
Figura 25. Evolución temporal de los sistemas BRT.....	49
Figura 26. Comparación de los factores de emisión de CO ₂ para algunos países en 2000-2025.....	54
Figura 27. Impactos de las políticas en las emisiones globales de los vehículos ligeros.....	55
Figura 28. Políticas y objetivos para las mezclas de biocombustibles.....	61
Figura 29. Contribución de cada subsector al total del sector transportes.....	72
Figura 30. Contribución de cada rama del subsector Autotransportes.....	72
Figura 31. Estructura porcentual del consumo de los hogares y las IPSFL según finalidad, 2012....	74
Figura 32. Red Carretera Principal en 2012.....	76
Figura 33. Estructura porcentual de fondos federales para movilidad según destino, 2011.....	76
Figura 34. Evolución del consumo energético del sector transporte por modo.....	78
Figura 35. Evolución del consumo energético del sector transporte según combustible.....	78
Figura 36. Evolución de las emisiones de CO ₂ asociadas a la producción y consumo de energía en México.....	80
Figura 37. Producción e importación de gasolina y diésel en México (1990-2011).....	80
Figura 38. Importaciones de gasolina y diésel en México como proporción de sus demandas (1990-2011).....	81

Figura 39. Propuesta de desagregación por modos y sub-modos del autotransporte.	85
Figura 40. Evolución de la flota de vehículos a gasolina según segmento.	100
Figura 41. Evolución de la flota de vehículos a gasolina según procedencia legal.	101
Figura 42. Evolución del rendimiento de combustible de los automóviles en circulación según segmento.	104
Figura 43. Estimación de la evolución del rendimiento de combustible en los vehículos a diésel.	105
Figura 44. Evolución del rendimiento de combustible de los vehículos en Estados Unidos.	106
Figura 45. Evolución del rendimiento de combustible en el mundo bajo las normas vigentes en 2004.	106
Figura 46. Actividad del transporte interurbano en México.	107
Figura 47. Evolución del consumo de gasolina por modo de transporte.	109
Figura 48. Evolución del consumo de gasolina de los automóviles privados por segmento.	109
Figura 49. Evolución del consumo de diésel por modo.	110
Figura 50. Desagregación de gasto en transporte en los hogares mexicanos en 2012 por decíl. ..	113
Figura 51. Evolución de las ventas de los segmentos automotrices y de camiones ligeros.	116
Figura 52. Determinantes de la expansión de la flota para algunos países para (1980-2020). ..	117
Figura 53. Evolución de la flota de vehículos a gasolina.	120
Figura 54. Evolución del consumo de gasolina de los automóviles privados.	122
Figura 55. Evolución del consumo de diésel por modo.	122
Figura 56. Evolución de las emisiones de CO ₂ asociadas al autotransporte en México por modo.	124
Figura 57. Rendimiento de combustible de los vehículos subcompactos en circulación para cuatro escenarios.	128
Figura 58. Rendimiento de combustible de las camionetas en circulación para cuatro escenarios.	128
Figura 59. Rendimiento de combustible de los camiones ligeros en circulación para cuatro escenarios.	129
Figura 60. Rendimiento de combustible de los camiones pesados en circulación para tres escenarios.	131
Figura 61. Rendimiento de combustible de subcompactos y camionetas en circulación bajo el escenario de aumento de eficiencia.	132
Figura 62. Penetración de los vehículos eléctricos impulsados por baterías bajo dicho esquema de mitigación.	134
Figura 63. Evolución del factor de emisión (F. E.) del sistema eléctrico mexicano.	136
Figura 64. Evolución del rendimiento y del factor de emisión para vehículos eléctricos en relación con la flota de convencionales más híbridos.	136
Figura 65. Cambio modal de los usuarios del Metrobús sobre Insurgentes en 2006 como porcentaje de los nuevos usuarios.	137
Figura 66. Penetración del consumo de biocombustibles (etanol y biodiésel).	140
Figura 67. Consumo de gasolina bajo el escenario base y bajo escenarios de mitigación.	140
Figura 68. Emisiones de GEI en la producción y distribución de etanol y gasolina en México.	142
Figura 69. Consumo de diésel bajo el escenario base y bajo escenarios de mitigación.	147
Figura 70. Producción mundial de biodiésel por región.	149
Figura 71. Consumo de energía bajo la línea base y para cada escenario de mitigación aplicado sucesivamente.	153
Figura 72. Emisiones de CO ₂ bajo la línea base y con la aplicación de los escenarios de mitigación.	155
Figura 73. Estructura por edad según procedencia legal de los vehículos en 2012.	157
Figura 74. Flota de vehículos ligeros para el escenario base y el de mitigación.	158

<i>Figura 75. Emisiones de CO₂ bajo la línea base y con la aplicación de los escenarios de mitigación.</i>	158
<i>Figura 76. Emisiones de CO₂ bajo la línea base y con la aplicación de escenarios de mitigación con E85.</i>	161
<i>Figura 77. Emisiones de CO₂ bajo la línea base, con los escenarios de mitigación y bajo una reducción del 70% en la TMCA de los vehículos ligeros (se exceptúan motocicletas).</i>	162
<i>Figura 78. Emisiones de CO₂ bajo la línea base y con escenarios de mitigación aplicados 10 años después.</i>	163
<i>Figura 79. Emisiones de CO₂ bajo la línea base y con escenarios de mitigación aplicados 20 años después.</i>	163

Abreviaturas utilizadas.

AIE: Agencia Internacional de Energía (*International Energy Agency*)

AMIA: Asociación Mexicana de la Industria Automotriz.

BNE: Balance Nacional de Energía.

BPEV: Vehículo eléctrico impulsado por baterías. (*Battery powered electric vehicle*)

BRT: Autobús de tránsito rápido. (*Bus Rapid Transit*)

CH₄: Metano.

CO: Monóxido de carbono.

CO₂: Dióxido de carbono.

EPA: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (*Environmental Protection Agency*)

EV: Vehículo eléctrico (*Electric vehicle*).

ETBE: Etil tert-butil éter.

GEI: Gases de efecto invernadero.

GLP: Gas licuado de petróleo.

Gtoe: Giga toneladas de petróleo equivalente.

HFCs: Hidrofluorocarbonos

ICCT: *International Council on Clean Transportation.*

INE: Instituto Nacional de Ecología.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas. (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)

Lge: Litros de gasolina equivalente.

MMbd: Millones de barriles diarios.

MTBE: Metil tert-butil éter.

Mtoe: Mega toneladas de petróleo equivalente.

NMVOC: Compuestos orgánicos volátiles distintos del Metano.

N₂O: Óxido Nitroso.

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

Pas-km: Pasajero-kilómetro.

PCM: Potencial de calentamiento mundial.

PHEV: Vehículo eléctrico híbrido enchufable. (*Plug-in hybrid electric vehicle*)

PIB: Producto Interno Bruto.

PFCs: Perfluorocarbonos

POISE: Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico.

SCT: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

SF₆: Hexafluoruro de azufre

SMA-GDF: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

TMCA: Tasa media de crecimiento anual.

TTW: Del tanque a la rueda. (*Tank to Wheel*)

VAB: Valor Agregado Bruto

Veh-km: Vehículo-kilómetro.

WTT: Del pozo al tanque. (*Well to tank*)

ZMVM: Zona Metropolitana del Valle de México.

1. Introducción.

Esta tesis presenta un panorama del consumo de energía y de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) atribuibles al autotransporte en México. A través de cálculos sustentados en información sobre la actividad del autotransporte de carga y de pasajeros en el país, se estiman las cifras históricas relativas al consumo de combustibles y a las emisiones de CO₂ para 1990-2010 así como las proyectadas para la línea tendencial o escenario base que va de 2010 a 2050. La metodología está sustentada en las recomendaciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2006) y un modelo propio para transporte con un enfoque primordialmente de abajo hacia arriba, aunque reforzado con el enfoque de arriba hacia abajo que permiten las cifras del Balance Nacional de Energía (BNE). Si bien existe software que puede realizar proyecciones sobre el consume energético, incluyendo sus relaciones con otros sectores de la economía, existe algunas desventajas, a saber, se tiene poco control sobre el proceso computacional actual, permiten pocas modificaciones y la información de entrada puede no coincidir con la información disponible, requiriéndose un considerable procesamiento previo de información antes de que el paquete pueda ser usado.

Se presentan, además del escenario base, escenarios de mitigación del consumo: el aumento en la eficiencia vehicular de los vehículos nuevos, la restricción al alto crecimiento de las camionetas de pasajeros, el impulso al uso del vehículo eléctrico, el cambio modal hacia sistemas de transporte masivo de tipo *Bus Rapid Transit* (BRT), el uso de biocombustibles, tales como el etanol y el biodiésel y la reducción de la tasa de crecimiento de los camiones ligeros.

En este contexto, pero también en la perspectiva de un futuro más libre de carbono es fundamental analizar las tendencias del consumo de energía en México, su impacto en las emisiones de CO₂, y proponer medidas de mitigación, en particular las del sector transporte. Para ello es indispensable conocer el consumo energético de cada modo de transporte con el fin de poder calcular las emisiones de CO₂ correspondientes a cada uno. Con ello, se estaría en condiciones de diseñar estrategias de mitigación correctamente dirigidas a los modos de transporte mayormente responsables del problema. Sin embargo,

el Balance Nacional de Energía (BNE) que publica cada año la Secretaría de Energía tan sólo presenta una desagregación del consumo de energía del sector transporte en autotransporte, aviación, marítimo y ferroviario. Se sabe que el autotransporte representa el 92% del consumo del sector, pero a pesar de su importancia, no existen datos oficiales que desagreguen este gasto energético entre los diversos sub-modos del autotransporte, a saber: transporte de carga o de pasajeros, transporte público o particular, transporte urbano o interurbano, etc.

Medir el uso de la energía de cada modo de transporte requiere un examen de sus características principales: las características de los vehículos, la intensidad con la que se les usa, las condiciones de manejo, e incluso los instrumentos políticos que los afectan, como los impuestos. Los cambios en estos parámetros producen cambios en cuanta energía usan. La estructura de cada modo de transporte, es decir, las características físicas y las de comportamiento (cómo viaja la gente y qué tanto) pueden expresarse mediante los indicadores de energía descritos anteriormente y algunos más.

La importancia del primer factor, el físico, representada mediante las características de los vehículos, puede apreciarse al saber que con cada año el peso promedio de los vehículos vendidos en varios países ha tenido un marcado incremento. Esto es importante debido a que un vehículo de mayor peso requerirá, en términos prácticos, de mayor potencia y mayor energía para moverse que uno de menores dimensiones y peso. Una excepción a esta regla sería el caso en que los adelantos tecnológicos lleven a los motores de los vehículos a un nivel mayor de eficiencia. De hecho esto es lo que ha ocurrido, los vehículos se han vuelto más eficientes energéticamente, sin embargo, esa eficiencia ha ido a parar a incrementos en tamaño y confort, absorbiéndose los posibles beneficios ambientales, por lo cual los nuevos vehículos no ofrecen mayores distancias recorridas por litro de combustible (menor intensidad de combustible o mayor rendimiento), sino mayor masa transportada, aunque este incremento sólo se trate de la carrocería y el equipamiento del vehículo.

Por otro lado, la intensidad de combustible varía entre los países no sólo debido a diferencias de peso y potencia de los vehículos, sino también a las condiciones de tráfico y hábitos de manejo, así como a las condiciones ambientales, temperatura y altitud. Todos

estos elementos crean una diferencia de entre 10 y 30 por ciento entre la intensidad de combustible de la flota en circulación y la intensidad de combustible obtenida en los ciclos de prueba. Además de lo anterior, suelen darse algunas otras particularidades, como la tendencia a que los vehículos nuevos recorran más distancia que los de mayor antigüedad por lo que la economía de combustible (que es la intensidad de combustible ponderada de acuerdo a las ventas de cada tipo de vehículo) es un indicador clave, aunque solamente marginal, pues es necesario conocer, entre otras cosas, el peso de los automóviles nuevos en el total de la flota. También podrá ocurrir que, aunque la intensidad de energía de los vehículos nuevos decaiga con respecto a los vehículos más antiguos, los factores de ocupación también disminuyan incluso en mayor proporción, resultando un incremento neto en la intensidad modal, sobretodo en el caso del transporte de pasajeros en automóvil.

Por su parte, el factor de carga (el número promedio de personas que viajan en un vehículo) variará de acuerdo al propósito del viaje y generalmente tendrá los valores más bajos para los viajes de trabajo. El factor de carga promedio ha decaído muchos países como resultado del incremento del número de vehículos, de más viajes de trabajo y de viviendas cada vez más pequeñas. Los viajes locales (entre 13 y 15 km en Europa y Estados Unidos) son los que predominan como motivo de uso de los automóviles, sin importar el tamaño del país o la densidad de población (IEA, 1998). Por lo tanto la frecuencia de viajes, y no su longitud, es lo que parece determinar el uso total de los automóviles y consecuentemente el uso de energía en transporte de personas. La proliferación de asentamientos de baja densidad favorecerá por tanto el uso del automóvil sobre otros modos. Por el contrario, los asentamientos más compactos no reducirán la distancia recorrida en los viajes, tanto como su frecuencia, pues al encontrar su destino más cercano (por ejemplo, su trabajo) el ciudadano encontrará atractivo probar otros modos de transporte (transporte público, bicicleta o caminar) ahorrando en gasolina y en estacionamiento, modificándose con ello la estructura modal del transporte de pasajeros (la proporción con que se utiliza cada modo).

Las preferencias de los consumidores y su situación financiera tienen también impacto profundo en la movilidad y en el uso de los automóviles. Los incrementos de los ingresos de las familias incrementan generalmente la propiedad de vehículos y por lo tanto aumentan los viajes (reduciéndose el factor de ocupación), existiendo además un

desplazamiento hacia vehículos más potentes y pesados a medida que el ingreso aumenta. Aún más, los conductores que se benefician con un carro de la compañía en la que trabajan, viajan más que aquellos que pagan por su propio combustible.

Los impuestos son otro factor que afecta tanto a la magnitud de posesión de vehículos como a sus características. En Europa, en los países con mayores impuestos los vehículos suelen ser de menor tamaño. Por otro lado, cuando es posible reducir impuestos debido a amortizaciones, se ha visto que se incentiva a la gente a comprar vehículos más pesados.

De esta manera, a actividad de los vehículos, la estructura modal y la intensidad de energía modal son componentes dependientes unos de otros. Una reducción en la intensidad de combustible para cierto modo de transporte reduce su costo, estimulando su uso (efecto llamado de retroalimentación o de rebote); un ejemplo es el de los conductores que se muestran dispuestos a pagar más por un carro a diésel a cambio de beneficiarse con menores costos de operación, viajando mayores distancias. De esta manera, son los tres indicadores en conjunto los que explican los cambios en el uso de la energía en el transporte de pasajeros.

Si bien en el transporte de carga los indicadores son análogos a los del transporte de pasajeros, la importancia de cada factor es distinta. Aquí, la mezcla modal tiene un impacto estratégico en el uso de la energía para transporte de bienes, debido a que el transporte mediante camiones tiene una intensidad 10 veces mayor que en barco o en ferrocarril. Pero, dado que los camiones ofrecen gran flexibilidad, cada vez tienen un mayor uso en el transporte de mercancías, especialmente cuando se prefiere la estrategia *Just in Time*. Sumado a ello, el cambio hacia vehículos más pequeños en las flota de camiones ha tendido a incrementar la intensidad modal.

El consumo de energía en el autotransporte de carga, por tanto, está relacionado con la intensidad de combustible, pero la estructura por tipo de camiones y las condiciones de uso y de tráfico tienen un papel mucho mayor en la eficiencia energética, sobre todo cuando el incremento en el uso de la energía por cambios hacia el camión (abandonando el barco o ferrocarril) ha sido mayor a cualquier reducción en la intensidad modal de estos últimos.

Consecuentemente, en el autotransporte de carga, son la mezcla modal, la forma de usar la capacidad de carga y el volumen transportado relativo al PIB, los elementos más importantes que deben considerarse en la elaboración de políticas de reducción de consumo de energía.

Con la finalidad de desagregar el consumo de energía del autotransporte, se desarrolla un modelo de “abajo hacia arriba”, sustentado en diferentes fuentes de información y estimaciones, que permiten evaluar el consumo de energía final y las emisiones de GEI del autotransporte en México de 1990 a 2050. Este análisis permite en primera instancia elaborar el inventario de emisiones de CO₂ para 1990-2010 desagregado en los diversos sub-modos de transporte; en segundo, ayuda a elaborar un pronóstico del crecimiento de energía y emisiones de CO₂ del autotransporte en México para 2010-2050 y con ello reconocer los sub-modos que más influirán en el gasto energético y en el aumento de las emisiones bajo análisis. En el presente estudio se examinan solamente las emisiones directas de CO₂, puesto que los otros GEI, para el caso del autotransporte, tienen una proporción menor al 4% del total. En el caso del óxido nitroso, este gas contribuye normalmente a alrededor del 3% de las emisiones de CO₂ equivalente procedentes del sector del transporte, con una incertidumbre que puede ser de más de $\pm 50\%$, relacionada con los factores de emisión. El metano contribuye en el transporte, por lo general con menos del 1% de las emisiones de CO₂ equivalente, con una incertidumbre de $\pm 40\%$ en la estimación del CH₄. Las fuentes más importantes de incertidumbre son en estos dos casos los factores de emisión (INECC-PNUD, 2012).

Los resultados muestran que bajo el escenario tendencial, el consumo energético del autotransporte en México pasó de 1,147PJ en 1990 a 2,069 PJ en 2010 y de seguir las tendencias, llegará a 9,748 PJ en 2050. Las emisiones de CO₂ asociadas al autotransporte aumentarán casi cuatro veces en 40 años, pasando de 146 millones de toneladas (o Tera gramos) en 2010 a 683 millones de toneladas de CO₂ en 2050. La causa principal de este crecimiento será la gran cantidad de vehículos que habrá en el país, pues los altos niveles de ventas no se verán compensados con un aumento de las mismas proporciones en el rendimiento de combustible de los vehículos ni con una disminución de las distancias recorridas.

En 2010, los automóviles, los camiones ligeros y las motocicletas fueron responsables del 60% de las emisiones del sector, en el escenario base éstas contribuirán con 76% en el año 2050. El sector que, en contraparte perderá mayor presencia en el escenario tendencial, será el transporte público de personas, que pasará del 10% al 3% de la participación para esas mismas fechas. Bajo esta tendencia, se estarán prefiriendo los modos de transporte con mayor intensidad modal, o en otras palabras, los que mayor energía demanda por pasajero o tonelada transportada. Al interior del sector de los automóviles de uso particular, la situación será análoga, el segmento con mayor intensidad de combustible, las camionetas, continuará siendo el de mayor crecimiento.

Bajo esta perspectiva y ante los problemas del abasto energético y del cambio climático se proponen algunos esquemas de mitigación, los cuales son evaluados en cuanto a su capacidad de reducción del consumo de energía y de las emisiones de CO₂. En relación con los niveles de 2010, el potencial de reducción conjunta para 2050 de los escenarios de mitigaciones de 77% en comparación con el escenario base. La mayor parte del beneficio (44%) puede provenir de un aumento del rendimiento de combustible en los vehículos a gasolina, seguido por la reducción de la tasa de crecimiento de camiones ligeros (13%), el aumento de rendimiento en vehículos a diésel (8%), y el uso del vehículo eléctrico (5%). Esquemas de mitigación como el BRT darán mayores beneficios en la medida en que se logre efectuar el cambio modal desde los automóviles particulares hacia los autobuses. Lo que es de destacar, es que se muestra que un solo esquema de mitigación resulta ya insuficiente y que, cuanto más tiempo se demore en la instrumentación de acciones de mitigación, los niveles de emisión que se alcancen serán más intensos, encontrando con ello mayores dificultades para su estabilización.

1.1. El consumo de energía y el cambio climático.

Los climatólogos han observado que las concentraciones de Dióxido de Carbono (CO₂) en la atmósfera se incrementaron significativamente durante el siglo pasado, en comparación con los niveles estables pre-industriales de 280 partes por millón en volumen (ppm). En 2012 se registraron 394 ppm de CO₂, 40% más altas que las correspondientes de mediados del siglo XIX, con un aumento promedio para los últimos diez años de 2 ppm/año. Los

niveles de metano (CH_4) y de óxido nítrico (N_2O) también se han incrementado significativamente (IEA, 2013).

De acuerdo con el último reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (*Fifth Assessment Report from the Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I*), el calentamiento del sistema climático es claro, como se evidencia a partir de los incrementos en las temperaturas medias mundiales del aire y del océano, el derretimiento generalizado del hielo y de la nieve, y la elevación del nivel medio del mar en el mundo. A escala continental, regional y de la cuenca oceánica, se han observado también numerosos cambios climáticos de largo plazo, entre los cuales se encuentran los cambios en la temperatura y del hielo ártico, en la cantidad de precipitación, en la salinidad de los océanos, en las pautas de los vientos, así como mayor presencia de condiciones climáticas extremas como sequías, fuertes lluvias, olas de calor y ciclones tropicales. Muchos de los impactos del incremento en las concentraciones de GEI pueden demorar en ser apreciables debido a la estabilidad inherente de los sistemas climáticos, ecológicos y socio-económicos, pero aún después de una eventual estabilización de las concentraciones de CO_2 , el calentamiento antropogénico podría continuar por siglos dadas las escalas de tiempo y las retroalimentaciones asociados a los procesos climáticos. Aún más, algunos cambios del sistema climático pudieran ser irreversibles durante el horizonte temporal de la vida humana.

Puesto que además de las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar, la variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera altera el equilibrio energético del sistema climático, con un grado de confianza muy alto puede decirse que la mayor parte del aumento observado de temperatura desde mediados del siglo XX se debe al aumento de las concentraciones de GEI antropogénicos. La observación de las emisiones de CO_2 en el transcurso del tiempo ha permitido aseverar que (IEA, 2013):

- Las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nítrico mundiales han aumentado, sensiblemente, como resultado de las actividades

humanas desde 1750, y en la actualidad han superado los valores preindustriales determinados en testigos de hielo milenarios.

- A partir de la Revolución Industrial, las emisiones del gas provenientes de quema de combustibles se incrementó dramáticamente desde un nivel cercano a cero hasta 31 GtCO₂ en 2011 (**Figura 1**) con un crecimiento anual de 2.7% (nivel que está en consonancia con los promedios anuales de crecimiento desde 2000).
- En 2011, la emisiones de los países no incluidos en el Anexo¹ continuaron creciendo rápidamente (5.8% anualmente), mientras que aquellas de los países del Anexo I disminuyeron 0.8%. En términos absolutos, las emisiones globales de CO₂ se incrementaron en 0.8 GtCO₂ in 2011, guiadas por el incremento de 0.7 GtCO₂ en las emisiones derivadas del uso de carbón en países no incluidos en el Anexo I.
- Dado este aumento de GEI antropogénicos en la atmósfera, principalmente de CO₂, se ha proyectado que para las próximas dos décadas podría tenerse un calentamiento mundial de cerca de 0.2°C por decenio y alcanzar un aumento global de temperatura desde 1°C hasta 6°C para una gama de escenarios de emisiones IEEEE². Incluso si las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero y de aerosoles se hubieran mantenido constantes en los niveles del año 2000, podría esperarse un calentamiento de 0.1°C aproximadamente por decenio, debido a la permanencia de GEI en la atmósfera.

¹ La Partes del Anexo I según la Convención Marco sobre el Cambio Climático (UNFCCC) son: Australia, Austria, Bielorrusia, Bélgica, Bulgaria, Canadá, Croacia, República Checa, Dinamarca, Estonia, Comunidad Económica Europea, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Islandia, Irlanda, Italia, Japón, Letonia, Liechtenstein, Lituania, Luxemburgo, Malta, Mónaco, Holanda, Nueva Zelanda, Noruega, Polonia, Portugal, Rumania, Rusia, República Eslovaca, Eslovenia, España, Suecia, Suiza, Turquía, Ucrania, Reino Unido y Estados Unidos. La Partes del Anexo II consisten en los miembros de la OCDE miembros del Anexo I que no son economías en transición. A estas Partes se les requiere que provean de recursos financieros que habiliten a las naciones en desarrollo para emprender acciones de reducciones de emisiones y para ayudarlas a adaptarse a los efectos adversos del cambio climático. Adicionalmente, deben promover la transferencia de las tecnologías ambientalmente amigables a las economías en transición y a los países en desarrollo (UNFCCC, 2014)

² Los escenarios de emisiones IEEEE están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 y B2) que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas causantes demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de GEI resultantes. La decisión sobre cuál de los diversos escenarios descritos parece más probable se deja abierta, puesto que el IPCC no asume el riesgo de asignar probabilidades a cada uno de ellos.



Figura 1. Emisiones mundiales de CO₂ debidas a la quema de combustibles fósiles.
Fuente: (IEA, 2013)

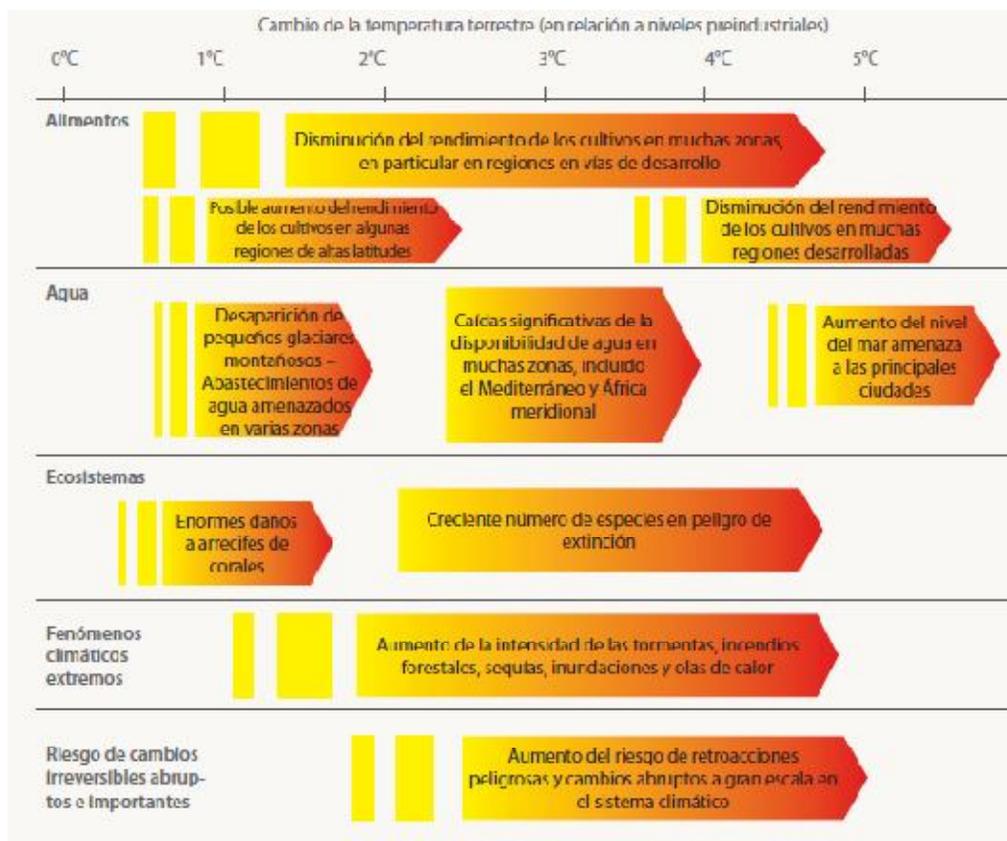


Figura 2. Efectos proyectados del cambio climático.

Fuente: (PNUD, 2009)

Si bien este incremento de temperatura puede parecer pequeño a primera vista, debe tenerse en cuenta que los posibles efectos perjudiciales de un aumento de temperatura se sitúan a partir de un aumento de tan sólo 0.5°C por encima de los niveles preindustriales (Figura 2) y que de continuar las tendencias de los últimos tres decenios, deberemos estar preparados para un cambio en la temperatura promedio mundial de 4°C (IPCC, 2007).

De entre la gran diversidad de actividades humanas que generan GEI, el uso de la energía es la principal fuente de emisiones (83% de las emisiones de los países del Anexo I en 2011, sin considerar el uso de suelo, cambios en el uso de suelo ni silvicultura). Porciones menores de GEI, principalmente CH₄ y N₂O, corresponden a la agricultura (8%) y a los procesos industriales no relacionados con la energía (6%). (IEA, 2013). Dentro del sector energético, el CO₂ proveniente de la quema de combustibles es la principal fuente de GEI (93%), representando de esta manera cerca de tres cuartas partes de las emisiones antropogénicas de GEI de los países del Anexo I.

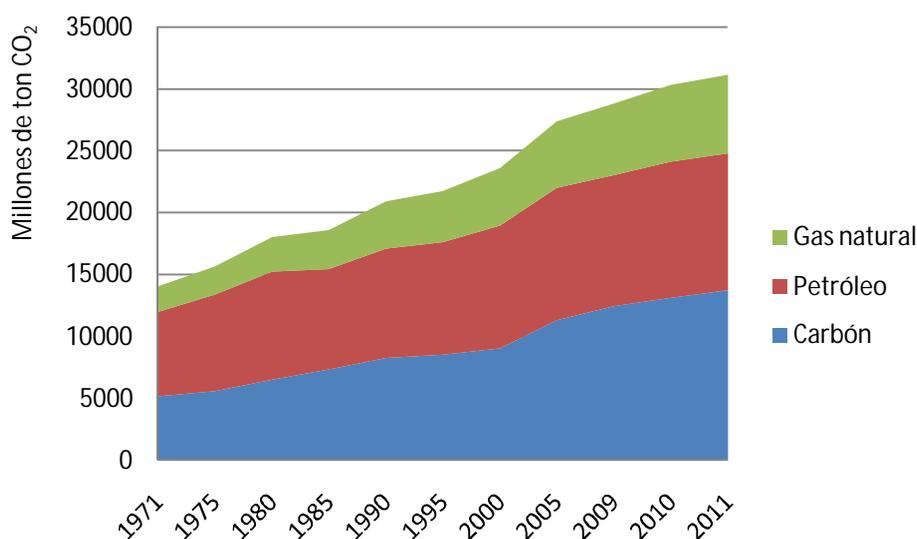


Figura 3. Emisiones mundiales de CO₂ por quema combustibles.
Nota: No se incluyen las emisiones de los búnkeres internacionales, las cuales, en números redondos, contribuyen con el 2% de las emisiones.
Fuente: Elaboración propia con datos de (IEA, 2013)

El consumo global de energía primaria, principalmente basado en combustibles fósiles (82% en 2011³), aumentó a más del doble entre 1971 y 2011, pasando de 6 Giga toneladas de petróleo equivalente (Gtoe) a 13Gtoe, en números redondos. Este aumento en la demanda de energía tiene su origen principal en el crecimiento económico mundial, generando una tendencia ascendente en las emisiones de CO₂ (Figura 3).

Dado el gran tiempo de vida del CO₂ en la atmósfera, estabilizar las concentraciones de los GEI a cualquier nivel requerirá de importantes reducciones de las emisiones globales de CO₂ con respecto de los niveles actuales. Cuanto más bajo sea el nivel de estabilización deseado, más pronto deberá comenzar la reducción de las emisiones de CO₂, o la intensidad de ésta (Tabla 1). En este sentido, la Conferencia de las Partes (COP) ha reconocido que las Partes deberían tomar acciones urgentes para cumplir con el objetivo de restringir el aumento de la temperatura promedio mundial a sólo 2°C por arriba de los niveles preindustriales. Sin embargo, las proyecciones de la IEA, aún para su escenario de nuevas políticas, indican que las emisiones globales de CO₂ ocasionadas por el uso de energía seguirán creciendo, si bien a un paso menor, alcanzando 37.2 GtCO₂ en 2035, lo cual, si bien representa una mejora sobre el escenario de las políticas actuales, lleva a un incremento en la temperatura de 3.6°C, bastante más alto que la meta de 2°C acordada por las Partes de la Convención Marco de Cambio Climático de Naciones Unidas (UNFCCC) (IEA, 2013).

Tabla 1. Relación entre las concentraciones de CO₂ y el cambio global de temperatura.

Incremento de temperatura	Todos los GEI (ppm CO ₂ e)	CO ₂ (ppm)	Emisiones de CO ₂ en 2050 (% de las emisiones de 2000)
2.0-2.4	445-490	350-400	-85 to -50
2.4-2.8	490-535	400-440	-60 to -30
2.8-3.2	535-590	440-485	-30 to +5
3.2-4.0	590-710	485-570	+10 to +60
4.0-4.9	710-885	570-660	+25 to +85
4.9-6.1	885-1,130	660-790	+90 to +140

Fuente: (IEA, 2010)

³ A pesar del crecimiento de la energía de origen distinto al fósil, esta proporción prácticamente no ha cambiado en los últimos 40 años.

Los países no incluidos en el Anexo I representaron en 2011 el 54% de las emisiones globales de CO₂. Cerca de dos terceras partes de las emisiones globales de ese año fueron originadas por sólo diez países, con China que genera una cuota de 25.4% y los Estados Unidos el 16.9%, conjuntamente, estas dos naciones produjeron 13.2 GtCO₂. De las diez naciones que más emiten, cinco pertenecen al Anexo I y cinco no pertenecen a él (**Figura 4**). Con respecto al cambio anual, China también ocupó el primer lugar como la región que tuvo el mayor incremento en consumo de energía en 2010-2011, mientras que los países europeos del Anexo II y Norte América redujeron sus emisiones (**Figura 5**), sin embargo, las emisiones por habitante de la sección de Norte América del Anexo II siguen siendo las mayores del planeta.

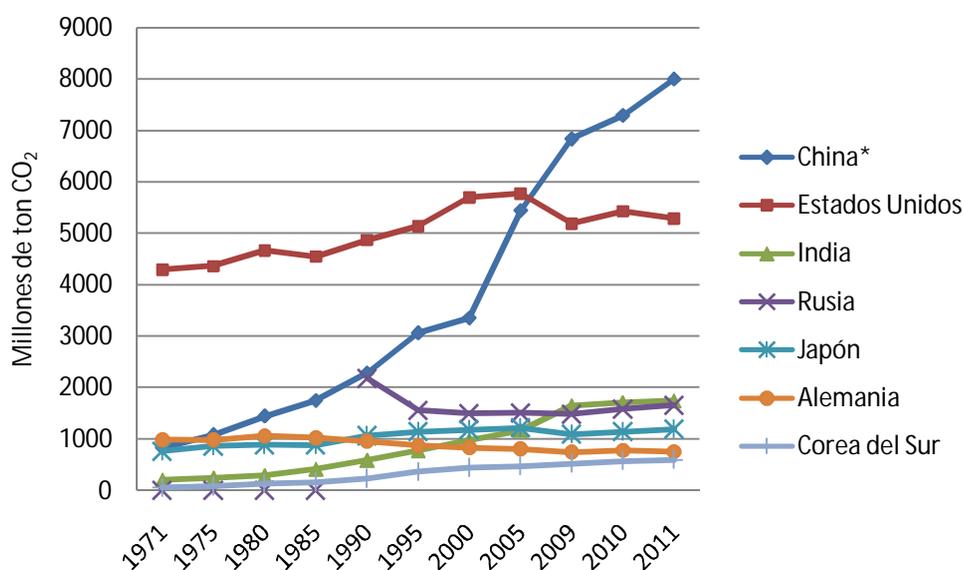


Figura 4. Principales países emisores de CO₂ en 2011.
Fuente: Elaboración propia con datos de (IEA, 2013)

En particular, México ha representado desde 1990 alrededor del 1.4% de las emisiones mundiales del CO₂ proveniente de la quema de combustibles⁴. El aumento mostrado ha sido de 56.3% entre 1990 y 2011 y es parte de los países que no tienen compromisos de reducción de emisiones dentro del protocolo de Kioto. Sin embargo, en el nuevo marco de un acuerdo post-Kioto de la Convención Marco de Cambio Climático de Naciones Unidas,

⁴ Cálculos propios con datos de (IEA, 2013)

existen presiones para que países como China e India y en América Latina, México y Brasil, adquieran algún tipo de compromiso de reducción de emisiones de GEI.

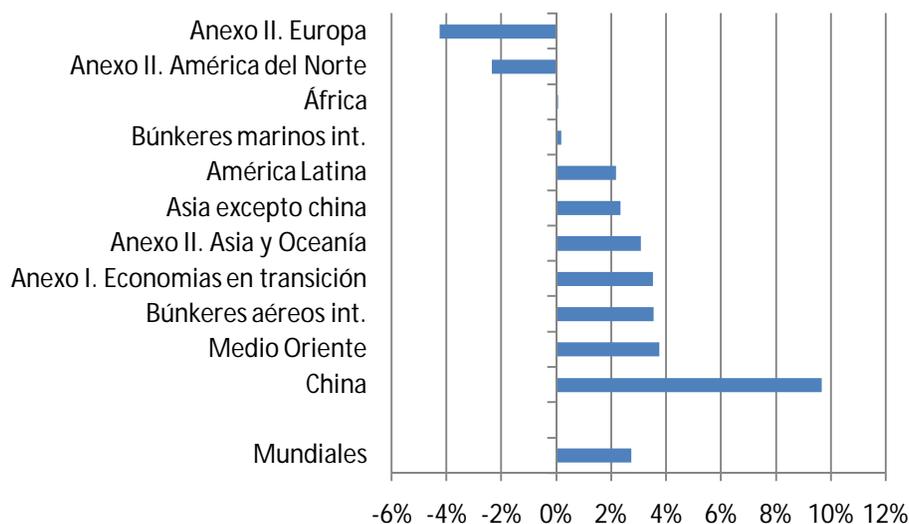


Figura 5. Cambio en las emisiones de CO₂ en 2010-2011 por región.
Fuente: Elaboración propia con datos de (IEA, 2013)

1.2. Importancia del transporte en el consumo energético y en las emisiones de GEI.

En 2011, la electricidad y generación de calor y el transporte fueron los dos sectores que produjeron cerca de dos tercios de de las emisiones globales⁵ de CO₂ (Figura 6), el primero representó el 42%, mientras que el segundo 22% (IEA 2013). El sector que ocupa el tercer sitio es el industrial, representando el 21%. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA 2011), en el año 2010, las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero atribuibles al sector transporte son las de mayor crecimiento entre todos los

⁵ Aquí se hace referencia a las emisiones relacionadas con el uso de la energía. De las emisiones antropogénicas totales de GEI, las del transporte representaron en 2004 el 13% y se ubicaron en el cuarto lugar en importancia, después de la generación eléctrica (26%), industria (19%), silvicultura (17%) y solo medio punto porcentual debajo de la agricultura. Sin embargo, el transporte mostró el segundo mayor crecimiento en las emisiones mundiales de GEI entre 1970 y 2004 (120% de incremento en emisiones directas), después del sector de suministro energético (incremento de 145%) y por arriba de la industria (65%) y de los cambios de usos del suelo y silvicultura (40%) (IPCC, 2007b).

sectores con un 3% para 2009-2010 y se proyecta que su proporción en el consumo global de energía sea del 40% para 2035.

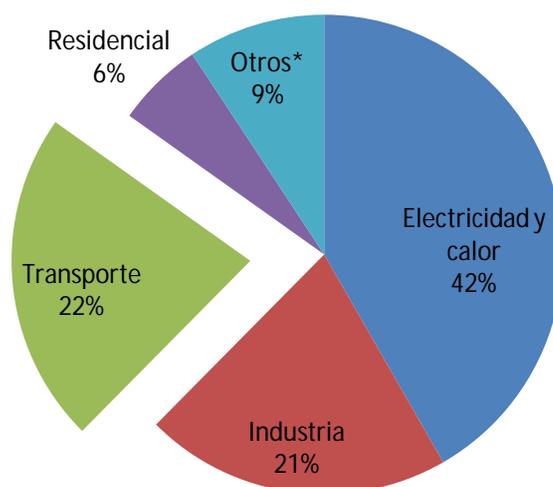


Figura 6. Emisiones de CO₂ por sector en 2011.

*En Otros se incluye servicios comerciales y públicos, agricultura y silvicultura, pesca y otras industrias de la energía distintas a la electricidad y el calor.

Fuente: (IEA, 2013)

El sector del transporte permanece dependiente del petróleo - 93% de la energía usada en el sector proviene de ese combustible (IEA, 2012) - debido a su alta densidad de energía y al hecho de que su costo sigue siendo muy competitivo cuando se le compara con la mayoría de los combustibles alternativos. Por ello es poco probable que la demanda de transporte se reduzca en un futuro previsible.

El rápido crecimiento en las emisiones del transporte han sido conducidas principalmente por el autotransporte (*Road sector*) y en especial por los vehículos ligeros (**Figura 7**), los cuales se han incrementado en 52% desde 1990 y representaron en 2011 tres cuartas partes de las emisiones del transporte (IEA, 2012). A pesar de los esfuerzos por limitar las emisiones del transporte, las emisiones de algunos de los transportes con mayor intensidad modal (vehículos ligeros, camiones y aviación) siguen creciendo con las mayores tasas.

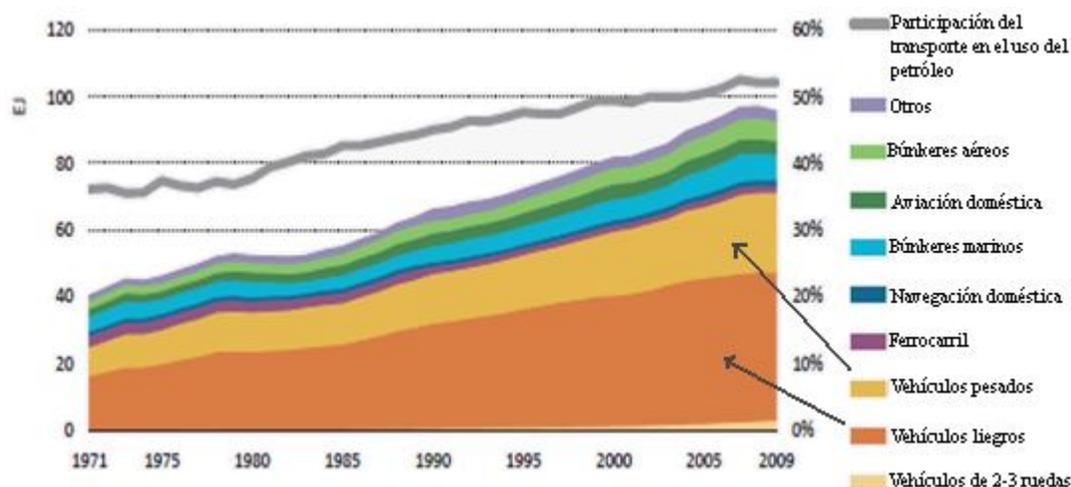


Figura 7. Uso mundial de la energía en el transporte por modo en 2011
 Fuente: (IEA, 2012)

A nivel regional, la energía para el transporte crece a mayor velocidad en las regiones NO-OCDE que en las OCDE, pero aún en Norte América y Europa se usa más energía que en cualquier otra región. Con base en los índices per cápita, la historia es la misma, Norte América y Australia tienen el mayor uso de petróleo per cápita para el transporte (1200-1500 toe/ 1000 cápita). India y China, por el contrario, aún están en el rango de 50-150 toe/1000 cápita (IEA, 2012). En relación con los viajes de pasajeros per cápita, Estados Unidos es también quien presenta el mayor nivel (más de 25,000 km por persona por año). Hasta hace poco los bajos precios del combustible habían contribuido al uso de vehículos de mayores dimensiones, mientras que en Europa los altos precios de los combustibles impulsaron la mejora de los rendimientos de combustible en los vehículos. Como resultado, existe una variación de más del 50% en el consumo promedio de combustibles en automóviles nuevos entre los miembros de la OECD (IEA, 2012).

La gasolina es aún el tipo de combustible predominante y representa casi la mitad de la energía usada en Norte América, aunque sólo un cuarto en Europa, donde el diésel tiene el 50% del uso en el transporte. El diésel pesado (*Heavy fuel oil*) ocupa el tercer sitio en las regiones no-OECD, pero en las regiones OECD el combustible para aviación está justo debajo de la gasolina y el diésel, debido al incremento en pasajeros viajando por aire (IEA, 2012).

En cuanto a la estructura modal, dentro de la OECD (con excepción de Corea del Sur), el promedio viajes (pasajeros-km/año) en automóvil representa entre 60% y 80% de los viajes motorizados. En Norte América los camiones ligeros y las camionetas (*Sport Utility Vehicles* o Vehículos de Usos Múltiples) tienen una gran presencia, mientras que en Europa tienen una participación menor. En las regiones No- OECD los demás modos motorizados en que viajan las personas tienen una mayor participación, sin embargo, los viajes en vehículos ligeros (automóviles, camionetas y camiones ligeros) han alcanzado un tercio en promedio (Figura 8). Como resultado de este acelerado aumento de de vehículos privados para el traslado de personas, los viajes de pasajeros han crecido rápidamente en el mundo en las últimas décadas y continúa creciendo rápidamente fuera de la OECD. Aún a pesar de los puntos de saturación alcanzados en algunos de los países de la OCDE (Figura 9), en donde, después de algunos años de continuo crecimiento, los viajes en vehículos se han estabilizado o incluso están declinando⁶, pasara bastante tiempo antes de que las economías emergentes alcancen tales situaciones (si es el caso de que estos límites existan).

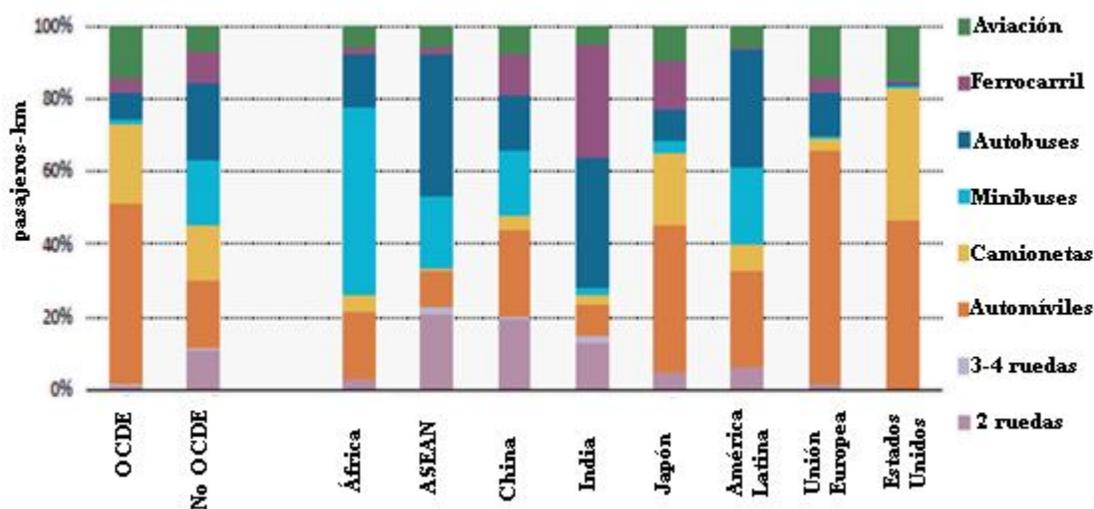


Figura 8. Estructura de los viajes motorizados de pasajeros por modo en 2009
 ASEAN: Asociación de Naciones del Sureste Asiático.

Fuente: (IEA, 2012)

⁶ Los puntos de saturación varían entre países: en Japón se alcanzó la cifra de 9,000 km por vehículo por año, punto mucho menor al de Europa (14,000 km/año), que a su vez es inferior al de estados Unidos (19,000 km/año)

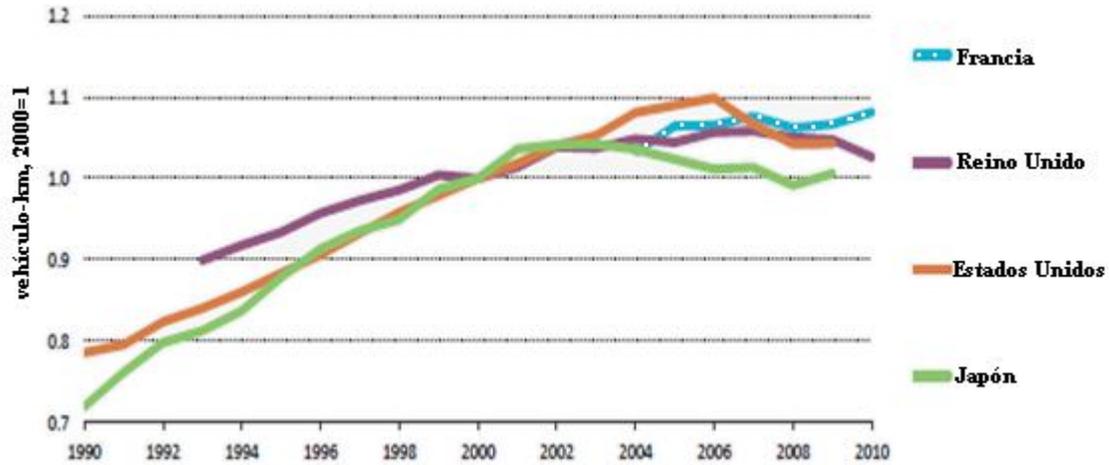


Figura 9. Viajes de pasajeros en vehículos ligeros para algunos países de la OCDE.
Fuente: (IEA, 2012)

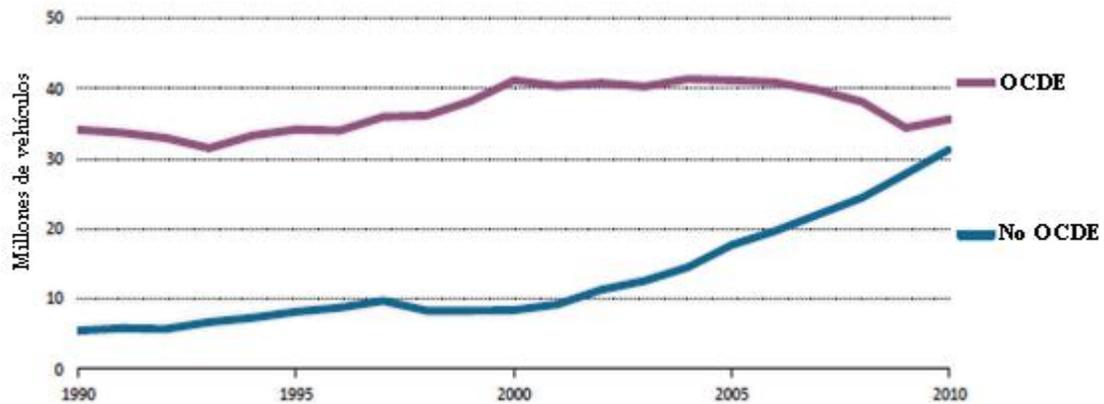


Figura 10. Ventas mundiales de vehículos ligeros para pasajeros
Fuente: (IEA, 2012)

En la última década 2000-2010, en las naciones en desarrollo la venta de vehículos ligeros (uno de los medios más intensivos en energía para el transporte de personas y bienes) emergió mientras que en los países OECD se mostró una saturación del mercado. Con ello, las regiones No-OECD han estado ganando mayor presencia en el mercado, y de seguir esa tendencia, pronto (alrededor de 2015) sobrepasarán a las ventas de vehículos en las OECD (Figura 10). En China, por ejemplo, las ventas de vehículos ligeros para pasajeros crecieron más de veinte veces en el periodo (de medio millón a 12 millones de vehículos)

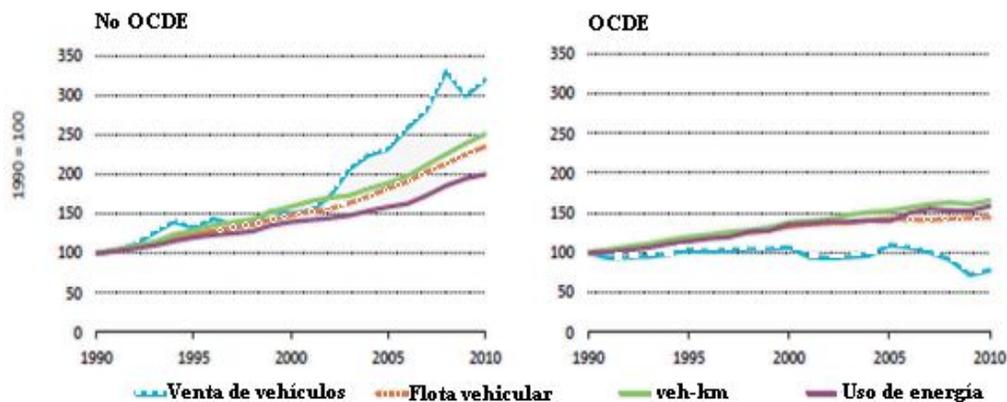


Figura 11. Evolución de autotransporte de carga
Fuente: (IEA, 2012)

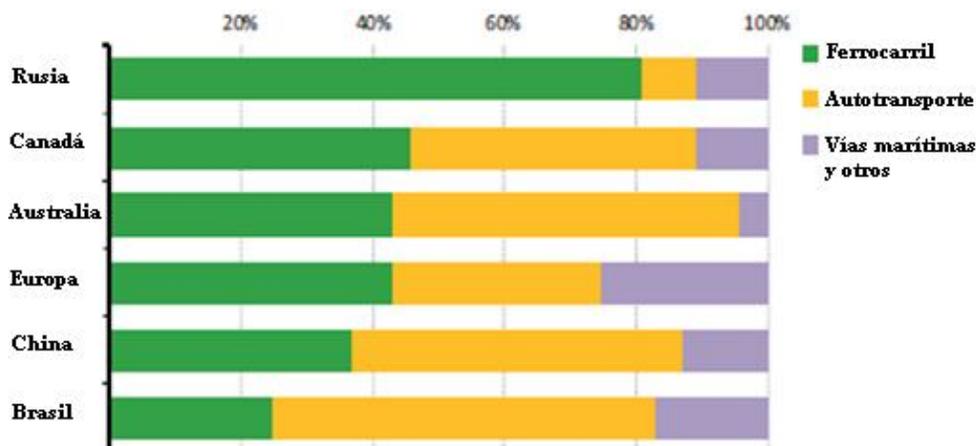


Figura 12. Estructura modal del transporte de carga hacia el interior de algunos países (comercio doméstico).
Fuente: (IEA, 2013c)

El transporte de mercancías está ligado al crecimiento económico y a la demanda de bienes y durante 2000-2010 tanto el transporte en camiones como en ferrocarril⁷ tuvieron incrementos continuos en ton-km transportados. La actividad del autotransporte de carga y la energía utilizada por ella prácticamente se ha duplicado durante las dos últimas décadas, con diferentes tasas de crecimiento dentro y fuera de la OECD (Figura 11). Aún cuando las ventas de vehículos han estado muy ligadas a las recientes fluctuaciones de la economía, tanto la flota como los viajes (vehículo-km) y el uso de la energía han crecido

⁷ El ferrocarril es aún el modo dominante de transporte de bienes en cuanto al peso de las mercancías (53% de las ton-km por tierra en 2011) (IEA, 2012)

constantemente. Dado que, en términos absolutos, la actividad del autotransporte de carga fuera de la OCDE no alcanza los mismos niveles que dentro de ella, en las regiones No-OCDE se muestra todavía un mayor dinamismo que podría durar bastante tiempo antes de disminuir tal como ocurre ahora en la OCDE desde 2000.

2. Antecedentes.

2.1. Proyecciones del consumo de energía mundial en el transporte y sus emisiones.

El consumo energético mundial (incluido el del transporte), así como de sus emisiones de GEI depende de las políticas efectivamente implementadas para regularlo. La Agencia Internacional de Energía (AIE) ha desarrollado varios escenarios que ilustran el futuro del consumo energético y de las emisiones de CO₂ dependiendo de un conjunto específico de políticas aplicadas. En el *World Energy Outlook* (IEA, 2013c) se diseñan tres escenarios⁸: El Escenario de Nuevas Políticas (escenario base) analiza la evolución de los mercados de energía basado en la continuidad de las medidas existentes así como en la implementación de políticas que han sido anunciadas por los gobiernos pero que aún no se ponen en práctica. El Escenario de Políticas Actuales toma en cuenta sólo las políticas aplicadas desde mediados de 2013. El Escenario 450 ppm muestra aquello que es necesario para establecer los sistemas energéticos en camino de tener 50% de posibilidades de mantener a largo plazo un incremento en la temperatura promedio global de 2°C. Este escenario lleva a un pico en las concentraciones de GEI en la atmósfera alrededor de la mitad del presente siglo en un nivel mayor a los 450 ppm, pero en un nivel no muy alto como para imposibilitar que el objetivo de 2°C sea inalcanzable. Estos escenarios son compatibles con los descritos en (IEA, 2012): el 6DS, que induce un incremento global de temperatura a largo plazo de 6 °C y que puede equipararse al escenario de Políticas Actuales; el 4DS, que establece un cambio de 4°C como media mundial; y el 2DS, equiparable al escenario 450 ppm y que establece en 80% la probabilidad de tener un incremento global de temperatura de 2°C.

⁸ Estos escenarios consideran un crecimiento del PIB mundial de 3.6% por año hasta 2035 (teniendo a Asia en desarrollo, como la mitad del incremento en la actividad económica) y los factores demográficos continuarán guiando los cambios en la matriz energética. La población mundial cambiará de 7 a 8.7 miles de millones en 2035, impulsado por el cambio en África e India, dado que la población china cambia poco y en 2025 India se convierte en el país más poblado del mundo. La mayoría de los países de la OECD (a excepción de Estados Unidos) muestran pocos cambios en este sentido. Los precios de energía alcanzan, en las proyecciones, 128 dólares por barril en 2035 y 113 dólares en 2020. Se considera que las tecnologías energéticas más limpias consiguen reducciones en costo pero dependen aún del apoyo de políticas dedicadas y subsidios (IEA, 2013c)

Uno de los principales resultados de los escenarios base consiste en que la brecha existente entre las emisiones globales de GEI y la trayectoria de un cambio climático de 2°C continúa creciendo. Para 2035, las emisiones globales de CO₂ relacionadas con la energía se incrementarán a 43 Giga toneladas (Gt) en el escenario de Políticas Actuales, a 37.2Gt en el de Nuevas Políticas y se reducirá a 21.6Gt en el escenario 450 ppm (la mitad que en el de Políticas Actuales) (Figura 13). Sin embargo, bajo el escenario de Nuevas Políticas, el ahorro acumulado de 30% en las emisiones es aún consistente con el objetivo de un aumento global de temperatura de 2°C. Para dicho escenario deberá impulsarse otras fuentes energéticas para el transporte, tales como los biocombustibles.

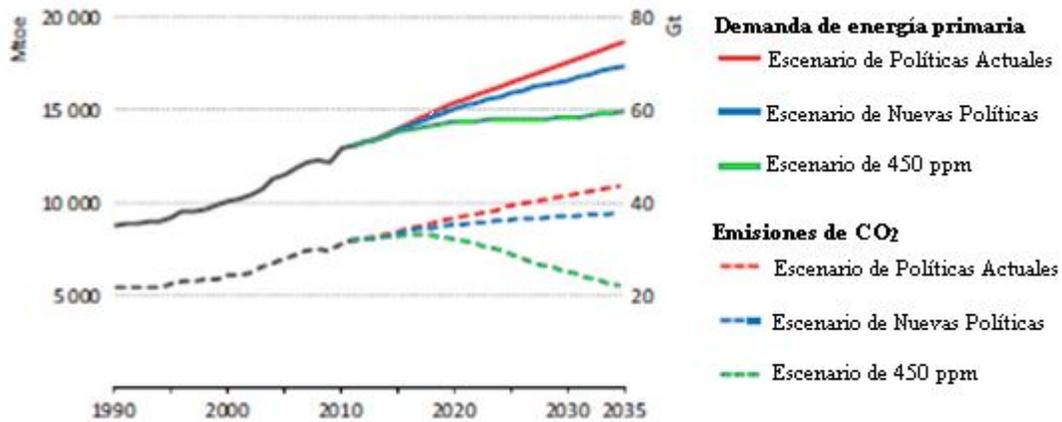


Figura 13. Evolución del consumo energético y de las emisiones de CO₂ para los escenarios de la AIE. Fuente: (IEA, 2013c)

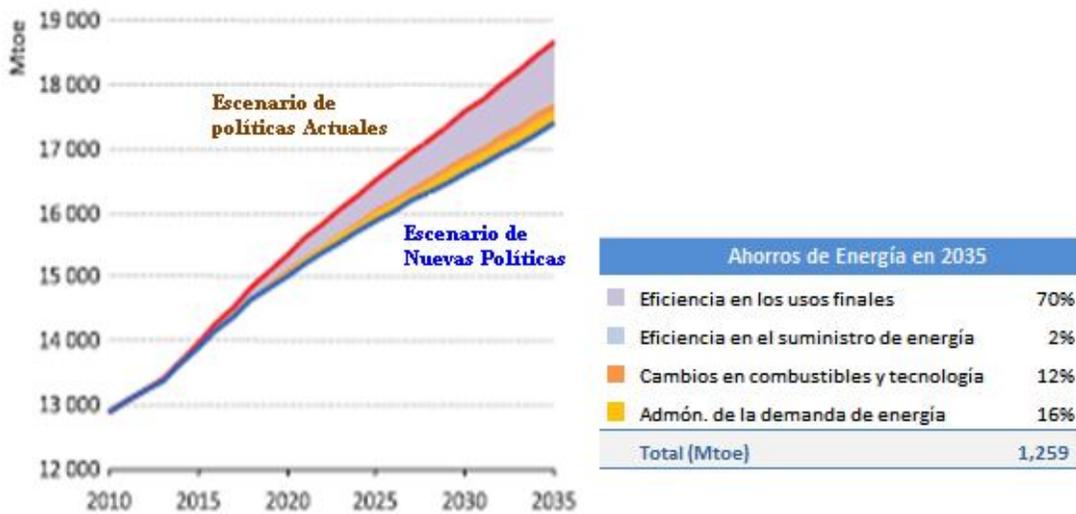


Figura 14. Ahorros de energía para el escenario de Nuevas Políticas de la AIE por área Fuente: (IEA, 2013c)

En 2011 los combustibles fósiles representaron el 82% de la demanda de energía primaria, pero la proporción declina para 2035 bajo todos los escenarios: a 80% en el escenario de Políticas Actuales, a 76% en el escenario de Nuevas Políticas y a 64% en el escenario 450 ppm, pero aún en este, que induce un aumento global de 2°C, la transición hacia combustibles no-fósiles tomará un tiempo considerable.

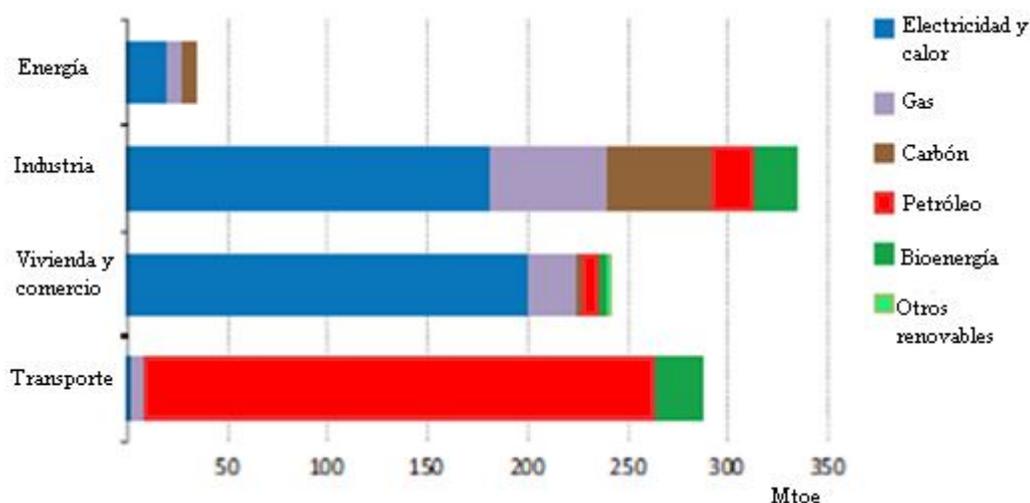


Figura 15. Ahorros de energía para el escenario de Nuevas Políticas de la AIE por sector
Fuente: (IEA, 2013c)

Según la AIE, la eficiencia energética de los usos finales es el ámbito que en general ofrece las mayores posibilidades de reducción del consumo de energía (**Figura 14**) y en cuanto al ahorro de energía por sector, el autotransporte ofrece casi un tercio del potencial, principalmente en el petróleo (**Figura 15**). Las tendencias están fuertemente marcadas por el consumo de combustibles, especialmente por el del petróleo, del cual, el consumo para transporte es el 62.3% (IEA, 2013b). En este sentido será necesario reducir la combustión de petróleo (sea que se considere el escenario de Nuevas Políticas o el de 450 ppm) lo cual implica reducir su uso en el transporte, haciendo la transición hacia los biocombustibles o hacia formas de energía con menores emisiones de carbono como el gas natural (relativamente abundante y flexible como combustible) o hacia los vehículos eléctricos, y en general, el éxito de la mitigación de GEI dependerá en general de desacoplar el uso de la energía de la actividad económica, mediante la reducción global de la intensidad energética (**Figura 16**).

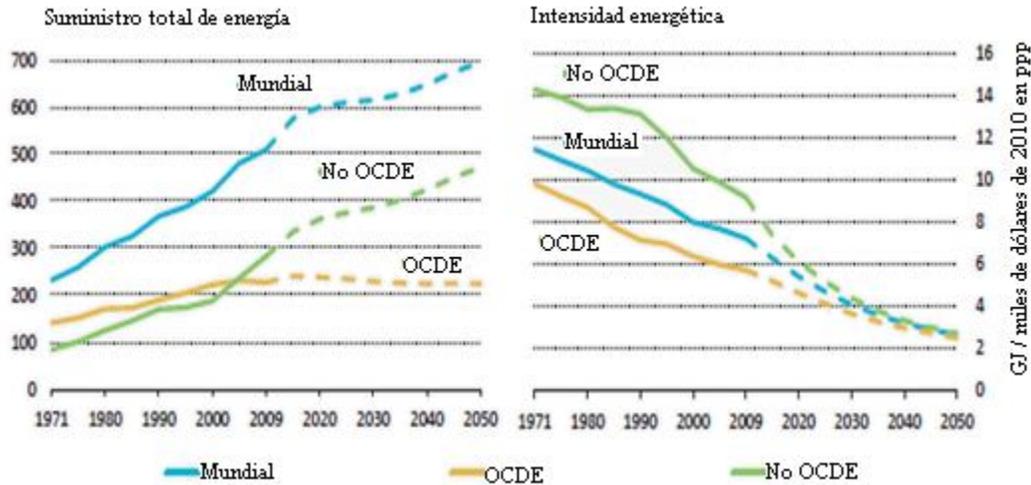


Figura 16. Consumo total de energía e intensidad energética consistentes con un aumento global de temperatura de 2°C.
Fuente: (IEA, 2012)

En el escenario 2DS, las emisiones de la generación de electricidad son casi eliminadas para 2050, mientras que las correspondientes a la industria y al transporte aún seguirían siendo significantes (**Figura 17**). Esto refleja las dificultades inherentes a la mitigación en el sector transportes (y también en el industrial), el cual no se espera que pueda ser totalmente des-carbonizado para 2050, requiriéndose de estrategias de mitigación adicionales a las de eficiencia del usuario final, sobre todo cuando en varias regiones (Asia del Sur, Latinoamérica, Medio Oriente y China) las mejoras en eficiencia serían parcialmente opacadas por el efecto rebote: un incremento en la demanda de viajes como resultado de un menor costo de combustible.

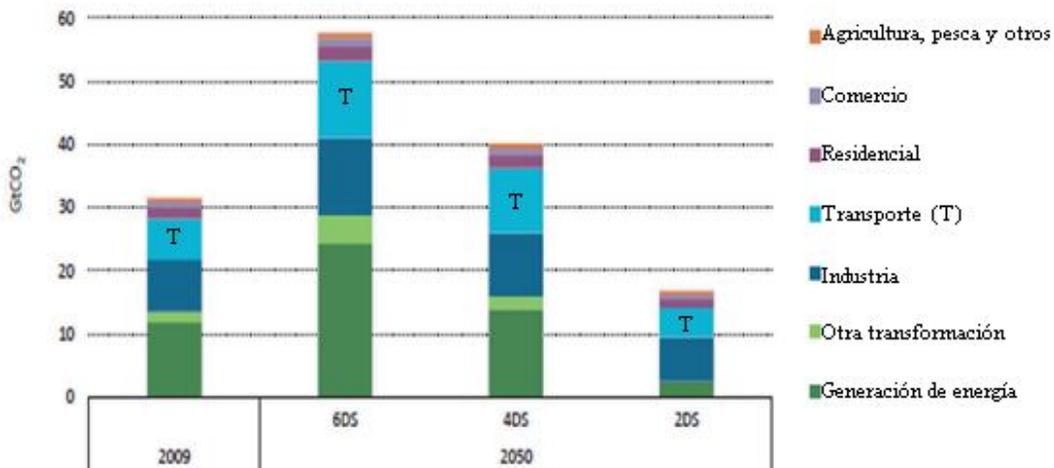


Figura 17. Emisiones de CO₂ por sector para distintos escenarios de la AIE
Fuente: (IEA, 2013c)

Casi el 30% del consumo final de energía global se realiza en el transporte. En el escenario de Nuevas Políticas el consumo de energía del sector se incrementa 1.3% anualmente (alcanzando 3300 Mtoe en 2035), en comparación con el 2.1% anual de los últimos veinte años, reflejando las tendencias hacia la baja en el autotransporte y el mayor uso del ferrocarril y la aviación. Aún así, las emisiones de CO₂ del sector se incrementarían de 7GtonCO₂ en 2011 a 9 GtonCO₂ en 2035, siendo el transporte el de mayor crecimiento de todos los usos finales. De cumplirse unas normas de eficiencia vehicular más estrictas, la demanda de energía en el transporte se reduciría 280 Mtoe en 2035. Los ahorros por eficiencia en el transporte están principalmente guiados por las normas de eficiencia vehicular, que contribuirían con el 12% del total de los ahorros de CO₂ en 2035. Los mayores impactos de tales métodos se esperan en China (Figura 18), seguidos de Estados Unidos y la Comunidad Europea.

En el autotransporte, algunas tendencias se han observado en los últimos años (2005-2012) (Figura 19): en Japón y en la Unión Europea, los altos precios del combustible, las normas para el rendimiento del combustible en los vehículos y la baja actividad de la economía impulsó a los individuos a comprar vehículos más pequeños con menor intensidad de energía, mientras en otras regiones, como la India, la intensidad de energía de los combustibles permaneció prácticamente constante.

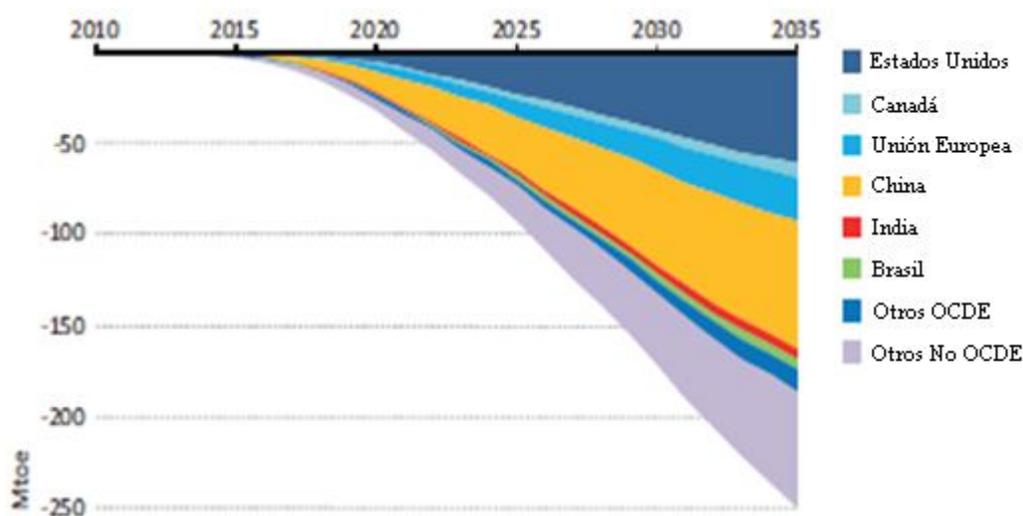


Figura 18. Ahorros de combustible por eficiencia energética en el autotransporte en el escenario de Nuevas Políticas de la AIE
Fuente: (IEA, 2013c)

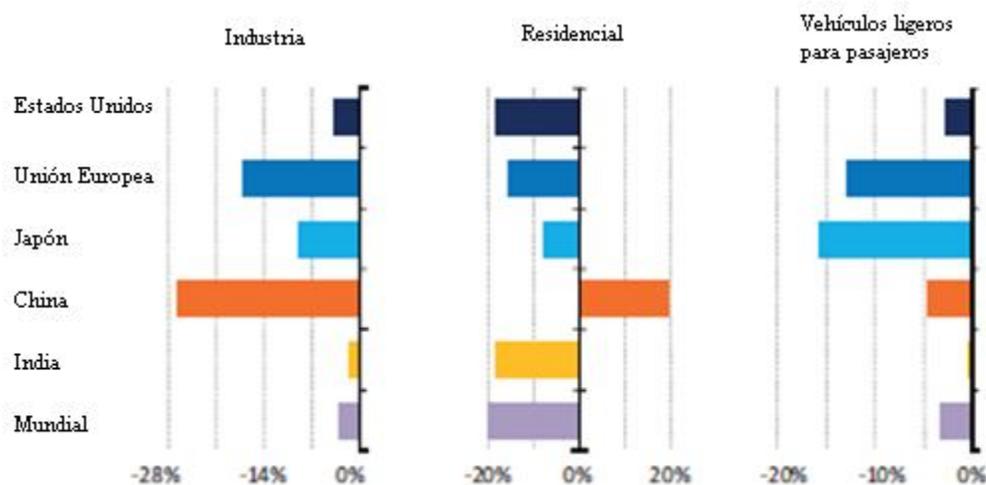


Figura 19. Cambio en la intensidad energética por sector y región para 2005-2012
Fuente: (IEA, 2013c)

Para los sub-sectores del transporte, los mayores ahorros que se pueden obtener con las políticas actuales y las que están en puerta, se encuentran en el autotransporte de carga (Figura 20), pero también hay importantes potenciales en los vehículos ligeros para pasajeros (PLDV) y en los búnkeres internacionales. La demanda de petróleo para los PLDV está determinada no sólo por la subyacente demanda de movilidad personal (implicando el número de vehículos y la distancia promedio recorrida) sino también por la tecnología vehicular y su eficiencia, así como la selección del combustible. Se proyecta que la flota mundial de PLDV se expanda desde 900 millones de unidades en 2012 hasta 1,700 millones en 2035; gran parte del crecimiento provendrá de países que no son miembros de la OECD (Figura 21), tendencia que también es reflejada en la evolución del consumo de petróleo. El estancamiento de las ventas en los países pertenecientes a la OECD refleja la saturación del mercado, el reforzamiento de las normas de eficiencia vehicular y la sustitución de combustibles. Dada la creciente participación de los biocombustibles, el gas natural, y la electricidad como energéticos para los vehículos, se proyecta que en 2035 bajo las políticas actuales y las anunciadas, los vehículos PLDV consumirán en promedio 30% menos energía que los actuales. Sin embargo, dichas mejoras serán ampliamente superadas por el rápido crecimiento de las flotas vehiculares de diversas regiones.

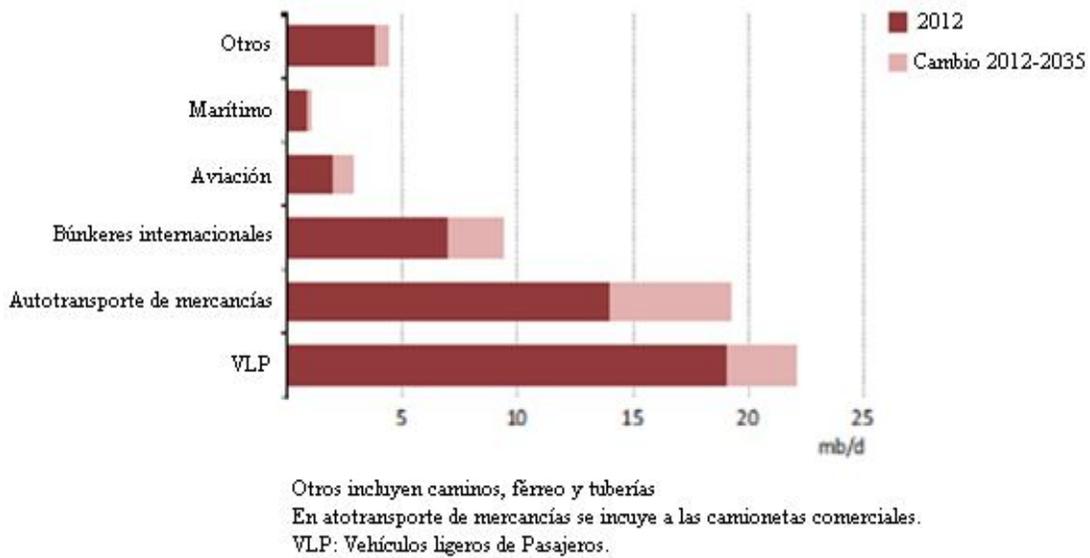


Figura 20. Demanda de petróleo para el transporte por subsector en el escenario de Nuevas Políticas
 Fuente: (IEA, 2013c)

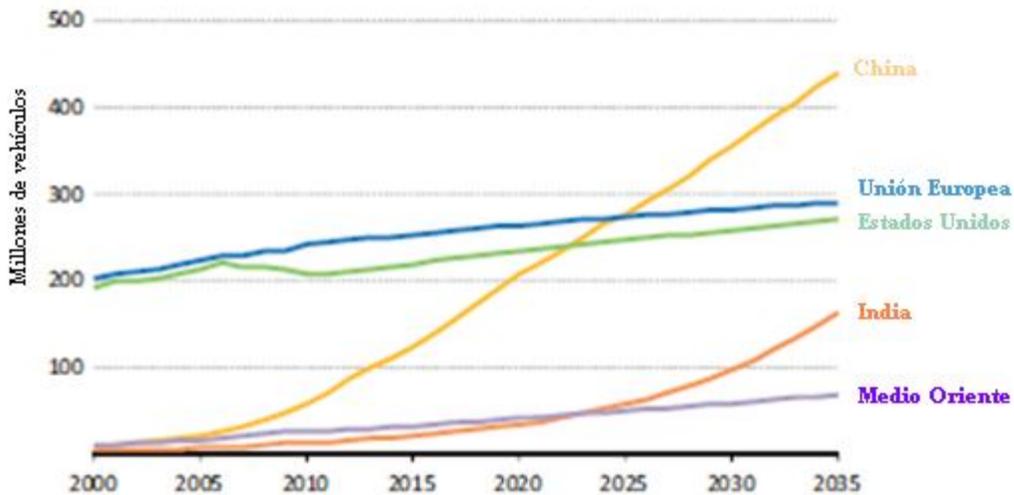


Figura 21. Crecimiento de la flota de vehículos ligeros de pasajeros por región en el escenario de políticas actuales y anunciadas (Nuevas Políticas).
 Fuente: (IEA, 2013c)

A nivel mundial, el consumo de petróleo en los vehículos de transporte de carga es impulsado por los incrementos de actividad económica y por la limitada posibilidad de cambio modal hacia medios con motores no basados en combustibles fósiles. Se espera que siga existiendo una gran correlación entre el crecimiento económico y las toneladas-kilómetro realizadas. Este enlace gradualmente se debilita en algunos países avanzados de

la OECD, pero se tienen relativamente pocas oportunidades para llevar la carga fuera de las carreteras (vía ferrocarril o aguas interiores). La demanda de combustibles fósiles pasa de 14 mil barriles por día en 2012 a 19 mil barriles por día en 2035 en el escenario de Nuevas Políticas. La falta de políticas bien diseñadas para la reducción del consumo de combustibles en muchos países es todavía una de las principales barreras que impiden amortiguar el crecimiento en la demanda de combustibles en el sector.

2.2. Las medidas de mitigación de emisiones de GEI para el transporte.

Con el objeto de considerar la eficiencia y la intensidad de carbono de los sistemas de transporte como un todo, dentro de lo cual se atiende a la eficiencia de los vehículos (nuevos y en circulación), la estructura por modo de transporte (de acuerdo a su mayor o menor intensidad de carbono) y la demanda global de los servicios de transporte, generalmente se hace referencia al marco ASI (-T)⁹ (Figura 22). Dicho marco es utilizado por el Banco de Desarrollo Asiático, el Banco Interamericano de Desarrollo, la Agencia Internacional de Energía, La Sociedad Alemana para la cooperación Internacional (GIZ), los 68 miembros del Transporte Sustentable Bajo en Carbono y otras instituciones, como herramienta de análisis y de apoyo para la toma de decisiones sobre proyectos, programas y políticas de transporte. Las estrategias de la categoría *Improve* recaen en la expansión de las tecnologías existentes que han demostrado reducir emisiones: vehículos híbridos de combustión Interna (HEV), el etanol de azúcar en Brasil, los sistemas BRT. En contraste, las medidas categorizadas en *Transform* involucran el desarrollo y la introducción de tecnologías que aún no han alcanzado una implementación o adopción en el mercado a gran escala: PHEV, BPEV, FCEV, biocombustibles avanzados o de segunda generación (etanol celulósico y biodiésel derivados de algas), y corredores electrificados (con suministro de energía con fuentes renovables) para el transporte de bienes. Las medidas correspondientes a la categoría *Shift* implican el cambio de viajes en automóviles privados hacia el transporte masivo de pasajeros y hacia el transporte no motorizado, y el cambio del transporte de mercancías en camiones de carga hacia el transporte en ferrocarril. Las estrategias *Avoid* implican inversiones en infraestructura para transporte masivo y para transporte en

⁹ Evitar- Cambiar- Mejorar (Transformar). *Avoid-Shift-Improve (Transform)*

ferrocarril, junto con estrategias de administración de la demanda de viajes (mejoramiento de logística), políticas de usos de suelos y medidas fiscales (impuestos y derechos de uso) para reducir la actividad de los vehículos. Las estrategias para la reducción de emisiones mayormente usadas en el sector transporte se presentan bajo este marco en la

Tabla 2. Puede apreciarse que un esquema de mitigación puede pertenecer a varias de estas categorías, tal es el caso de los BRT.

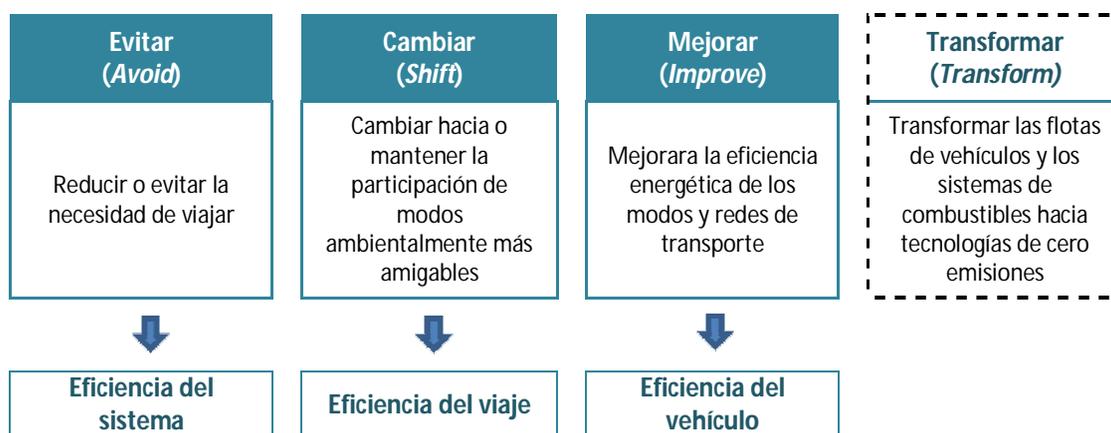


Figura 22. Marco ASI (-T) para los sistemas de transporte.
Fuente: (ICCT, 2012)

Tabla 2. Estrategias de reducción de emisiones.

Estrategias	Evitar	Cambiar	Mejorar	Transformar
Mejoras en la eficiencia de los vehículos para autotransporte			•	•
Mejoras en los sectores aéreo y marítimo	•	•	•	
Combustibles de bajo carbono			•	•
Planeación del uso de suelos	•	•		
Administración de la demanda de viajes	•	•		
Infraestructura para el transporte sustentable	•	•		
Mejoras en logística	•			
Medidas fiscales	•	•	•	

Fuente: (ICCT, 2012)

Visto de otra manera, para limitar las emisiones del transporte, deberán implementarse medidas en tres frentes: alentar o exigir una mejora en la eficiencia vehicular, inducir un cambio hacia combustibles o portadores de energía con menor contenido de carbono, o bien, fomentar un cambio modal de los automóviles hacia los medios públicos. Para evitar un efecto de rebote en la demanda de energía para el transporte, estas acciones deberán acompañarse de políticas de tarifas por emisión o sobre los combustibles. Estas medidas ayudarán tanto a reducir los impactos ambientales del transporte, como a reforzar la seguridad energética y a maximizar el potencial económico de cada país.

Eficiencia vehicular (o de rendimiento de combustible).

Para la siguiente década, mejorar el rendimiento de combustible en los vehículos y en las flotas de vehículos en circulación, es la mejor oportunidad para frenar el uso de combustibles fósiles y para reducir las emisiones de CO₂ dentro del sector del transporte.

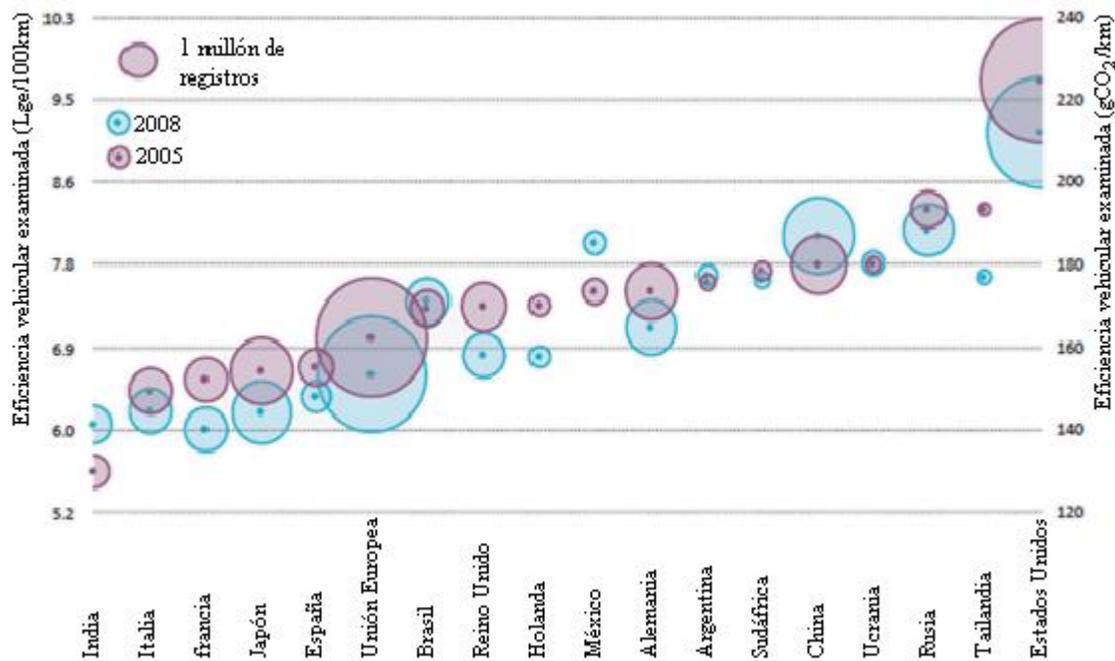


Figura 23. Rendimiento de combustible y nuevos registros de vehículos ligeros.
 Lge: litros de gasolina equivalente
 Fuente: (IEA, 2012)

La intensidad de combustible promedio en los vehículos ligeros varía significativamente entre los países (Figura 23), desde 6 litros/100km (rendimiento de 16.7km/l) hasta 9

litros/100km (rendimiento de 11.1km/l). El promedio mundial (en una muestra de 21 países) de eficiencia de los vehículos ligeros mejoró 1.7% entre 2005 y 2008, pero mientras en algunos regiones, como la Comunidad Europea, mejoró la eficiencia vehicular en otras (China, Brasil, México e India, por ejemplo) las flotas vehiculares se están volviendo rápidamente menos eficientes, debido en muchos casos al aumento en las ventas de vehículos de mayores dimensiones. A medida que el poder de compra de la economías crece, la venta de vehículos se incrementa, y en cuanto vehículos más grandes entran en el mercado, el rendimiento vehicular se va a la baja, tal como se ha visto en China, en donde una norma de eficiencia vehicular fue introducida en 2005 mientras el registro de vehículos grandes creció de 2005 a 2008. En promedio el rendimiento de combustible de la flota empeoró, aunque la norma de eficiencia ayudó a limitar los efectos. En la India, Indonesia y México, sin contar entonces con normas similares, se mostraron tendencias similares. Bajo estas consideraciones, es crítico evitar que la demanda de vehículos se desplace hacia los vehículos más grandes y con mayor intensidad energética. No es posible atribuir los cambios en los rendimientos de combustible a un solo factor, pero se ha observado que en los países que se adoptan exigentes normas de eficiencia vehicular e incrementos en los precios de los combustibles fósiles, los consumidores se ven impulsados a comprar vehículos más eficientes. En los países en los que no se dan tales condiciones, la demanda está desplazándose hacia vehículos más grandes y pesados. Puede decirse que las nuevas y más robustas normas de eficiencia han mejorado el rendimiento de combustible de las flotas en varios países y prometen mejorarlo aún más. En general, en los países de la OECD la participación de las camionetas (SUV) en el mercado ha disminuido, mientras la cantidad de vehículos pequeños se incrementó en algunos países, ganando en 2008 el 5% de mercado en comparación con 2005 (IEA, 2012).

Tabla 3. Progreso del rendimiento de combustible contra los objetivos de 2DS

Lge: litros de gasolina equivalente

Intensidad de combustible (Lge/100 km)	2005	2008	2020	TMCA 2005-2008
Promedio mundial estimado	8.1	7.7		-1.70%
Objetivos al 2020 para un cambio de 2°C	8.1	7.4	5.6	-2.70%

Fuente: (IEA, 2012)

Las normas de eficiencia vehicular (o rendimiento de combustible) han mostrado ser una herramienta importante para influir tanto en los aspectos técnicos de la eficiencia vehicular como en las preferencias de los consumidores. En el orden de limitar el calentamiento global sólo a 2°C, las normas existentes deben endurecerse y ser extendidas más allá de 2020 y los países que no cuentan con este tipo de instrumentos deberán considerar en implementarlos. Aunque globalmente el cambio en la eficiencia de los vehículos ha sido positivo, es necesario aumentar la velocidad con que lo hace para lograr acotar el calentamiento global a sólo 2°C. Se requerirá de un aumento en el rendimiento de combustible en los vehículos ligeros de 50% para 2030 (IEA, 2012) y mantener para ello una tasa media de crecimiento anual (TMCA) de 2.7% (Tabla 3). Si el rendimiento de combustible cambia con tales proporciones, el consumo de combustible en 2020 será 25% menor que en 2005, y en 2050 será 50% menor con respecto a la misma base; las emisiones de CO₂ descenderían 0.2 Gt en 2020 y 1.5 Gt, para las mismas fechas, excluyendo los ahorros por vehículos eléctricos. Mejorar los demás modos (camiones, barcos, aviones, etc.) en cantidades alcanzables (30% - 50% dependiendo del modo) produciría ahorros totales de CO₂ en el transporte de 0.5Gt en 2020 y de 3 Gt en 2050. La demanda de petróleo para el transporte puede entonces limitarse a 3 millones de barriles al día (MMbd) en 2020 y a 20 MMbd en 2050.

Mejorar el rendimiento de combustible de la flota vehicular depende tanto de avances tecnológicos¹⁰ como de preferencias de los consumidores. Dentro del aspecto tecnológico se incluyen factores como el tamaño del vehículo, su peso y las características del tren motriz (desplazamiento del motor, tipo de transmisión, tipo de combustible, tipo de aspiración y potencia del motor). Sin embargo, los consumidores compran un automóvil poniendo atención al precio del vehículo¹¹, precio del combustible, tipo de combustible, disponibilidad de estacionamiento, diseño, seguridad, volumen de carga, potencia y razón potencia/peso, confiabilidad, e imagen de la marca (IEA, 2012). Ante esto, los estudios han

¹⁰ Progresos sustanciales pueden ser alcanzados con la tecnología existente en los motores, la transmisión, los trenes motrices, sistemas híbridos, materiales ligeros, aerodinámica, resistencia al rodamiento.

¹¹ Los consumidores (y los fabricantes) de vehículos no están dispuestos a invertir en la tecnología para la eficiencia de los vehículos a menos que esperen cortos periodos para la recuperación de su inversión (1- 2 años) a través del ahorro de combustible.

mostrado que sostener los precios de la gasolina en niveles altos influye en la selección de los vehículos, llevando a los consumidores a adquirir vehículos más eficientes. Lo inverso es cierto, cuando los precios de la gasolina decrecen se muestran incrementos en la participación de las camionetas en las ventas. Otras medidas para guiar las decisiones de los consumidores son: impuesto e incentivos hacia vehículos más limpio, impuestos a los combustibles, medidas de control de tráfico y dotar a los consumidores de información sobre el desempeño ambiental de los vehículos. La implementación por los gobiernos de tales políticas es relativamente limitada dado el hecho de que en última instancia los consumidores deciden si comprar un vehículo más o menos eficiente.

Por otro lado, existe una clara falta de regulación en cuanto a la eficiencia vehicular para un segmento que sigue creciendo rápidamente en número y en los niveles de emisión de CO₂: los camiones pesados para el transporte de mercancías; esto es particularmente más notorio en las economías que no pertenecen a la OECD. Algunos países de la OECD están trabajando en normas de eficiencia para vehículos comerciales y algunos las han implementado, aunque falta mucho por hacer.

Vehículos Eléctricos e Híbridos

Para lograr mantener el incremento de temperatura mundial en 2°C (según el 2DS) los vehículos eléctricos (EV), los híbridos enchufables (PHEV) y los impulsados únicamente por baterías (BEV), deberán alcanzar en 2020 unas ventas anuales de 7 millones de vehículos y una flota de 20 millones, pero aún cuando se logren estas cifras, los vehículos eléctricos representarían sólo 2% de la flota mundial de vehículos en 2020. Como con cualquier tecnología emergente, la proyección de expansión del mercado de EV es extremadamente difícil. Una gran mejora en el desempeño de las baterías y en sus costos llevaría a una alza en la demanda de EV, pero sin dichos desarrollos, los EV permanecerán como nicho de mercado. Aún con las políticas anunciadas como próximas (Nuevas Políticas) las ventas mundiales de EVs alcanzarían únicamente 500 mil unidades en 2020 (y 4 millones en 2035), nivel mucho menor a los 7 millones aún para 2020. A este paso, los ahorros conseguidos serían de alrededor de 35kb/d en 2020 y cerca de 235kb/d en 2035 (menores a los correspondientes a los biocombustibles o al gas natural) (IEA, 2013c).

Existen aún dificultades en incorporar al mercado vehículos eléctricos (PHEV y BEV) comercialmente atractivos (siendo esto uno de las principales dificultades para alcanzar el escenario 450ppm). A pesar de las medidas implementadas en muchos países para incrementar las ventas, únicamente 100 mil vehículos eléctricos (EV) fueron vendidos en el mundo en 2012 (principalmente en Estados Unidos y Japón). Los subsidios y otros incentivos aún no han sido suficientes para hacer atractivo el precio a la mayoría de los potenciales consumidores. La meta anunciada en 2001 por la administración de Estados Unidos, de poner en 2015 en circulación un millón de vehículos EV parece distante. Por su parte, Alemania ha re-expresado su objetivo de un millón de EV en circulación en 2020, pero en 2012 sólo 72 mil unidades fueron vendidas. En China, el gobierno se propuso tener 500 mil EV en circulación para 2015 y un millón para 2020, sin embargo las ventas fueron de menos de 13 mil en 2012. La India lanzó en enero de 2013 el objetivo de poner 6-7 millones de vehículos EVs en las calles para 2020, de los cuales 4-5 millones serían a dos ruedas. En Israel, la mayor red de recarga de baterías del mundo se fue a la quiebra debido a la falla en alcanzar los niveles de servicio planeados. (IEA, 2013c)

Muchos gobiernos han adoptado grandes metas para la implementación del vehículo eléctrico durante el periodo 2015-2020 (**Figura 24**), lo cual está en concordancia con los objetivos de 2DS. Para lograr esta meta, las ventas deberán duplicarse cada año entre 2012 y 2020, los costos deben seguir bajando, la infraestructura deberá seguir desarrollándose y la elección de los consumidores y su confianza requerirán de un impulso mayor.

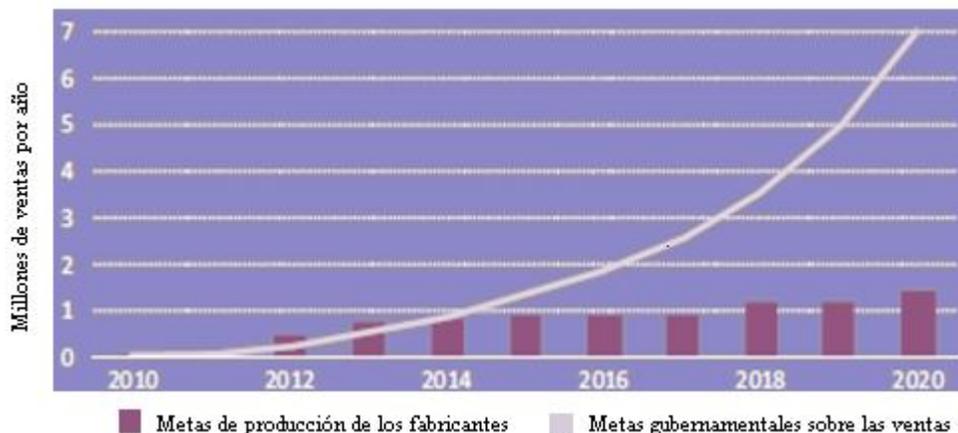


Figura 24. Metas globales gubernamentales y de los fabricante de autos EV
Fuente: (IEA, 2012)

Los incrementos en precios no sólo influyen a los consumidores a adquirir vehículos más eficientes, sino también a incrementar el interés en modos alternativos de transporte. Esto es especialmente cierto para los híbridos. Este tipo de vehículos ganó popularidad en Estados Unidos en 2008 aunque después, su interés ha declinado en ese país; sin embargo, en Japón ha despegado la venta de los híbridos y se ha convertido en el principal mercado a nivel mundial. Las ventas de BEV tienen aún mayores obstáculos por superar, especialmente el costo de las baterías. Estimar el costo de las baterías es difícil de separar del precio total del vehículo, pues además de los costos de producción, los precios reflejan a menudo costos generales, tales como el mercadeo. Con base en un volumen medio de producción las baterías tenían a principios de 2011 un costo de 750 USD\$/kWh, quienes declinaron hasta los 500 USD\$/kWh a principios de 2012. Si las tendencias continúan, las baterías podrían alcanzar los 325 USD\$/kWh o menos para 2020, lo cual es suficiente para llevar a los vehículos BEV cerca de ser competitivos en costo con los vehículos con motores de combustión interna.

Los principales elementos que alentarían la adopción de los EV por parte de los consumidores son:

- Nivelar los costos de poseer un EV (pago mensual de adquisición, operación y costo de combustibles similares a los vehículos a gasolina convencionales) mediante programas de incentivos.
- Reducir las preocupaciones relativas a la vida de las baterías y el valor de reventa de los vehículos, posiblemente a través de esquemas de arrendamiento financiero para las baterías.
- Proveer una infraestructura adecuada para la recarga de baterías con objeto de posibilitar la completa movilidad local. La educación de los consumidores sobre otras opciones de movilidad es también importante, toda vez que según las observaciones, actualmente los EV se conducen en promedio 190 km diarios. Mejoras en la autonomía serán requeridas para superar las limitaciones de rango inter-urbano.
- Implementar ventajas temporales para los vehículos, tales como la prioridad de estacionamiento en áreas urbanas y la prioridad de acceso a carriles o autopistas.

Potenciar la implementación de los EV también es altamente dependiente de los compromisos de las armadoras para desarrollar y mercadear los vehículos. Los programas de subsidios actuales de uno o dos años no inspiran confianza a las armadoras de que los mercados se desarrollarán y de que la demanda crecerá, por lo que la producción para después de 2014 es aún incierta.

Cabe añadir aquí que el Hidrógeno puede jugar un papel importante en los sistemas de transporte bajos en carbono, principalmente mediante la tecnología de vehículos eléctricos con celdas de combustible (FCEV), sin embargo su implementación presenta aún mayores barreras: completa falta de infraestructura, altos costos de las celdas de combustibles, preocupaciones sobre el almacenaje del hidrógeno a bordo del vehículo.

Biocombustibles

En contraste con los EV, los biocombustibles han sido producidos en Brasil y Estados Unidos desde hace varias décadas. El sector ha crecido rápidamente en los diez últimos años gracias al impulso de las políticas aplicadas en más de cincuenta países la producción global creció de 16 mil millones de litros de gasolina equivalente (Lge) en 2000 a más de 100 mil millones en 2011. Globalmente los biocombustibles representaron cerca del 3% de los combustibles para transporte, con una considerable proporción en Brasil (21%) (IEA, 2012). En el escenario Nuevas Políticas del *World Energy Outlook 2013* se proyecta que la participación de los biocombustibles en el autotransporte se expanda de 3% a 8% entre 2012 y 2035 (IEA, 2013c). Dicha realización depende de un continuado apoyo gubernamental a través de políticas de mezcla de combustibles y de subsidios.

Sin embargo, no todos los biocombustible en el mercado actual pueden reducir las GEI en el nivel requerido para mantener el cambio climático en 2°C. Todavía se requiere mejorar la productividad de los biocombustibles avanzados y desarrollarlos comercialmente; para el escenario 2D el uso de biocombustibles se incrementa a 240 miles de millones de Lge en 2020, los cuales, si se producen sustentablemente, darían lugar a reducción de 0.1GtCO₂ en el transporte. La meta para 2020 es producir 22 miles de millones de Lge de biocombustibles avanzados con una importante reducción en sus costos. Actualmente la producción de este tipo de biocombustibles (etanol lignocelulósico, biomasa a líquido) es

menor de 200 millones de Lge. Alcanzar tales niveles requerirá de un importante y sostenido estímulo por medio de políticas dedicadas.

Las reglamentaciones para la mezcla de combustibles y los incentivos financieros han contribuido a un rápido crecimiento de los biocombustibles, sin embargo los altos precios de las materias primas, la sobrecapacidad, los cambios en las políticas y la discusión sobre la sustentabilidad de los biocombustibles¹² han conducido a una reciente desaceleración. Esto podría limitar la expansión futura de combustibles que proveen limitados beneficios en la reducción de GEI. Algunas situaciones ocurridas en 2011 apuntan en esa dirección, tales como la caída de 15% en la producción de etanol de caña en Brasil debido a los altos precios del azúcar o la utilización de únicamente la mitad de capacidad de producción de biodiésel en Europa con altos costos de materias primas y presiones económicas. Asimismo, el reforzamiento de las inversiones en Estados Unidos para cumplir con la norma 2 de combustibles renovables (Renovable Fuel Standard 2) podría desalentar el crecimiento de los biocombustibles convencionales puesto que si bien esta norma requiere proporciones crecientes de biocombustibles en las mezclas, el mandato pide mezclar combustibles distintos al etanol de maíz (como biocombustibles celulósicos y otros avanzados).

El apoyo a los biocombustibles avanzados (de bajas emisiones de GEI) debe continuar al menos hasta 2020 para asegurar su escalamiento y la reducción necesaria de costos para alcanzar la plena comercialización. Las políticas de apoyo deberán promover los biocombustibles más eficientes (en términos de reducción efectiva de GEI) soportados por marcos políticos que aseguren que la seguridad alimentaria y la biodiversidad no se comprometan y que los impactos sociales sean positivos. Esto incluye una administración sustentable del uso de la tierra y esquemas de certificación, así como medidas de soporte que promuevan bajo impacto del uso de la materia prima (residuos) y de los recursos hídricos.

¹² El uso de biocombustibles ha sido objeto de importantes análisis y debates debido a sus impactos directos sobre otros usos agrícolas para la tierra, la incertidumbre en relación con los ahorros de GEI, dudas sobre la factibilidad de alcanzar ciertos objetivos en el nivel de suministro, aceptabilidad de los consumidores y retrasos en alcanzar la factibilidad comercial.

Gas natural en el transporte

Más allá de los biocombustibles y la electricidad (en PHEV y BEV), una alternativa de medio-largo horizonte al petróleo como fuente de combustibles para el transporte, es el gas natural (comprimido o líquido). Su alto valor calórico y bajo contenido de CO₂ lo hacen factible como combustible para el transporte, pero dada su baja densidad requiere compresión o licuefacción. Los vehículos a gas natural (GNV) tienen generalmente menores emisiones de GEI, de óxidos de nitrógeno (NOx) y de partículas suspendidas (PM) que los motores a gasolina y a diésel, pero para usar el gas natural se requiere de cambios fundamentales en la tecnología de los vehículos y/o en la infraestructura de recarga de combustible.

En términos de volumen, el autotransporte es el sector más atractivo para el uso del gas natural. Actualmente sólo el 2% de la energía total en el autotransporte corresponde a este combustible y su uso está concentrado en pocos países: Irán, Pakistán, Argentina, Brasil e India con el 68% de la flota¹³ a gas natural (NGV). El número de los vehículos a gas natural creció en la década pasada, especialmente los vehículos para transporte público, sin embargo, dicha tecnología aún permanece como nicho de mercado con menos del 1% de la demanda de combustibles para transporte (o también menos del 1% de la demanda de gas natural).

Actualmente los vehículos a gas natural son casi competitivos con los trenes motrices convencionales, pero en el largo plazo necesitan ser mayormente des carbonizados para constituir una opción trascendente para enfrentar el cambio climático. El biogás, el gas biosintético y la conversión gas a líquido son opciones factibles para el sector transporte altamente dependiente del petróleo, sin embargo saltar directamente del uso del petróleo en los vehículos de pasajeros al uso vehículos con celdas de combustible o baterías tiene la ventaja de evitar la creación de la infraestructura de transición hacia el gas. En el escenario 2DS el uso del gas natural en el transporte debería ser del 5% de la demanda global de gas natural; en el 4DS, su uso se puede mantener en 1% hasta 2050.

¹³ Los países con ventas de GNV mayores al 10% son: Bangladesh 61%, Armenia 30%, Pakistán 30%, Bolivia 26%, Argentina 24%, Colombia 24%, Irán 14% y Malasia 11% (IEA, 2012)

Tecnologías y sistemas para promover el cambio modal.

Los autobuses de tránsito rápido (BRT) son sistemas que mejoran el transporte de las ciudades como un todo, usando menos energía y ayudando a combatir el incremento en la congestión y las emisiones contaminantes locales en tanto que el número de automóviles sigue creciendo en las áreas urbanas. Los sistemas BRT involucran la operación de autobuses de alta capacidad de ocupación en corredores con carriles aislados del resto del tráfico y sistemas de abordaje y prepago similares a los sistemas metro. Los BRT ayudan a mejorar la movilidad en las ciudades para un amplio rango de sectores de la población, sobre todo para aquellos que no poseen un automóvil -más de 80% de la población mundial- (IEA, 2012). En comparación con los autobuses tradicionales los BRT tienen mejores velocidades promedio de circulación que se traducen un menor consumo de combustible: en promedio los autobuses circulan a 16 km/h versus los 21 km/h en promedio de los BRT.

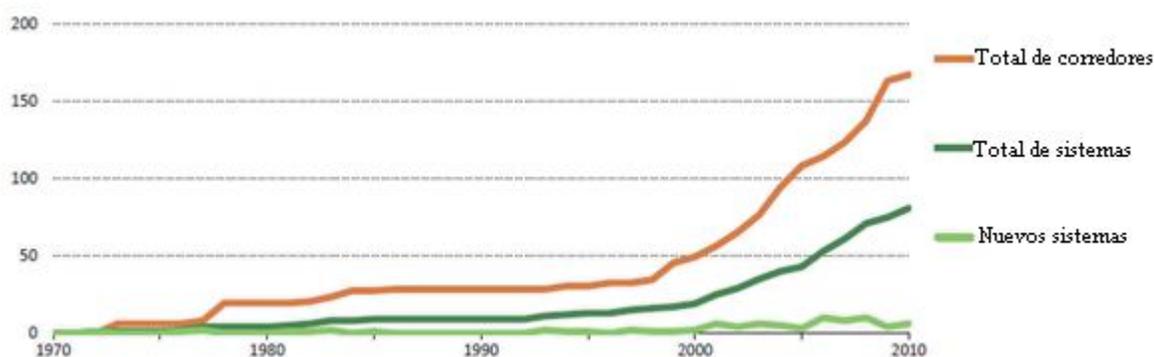


Figura 25. Evolución temporal de los sistemas BRT.

Fuente: (IEA, 2012)

Tabla 4. Comparación de tres opciones para transporte masivo de pasajeros.

	Tren ligero	BRT	Metro
Intensidad de CO ₂ (CO ₂ /pas-km)	4 a 22	14 a 22	3 a 21
Costo de capital (millones de dólares/km)	13 a 40	5 a 27	27 a 330
km de red que puede construirse con mil millones de dólares	25 a 77	37 a 200	3 a 37
Longitud mundial de las redes en 2011 (km)	15000	2139	10000
Capacidad (miles de pasajeros por hora por dirección)	2 a 12	10 a 35	12 a 45

Fuente: (IEA, 2012)

Los sistemas BRT han ganado popularidad en el mundo desde mediados de 1990's, después del éxito del sistema de Bogotá, y tuvieron un apreciable incremento durante la década 2000-2010 (**Figura 25**). Las proyecciones de la AIE indican que si los BRT son ampliamente implementados, pueden contribuir a mitigar las emisiones de CO₂ con 0.5Gt del gas en ahorros acumulados entre 2010-2050. Los sistemas BRT son significativamente más baratos que otros sistemas de transporte masivos, sin embargo, tienen un potencial de mitigación de GEI más reducido (**Tabla 4**), a no ser que los vehículos sean electrificados usando trolebuses o se adopte ampliamente una fuente de energía baja en carbono, como los biocombustibles.

Al lado del BRT existen otros mecanismos (trenes ligeros y ciclo vías, por ejemplo) para promover el cambio modal de los automóviles al transporte público. Estas innovaciones, junto con el uso de las telecomunicaciones en el transporte y una más integrada planeación del uso de los espacios deben de ser tomados en cuenta. A final de cuentas, la innovación del BRT es más un modelo de cómo una ciudad puede establecer un nuevo mecanismo de transporte masivo mediante el aprovechamiento de inversiones ya hechas en las calles, integrando una visión de largo plazo para el desarrollo urbano que combina e integra el uso de suelos con la planeación del transporte.

2.3. Medidas de mitigación en curso en el sector transporte e intervenciones potenciales.

Las normas de eficiencia para los vehículos ligeros.

Después de que la primer norma de eficiencia vehicular logró aumentos impresionantes en Estados Unidos en lo 70's, las normas regulatorias se estancaron y las reducciones de CO₂ y el rendimiento de combustible se rezagaron por varias décadas. Recientemente ha comenzado un resurgimiento de las normas de rendimiento de consumo de combustible y de emisiones de CO₂: se han adoptado o propuesto regulaciones en Estados Unidos, Europa, Japón y China con normas que dirigen el desarrollo de la eficiencia vehicular 2020 ó 2025 y que podrán reducir la tasa promedio de emisión de los vehículos de pasajeros

entre 19% y 50% por debajo de los niveles de 2010. Sin embargo, aún de lograrse con las normas las reducciones proyectadas, estas no compensarán el crecimiento en las emisiones del sector, las cuales tienen mucho de su origen, como se ha visto, en la expansión de las flotas vehiculares y de su actividad en los países en desarrollo.

Las normas obligatorias de eficiencia vehicular para vehículos de pasajeros están en más del 70% del mercado de los vehículos ligeros, pues dichas normas tienen resultados probados en conseguir mejoras en la eficiencia. Para asegurar futuras reducciones en consumo de combustibles y en emisiones de GEI, dado el incremento de las flotas vehiculares, las normas deben volverse cada día más exigentes y a medida que ello sucede, las nuevas tecnologías se dispersan hacia otras regiones. Sin embargo, las mejoras en la eficiencia suelen subvaluarse por los consumidores, induciendo a los fabricantes a no ofrecer opciones más eficientes, o bien, a usar dichas tecnologías para compensar los incrementos en el tamaño y potencia de los vehículos. Por ello, políticas adicionales como los altos impuestos a los combustibles, las cuotas por consumo de combustible y los programas de desecho de vehículos pueden alentar la compra de vehículos más eficientes, disminuir el tamaño promedio de los vehículos y acelerar la renovación de la flota vehicular. Estas políticas pueden promover el cambio hacia tecnologías y modos más eficientes, una reducción de la actividad vehicular, la conducción más eficiente de los vehículos y mantenimiento mejorado a los vehículos. Algunas estrategias de administración de la demanda de transporte pueden estimular el uso más eficiente a través de mejoras en el flujo de tráfico y reducción del congestionamiento urbano.

La **Tabla 5** describe las políticas para los vehículos ligeros (automóviles, camionetas, camiones ligeros y motocicletas). Las políticas vigentes o adoptadas (*Adopted*) incluyen todas las regulaciones existentes vinculantes decretadas en publicaciones oficiales y adoptadas desde 2000 y se asumen que no se dan cambios autónomos en la eficiencia vehicular a excepción de la penetración de los vehículos eléctricos o los combustibles bajos en carbono. Las políticas próximas a adoptarse (*Pipeline*) incluyen las regulaciones propuestas o formalmente anunciadas por las agencias gubernamentales con autoridad regulatoria relevante y que describen con suficiente especificidad sus objetivos y horizonte temporal como para calcular sus beneficios potenciales. Como potenciales se incluyen un

amplio rango mejores prácticas de eficiencia vehicular, cambios modales y estrategias de reducción de la actividad vehicular que estarían técnicamente disponibles después de 2030, resultando una trayectoria ambiciosa pero alcanzable. Dichas estrategias requerirán de un tiempo razonable para su implementación y adopción así como del desarrollo de infraestructura. Además de la mejora de eficiencia vehicular, esta trayectoria incluye cambios modales de vehículos de pasajeros a medios masivos y medios no motorizados, así como cambios del transporte de mercancías en camiones hacia los ferrocarriles para el caso de largas distancias. También se consideran políticas complementarias para la reducción de viajes urbanos y para el mejoramiento de las operaciones logísticas.

Tabla 5. Resumen de políticas de eficiencia para vehículos ligeros.

Región		Política
Estados Unidos	Adoptada	Norma CAFE para VL de AM 2000-2011 Norma para VL de AM 2012-2016: 35.5 mpg o 250 gCO ₂ e/milla para 2016 Norma para VL de AM 2017-2025: 49.1 mpg o 163 gCO ₂ e/milla para 2025
	Próxima	Ninguna
Unión Europea	Adoptada	Acuerdo voluntario, AM 2008 y posteriores: 140 gCO ₂ /km Norma para VP de AM 2015: 130 gCO ₂ /km Normas para VLC de AM 2017: 175 gCO ₂ /km
	Próxima	Meta para VP de AM 2020: 95 gCO ₂ /km Normas para VLC de AM 2020: 147 gCO ₂ /km
China	Adoptada	Norma para VL de AM 2005: Normas por vehículo fase I Norma para VL de AM 2008: Normas por vehículo fase II Norma para VL de AM 2015: 6.9 l/km fase III Norma para VLC de AM 2006: 9.42 l/100 km, para AM 2009: 8.46 l/100 km, fase III
	Próxima	Norma para VL de AM 2020: 5 l/100 km fase IV
India	Adoptada	Ninguna
	Próxima	Propuesta de norma para VL de AM 2020: 20 km/l
Japón	Adoptada	Norma para VL de AM 2010: 15.1 km/l Norma para VL de AM 2015: 16.8 km/l; minibuses: 8.9km/l; VLC: 16.8 km /l Norma para VP de AM 2020: 20.3 km/l
	Próxima	Ninguna
Brasil	Adoptada	Incentivos fiscales en 2017 para VL, 17.4 km/l Programa de etiquetado de VL
	Próxima	Incentivos fiscales en 2017 para VL, 18.8 km/l

		Norma voluntaria para VL de AM 1976-2006
Canadá	Adoptada	Norma para VL de AM 2007-2010
		Norma para VL de AM 2011-2016, armonizada con la de Estados Unidos
	Próxima	Norma para VL de AM 2017-2025, armonizada con la de Estados Unidos
Corea del Sur	Adoptada	Programa de promedio de rendimiento para VL de AM 2012-2015: 17 km/l para 2015 Para VP de AM 2012 menores a 1600cc: 14.3 km/l; para VP mayores: 11 km/l
	Próxima	Ninguna
México	Adoptada	Norma para VL de AM 2013-2016, armonizada con la de Estados Unidos
	Próxima	Ninguna
Australia	Adoptada	Ninguna
	Próxima	Propuesta de norma (el objetivo no se ha anunciado)
Principales regiones	Potencial	Para VP y VLC de AM 2015-2030: mejoras de 4% anual. Para motocicletas: mejoras de 1% anual.
Otras regiones	Potencial	Para VP y VLC de AM 2020-2030: mejoras de 4% anual. Para motocicletas: mejoras de 1% anual.

CAFE: *Corporate Average Fuel Economy*

AM: Año modelo

VL: Vehículos ligeros

VP: Vehículos de Pasajeros

VLC: Vehículos ligeros comerciales

mpg: millas por galón

Fuente: (IEA, 2012)

De cumplirse los objetivos anunciados (*Pipeline*), para 2020 el rendimiento de combustible rondará los 20km/l en China, India Japón y Brasil, y para 2025, los 21 km/l en estados Unidos, con potenciales de mejora de 4% anual para los vehículos ligeros hasta 2030, a excepción de las motocicletas, las cuales mejorarían su eficiencia con tasas del 1% anual hasta 2030. Los Estados Unidos, China, Europa y Japón son los líderes en políticas regulatorias para los vehículos ligeros, requiriéndose para los objetivos de eficiencia establecidos por ellos mismos, tasas anuales de mejora de eficiencia de 4.8%, 4.2%, 3.8% y 1.9%, respectivamente. Cabe señalar que Brasil no ha decretado una norma de rendimiento de combustible o de emisiones GEI para los vehículos ligeros, sin embargo, es probable que el recientemente adoptado incentivo fiscal que toma en cuenta la eficiencia del vehículo surta los mismos efectos que una norma. En México recientemente entró en vigencia la NOM-163 para el periodo 2014-2016, la cual está armonizada con la norma de Estados Unidos e intenta alcanzar los 15.3 km/l para el promedio de los vehículos ligeros de pasajeros en 2016 (ICCT, 2012).

Como resultado de las políticas vigentes y de las próximas por adoptarse los factores de emisión para el dióxido de carbono oscilarían en 2020 entre los 95 gramos de CO₂ por kilómetro en la Comunidad Europea y los 153 grCO₂/km en Australia (en relación con el NEDC- Nuevo Ciclo Europeo de Conducción). Dado que las normas de Estados Unidos parten de una base ineficiente para los vehículos y debido al tamaño de su flota, se esperan que las mayores reducciones en emisiones de CO₂ para 2011-2025 sean logradas en dicho país (Figura 26), con la eficiencia vehicular prácticamente duplicada con base en 2010¹⁴.

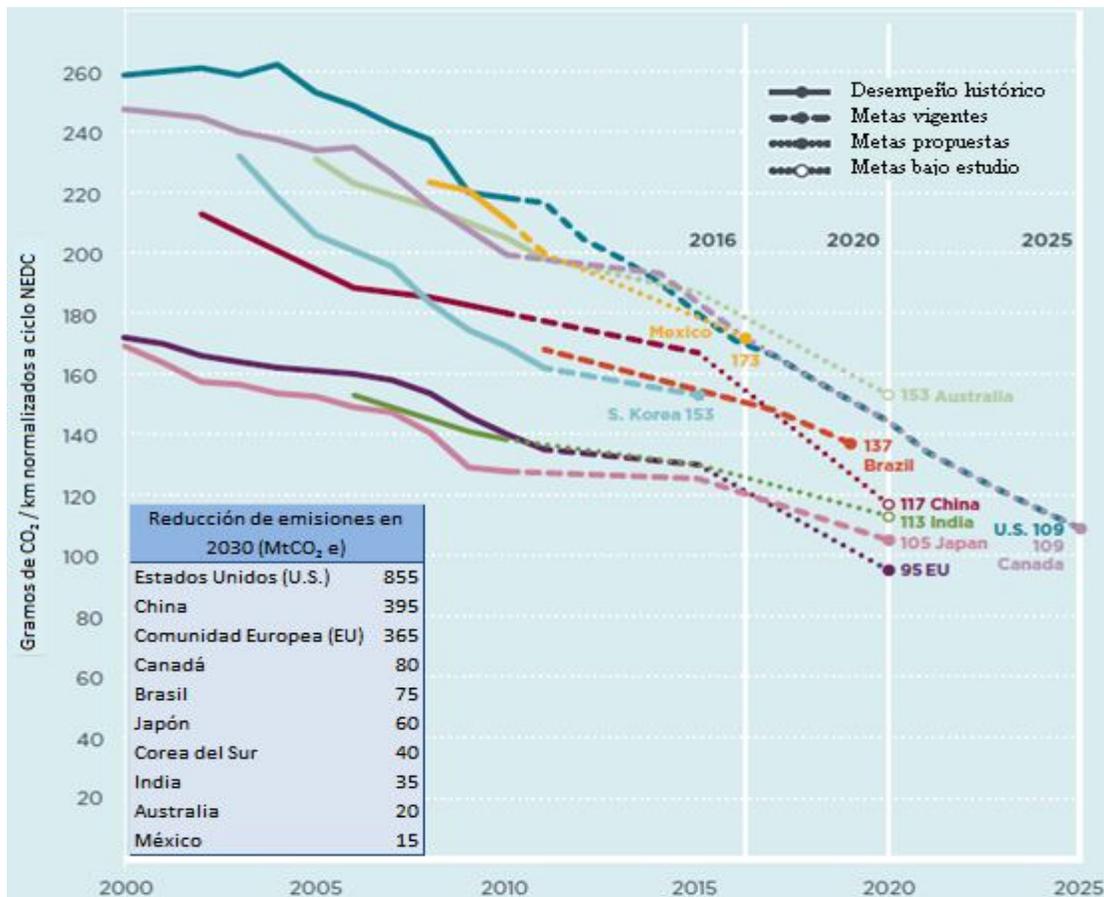


Figura 26. Comparación de los factores de emisión de CO₂ para algunos países en 2000-2025
Fuente: Elaboración propia con datos de (ICCT, 2012)

La exigencia de los incentivos fiscales que fomentan la eficiencia de toda la flota varía ampliamente y operan de distintos modos: con impuestos basados directamente en el CO₂ o

¹⁴ Los avances tecnológicos junto con los esfuerzos de de largo plazo por mejorar la eficiencia vehicular, pueden soportar la duplicación de la eficiencia en una manera costo-efectiva entre 2010 y 2030, haciéndola plausible (ICCT, 2012)

el consumo de combustible (Europa y Estados Unidos), con impuestos e incentivos dependientes de atributos de los vehículos relacionados con las emisiones de CO₂ como el tamaño de motor y el peso del vehículos (Europa, Brasil, China, India, Japón), o bien, con incentivos dirigidos a promover vehículos con tecnología avanzada (Estados Unidos, Europa, India y Japón). Existen además, políticas vigentes que intentan guiar la elección del consumidor hacia vehículos más eficientes como las mostrada en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Otras políticas vigentes en 2011

Tipo de política	Descripción	Países / Regiones
Incentivos fiscales	Los impuestos de registro se incrementan con el tamaño del vehículo y del motor, y de las emisiones de CO ₂ . Incentivos a las ventas de vehículos más eficientes en consumo de combustible y emisiones.	Brasil, China, Francia, Alemania, India, Italia, Japón, Corea del Sur, Rusia, Sudáfrica, España, Turquía, Reino Unido, Estados Unidos.
Información al consumidor	Etiquetas que muestran el rendimiento de combustible y las emisiones de GEI	Australia, Brasil, Chile, Unión Europea, China, India, Corea del Sur y otros
Priorización y penalización	Carriles con prioridad de circulación para vehículos con alta eficiencia; prohibición a SUV y cargos a vehículos de baja eficiencia.	Varias entidades de Estados Unidos, Londres, París.

Fuente: (IEA, 2012)

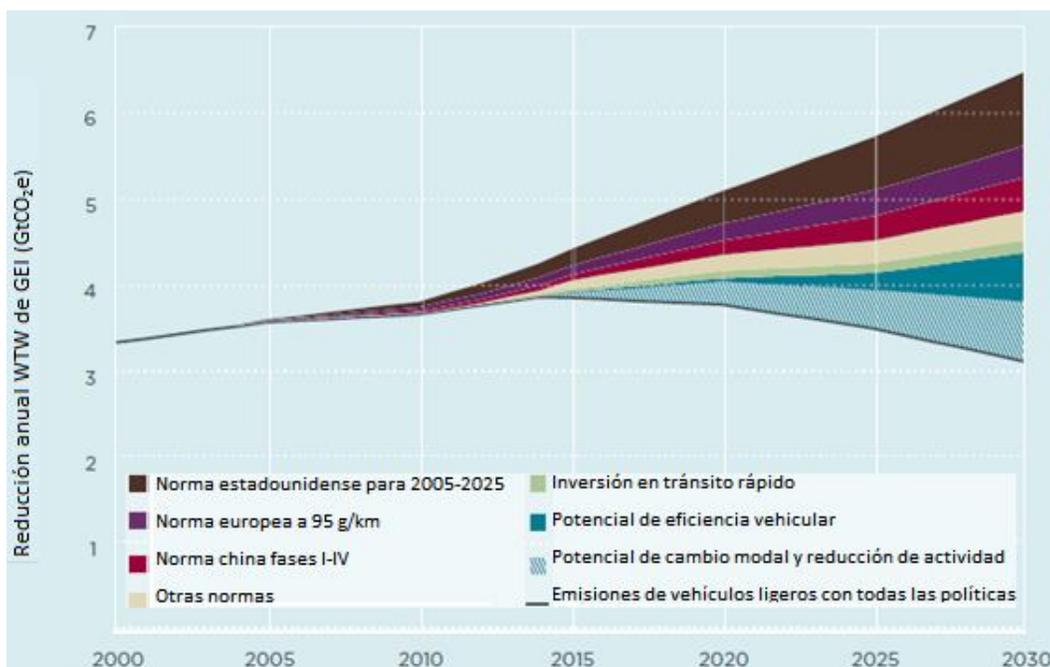


Figura 27. Impactos de las políticas en las emisiones globales de los vehículos ligeros

Fuente: (ICCT, 2012)

Según la proyección del *International Council on Clean Transportation* (ICCT) (**Figura 27**), las emisiones de CO₂ y el consumo de petróleo prácticamente se duplicarán entre 2010 y 2030, con los mayores crecimientos en los mercados más grandes (China, India, Brasil). En esencia, las mejoras en eficiencia sólo compensarán el crecimiento esperado en las flotas y en su actividad. La estrategia de reducción de frecuencia de viajes ayudaría a reducir las emisiones de los vehículos ligeros hasta los niveles de 2000. Dichas estrategias incluyen el cambio modal hacia el transporte público y una mejor planeación del uso de suelos.

La NOM-163 de México

En México recientemente entró en vigor la NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-2013 que tiene por objetivo establecer la metodología para el cálculo de los promedios corporativos meta y observado de las emisiones de CO₂ por km y su equivalencia en rendimiento de combustible con base en los vehículos ligeros nuevos que utilizan gasolina o diésel como combustible y que se comercialicen en México. Las emisiones de CO₂ meta deberán ser determinadas para cada segmento de sombra¹⁵ y para dos clases de vehículos: los denominados vehículos de pasajeros y las caracterizadas como camionetas ligeras. En dicha norma, los fabricantes de vehículos pueden acceder a créditos¹⁶ que les faciliten el cumplimiento de la disposición; los créditos pueden originarse por esfuerzo anticipado (en vehículos de los años-modelo 2012 y 2013), por penetración de tecnologías de sistemas de aire acondicionado más eficientes, o por penetración de tecnologías que permitan reducir las emisiones de CO₂ e incrementar el rendimiento de combustible en los vehículos.

En la **Tabla 7** y en la **Tabla 8** se muestran los rendimientos meta equivalentes según esta norma para los vehículos de pasajeros y para las camionetas ligeras, respectivamente. En los vehículos de pasajeros A es el rendimiento meta para vehículos con sombras menores o iguales a 3.81m^2 , B es el rendimiento meta para vehículos con sombras mayores o iguales a 5.20m^2 . Para los demás vehículos con tamaños intermedios, su rendimiento meta debe ser calculado con la relación: *rendimiento meta de CO₂* = $(C*\text{sombra}) + D$. Para las

¹⁵ La sombra es una medida del área entre las llantas del vehículo expresada en metros cuadrados.

¹⁶ Los créditos son las diferencias positivas que resultan de la aplicación de los criterios de la norma entre los promedios meta y promedios ponderados observados, determinados en gCO₂/km

camionetas ligeras el procedimiento es similar y se utiliza 6.13 m² como el límite superior para la sombra (en vez de 5.20 m²) mientras que el límite inferior no cambia.

Tabla 7. Rendimiento de combustible equivalente según la NOM-163, vehículos de pasajeros.

Año-modelo regulado	Rendimiento de combustible meta			
	A [km/l]	B [km/l]	C [km/l]/[m ²]	D [km/l]
2012	15.1341	11.7663	0.01356	0.01438
2013	15.4920	11.9811	0.01357	0.01285
2014	15.8920	12.2210	0.01356	0.01126
2015	16.5192	12.5873	0.01357	0.00885
2016	17.2980	13.0335	0.01357	0.00611

Fuente: (DOF, 2013)

Tabla 8. Rendimiento de combustible equivalente según la NOM-163, camionetas ligeras.

Año-modelo regulado	Rendimiento de combustible meta			
	A [km/l]	B [km/l]	C [km/l]/[m ²]	D [km/l]
2012	12.4305	9.2833	0.01174	0.03571
2013	12.7848	9.4792	0.01174	0.03348
2014	13.0808	9.6418	0.01174	0.03173
2015	13.6394	9.9419	0.01174	0.0286
2016	14.348	10.3129	0.01174	0.02497

Fuente: (DOF, 2013)

Las normas de eficiencia vehicular en los vehículos pesados (HDV)¹⁷.

Las normas para los vehículos pesados tienen relativamente poco tiempo de aplicación, por lo que tienen un enorme potencial para su aplicación en los próximos años. La **Tabla 9** resume las políticas para HDV que han sido adoptadas, así como el potencial de mejoras dentro del horizonte temporal especificado. Muy pocos países han adoptado o están por adoptar políticas para los HDV: La norma china es prácticamente la única que ha entrado en fase de implementación, pero dado que apunta hacia los modelos de vehículos menos

¹⁷ Los vehículos de servicio pesado (HDV) van desde las pick-up de servicio pesado (Clase 2b) hasta los grandes tractocamiones (Clase 8) y todo lo que se encuentre en medio como los autobuses y camiones unitarios.

eficientes, sus efectos son limitados. La norma de Japón para los HDV del 2015 está prácticamente cumplida como resultado de los incentivos fiscales disponibles en el país. La norma adoptada en Estados Unidos, así como sus armonizaciones en México y Canadá es la norma más completa del mundo para el segmento de las HDV, sin embargo, sus objetivos están muy por debajo del verdadero potencial para el plazo considerado.

Tabla 9. Resumen de políticas de eficiencia para vehículos pesados.

Región		Política
Estados Unidos	Adoptada	Norma para VH de AM 2014-2018: mejoras en eficiencia de combustible y de emisiones de GEI con TMCA de 1.3% - 4.2% dependiendo del peso California: Regulación para tractocamiones nuevos de AM 2011+ y para las llantas. Mejoras en la eficiencia de 3-10% para todos los camiones que entren al estado. Norma para VL de AM 2017-2025: 49.1 mpg o 163 gCO ₂ e/milla para 2025
	Próxima	Ninguna
China	Adoptada	Norma industrial
	Próxima	Norma para VH de AM 2015: reducción del consumo de combustible en 10% en 2015 y 25% en 2020 con respecto de 2010
Japón	Adoptada	Norma para VH de AM 2015: 10-13% de incremento en el rendimiento de combustible con respecto de 2002
	Próxima	Ninguna
Canadá	Adoptada	Ninguna
	Próxima	Norma para VH de AM 2014-2018: niveles de emisión de GEI para vehículos y máquinas, armonizada con la de Estados Unidos
México	Adoptada	Ninguna
	Próxima	Norma para VH de AM 2014-2018 armonizada con la de Estados Unidos, cumplimiento obligatorio para 2016.
Principales regiones	Potencial	AM 2020-2030 (empezando al término del periodo regulado): mejoras de 3.5% anual para todas las clases de camiones.
Otras regiones	Potencial	AM 2025-2030: mejoras de 3.5% anual para todas las clases de camiones.

Fuente: (ICCT, 2012)

Con respecto de 2010, pueden esperarse mejoras en el rendimiento de combustible en Estado Unidos del 45% para los tractores y 40% para el resto de las clases en 2020, y de 55% y 50%, respectivamente para 2030. En una base de 20 años (2010-2030) se espera una mejora anual en la eficiencia de tractores del 3.9%, mientras que para el resto de las clases de HDV, la tasa anual es de 3.4% (3.5% en promedio para todos los HDV) (ICCT, 2012).

Muchos países (Estados Unidos, Canadá, Europa, China, Corea del Sur, India, Brasil) han estado trabajando en propuestas de regulaciones para los HDV o en sus segundas fases, sin que aún estén próximas a adoptarse, por lo que los potenciales de mejoras en los rendimientos podrían esperarse hasta después de 2020 en las principales regiones o después de 2025 en el resto del mundo, resultando reducciones de consumo de combustible en 2030 de 19-47% con respecto de 2010, dependiendo de la región. Aunque el factor de 3.5% está basado en estudios de Estados Unidos, existe fuerte evidencia de que dicho factor puede ser usado para otras regiones, sobre todo en México y Canadá, puesto que se espera su alineamiento a las siguientes fases de las normas estadounidenses. Además, las mismas armadoras dominan a través de los tres países con similares configuraciones y condiciones de uso entre los tres países (ICCT, 2012).

Adicionalmente a las normas de eficiencia, programas voluntarios como el Smart Way de la EPA, han sido adoptados y han servido para elaborar las normas que han sido adoptadas. Smart Way, lanzado en 2004, trabaja con empresas usuarias del transporte de bienes y armadoras de camiones para mejorar la eficiencia de combustible en la cadena de abasto. Este programa ha servido como modelo para programas similares en el mundo, como Europa, China y México (aquí con el nombre de Transporte Limpio es coordinado por la SCT-SEMARNAT). El programa de California requiere que ruedas de baja resistencia, así como que dispositivos aerodinámicos se instalen en los tractores y las cajas. Estos requerimientos reducirán las emisiones un 6-10% en los tractocamiones que entren a California -30% de los tractocamiones operando en Estados Unidos - (ICCT, 2012).

A diferencia de las políticas en los LDV, las políticas que se proyectan se implementarán para los HDV, no serán suficientes para compensar la duplicación de las emisiones de HDV que ocurrirían entre 2010 y 2030 en ausencia de tales políticas. Como resultado de la demora en el lanzamiento de las políticas, los beneficios totales de la mejora de eficiencia en los HDV no se verán sino hasta después de 2030. Los programas como los de California podrían ayudar a adelantar tales beneficios mientras los beneficios de las flotas de muy bajas emisiones se incorporan. El potencial de eficiencia vehicular, en combinación con el cambio modal y la reducción de actividad, podrían compensar el crecimiento de la actividad vehicular y estabilizar las emisiones de los HDV en los niveles de 2015.

Las políticas para los vehículos eléctricos.

Estados Unidos, varios países de Europa, China, Japón y Corea del Sur han adoptado objetivos no vinculantes para las ventas de PHEV y BEV, pero dada la incertidumbre de la efectividad de las metas no vinculantes, estas no pueden considerarse como adoptadas o próximas a adoptarse. Por otro lado, los incentivos fiscales que se han establecido en muchos países para los vehículos eléctricos son considerados dentro de las estrategias de los fabricantes por cumplir con los niveles nacionales de eficiencia y las normas de GEI, por lo que sus logros deben ser considerados dentro del rubro de eficiencia vehicular. Como resultado, únicamente la regulación de vehículos de cero emisiones (ZEV) adoptada por California puede considerarse como una política para los vehículos eléctricos. Dicha regulación establece un objetivo de 15% en ventas de vehículos ZEV para 2025.

Dentro del potencial de esta tecnología para el resto de las regiones, es posible que para 2030 la cuota de mercado para vehículos ligeros ZEV alcance 8-9% en Estados Unidos, Japón Canadá, Europa, China, Corea del Sur y Australia, y 1-2% para las demás regiones. La tecnología PHEV alcanzaría 1-5% del mercado (ICCT, 2012). Para 2050, existe una mayor incertidumbre sobre la evolución del mercado de vehículos eléctricos, de manera que sólo puede apuntarse, a la luz de los estudios publicados, que es plausible que la cuota del mercado para los vehículos eléctricos se encuentre entre el 20 y el 60%.

Las políticas sobre los Biocombustibles

Las políticas de corto plazo para la reducción del carbón en los combustibles se han topado con la dificultad de realizar con precisión el análisis del ciclo de vida de los biocombustibles (en algunos casos, sobre todo en ausencia de controles estrictos sobre el uso de suelo, el empleo de biocombustibles parece incrementar las emisiones netas de CO₂). Aún no existe consenso sobre las emisiones indirectas de la producción de biocombustibles, particularmente las derivadas de los cambios del uso de suelo, y existen incertidumbres acerca de asuntos como el rebote fósil¹⁸ y otros impactos indirectos¹⁹, pues

¹⁸ Rebote fósil: La adición de un litro de biocombustibles al mercado puede desplazar sólo una fracción de litro de combustible fósil.

en última instancia, no es lo mismo la forma en que el biocombustible puede ser producido a la forma en que es producido.

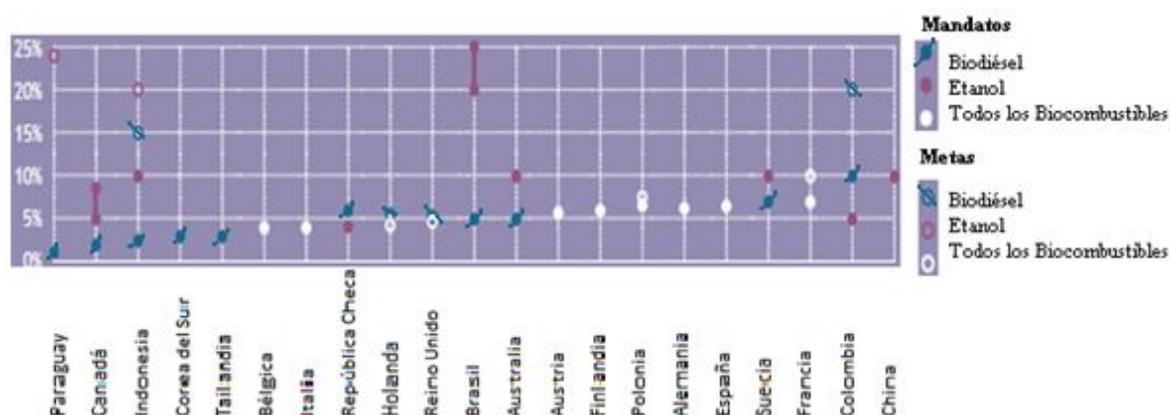


Figura 28. Políticas y objetivos para las mezclas de biocombustibles.

Fuente: (IEA, 2012)

Muchas regiones han implementado subsidios y normas sobre los biocombustibles (Figura 28) que tienen por objeto una amplia variedad de propósitos: mitigación del cambio climático, seguridad energética nacional, promoción de la agricultura local. Sin embargo, dadas las preocupaciones sobre seguridad alimentaria y el retraso de la comercialización de los biocombustibles avanzados, es difícil valorar el desarrollo futuro de los mercados, por lo que la implementación de los biocombustibles, así como los ahorros en emisiones de CO₂ derivados de tres políticas son actualmente inciertos:

- 1) En Europa se discuten las enmiendas a las Directivas sobre las Energías Renovables y la Calidad del Combustible sobre aspectos de cambios de uso de suelo y con objeto de reducir la competencia entre alimentos y biocombustibles. Estas enmiendas pueden mejorar el desempeño ambiental de las políticas pero simultáneamente reducir el tamaño total del mercado.
- 2) En Estado Unidos, la EPA ha reducido repetidamente la directiva sobre el uso de biocombustibles celulósicos bajo la norma de combustibles renovables debido a su limitada disponibilidad. Se esperaba que este combustible brindara la mayor porción

¹⁹ Los cambios en la agricultura pueden afectar las fuentes de emisión tales como la ganadería, el uso de fertilizantes y los arrozales, mientras que cambios en el uso de los desechos y residuos pueden fomentar el incremento en el uso de otros combustibles

de los ahorros de dicha política, sin embargo, hay incertidumbre sobre el cumplimiento de los objetivos programados para 2022.

- 3) En California, la norma combustible de bajo carbono del Air Resources Board fue declarada en contravención con la cláusula de comercio de la constitución estadounidense, provocando incertidumbre en la industria.

Como resultado, dada la incertidumbre de la industria de los biocombustibles y de los ahorros reales de CO₂, es difícil asegurar reducciones sustanciales en el corto plazo a las emisiones de GEI debido al uso de biocombustibles. La excepción del caso es para el etanol de caña de azúcar de Brasil debido a que es una industria bien establecida con una considerable participación en la demanda de combustibles y porque la mayoría de los estudios técnicos apoyan la conclusión de que puede aportar reducciones significativas de emisiones de CO₂ con una intensidad en las emisiones de 30 gCO₂ por cada MJ de etanol producido (15gCO₂/MJ como emisiones directas y 15 gCO₂/MJ como emisiones indirectas por cambio de uso de suelo) lo cual equivale aproximadamente a un tercio de las intensidad de emisiones de la gasolina.

Brasil ha tenido por mandato legal, mezclas de etanol en gasolina del 18 al 25%. Dado su apoyo histórico al etanol y la intención del gobierno de controlar su producción, puede esperarse que la cuota de etanol en los combustibles para PLDV (gasolina) aumente de 50% en 2010 hasta 65% en 2020 (ICCT, 2012).

Las políticas sobre cambio modal y de reducción de la actividad.

Las mejoras en los vehículos y en los combustibles no serán suficientes para revertir el aumento en las emisiones, por lo que, para alcanzar las metas ambientales serán requeridos cambios modales en el transporte de personas y de bienes, así como frenar la expansión de la actividad de los vehículos. Existen varias posibles intervenciones para redirigir el crecimiento de la actividad de los vehículos hacia el transporte público, hacia el no motorizado y hacia el ferrocarril además de reducir la actividad vehicular total. Algunas medidas fiscales y políticas intentan alejar a los conductores de los vehículos privados, mientras que otras opciones de movilidad intentan atraerlos desde allí. Dentro de las primeras se incluyen el cobro por uso de caminos, esquemas de cargos por congestión, el

cobro por estacionarse en vía pública, restricciones para el estacionamiento, e impuestos por combustible o carbono. Las segundas implican las inversiones para el mejoramiento de la infraestructura de transporte, la implementación de redes integradas de transporte y la planeación de uso de suelo. Las opciones de movilidad en este caso incluyen los sistemas BRT, los sistemas férreos para pasajeros y para transporte de bienes, esquemas de vehículos compartidos y sistemas de préstamo de bicicletas.

Tabla 10. Resumen de políticas para el cambio modal y para la reducción de la actividad

País / región	Cambio modal*					Reducción de Actividad	
	BRT	Otros Autobuses	TNM	Tren de Pasajeros	Ferrocarril de carga	Uso de suelo urbano	Mejoras logísticas
Estados Unidos	• •	• •	•	• •	•	•	•
Comunidad Europea	• •	• •	•	• •	•	•	•
China	• •	• •	•	• •	•	•	•
India	• •	• •	•	• •	•	•	•
Japón	• •	• •	•	•	•	•	•
Brasil	• •	• •	•	• •	•	•	•
Canadá	• •	• •	•	•	•	•	•
Corea del Sur	• •	•	•	• •	•	•	•
México	• •	•	•	• •	•	•	•
Australia	• •	•	•	• •	•	•	•

• Próximas • Potenciales

TNM: Transporte no motorizado

* Las políticas de cambio modal *Adoptadas* se incluyen en *Próximas*.

Fuente: (ICCT, 2012)

En la **Tabla 10** se resumen tanto las políticas actualmente aplicadas o en vías de aplicarse como aquellos esquemas potenciales relativos al cambio modal y reducción de la actividad vehicular. De acuerdo con los análisis realizados por el ICCT a los proyectos de transporte²⁰, se desprenden las magnitudes de los cambios modales para el transporte de pasajeros (**Tabla 11**) para las políticas vigentes junto con las próximas a implementarse. México puede esperar 9.5% como cambio modal de vehículos-kilómetro recorridos (VKT) de vehículos privados hacia autobuses en 2030, la mayor expectativa para los países

²⁰ En estos análisis se considera, entre otras cosas, la capacidad añadida (pasajeros/día) y longitud promedio de viaje.

considerados. En caso de mantenerse el ritmo actual de las inversiones para transporte público en México, estaría en condiciones de mantener la estructura modal de la actividad vehicular de 2010, en vez de verse incrementada la participación del automóvil privado, tal como se espera que ocurra en otras regiones. De lograrse dicho potencial, México duplicaría en 2030 (en relación con las políticas en curso y próximas a adoptarse) el cambio modal de los vehículos ligeros hacia el transporte público, llegando a un 19% de participación en la actividad vehicular (**Tabla 12**). Para desarrollar dicho potencial será requerida una combinación de políticas que hagan al vehículo privado menos deseable.

Tabla 11. Cambios modales del transporte de pasajeros bajo las políticas vigentes y próximas a adoptarse.

Región	Proporción de veh-km recorridos en vehículos ligeros que cambian de modo							
	Hacia el autobús				Hacia el ferrocarril			
	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
Estados Unidos	1.1%	2.1%	2.4%	2.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Comunidad Europea	1.1%	2.2%	2.5%	2.9%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%
China	0.2%	3.1%	4.3%	5.5%	0.0%	2.6%	2.6%	2.6%
India	0.6%	3.0%	5.1%	7.3%	0.0%	2.1%	2.1%	2.1%
Japón	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Brasil	0.2%	0.8%	2.0%	3.1%	1.2%	1.7%	1.7%	1.7%
Canadá	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Corea del Sur	0.1%	0.1%	0.5%	1.0%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%
México	0.1%	1.9%	5.7%	9.5%	0.1%	0.1%	1.0%	2.0%
Australia	0.0%	0.0%	0.9%	1.8%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%

Fuente: (ICCT, 2012)

En varias regiones alrededor del mundo se alientan otros cambios modales, por ejemplo, en la Ciudad de México, Nueva York, Berlín, Hangzhou, se realizan esfuerzos para incrementar la infraestructura para el peatón y el ciclista (programas de préstamo de bicicletas, calzadas peatonales y recuperación de vías para el uso de peatones y ciclistas). Dada la carencia de información, la medida conservadora para el potencial de cambio modal hacia medios no motorizados se establece en 1% de la actividad de los vehículos ligeros de pasajeros en 2015, aumentando al 4% del escenario base en 2030 (ICCT, 2012).

Tabla 12. Potencial de cambios modales en el transporte de pasajeros.

Región	Proporción potencial de veh-km recorridos que cambiarían de modo							
	Hacia el autobús				Hacia el ferrocarril			
	2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
Estados Unidos	1.1%	4.3%	6.1%	8.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
Comunidad Europea	1.1%	4.3%	6.3%	8.6%	0.0%	0.3%	0.3%	0.4%
China	0.2%	6.2%	10.8%	16.5%	0.0%	5.2%	6.6%	7.9%
India	0.6%	6.1%	12.8%	21.8%	0.0%	4.3%	5.3%	6.4%
Japón	0.1%	0.3%	0.4%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Brasil	0.2%	1.7%	4.9%	9.2%	1.2%	3.5%	4.3%	5.2%
Canadá	0.1%	0.3%	0.4%	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Corea del Sur	0.1%	0.1%	1.3%	3.0%	2.0%	4.0%	5.0%	6.0%
México	0.1%	3.8%	11.4%	19.0%	0.1%	0.2%	2.1%	3.9%
Australia	0.0%	0.1%	2.3%	5.5%	0.0%	0.2%	0.3%	0.4%

Fuente: (ICCT, 2012)

Por otro lado, el potencial del cambio modal del transporte de carga hacia el ferrocarril se asume que México, dada su pequeña infraestructura en vías férreas, puede desarrollar (al igual que Europa, India y Brasil) un potencial del 40% de incremento en la actividad del ferrocarril para 2030 con respecto de 2015. Otras regiones (Estados Unidos, China, Japón, Canadá, Corea del Sur, Australia) debido a su gran infraestructura férrea podrían lograr incrementos en la actividad del ferrocarril del 20% en 2030 con respecto de 2015. (ICCT, 2012).

Para reducir la actividad de los vehículos privados, puede recurrirse a las regulaciones del uso de suelo con objeto de compactar las ciudades y que sus zonas puedan ser emparejadas con políticas de manejo de la demanda de los viajes (por ejemplo, con restricción de estacionamiento o tarifas por congestión) para reducir la actividad vehicular. Como muestra, en cuatro ciudades de China (Shangai, Beijing, Guiyang y Guangzhou) se ha limitado el número de registro de vehículos privados para reducir la actividad en dichas áreas. Junto con una combinación de planeación del uso del suelo, políticas de manejo de la demanda de viajes, medidas fiscales y políticas de estacionamiento, podría reducirse la actividad vehicular urbana de pasajeros en 2% para 2020 y en 5% para 2030. Por su parte, los incentivos fiscales y cuotas en las autopistas pueden mejorar la logística y disminuir la actividad del transporte de carga. Suiza, Alemania y Austria son ejemplos de tales políticas,

declinando la actividad vehicular y aumentando las toneladas transportadas. De estas experiencias se sabe que puede esperarse, debido a las mejoras en logística, reducciones en la actividad del transporte de mercancías del 3% en 2020 y del 5% en 2030 (ICCT, 2012).

2.4. Publicaciones sobre el tema.

En contexto, existe una gran diversidad de análisis sobre el consumo de energía en el sector transporte y las emisiones asociadas de GEI para diversos países: (Han Hao et. al, 2014) analiza para cada una de las provincias chinas la estructura del parque vehicular por modos, su consumo energético y sus emisiones de CO₂, para concluir que la estructura de transporte y la tasa de motorización determinan ampliamente las emisiones de GEI asociadas al transporte urbano de pasajeros; (Ling-Yun He et. al., 2013) examina cinco escenarios con incorporación de vehículos eléctricos e híbridos como posibles políticas destinadas a reducir el consumo energético y las emisiones de GEI del autotransporte en China; (Nuwong Chollacoop et. al., 2013) explora la posibilidad de usar el etanol como sustituto para el diésel (cuyo consumo dobla al de la gasolina) en Tailandia; (Piyush Tiwari et. al., 2013) examina la causas del cambio en el consumo energético en el sector del transporte en la India, las cuales son comparadas contra las causas de los cambios en países seleccionados, encontrándose al volumen del transporte como causa primera tanto en el transporte de pasajeros como en el de mercancías; (Hannah E. Daly et. al., 2013) modela el crecimiento de la flota vehicular irlandesa para simular el impacto de varias políticas en la demanda de energía de la línea tendencial para 2030. Las estrategias modeladas incluyen la incorporación de vehículos eléctricos, vehículos a gas natural, mejoras en el rendimiento de combustible en los vehículos, requerimientos nacionales sobre mezclas de biocombustibles, así como cambios modales y reducción en la demanda de viajes; (Phillip Y. Lipsy et. al, 2013) examina la eficiencia energética del transporte en Japón desde 1970 y lo compara con Estados Unidos y otros países desarrollados para mostrar que Japón destaca debido a los bajos niveles de actividad y a la estructura modal más que debido a la intensidad de energía modal; (Schipper et al., 2011) analiza las emisiones de GEI del transporte en Estados Unidos de 1960 a 2008 a través de los impactos en la población, crecimiento económico, el cambio modal, la eficiencia y el contenido de carbono; en (Schipper, 2011) se examinan los cambios en el consumo de energía del sector transporte debido a la

economía de combustible en diversos países industrializados; (Monzón de Cáceres et. al., 2009) analiza las tendencias de las emisiones del sector transporte en España en contexto con las emisiones de la Unión Europea; (Yan et. al., 2010) estudian la demanda de energía del autotransporte en China con una metodología similar a la presentada en este estudio; (Li, 2011) estudia las causas del crecimiento del consumo de energía y emisiones asociadas del transporte urbano en las ciudades de la India, así como las políticas para su reducción, mientras que (Zhanga et al., 2011) presentan un estudio de las eficiencias energéticas y exergéticas del sector transporte en China.

En estudios con mayor análisis para el transporte de carga se encuentra que (Heikki Liimatainen et. al., 2013b) analiza las relaciones entre la actividad económica, la demanda de transporte de carga, la eficiencia energética y las emisiones de dióxido de carbono para diferentes subsectores económicos de Finlandia; (Wen Liu et. al., 2013) evalúa tres estrategias para la reducción del consumo energético del sector transporte en China: Vías férreas de alta velocidad, tránsito ferroviario para pasajeros y vehículos eléctricos; (Rachael Nealer et. al., 2012) analiza el consume energético y las emisiones por modo de transporte para la cadena de suministro de diversos sectores industriales de Estados Unidos, proponiendo cuatro escenarios de mitigación en relación con el cambio modal hacia el ferrocarril; (Eom et. al., 2012) analiza las tendencias de las emisiones del autotransporte de carga para 11 países miembros de la IEA con datos de 2007-2010 y hace una comparación entre países.

En artículos relacionados con el consumo energético en el transporte y sus emisiones, pero tratados desde un punto de vista socio-económico se tiene que (Saboori et al., 2014) muestra la relaciones bidireccionales de largo plazo entre las emisiones de CO₂, el crecimiento económico y el consumo energético del autotransporte para todos los países de la OCDE usando series de datos de 1960 a 2008; (Alexandra Hyard, 2013) hace una revisión de las innovaciones no tecnológicas que se han implementado en Europa que han tenido por objeto desarrollar un transporte sustentable; (María J Figueroa et. al., 2013) examina las condiciones que afectan al autotransporte de pasajeros en los países en desarrollo y que pueden ser un instrumento para la reducción de emisiones de CO₂; (Heikki Liimatainen et. al., 2014) a través de la metodología Delphi, pronostica los cambios de PIB

y otros siete indicadores que determinan las emisiones de CO₂ en el transporte de carga Finlandés en un análisis de seis escenarios; (Robert C. Pietzcker et. al., 2013) compara las proyecciones de demanda de energía y de emisiones para China, Estados Unidos y para el mundo bajo cinco modelos de largo plazo; (Slobodan Mitric, 2013) hace un recuento de los préstamos para el desarrollo del transporte urbano que ha otorgado el banco mundial entre 1999 y 2009. En dicha relatoría se incluyen las características generales del Préstamo para el Marco de Políticas de Desarrollo de Crecimiento Verde para el desarrollo de PROTRAM (Programa Nacional de Transporte Masivo) de México; (Musso et. al., 2013) revisa brevemente el problema de la externalización de los costos del transporte con un enfoque en el cambio climático; (Boqiang Lin et. al., 2013) busca las relaciones de largo plazo que afectan el consumo de combustible en el sector transporte de China, para determinar la importancia de variables como PIB, condiciones de los caminos, productividad laboral y precios del petróleo, así como los potenciales ahorros de combustibles en el sector; (Darío Hidalgo et. al., 2013) hace una revisión de las condiciones de movilidad para pasajeros en importantes ciudades latinoamericanas así como de ejemplos de las mejores prácticas implementadas en la región bajo el marco *Avoid-Shift-Improve*; (Mark Jennings et. al. 2013) compara las tendencias de motorización, uso de automóviles y actividad vehicular en Irlanda contra las tendencias históricas mundiales para arrojar luz sobre los orígenes de la duplicación de la flota vehicular en dicho país entre 1990 y 2008; (Jillian Anable et. al., 2012) modela escenarios para la mitigación del consumo energético en el transporte de Reino Unido y contrasta escenarios técnico-económicos contra cambios sociales sobre el estilo de vida.

En relación con México (Carlos Chávez-Baeza et. al., 2014) presenta dos escenarios para la mitigación de contaminantes criterio y de GEI asociados al transporte de pasajeros en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México; (Sheinbaum et. al., 2011) analiza la tendencia del rendimiento de combustible para vehículos particulares; (García et. al., 2011) analiza la factibilidad ambiental y económica del etanol de caña como sustituto de la gasolina para el transporte en México en 2010-2030, al tiempo que (Lozada et al., 2010) discuten el potencial de uso de biodiésel para el transporte en México. Destaca también el trabajo de (Páez, 2010) que analiza el sector transporte Mexicano frente a la transición energética y en (Cravioto et. al., 2013) se realiza una estimación monetaria de las externalidades del

autotransporte en México, incluyendo los GEI. Recientemente fue publicado un estudio conjunto de la Secretaría de Energía en colaboración con la Agencia Internacional de Energía, que presenta una desagregación del consumo de energía del autotransporte para el año 2010. Sin embargo, ninguno de estos estudia las tendencias del consumo a nivel nacional, ni se propone, a excepción del estudio que se hace en (Carlos Chávez-Baeza et. al., 2014) para el Área Metropolitana del Valle de México, una desagregación en submodos del autotransporte para diversos años.

3. El autotransporte en México.

3.1. El autotransporte y la economía.

Como se ha visto, el transporte cada vez en mayor proporción genera problemas ambientales cuyo costo social y económico impactan negativamente en los ámbitos local, nacional y mundial. Sin embargo, no es posible simplemente restringir esta actividad. La movilidad es esencial para el ser humano, la vida de las ciudades y el comercio actual no pueden funcionar sin la intervención de los sistemas de transporte de personas y mercancías. Bajo este contexto, es necesario analizar la importancia del transporte como actividad productiva en nuestro país, haciendo énfasis en las circunstancias del autotransporte.

Para medir el nivel de actividad económica del transporte, puede observarse la contribución del sector al PIB nacional. El transporte se encuentra incluido dentro de la división denominada Transportes, Correos y Almacenamiento, que comprende "unidades económicas dedicadas principalmente al transporte (de personas y de carga), a proporcionar servicios especializados relacionados directamente con el transporte, y al almacenamiento de bienes. En virtud de que las actividades de las oficinas postales y de las mensajerías consisten en transportar bienes, fueron incluidas en este sector" (INEGI, 2007). El Valor Agregado Bruto del grupo (VAB) de transportes (sin considerar las actividades de correos y almacenamientos) genera alrededor del 6% del VAB nacional (**Tabla 13**), ocupando la sexta posición de veinte, según la generación de valor de las distintas divisiones en la economía. La actividad del transporte ha tenido un crecimiento anual promedio de 2.66%, muy parecido al 2.75% de crecimiento general de la economía²¹.

El transporte está fuertemente vinculado con los demás sectores de la economía a nivel general: un aumento del PIB se producirá por un incremento de la fuerza de trabajo, de la productividad, o una combinación de ambas. En el primer caso, se requerirá transportar una mayor cantidad de hombres, en el segundo, una mayor cantidad de mercancías. Así, será

²¹ A precios de 2008 para el periodo 2003-2012. Cálculos propios con datos del Banco de Información Económica del INEGI (BIE-INEGI).

muy probable que un aceleramiento en toda la actividad económica produzca un mayor dinamismo en el transporte, lo cual a su vez será necesario para garantizar el crecimiento continuado del PIB nacional. Por otra parte, existe una clara interrelación del transporte con ciertas divisiones económicas, por ejemplo, con la industria manufacturera, la minería y la electricidad. Esta situación que se explica debido a que la primera de ellas depende de las fuentes energéticas representadas por las dos últimas y del servicio de transporte en las dos etapas que caracterizan el ciclo productivo (producción-distribución). Además de ello, el transporte genera empleos, directamente en la etapa de construcción y operación de la infraestructura y la operación de los servicios de transporte, e indirectamente en sectores de la economía relacionados con el sector transportes. (IMT, 2000)

Tabla 13. Participación del sector Transportes en el Valor Agregado Bruto Nacional.
Cifras en miles de millones de pesos corrientes.

Año	Valor Agregado Bruto	VAB Transportes	Participación del sector
2004	8,300	494	6.0%
2005	9,029	541	6.0%
2006	10,120	603	6.0%
2007	10,962	646	5.9%
2008	11,941	677	5.7%
2009	11,568	668	5.8%
2010	12,723	772	6.1%
2011	14,003	832	5.9%
2012	15,078	918	6.1%

Fuente: Elaboración propia con datos del BIE-INEGI

La producción económica del transporte no está distribuida de manera homogénea entre sus subsectores (**Figura 29**), el autotransporte de carga y el autotransporte de pasajeros generan cerca del 84% del VAB del sector transportes²² (48% del autotransporte de carga y 36% del transporte de pasajeros). En un nivel de desagregación mayor (**Figura 30**), dentro del autotransporte de pasajeros, destaca el transporte colectivo foráneo de pasajeros, el servicio

²² La contribución es de 89% si se incluyen las actividades terrestres de los subsectores *Turístico* y *Servicios Relacionados con el Transporte*.

de taxis y el transporte colectivo urbano y suburbano, como las ramas con mayores participaciones: 41%, 35% y 24%, respectivamente en 2011.

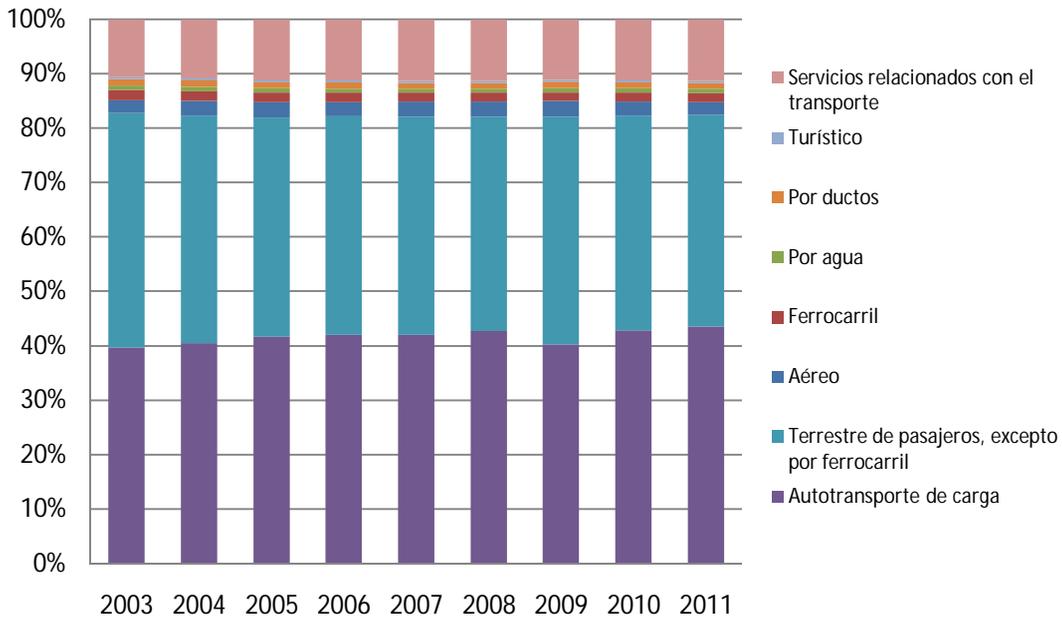


Figura 29. Contribución de cada subsector al total del sector transportes.
Fuente: Elaboración propia con datos de BIE-INEGI.

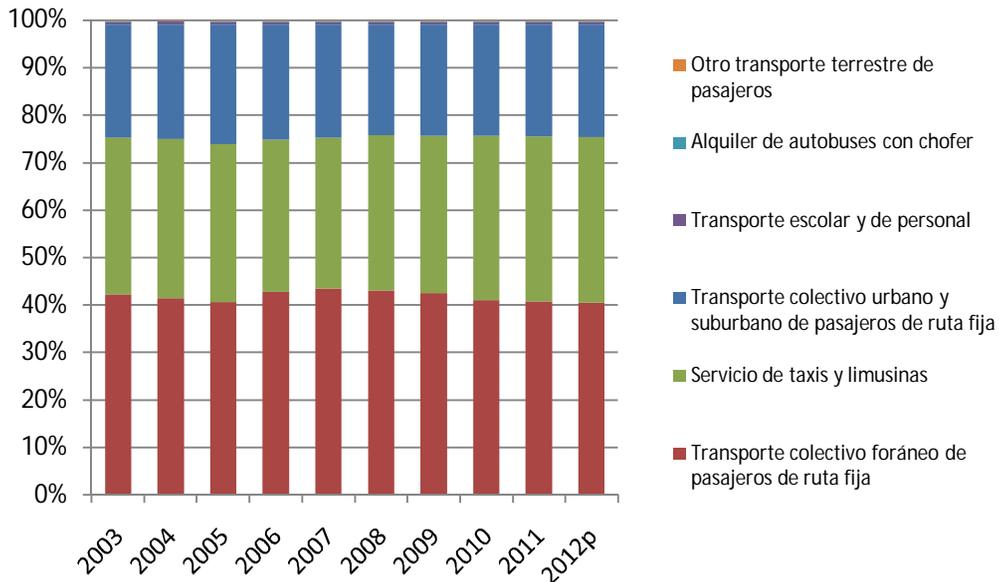


Figura 30. Contribución de cada rama del subsector Autotransportes.
Fuente: Elaboración propia con datos de BIE-INEGI.

La importancia del autotransporte dentro del sector puede apreciarse también al notar que el 95.5% de los pasajeros-kilómetro son realizados por este medio, dejando muy por debajo al avión, con 4.3%. En cuanto a la carga, el autotransporte constituye el 78% del tráfico doméstico. Solamente en lo relativo al comercio internacional, el autotransporte tiene una dominancia más moderada (Tabla 14 y Tabla 15), constituyendo poco más de la mitad en cuanto al valor de las mercancías trasladadas y con unas tasas medias de crecimiento anual (TMCA) menores a las de los restantes sistemas de transporte, sobretodo en comparación con el marítimo y el ferroviario.

Tabla 14. Mercancías importadas por modo de transporte (LAB)
Millones de dólares corrientes

Subsector	TMCA	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Carretero	5.1%	139,415	149,026	154,510	123,845	161,536	178,366
Marítimo	13.0%	55,269	64,272	76,966	52,322	78,034	101,893
Ferrovionario	14.8%	15,350	17,308	20,925	13,792	24,639	30,635
Aéreo	6.2%	20,954	22,832	23,860	19,696	24,821	28,261
Otros	-14.2%	25,142	28,511	32,343	24,730	12,453	11,687
<i>Total</i>	6.5%	256,130	281,949	308,604	234,385	301,483	350,842

Fuente: Elaboración propia con datos de (IMT, 2012).

Tabla 15. Mercancías exportadas por modo de transporte (LAB)
Millones de dólares corrientes

Subsector	TMCA	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Carretero	4.7%	153,736	163,242	168,707	141,896	173,493	193,038
Marítimo	10.5%	59,544	68,130	81,352	53,768	72,798	98,052
Ferrovionario	7.6%	25,254	27,005	26,378	19,657	30,103	36,470
Aéreo	9.3%	8,693	10,285	11,821	11,198	12,897	13,533
Otros	24.5%	2,770	3,213	3,084	3,264	9,183	8,283
<i>Total</i>	6.9%	249,997	271,875	291,342	229,783	298,474	349,376

Fuente: Elaboración propia con datos de (IMT, 2012).

No sólo la producción es un factor que determina la importancia económica de un sector, el consumo también lo es. En el caso de los hogares y las instituciones privadas sin fines de lucro (IPSFL), el transporte constituyó en 2012 el 19% del consumo final (**Figura 31**), sólo por detrás del consumo en alimentación (23%) y de vivienda (20%). Este monto equivale, en números redondos, a 6 veces del Valor Agregado Bruto de la rama del Transporte Terrestre de Pasajeros descrita líneas arriba, o bien, al 13% del PIB nacional. Dos terceras parte de este consumo se relacionan con el transporte privado (adquisición de vehículos y mantenimiento) a pesar de que presumiblemente la proporción de viajes que se realiza en este modo es baja, por ejemplo, en el Distrito Federal sólo el 30% de los viajes se realiza en automóvil particular²³.

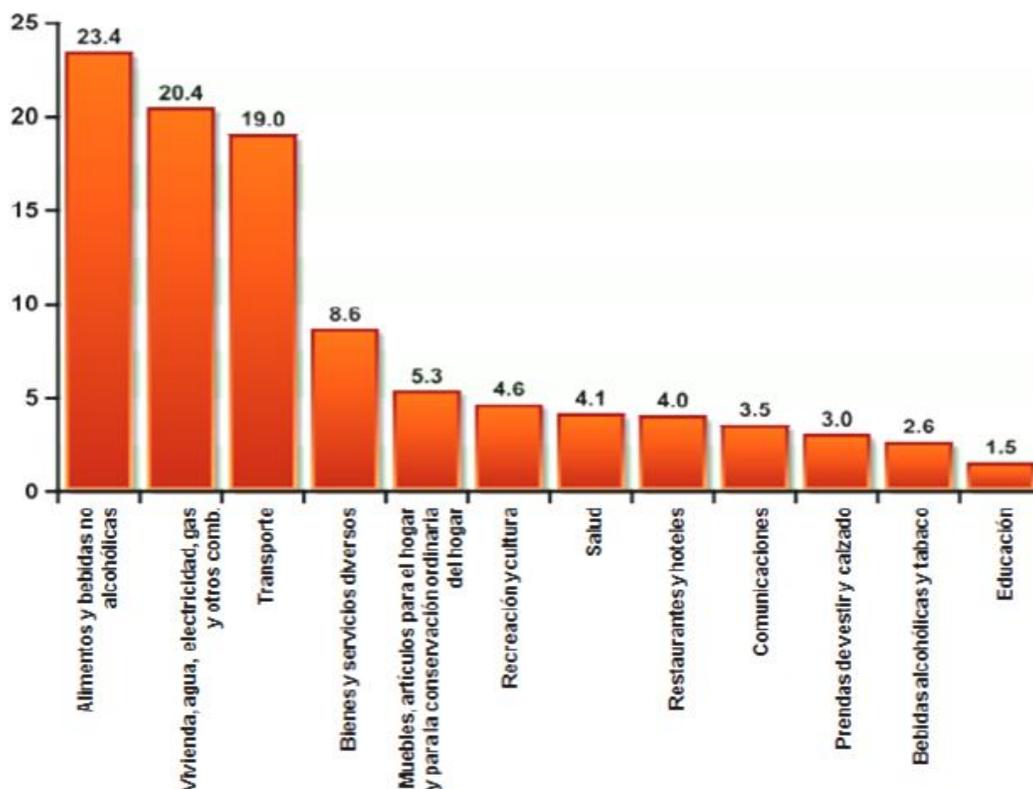


Figura 31. Estructura porcentual del consumo de los hogares y las IPSFL según finalidad, 2012.
Fuente: (INEGI, 2013).

²³ Según (Fimevic, 2000) en el año 2000 la participación del automóvil particular en el total de viajes de la Ciudad de México fue de 16%. Según los resultados del Diagnóstico sobre la Movilidad del Distrito Federal, actualmente el 30% de los traslados se realiza en automóvil particular (Reportaje del 30 de octubre de 2013 recuperado de <http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2013/10/30/925910>).

Como cualquier otra actividad económica, el transporte, requiere de inversión, sobre todo en infraestructura. Para ámbitos interurbanos, el panorama es análogo al de la producción, la mayor proporción de los recursos son destinados al autotransporte (Tabla 16). Salvo algunos años en que los recursos se destinaron en su mayoría a la construcción o modernización y ampliación de la red carretera, en general, el 80% de los recursos de cada año se destinan a su conservación. Por otro lado, entre el 72% y el 88% de la inversión, dependiendo el año, se ha destinado a las carreteras troncales, dejando el resto, entre 12% y 28%, a carreteras alimentadoras y caminos rurales

Tabla 16. Evolución de la inversión pública y privada en el sector transporte, según modo
Millones de pesos de 2011.

Subsector	Promedio	2000	2002	2004	2006	2008	2010
Carretero	93.4%	18,897	9,361	15,491	27,821	12,847	14,228
Ferroviario	1.5%	212	102	99	63	50	1,412
Aeroportuario	2.4%	345	159	451	653	606	406
Marítimo- portuario	2.7%	246	336	233	1,333	630	325
<i>Total</i>		19,701	9,958	16,274	29,871	14,133	16,371

Fuente: Elaboración propia con datos de (IMT, 2012).

Dentro del ámbito urbano, según (ITDP, 2012) la movilidad urbana es un aspecto prioritario para las ciudades, destinándose en 2011 casi el 23% de los recursos de un total de 51,219 millones de pesos de 12 fondos o programas federales analizados. Este documento muestra que en promedio el 76.2% del total de los recursos fue destinado a inversiones para ampliación y mantenimiento de vialidades. En contraparte, en las nueve zonas metropolitanas estudiadas en 2011²⁴, se destinó menos del 20% de los recursos de movilidad a inversiones para el transporte público, el mejoramiento del espacio público, la infraestructura ciclista y la seguridad peatonal. Debe destacarse, como lo hace dicho documento, que las inversiones en infraestructura ciclista y para mejorar la seguridad

²⁴ Las ciudades analizadas albergan una población total de 34.8 millones (31% de la población total de México y 40% del total de la población urbana según el censo de población 2010).

peatonal (movilidad no motorizada) representan solamente el 3.3% de los recursos en movilidad (Figura 33).

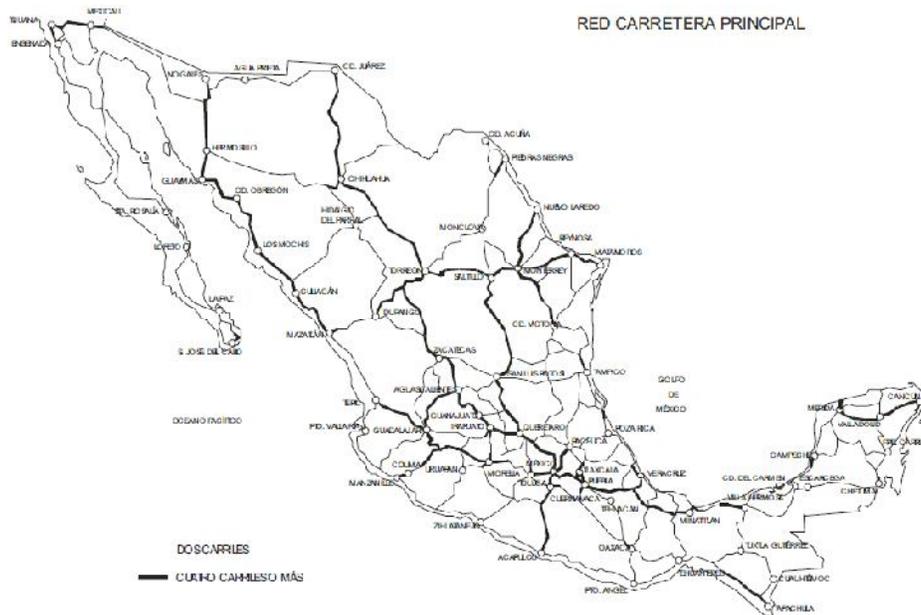


Figura 32. Red Carretera Principal en 2012.
Fuente: (IMT, 2012).

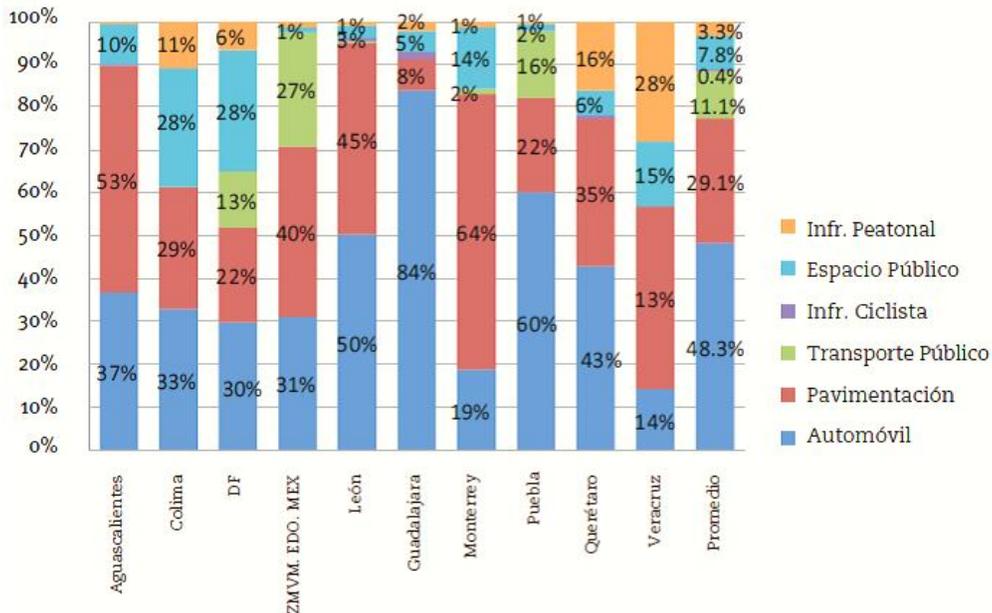


Figura 33. Estructura porcentual de fondos federales para movilidad según destino, 2011.
El monto total ejercido es de 11,763 millones de pesos corrientes.

Fuente: (ITDP, 2012).

3.2. Consumo de energía y emisiones de GEI del autotransporte en México.

Una vez que se ha contextualizado al autotransporte en cuanto a su importancia económica, es importante hacer lo propio en relación con la magnitud del consumo energético y de las emisiones de CO₂ asociadas. El sector transporte es el mayor consumidor de combustibles en México²⁵. La demanda energética del sector creció 79.3% durante el periodo 1990-2011 (Tabla 17), la TMCA para 1990-2000 fue de 2.4%, pero para 2000-2011 ésta aumentó a 3.21%.

Tabla 17. Consumo de combustibles en México por sector.
(Cifras en petajoules)

Sector	1990	2011	Variación
Transporte	1271	2279	79%
Generación eléctrica	895	1659	86%
Consumo propio	591	924	56%
Industrial	915	862	-6%
Residencial	529	576	9%
Agropecuario	68	120	75%
Comercial	52	75	44%
<i>Total</i>	4322	6243	44%

Fuente: Con base en información del BNE (SENER, 1997; 2012)

Al analizar el consumo por grandes modos de transporte, se encuentra que durante 1990-2011 la demanda de combustibles²⁶ para transporte terrestre por carretera o vialidades (autotransporte) creció 83%, el de la aviación 57%, el marítimo 41% y el ferroviario de 8%. Para 2011, el 92% del consumo de combustibles para transportes lo utilizó el autotransporte (Figura 34), seguido por la aviación (5%), el transporte marítimo (1.6%) y el ferroviario²⁷ (1.4%). Dado que la mayoría de los vehículos usan gasolina, el consumo de combustibles

²⁵ Tomando en cuenta el consumo de combustibles para la generación de electricidad y considerando todo el consumo de energía para aviación.

²⁶ Dadas las características de los modos de transporte (la mayoría, exceptuando el eléctrico, utilizan combustibles) el consumo energético coincide con el de combustibles.

²⁷ Aquí se incluye 0.17% de transporte eléctrico, aunque no haga uso propiamente de combustibles.

ha estado dominado por ésta (Figura 35), en 2011 el 66% de los combustibles consumidos fue gasolina, dejando al diésel con el 27% y al queroseno con 5%.

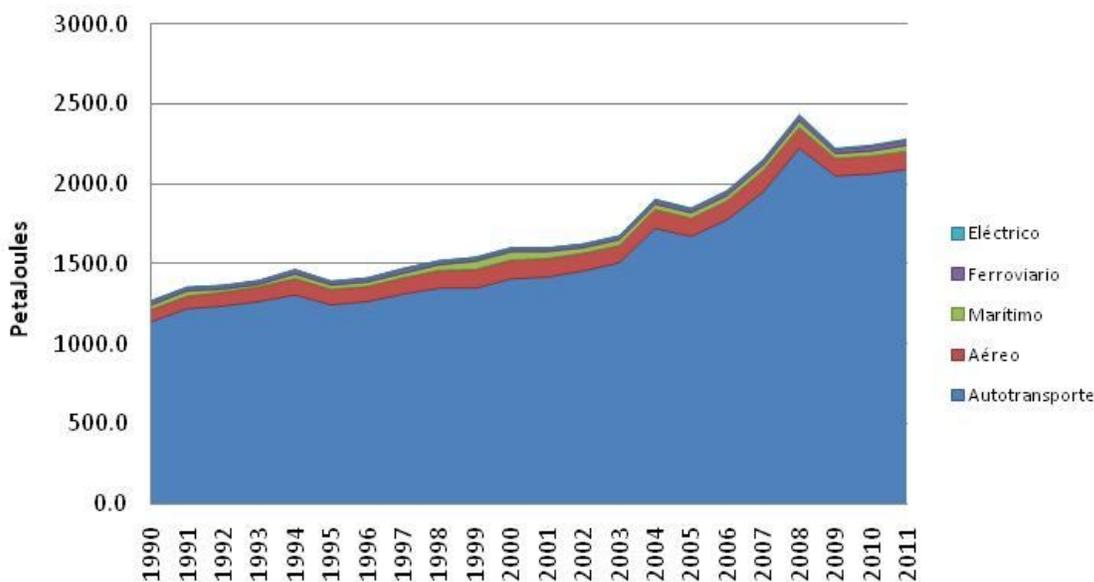


Figura 34. Evolución del consumo energético del sector transporte por modo.
Fuente: Elaboración propia con datos de SIE-SENER

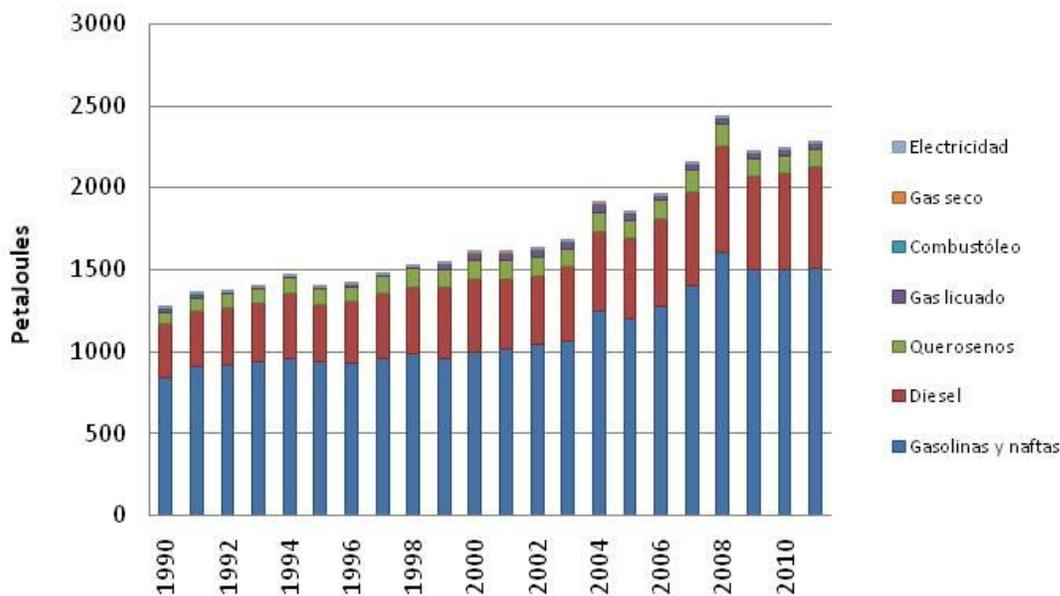


Figura 35. Evolución del consumo energético del sector transporte según combustible.
Fuente: Elaboración propia con datos de SIE-SENER

El sector transporte no sólo es el de mayor contribución a las emisiones de CO₂ asociadas con la producción y el consumo de energía en México, sino el de mayor crecimiento (**Tabla 18**). En 2010, el transporte representó el 39% de las emisiones equivalentes de dióxido de carbono, seguido por la generación eléctrica (28%), el sector industrial (13%), el consumo propio del sector energético (12%), el sector residencial (5%), el agropecuario (2%) y comercial (1%) (**Figura 36**). Obsérvese que, en comparación con el escenario mundial, la proporción de emisiones de CO₂ del autotransporte en México, relativas a la producción y uso de la energía, es muy alta (39% vs. 22%), alcanzándose ya los niveles promedio esperados para 2035 en el mundo. Debido al gran reto que representa la reducción de emisiones en el sector transporte, y dada las particularidades de esta actividad, esta gran proporción exacerba la problemática ambiental.

Tabla 18. Emisiones equivalentes de CO₂ asociadas al consumo de energía nacional por sector (TgCO₂ equivalente)

Sector	1990	2010	Crecimiento	TMCA
Transporte	90	158	76%	2.9%
Generación eléctrica	67	111	65%	2.5%
Agropecuario	5	8	66%	2.6%
Comercial	4	5	28%	1.2%
Consumo propio	38	49	27%	1.2%
Residencial	20	20	11%	0.5%
Industrial	56	53	-7%	-0.3%
<i>Total</i>	<i>279</i>	<i>405</i>	<i>45%</i>	<i>1.9%</i>

Además de los impactos ambientales, el consumo tan acelerado de los combustibles para transporte, en particular, gasolina y diésel, acompañado de la carencia de inversión en refinación nacional, ha dado lugar a un gran incremento de las importaciones de los combustibles para transporte, mientras que la producción se ha mantenido prácticamente constante (**Figura 37**). Si en 1990 se importó el 7% de la gasolina que se consumió en el país y no se importó diésel, en 2011 la proporción de gasolina importada fue del 52% de la demandada y la de diésel fue de 34% de su demanda²⁸ (**Figura 38**).

²⁸ Cálculos propios con base en (SIE-SENER)

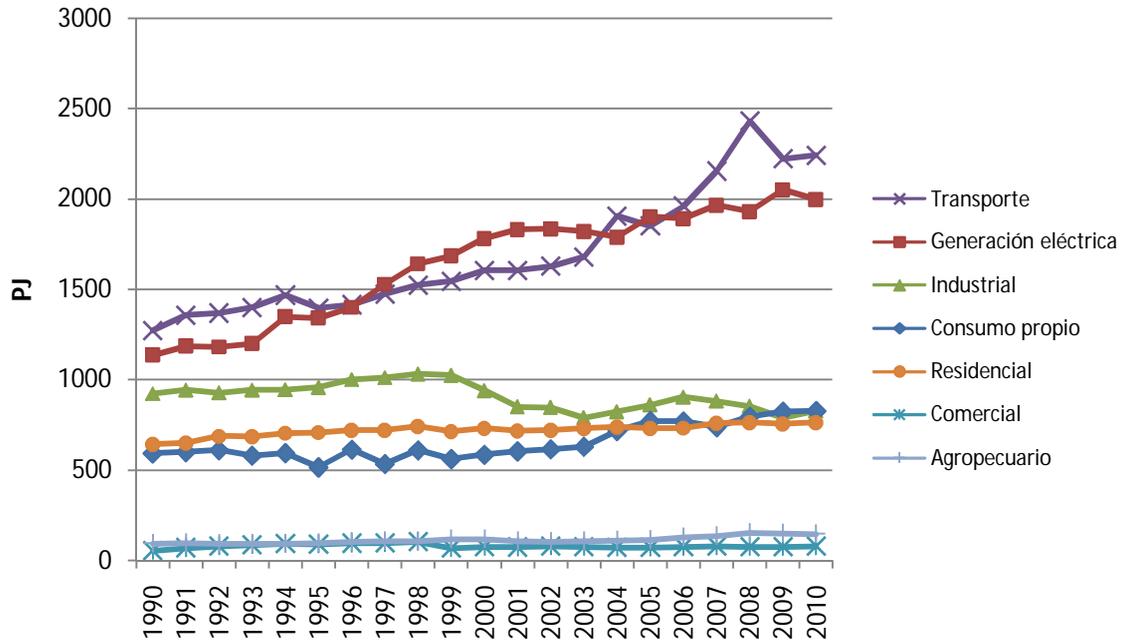


Figura 36. Evolución de las emisiones de CO₂ asociadas a la producción y consumo de energía en México.
Fuente: Elaboración propia con datos de SENER.

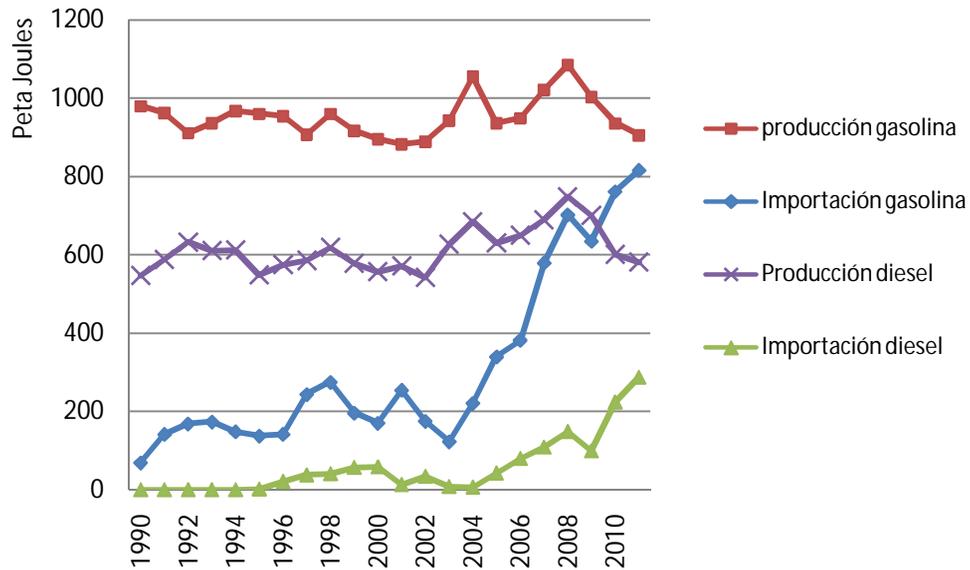


Figura 37. Producción e importación de gasolina y diésel en México (1990-2011).
Fuente: Elaboración propia con datos de SIE-SENER.

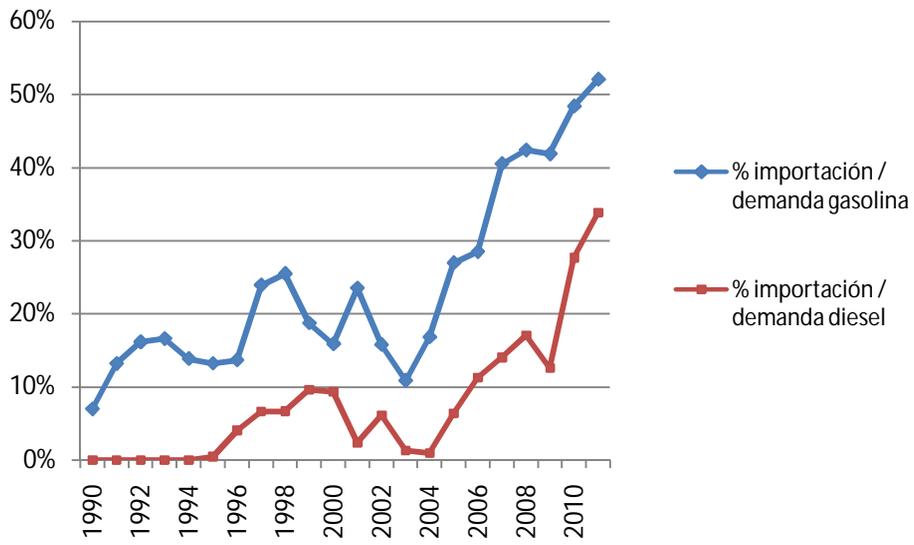


Figura 38. Importaciones de gasolina y diésel en México como proporción de sus demandas (1990-2011).
Fuente: Elaboración propia con datos de SIE-SENER.

4. Metodología y fuentes de información.

4.1. Variables de actividad y rendimiento energético

El autotransporte, el mayor consumidor de combustibles del país, se divide para su estudio en transporte urbano e interurbano, o en transporte de carga y de pasajeros. A su vez, estas categorías pueden subdividirse en otras muy útiles para el análisis del sector. Para cada una de estas, y con el fin de lograr un diagnóstico preciso del uso de la energía, se requiere estadísticas e indicadores de actividad y de eficiencia, tales como:

- Cantidad de vehículos: Además de requerirse el total de vehículos en circulación de cada tipo en determinado año, es conveniente conocer la estructura por edad del segmento. El tipo de vehículo generalmente se refiere al tamaño del vehículo, designado en el transporte de carga como Peso Bruto Vehicular. Para el transporte de pasajeros, los vehículos se clasifican en segmentos como subcompacto, compacto, deportivo, etc.
- Kilómetro recorrido promedio. Es la distancia, en kilómetros, que en promedio recorre cada tipo de vehículo al año.
- Vehículo-km. Es el resultado de multiplicar la cantidad de vehículos de determinado tipo por su kilómetro recorrido promedio anual. De esta manera, el indicador vehículo-km para el total de la flota se obtiene al hacer la suma de todos los vehículos-km de cada tipo.
- Tonelada-km (ton-km). Es el resultado de multiplicar el vehículo-km de cada tipo de transporte de carga por su factor de carga (promedio de toneladas que lleva cada tipo de vehículo por viaje). Así, el indicador ton-km para el total de la flota de carga, se obtiene al hacer la suma total de las ton-km de cada tipo de vehículo.
- Pasajero-km (pas-km). Es el resultado de multiplicar el vehículo-km por el factor de ocupación, el cual es el promedio de pasajeros que lleva cada tipo vehículo por viaje. El indicador pas-km para el total de la flota de transporte de pasajeros, será entonces la suma de todos los pas-km de cada tipo de vehículo.
- Rendimiento de combustible. Es la distancia que recorre cada tipo de vehículo por unidad combustible consumida. Se expresa generalmente en km/l, aunque también

suele expresarse en millas por galón (mpg) sobre todo en países anglosajones. Este indicador es el inverso de la intensidad de combustible expresada en litros/kilómetro, aunque es más común encontrar este indicador expresado como litros/100 kilómetros. De cualquier forma, si la intensidad de combustible aumenta, el rendimiento disminuye, y viceversa.

- **Intensidad modal:** Es la intensidad de combustible de un tipo de vehículo dividida entre el factor de ocupación o de carga. Este indicador es uno de los más importantes, pues muestra el vínculo entre el consumo energía y el objetivo final del transporte: la movilidad. La utilidad de este indicador es poder comparar diferentes modos de transporte en cuanto a la eficiencia con que cumplen su objetivo. Las dimensiones de este indicador son litros de combustible por cada pasajero-kilómetro en el caso del transporte de pasajeros, o litros de combustible por cada tonelada-kilómetro en el caso del transporte de mercancías. Si la intensidad modal no hace referencia al combustible sino más bien a la energía, entonces la unidad puede ser joules/pas-km, debiendo para ello multiplicar la razón anterior por la capacidad calorífica del combustible.

Desafortunadamente, en México no existe información del consumo de energía por modos del autotransporte (mucho menos por tipo de vehículo) y solamente se divulgan periódicamente algunos indicadores de actividad que permiten estimarlo de forma indirecta. La **Tabla 19** muestra la disponibilidad de información en el país para algunos de los indicadores definidos. La carencia de información es significativa, principalmente en lo que tiene que ver con el transporte urbano, del que se desconoce el valor promedio para las ciudades mexicanas del rendimiento de combustible y de los kilómetros recorridos, y del que se conocen los restantes indicadores sólo para algunas zonas metropolitanas. La estructura del consumo de energía por modos del autotransporte debe entonces construirse de forma indirecta a partir de la información disponible y de estimaciones y consideraciones basadas en experiencias internacionales.

Tabla 19. Información del autotransporte disponible en el país.

Indicador	Transporte urbano	Transporte interurbano	Estadística agregada
Cantidad de vehículos por tipo	Z	T	I, M
km recorrido	Z		
Vehículo-km		T	
Ton-km / pas-km		T	
Rendimiento vehicular	A, S	S	S

Estadística agregada: La información se encuentra sin desglosar para transporte urbano e interurbano.
 Z: La información se encuentra en documentos de los gobiernos locales pero sólo para las zonas metropolitanas de México, Guadalajara y Monterrey.
 T: La información se encuentra en documentos de SCT.
 I: La información se encuentra en documentos de INEGI.
 M: La información se encuentra en (Melgar, 2011).
 A: La información se encuentra en el inventario de emisiones de la ZMVM sólo para algunos años.
 S: La información se encuentra en (Sheinbaum et. al., 2011) sólo para automóviles.
 Los espacios en blanco indican que no se dispone de información.

Dada la baja desagregación del balance de energía para el autotransporte en México, el modelo utilizado para el cálculo del consumo energético es el presentado en la ecuación (1). Se propone la desagregación para los diferentes sub-modos del autotransporte (índice i en la ecuación) mostrada en la **Figura 39**, debido a que permite identificar el consumo de cada tipo de usuario final, siendo además en gran parte consistente con las fuentes de información²⁹.

$$E_t = \sum V_{ijkt} D_{ijkt} I_{ijkt} P c_{ijkt} \quad (1)$$

donde E_t es el consumo energético total del sector autotransporte en el año t , V_{ijkt} es la cantidad de vehículos de sub-modo i del año modelo k que usan el combustible j en el año t ,

²⁹ En específico, las categorías de vehículos usadas para los segmentos de automóviles y camiones ligeros son las utilizadas por la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz. Para los vehículos de servicio interurbano se toman las categorías utilizadas por la SCT.

D_{ijkt} es la distancia anual recorrida en kilómetros por el vehículo V_{ijk} en el año t , I_{ijkt} es la intensidad de combustible (en l/km) del vehículo V_{ijk} en el año t y Pc_j es el poder calorífico (en J/ l) del combustible j para el año t .

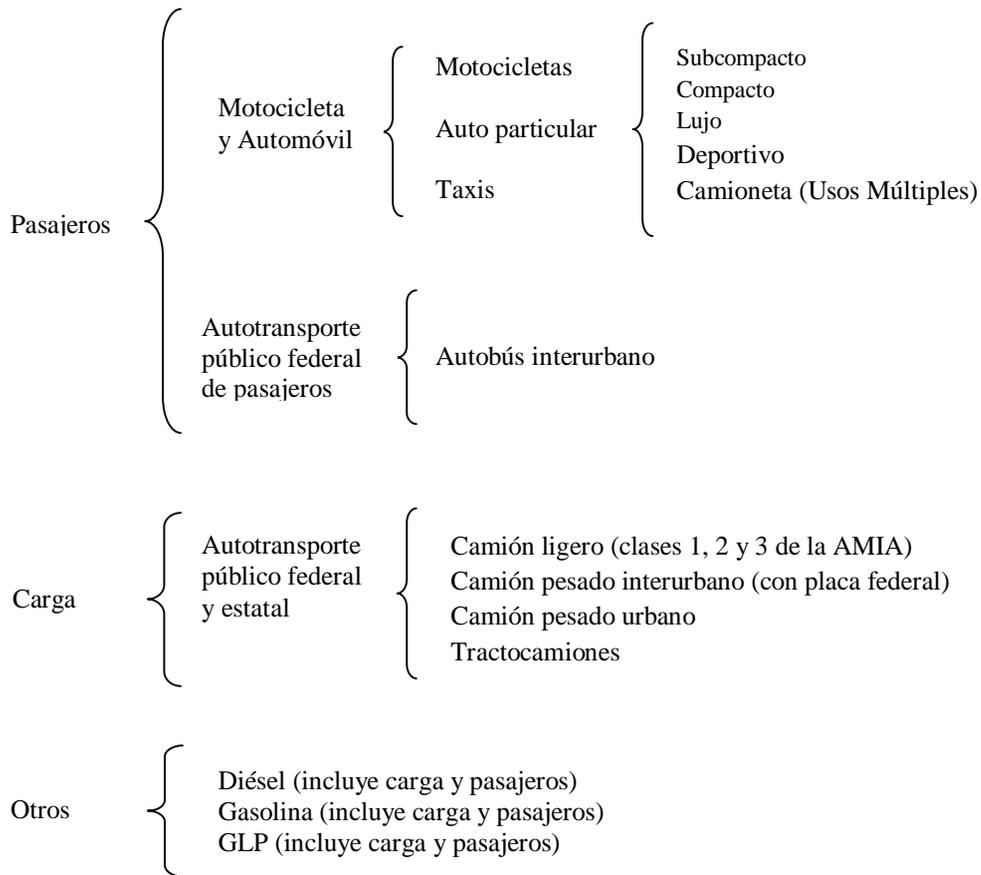


Figura 39. Propuesta de desagregación por modos y sub-modos del autotransporte.

La información del número de vehículos (V_{ijkt}) proviene de (SCT, 2000), (SCT, 2008), (SCT, 2010), (INEGI (2012a) y (Melgar, 2011). Se considera que todas las motocicletas y automóviles utilizan gasolina, lo cual es una muy buena aproximación dado que del total de los automóviles y camionetas que se han vendido en México de 1990 a 2010, el 99.8% son a gasolina (INEGI, 2012b). Se considera además que todos los autobuses interurbanos utilizan diésel. Para el transporte de carga, se supone que el camión ligero utiliza en su gran mayoría gasolina y el camión pesado y los tractocamiones utilizan diésel. Para el gas

licuado de petróleo (GLP), se asume que es consumido en su totalidad por camiones ligeros.

La distancia promedio anual recorrida (D_{ijkl}) se obtiene de la siguiente forma:

a) Para automóvil particular y el taxi se considera constante para todos los años e igual al promedio de las distancia recorridas en las tres zonas metropolitanas más importantes del país reportadas en (Sheinbaum et al., 2010). Estas tres zonas representan el 45% de las ventas totales de vehículos del país y 32% de la flota vehicular (INEGI, 2012a e INEGI, 2012b), para las motocicletas se toma el dato de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (SMA, 2008) por ser el único disponible.

b) Para el autotransporte público federal se utilizan los datos reportados por las fuentes de la SCT referentes al total de toneladas-km y pasajero-km transportados y se ajustan con los datos de (Gutiérrez et. al., 2011a) y (Gutiérrez et. al., 2011b) de distancia media recorrida y de factor de ocupación promedio.

c) Para el transporte de carga urbano (ligero y pesado) se utilizan los datos de ZMVM, aunque se ajustan en algunos años con el consumo de energía.

La información del rendimiento de combustible (el inverso de la intensidad I_{ijkl}) se obtiene, para el caso de los diferentes segmentos del automóvil particular nuevo, de (Sheinbaum et. al., 2011) para los modelos anteriores a 2009; para 2009 y 2010 se estima con base en la variación histórica de los diez años anteriores. Con estos rendimientos (de automóviles nuevos) se obtuvo el rendimiento de la flota en circulación de cada segmento mediante la ponderación de acuerdo a la estructura por edad. Para el taxi se consideró el mismo rendimiento que el de los automóviles subcompactos. Para el rendimiento de combustible de los demás sub-modos de transporte se recurre a (EPA, 2002) y (Davis et. al., 2011).

Los poderes caloríficos ($P_{C_{ijkl}}$) del diésel, la gasolina y el GLP se proponen como los promedios de los valores reportados por el BNE para 1990-2010 (SE, 1997; SE, 2012).

La categoría de otros se construye con la diferencia de los consumos energéticos reportados por el BNE para cada año y lo obtenido a partir del modelo. Esta categoría está asociada al transporte público urbano de pasajeros.

4.2. Metodología para el cálculo del consumo de energía y de las emisiones de GEI.

Las emisiones de CO₂ se calculan usando la metodología y los factores de emisión del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2006) de acuerdo con la ecuación (2).

$$CO_2 = \sum E_{s jt} F_{jt} \quad (2)$$

donde E es el consumo energético en el año t del sector s que usa combustible j y F es el factor de emisión por unidad energética para el mismo año y combustible.

Las emisiones de CO₂ están determinadas por el contenido de carbono en el combustible usado, pues prácticamente la totalidad de dicho elemento, al quemarse el combustible (en cualquier vehículo y para cualquier combustible) se convierte en CO₂. Los factores de emisión F_{jt} se presentan en la **Tabla 20**, donde se asume que el 100% del carbón presente en el combustible es oxidado durante o inmediatamente después del proceso de combustión, independientemente si el CO₂ es emitido como dicho gas o como CH₄, CO, NMVOC o como partículas³⁰.

Tabla 20. Factores por defecto para emisiones móviles de CO₂

Combustible	TonCO ₂ /TJ
GLP	63.1
Gasolinas	69.3
Diésel	74.1
Gas natural	56.1

Fuente: Valores extraídos de (IPCC, 2006)

³⁰ Siguiendo los niveles más detallados de la metodología IPCC, a medida para los que se cuenta con información local más específica, los factores de emisión de CO₂ pueden ser ajustados para tomar en cuenta el carbón no oxidado o el carbón emitido de manera distinta del gas CO₂.

4.3. Metodología para el cálculo de la elasticidad de la demanda.

Se aplica una función estándar de elasticidad constante para estimar las elasticidades del ingreso, precio y flota vehicular para el periodo 1990-2010. Este análisis agregado es útil para determinar el peso relativo de dichas variables en la demanda de energía para el autotransporte en México. Se asume que

$$\ln E_t = B + A_1 \ln P_t + A_2 \ln Y_t + A_3 \ln C_t + A_4 \ln T_t$$

donde E_t es la demanda de gasolina en el año t , P_t es el precio de la gasolina en el año t en pesos constantes de 2003, Y_t es el producto interno bruto (PIB) per cápita en México en el año t en pesos constantes de 2003, C_t es el tamaño de la flota vehicular de automóviles y T_t es la cantidad de camiones ligeros de carga.

4.4. Análisis de sensibilidad

Se incluyó en el presente estudio un análisis de sensibilidad con el fin de determinar, por un lado, a cuáles parámetros generales es más sensible el modelo y, por otro, qué rangos de variación en los resultados pueden esperarse en caso de que los parámetros considerados no sean del todo exactos. Para este análisis se consideró la variación de los siguientes parámetros: la tasa de crecimiento anual de la venta de vehículos, el factor de emisión de vehículos a gasolina y el de vehículos a diésel, la actividad vehicular y el rendimiento de consumo de combustible. La incertidumbre típicas para los factores de emisión son del 2 al 5%, mientras que para la actividad vehicular es de 5% (IPCC, 2006). Una de las ventajas de la forma en que está construido el presente modelo consiste en que en él, estos niveles típicos de incertidumbre están limitados y controlados, pues la estimación del consumo energético y de sus emisiones de CO₂ asociadas están conectadas y acotadas por el enfoque de arriba hacia abajo del BNE. Es decir, en el momento en que una de los parámetros seleccionados varíe más allá de lo permitido por el consumo total del BNE, la categoría *Otros* arrojará consumos energéticos negativos.

4.5. Metodología para los escenarios base y de mitigación.

Escenario base

Para estimar el consumo de energía y las emisiones de CO₂ de la línea tendencial o escenario base, la metodología que se sigue es muy similar a la presentada con la ecuación (2), sólo que en lugar de utilizar las cifras históricas para la cantidad de vehículos, su rendimiento de combustible y su actividad vehicular, se utilizan las proyecciones de estos parámetros para los años 2011 al 2050. En cuanto al rendimiento de combustible y a la actividad vehicular (distancia recorrida) del transporte interurbano, estos se hacen variar de acuerdo a su tendencia histórica. Por su parte, la actividad vehicular de los modos restantes y el poder calorífico de todos los combustibles se mantienen constantes. La estimación más elaborada corresponde a la de la población vehicular, pues para su proyección es necesario considerar, además de las ventas históricas, una tasa de desecho, como se muestra en la ecuación (3).

$$V_{it} = \sum [V_{i(t-1)}(1 + Td_{im}) + VEN_{i(t-1)}(1 + G_{it})] \quad (3)$$

donde V_{it} es la cantidad de vehículos del tipo i en el año t , $VEN_{i(t-1)}$ son las ventas de vehículos nuevos del tipo i en el año anterior a t , G_{it} es la TMCA de las ventas de los vehículos tipo i en el año t , Td es la tasa de desecho vehicular y es dependiente de la antigüedad m del vehículo y de su tipo i .

El nivel de ventas para el primer año de la proyección (2011) proviene de (INEGI, 2012b). Las TMCA de ventas para cada tipo de vehículo son estimadas a partir de los datos reportados por INEGI y las mantenemos constantes hasta el 2050. El factor de desecho sólo se calculó para los distintos segmentos de automóviles particulares mediante el análisis hecho a la estadística de (Melgar). Para los demás tipos de vehículos no se pudo estimar dicho parámetro, por lo que la ecuación (3) no se les aplicó. En este caso, para la estimación de la flota de tales tipos de vehículos se utilizaron las tendencias históricas de crecimiento, prescindiendo por tanto del factor de desecho y de la tasa de crecimiento de ventas.

Escenarios de mitigación.

En una primera expansión de la ecuación (2), tenemos que la energía del sector del autotransporte se calcula para un año en particular como:

$$Et = V_M D_M R_M P C_g + V_P D_P R_P P C_g + V_L D_L R_L P C_g + V_A D_A R_A P C_d + \\ + V_C D_C R_C P C_d + V_T D_T R_T P C_d + E_o \quad (4)$$

donde M , P , L , A , C y T son los subíndices para motocicletas, automóviles privados, camiones ligeros, autobuses, camiones pesados y tractocamiones, g y d son los subíndices para gasolina y diésel y E_o representa la energía consumida por otros vehículos.

Una disminución de la energía consumida de un año a otro implica la disminución de uno o varios de los sumandos en la ecuación (4), lo que a su vez se desprende de una reducción en V , D , R o Pc , o bien, en una combinación de ellos que produzcan una reducción neta del término. De aquí se desprende que para construir un escenario que mitigue el consumo energético y las emisiones de CO_2 deberá fomentarse alguna de las siguientes variaciones:

- a) Modificación de la tasa de desecho vehicular: Incrementar la velocidad de desecho de los vehículos (sin variar las ventas) implica sustituir los vehículos existentes por unos con tecnologías más limpias a una mayor velocidad de lo que se realiza actualmente, lo que se expresa en la ecuación (4) como una disminución de V . Este cambio pudiera ser fomentado, por ejemplo, con la extensión del programa Hoy No Circula de la ZMVM a otras Entidades Federativas y/o con impuestos vehiculares que gravaran en mayor medida a los vehículos menos eficientes³¹.
- b) Disminución de la distancia recorrida por los vehículos: Reducir D en la ecuación (4) impacta en la reducción de consumo de energía y lo hace en mayor medida cuando se relaciona con la distancia recorrida por el tipo de vehículo con mayor población y con menores factores de ocupación. Se sigue de ello que fomentar la migración de viajes en automóvil privado, taxi o motocicleta, a viajes en sistemas

³¹ Se asume aquí que los vehículos nuevos son lo suficientemente más eficientes como para motivar una renovación de los vehículos.

BRT puede reducir en gran medida el consumo energético. Desde luego que esto sólo es posible gracias al hecho de que los autobuses utilizados en el BRT tienen factores de ocupación mucho mayores al de los automóviles privados³².

- c) Aumento de la eficiencia de los vehículos nuevos con mayor velocidad a la tendencia histórica: El rendimiento de combustibles de los vehículos nuevos ha variado muy poco (al menos durante los últimos 20 años); aumentar este parámetro o lo que es lo mismo, disminuir la intensidad de combustible, a mayor velocidad que la manera en que la flota aumenta, implica reducir el consumo energético. Cuanto mayor sea la diferencia entre la velocidad con la que crece la flota vehicular y la rapidez con la que aumenta su rendimiento, mayor será la necesidad de aplicar medidas alternas a la reducción del consumo energético y de emisiones. La adopción de una norma estricta que limite la intensidad de combustible de los vehículos y que obligue a reducirla cada vez más, favorecerá en la reducción del parámetro R en la ecuación (4).
- d) Disminución de las ventas de los segmentos menos eficientes: Uno de los segmentos para los que se espera un gran crecimiento en sus ventas es el de las camionetas; disminuir V en la ecuación (4) a través de una reducción de la tasa de crecimiento de ventas pudiera no ser fácil de lograr sin aumentar las ventas en otro segmento, sin embargo, es preferible tener aumentos de la flota vehicular en segmentos de menor intensidad de combustible, como los vehículos subcompactos, que en otros que requieren de mayor combustible para moverse, como las camionetas. Este efecto puede lograrse con tasas impositivas a las emisiones de CO_2 , o lo que es equivalente, impuestos vinculados al rendimiento de combustible.
- e) Abatimiento de la tasa de emisión de CO_2 : Si se observa la ecuación (1) es posible disminuir las emisiones de CO_2 de un año a otro si el producto energía por factor de emisión disminuye. Con esta idea, la incorporación de vehículos eléctricos constituye un potencial escenario de mitigación, pues si bien el factor de emisión de la generación eléctrica en México puede ser un par de veces mayor al del vehículo de combustión interna, la intensidad de consumo energético del vehículo eléctrico es

³² Los factores de ocupación del BRT son casi de 100 veces el del automóvil de uso particular (160 vs. 1.7)

mucho menor a la del vehículo de combustión interna. Con ello, se obtiene una reducción neta en el consumo energético y sus emisiones asociadas.

Las estrategias anteriores pueden (y deben) combinarse y complementarse de tal manera que el producto VDR de la ecuación (4) disminuya con respecto al del año anterior. De manera general, la flota vehicular V crecerá más rápido que lo que disminuye D y R , por lo que será necesario aplicar varios esquemas de mitigación simultáneamente para lograr estabilizar tanto el consumo de energía como las emisiones de CO_2 , sobretodo cuando es factible que aparezca algún efecto de rebote o retroalimentación en el uso de los automóviles.

Bajo las consideraciones anteriores, se diseñaron ocho escenarios de mitigación del consumo de energía y de emisiones de CO_2 para el autotransporte en México, para los cuales se asume que comienzan a operar simultáneamente en 2013:

- 1) Mayor rendimiento de combustible de los vehículos a gasolina.

Este escenario muestra la evolución del consumo energético y de emisiones de CO_2 en el caso de que se implementara y se observara una norma que tuviese como objetivo el aumento de rendimiento de combustible en los vehículos nuevos. Hasta el año 2013 México no contaban con ningún tipo de norma para mejorar los rendimientos de combustible en los vehículos nuevos³³ o sus emisiones de CO_2 . En el diseño de este escenario se consideramos etapas: en la primera de ellas (2014-2016) el rendimiento de combustible de los automóviles y camiones ligeros nuevos sigue al proyecto de norma mexicana NOM-163 SEMARNAT-SENER-SCFI-2013, aumentando entre 7% y 11% al año la eficiencia; sin embargo, dado que una norma que gobierne únicamente durante cuatro años la mejora de rendimiento de combustible es insuficiente, en la segunda etapa del escenario (2017-2050) el aumento en la eficiencia continúa progresivamente a un paso mayor a la tendencia histórica del escenario base, para alcanzar en 2050 un rendimiento 100% mayor al de 2016. Con esta selección, los rendimientos del combustible de los vehículos nuevos crecen en esta

³³ Al menos hasta 2004, México e Islandia, eran los únicos países de la OCDE que no contaban con normas en este sentido (Feng et. al., 2004)

etapa a un ritmo de 2.2% anual, mientras que los propuestos por el Estado de California para la actualización de la norma CAFE (*Corporate Average Fuel Economy*) (EPA-DOE, 2011) crecerían a un ritmo de 5.1% en 2017-2025 ³⁴, para luego tener nula variación en 2026-2050 si consideramos que no existe reglamentación para tal periodo. Con respecto a los camiones ligeros, el rendimiento exigido es moderado al considerar exigible al segmento la cifra más baja según la norma NOM-163, correspondiente a los camiones de mayores dimensiones, sin embargo, se les exige el mismo incremento que a los automóviles: el doble de rendimiento en 2050 con respecto a 2016. En este escenario, el rendimiento de combustible de las motocicletas también aumenta continuamente al mantener en todo momento la proporción actual con respecto al rendimiento de los automóviles subcompactos; no se utiliza la tasa de crecimiento del 1% sugerida por (ICCT, 2012) para las motocicletas, porque con tal factor estos vehículos alcanzarían en 2050 rendimientos inferiores a los correspondientes a los vehículos subcompactos, situación poco creíble. Cabe aclarar que no se considera en el cálculo variación alguna en las tendencias de ventas ni efecto alguno de rebote debido al aumento del rendimiento de combustible. Las razones para ello son, en el primer caso, que los rendimientos aumentan con la misma proporción para todos los segmentos de vehículos, por lo que no hay motivo para suponer que se modifiquen por estos cambios las preferencias de los consumidores. Para el segundo caso, el efecto de rebote, se asume que esta consecuencia podría ser anulada mediante una mayor oferta de transporte público (considerada en el escenario 7) y a través de instrumentos, tales como los impuestos al uso del carbón, que inhiban el uso del automóvil particular. Además de ello, los altos niveles de congestión vial en las ciudades debido al alto crecimiento de las flotas vehiculares, podrán fungir en parte (y sólo en parte, pues debe regularse la expansión de las zonas urbanas mediante la administración de los usos del suelo) como auto-regulador del uso del automóvil.

2) Mayor rendimiento de combustible de los vehículos a diésel.

De manera similar al anterior, este escenario propone el aumento de eficiencia del consumo de combustible en dos etapas. En la primera etapa (2014-2016) el rendimiento de

³⁴ O bien, 4.8% para 2011-2025 según (ICCT, 2012)

combustible de los vehículos nuevos sigue a lo propuesto en (ICCT, 2011) con incrementos anuales de entre 2% y 3%. En la segunda etapa (2017-2050) el aumento de rendimiento se diseña de la misma manera que para el de los vehículos a gasolina, es decir, se alcanza en 2050 una eficiencia del doble que en 2016. Aquí, dada la actual estructura modal del transporte de carga, en la que el autotransporte realiza el 78% del tráfico doméstico y la mitad del internacional, podría ser irrelevante cualquier efecto de rebote, sobre todo cuando aún con los incrementos supuestos del rendimiento de combustible, la intensidad modal del autotransporte de carga queda muy por arriba de la de otros medios, como el ferroviario y el marítimo.

3) Restricción del crecimiento de las camionetas de pasajeros.

Dado el gran aumento de ventas en los últimos años de las camionetas de pasajeros (segmento de Usos Múltiples) se diseña este escenario para analizar los efectos de una disminución progresiva las ventas del segmento, hasta alcanzar en 2050 los mismos niveles que en 2013. Con esta suposición, el máximo nivel de ventas del segmento se tiene para 2031 y las camionetas que no se venden, en comparación con el escenario base, son compensadas por vehículos subcompactos. Como ejemplo del instrumento requerido para este escenario, puede mencionarse la adopción de gravámenes proporcionales a la intensidad de combustible (o bien, sobre el rendimiento de combustible) usado en cada vehículo.

4) Uso de automóviles eléctricos

Este escenario considera la incorporación gradual de automóviles eléctricos (incluyendo taxis) camiones ligeros y motocicletas sin modificarse los niveles de ventas de cada segmento ni los factores de desecho del escenario base. Dado que en el primer escenario de aumento de eficiencia no se limita la incorporación de vehículos híbridos (y de hecho es necesaria para alcanzar los rendimientos de combustible propuestos), aquí son considerados únicamente vehículos totalmente impulsados por baterías (*battery powered electric vehicle*, BPEV) con un consumo eléctrico dado por la actual oferta del mercado (consultado en

EPA-DOE) y con una reducción de su consumo energético del tanque a la rueda, TTW³⁵, de 1% anual³⁶. Los factores de emisión por la generación de energía eléctrica para el sistema mexicano son tomados de (Sheinbaum, 2013) hasta 2025, de 2026 a 2050 se obtienen ajustando los valores previos a una curva exponencial, con la cual cada vez se obtienen menores reducciones del factor de emisión. Se considera una penetración gradual de la tecnología de tipo sigmoide, de tal manera que en 2050 el 20% de los automóviles vendidos son BPEV.

5) Cambio modal a sistemas BRT

En este escenario se considera la sustitución de viajes que se realizan en transporte privado por viajes en sistemas de autobuses rápidos (o *Bus Rapid Transit*, BRT). Se mantiene el parque vehicular con la misma dinámica de crecimiento, pero se disminuye en un 50% el recorrido de los automóviles de uso particular, el de los taxis y el de las motocicletas. La sustitución se hace de manera gradual y de manera que en 2050 los vehículos que han reducido su recorrido son la mitad de los automóviles privados y la quinta parte de los taxis y las motocicletas. Es muy importante señalar que este escenario se diseñó considerando que el comportamiento de los conductores de vehículos eléctricos no cambia, es decir, que los costos de la energía y los incentivos para estos vehículos no los impulsa a realizar un cambio modal hacia el transporte público. Por otro lado, la hipótesis del crecimiento del BRT toma en cuenta el gasto energético adicional de los autobuses que absorben los viajes de los usuarios que han cambiado de modo de transporte; los parámetros considerados son: un rendimiento de combustible del BRT de 1.1 km/l (INE, 2007) con una tasa anual de crecimiento igual al de los camiones diésel en el escenario de aumento de eficiencia, un factor de ocupación BRT de 160 pasajeros por autobús con un recorrido diario promedio de 280 km/día (Power Mex, 2013) y un factor de ocupación del auto privado de 1.7 pasajeros por automóvil (Fimevic, 2000). Este escenario de mitigación asume que las inversiones

³⁵ Las emisiones TTW son las atribuibles al uso del combustible una vez que este se encuentra en el tanque del vehículo. Las emisiones *Well to Tank* (WTT) están relacionadas con la producción y el traslado del combustible a las estaciones de servicio, así como las derivadas del cambio de uso del suelo.

³⁶ Fuente: Cálculos propios con información de (Van Vilet, 2011)

para el crecimiento y mejoramiento de redes de transporte como el Optibús, Metrobús, Macrobús y Mexibús son suficientes para satisfacer la demanda de movilidad y seguridad.

6) Uso de mezcla etanol-gasolina

La proporción de etanol que es susceptible de usarse en el transporte depende de la forma en que se le utilice; hay tres opciones para ello (Islas et. al., 2007):

- a) Usar el etanol para la producción de etil tert-butil éter (ETBE)³⁷, aditivo oxigenante que aumenta el índice de octanos y reduce la emisión de monóxido de carbono y la emisión de hidrocarburos sin quemar. El ETBE se mezcla con la gasolina en proporción de hasta 15% en volumen y está compuesto de 48% en volumen de etanol y 52% de isobutileno.
- b) Usar etanol anhidro mezclado directamente con gasolina, actuando como oxigenante. De esta forma puede ser usado en proporciones del 5 al 26% en volumen.
- c) Usar el etanol anhidro como combustible en motores con motores modificados para ello, denominados flex-fuel. De esta manera el etanol puede ser mezclado con gasolina en proporciones superiores al 26% en volumen.

En este escenario se considera que la gasolina vendida en el país a partir de 2013 contiene una porción de etanol para usarse principalmente en los motores convencionales. Debido a la escasa producción actual de etanol en el país y a que el desarrollo de esta industria no puede darse en pocos años, se considera una penetración del biocombustible muy lenta en los primeros años posteriores a 2013. Se consideran las fases de emergencia, maduración y saturación de la tecnología, de manera análoga a la propuesta en (Islas et. al., 2007) asumiendo que la penetración del etanol se da como una sigmoide hasta alcanzar en 2050 el 30% de mezcla en la gasolina vendida en el país. Con esta velocidad de penetración, la proporción de etanol en gasolina en 2035 sería del 9.5%, lo cual no queda muy lejos del 8% prevista por (IEA, 2012) anotada en la sección de antecedentes. En la evaluación de este

³⁷El ETBE es un sustituto del Metil tert-butil éter (MTBE) por ser este último un potencial cancerígeno humano

escenario no se consideran las emisiones de tipo *Tank to wheel* (TTW) puesto que son neutras en cuanto al ciclo del CO₂, pero sí se consideran las emisiones *Well to tank* (WTT), principalmente las debidas al cambio del uso del suelo. Se asume además que el etanol está comercialmente disponible, ya sea para la producción del ETBE o como etanol anhidro para su mezcla directa con gasolina. El etanol restante que no puede ser usado en motores convencionales, vendría a ser consumido por vehículos con motores *flex-fuel* (que ya son comercializados) los cuales pueden usar el etanol en cualquier proporción. Asimismo se asume que el desempeño de los motores (la intensidad de combustible) no cambia significativamente con el uso de las mezclas consideradas, pues si bien el poder calorífico del etanol pudiera ser menor, el efecto antidetonante aumenta la eficiencia del motor. Por supuesto, se espera que existan los subsidios e incentivos necesarios para el desarrollo de la cadena productiva de los biocombustibles.

7) Uso de mezcla biodiésel-diésel

En este escenario se asume que el diésel vendido en el país contiene a partir de 2013 una porción de biodiésel. La penetración del biocombustible aumenta también según una sigmoide como se sugiere en (Islas et al, 2007) pero ajustándola nuevamente a nuestros periodos. Así, en 2050, se llega a una concentración del 20% de biodiésel en la mezcla; en este caso, al 2035 la introducción es del 7%. Se consideran también sólo emisiones WTT y que el desempeño de los motores no cambia significativamente.

8) Reducción de la tasa de crecimiento de los vehículos ligeros.

Este escenario de mitigación analiza el consumo energético del autotransporte y de sus emisiones de CO₂ cuando la TMCA de venta de automóviles de pasajeros (incluidas las camionetas y exceptuando las motocicletas) y de camiones ligeros logra reducirse desde el año 2013. Con ello, la flota de vehículos ligeros a gasolina se mantiene en constante crecimiento, pero ya no lo hace de manera tan acelerada como en el escenario tendencial. Las acciones requeridas para esta reducción estarán en sintonía con los escenarios aquí trabajados (principalmente el fomento del transporte público) y con otros esquemas ya apuntados en la sección de antecedentes (impuestos e incentivos). De hecho, como un

efecto colateral de la ampliación de los sistemas BRT, podría darse una reducción importante en las TMCA de la venta de vehículos. El principal objetivo de este escenario será determinar la reducción en las TMCA necesaria para lograr una estabilización de las emisiones de CO₂.

4. Resultados: 1990-2010.

Flota vehicular por categoría

Entre 1990 y 2010, la flota de vehículos de pasajeros y carga en circulación creció a un ritmo de 6.3% anual, pasando de 7.5 millones en 1990 a 25.7 millones en 2010. De conformidad con la discusión hecha en la sección de metodología, dado que la distancia recorrida, el rendimiento de combustible y el poder calorífico de los combustibles permanecen prácticamente constantes, el crecimiento de la flota vehicular es la causa principal del aumento en el consumo de combustibles y de emisiones de CO₂. La **Tabla 21** muestra la cantidad de vehículos para años clave. Para el año 2010, el vehículo particular constituyó el 62% del total, seguido por el camión de carga ligero con el 28%, dejando a las demás categorías con 10%.

La mayor parte de los automóviles privados corresponden al segmento de compactos y subcompactos (**Figura 40**) pero la TMCA de las camionetas de los últimos diez años supera a las de los demás segmentos. Esto es relevante para el consumo de combustibles y emisiones de CO₂, toda vez que las camionetas tienen rendimientos de combustible menores que los de los vehículos compactos y subcompactos.

Tabla 21. Flota vehicular en México según tipo.

Modo	1990	2000	2010
Automóvil privado	63.1%	62.6%	62.2%
Camión ligero	26.3%	27.8%	27.9%
Motocicleta	3.3%	2.4%	4.5%
Taxi	3.5%	2.9%	2.0%
Camión pesado urbano	0.3%	1.4%	1.4%
Tractocamión	0.7%	1.1%	0.8%
Autobús urbano	0.7%	0.7%	0.5%
Camión pesado interurbano	1.7%	0.8%	0.5%
Autobús interurbano	0.4%	0.5%	0.3%
<i>Total</i>	7,525,013	12,473,394	25,737,555

Fuente: Elaboración propia con datos de (Melgar, 2011), INEGI y SCT.

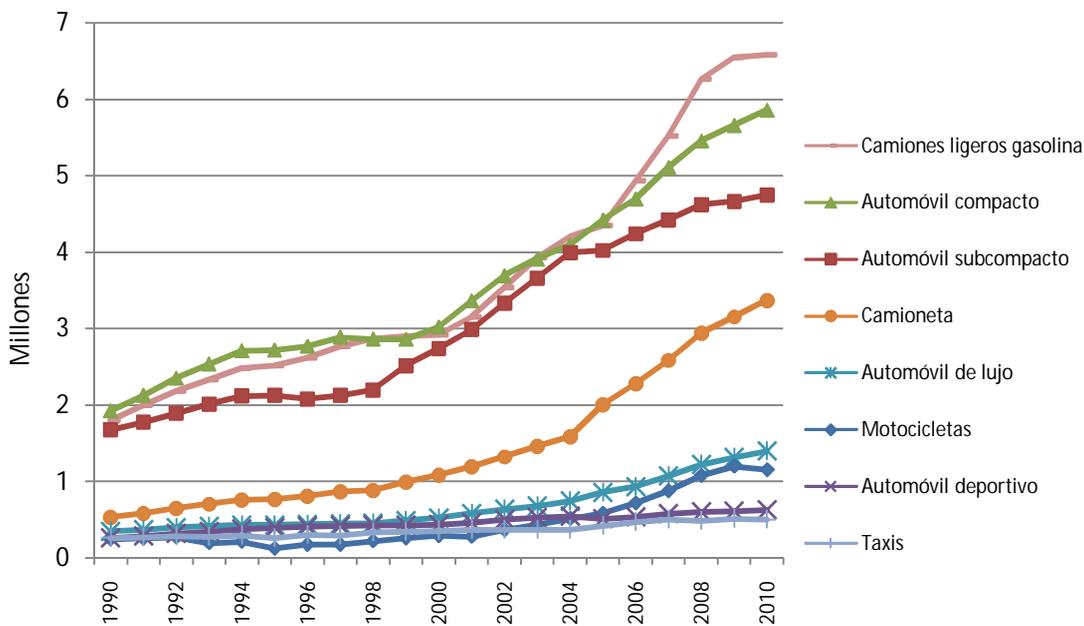


Figura 40. Evolución de la flota de vehículos a gasolina según segmento.

En el año 2012 los vehículos regularizados alcanzaron el 21% del total de la flota, aumentando cada año su participación, en tanto que los vehículos ilegales han representado en promedio el 23% de la flota durante 1999-2012 (**Figura 41**). La mayor parte de los vehículos ilegales son camiones ligeros (48%), seguidos por los compactos (25%), subcompactos (8%), los deportivos (6%), las camionetas (6%) y los vehículos de lujo (4%) (**Tabla 22**). Uno de los problemas que surgen con los vehículos ilegales y los regularizados radica en que tienen edades mayores a los nacionales (poco menos que el doble de edad que los vehículos legales, **Tabla 23**) y por ello menor rendimiento de combustible. Con ello, buena parte de la flota en circulación es bastante antigua: aproximadamente un 30% de los automóviles tiene una edad mayor a 15 años (**Tabla 24**) y para el caso de los camiones ligeros, la proporción es de cerca del 40% (estos dos segmentos conformaron en 2010 el 90% de los vehículos en circulación). La estructura descrita conduce a que la edad promedio de toda la flota sea de 12.1 años, siendo el segmento más moderno el de los subcompactos, con una edad de 9.5 años, y el más antiguo el de los subcompactos, con una edad promedio de 15.7, aunque los camiones ligeros no se quedan atrás: su edad promedio es de 14.1 años. Con esta antigüedad, el bajo rendimiento característico de los camiones ligeros, se ve aún en mayor medida disminuido por su mayor obsolescencia.

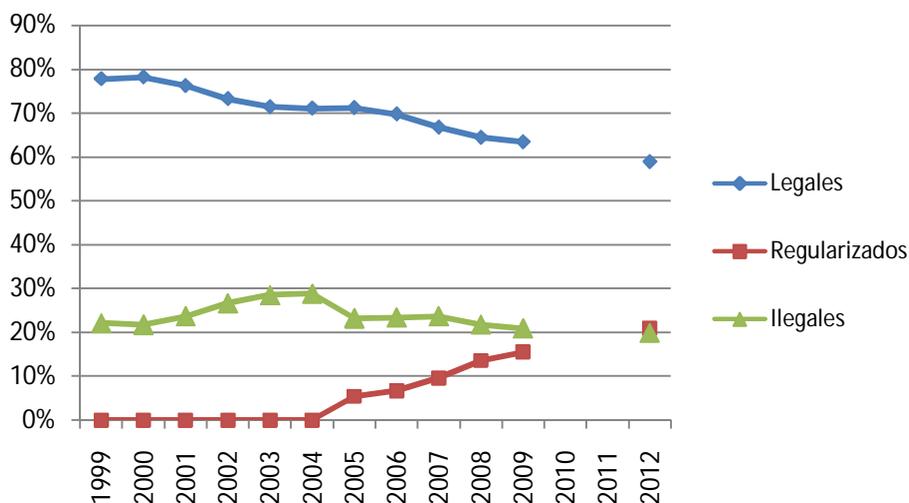


Figura 41. Evolución de la flota de vehículos a gasolina según procedencia legal. No se contó con información para 2010 y 2011.

Tabla 22. Estructura de la flota de vehículos ilegales según tipo

Segmento	2000	2005	2009	2012
Camiones ligeros	45.7%	46.4%	47.1%	47.7%
Compactos	27.7%	24.2%	25.4%	25.0%
Subcompactos	8.2%	7.3%	7.6%	7.6%
Deportivos	7.0%	6.2%	6.3%	6.3%
Camionetas	5.1%	5.9%	5.9%	5.8%
Lujo	3.5%	3.7%	3.6%	3.7%
Camiones pesados	1.8%	4.2%	2.0%	2.1%
Tractocamiones	1.1%	2.0%	2.0%	1.9%
Autobuses	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%

Fuente: Elaboración propia con de (Melgar, 2011).

Tabla 23. Estructura de la flota vehicular de México en 2012 por antigüedad y procedencia legal.

Procedencia	Edad promedio	Proporción
Legales	9.3	59 %
Regularizados	16.0	21 %
Ilegales	16.1	20 %

Fuente: Elaboración propia con datos de (Melgar, 2011).

Tabla 24. Estructura de la flota vehicular de México en 2012 por antigüedad y segmento.

Segmento	Mayor de 20 años	16 a 20 años	11 a 15 años	6 a 10 años	1 a 5 años
Automóvil privado	7.5%	20.7%	21.1%	25.2%	25.5%
Camión ligero	9.8%	30.8%	30.7%	13.8%	14.8%
Autobús	15.7%	27.5%	9.7%	26.3%	20.8%
Camión de carga	13.8%	23.0%	17.6%	20.3%	25.3%

Fuente: Elaboración propia con datos de (Melgar, 2011)

Por otro lado, el rápido crecimiento de los automóviles ha llevado al índice de motorización a elevarse también de manera abrupta con una TMCA de 4.7% (Tabla 25). A nivel global, México aún no se encuentra entre los primeros lugares, ocupando la posición 50 a nivel mundial (Tabla 26), sin embargo, la comparación adecuada debe ser con los países y regiones con ingresos y desarrollos semejantes. En este sentido, el índice de motorización de México se encuentra 29 lugares por arriba del promedio de las naciones con el mismo nivel de ingresos (medio-alto), y es 42% más alto que el promedio para Latinoamérica y El Caribe. De seguir este camino, nuestro país enfrentará el problema de tener un excesivo número de vehículos antes de llegar a un nivel de desarrollo mayor que le permita enfrentarlo con menos adversidades que el resto de las naciones.

Tabla 25. Tasa de motorización para México.

Año	Habitantes (millones)	Automóviles (miles)	Índice de motorización
1990	87.1	5.0	57.6
1995	94.5	6.7	71.0
2000	100.9	8.2	81.0
2005	107.2	12.2	114.3
2010	114.3	16.5	144.5
TMCA	1.4%	6.1%	4.7%

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAPO (2013) para las cifras de habitantes.

Tabla 26. Tasa de motorización para algunos países y regiones.

Posición	País/ Región	2008	2010
1	San Marino	-	1,263
2	Norte América	794	797
3	Estados Unidos	815	797
4	Liechtenstein	-	750
5	Islandia	767	745
6	Luxemburgo	747	739
7	Nueva Zelanda	733	712
8	Australia	687	695
9	Malta	674	693
10	Italia	669	679
11	Puerto Rico	622	635
12	Países de alto ingreso: OECD	629	629
13	Grecia	564	624
14	Países de alto ingreso	572	620
15	Finlandia	534	612
16	Comunidad Europea	587	593
17	España	606	593
18	Japón	592	591
19	Noruega	575	584
20	Francia	598	580
25	Miembros OECD	564	563
39	Europa & Asia Central	415	453
50	México	265	275
79	Ingreso medio-alto	90	98
	América latina & Caribe	186	
	América latina & Caribe (sólo en desarrollo)	183	

Los valores para México no coinciden con los de la Tabla anterior debido a las diferencias de las fuentes³⁸

Fuente: Elaboración propia con datos de (WB, 2013).

³⁸ Presumiblemente, la estadística del Banco Mundial utiliza el registro de Vehículos Registrados en Circulación del INEGI, mientras que en los cálculos propios (**Tabla 13**) se usa principalmente la base de datos de (Melgar, 2011). En esta tesis, se hace uso de esta última fuente, puesto que la del INEGI parece sobrevalorar la población real de vehículos en circulación.

Rendimiento de combustible

La evolución del rendimiento de combustible para los diferentes segmentos de automóviles privados en circulación se muestra en la **Figura 42**. El promedio ponderado por segmento para los automóviles privados arroja que en 1990 su rendimiento de combustible era de 10.04 km/l y éste tan sólo aumentó a 10.29 km/l en 2010. Es decir, en 20 años, el rendimiento del automóvil tan solo aumentó 2.5% con una TMCA de 0.12%. Como se ha comentado y puede deducirse de la ecuación (2), es otro factor que influye en el incremento del consumo de combustibles y emisiones de CO₂, pues la escasa reducción de intensidad de combustible R , no ha ayudado a compensar el gran aumento de la flota vehicular V .

En cambio, sin llegar a ser extraordinario, el aumento del rendimiento de combustible en los vehículos a diésel (**Figura 43**) ha sido mayor. La TMCA³⁹ fue de 0.6% para los camiones pesados y de 1.1% para los tractocamiones, mientras que el rendimiento de los autobuses permaneció constante. Cabe señalar sin embargo, que el rendimiento mostrado para los vehículos a diésel, a diferencia del de los automóviles, se refiere a los vehículos en circulación, por lo que las mejorías no se deben sólo a perfeccionamientos tecnológicos sino, probablemente en mayor medida, a mejores prácticas logísticas y de conducción.

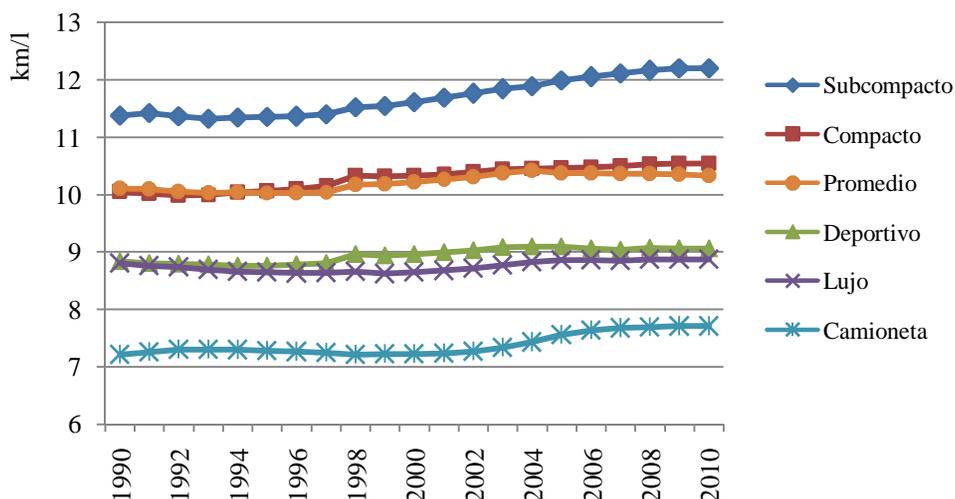


Figura 42. Evolución del rendimiento de combustible de los automóviles en circulación según segmento. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de (Sheinbaum et. al., 2011) y Melgar

³⁹La escasez de información sólo permitió determinar estas tasas de crecimiento con datos anteriores a 1997.

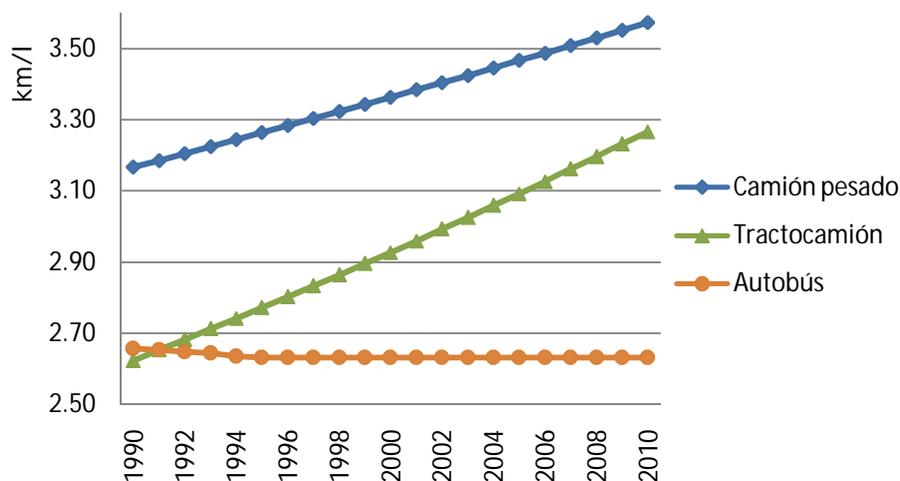


Figura 43. Estimación de la evolución del rendimiento de combustible en los vehículos a diésel.
Fuente: Elaboración propia con datos de (EPA, 2002) y (Davis, 2011)

El rendimiento de combustible correspondiente a las motocicletas se consideró constante, con un valor de 21.26 km/l (EPA, 2002), el de los taxis, de los mismos valores que los vehículos subcompactos y el de los camiones ligeros, iguales a las camionetas.

Esta escasa mejoría en el rendimiento de combustible no es exclusiva de México. En Estados Unidos de Norteamérica, si bien hubo un considerable aumento del rendimiento de combustible entre 1978 y 1988, a partir de entonces las mejorías han sido marginales. Es de notarse, por un lado, que la gran relación entre los rendimientos de combustible alcanzados están y la presencia de normas de rendimiento, por otro lado, que un gran aumento en la flota de camiones ligeros lleva al rendimiento de combustible combinado (línea azul en la **Figura 44**) hacia la baja con gran facilidad, a pesar de las mejoras del rendimiento en los automóviles.

En el resto del mundo las normas de rendimiento vehicular tampoco parecen prometer grandes mejorías, pues a excepción de la Comunidad Europea (EU) y California, donde se piden importantes incrementos en el rendimiento, en las demás zonas los aumentos exigidos no son grandes (**Figura 45**).

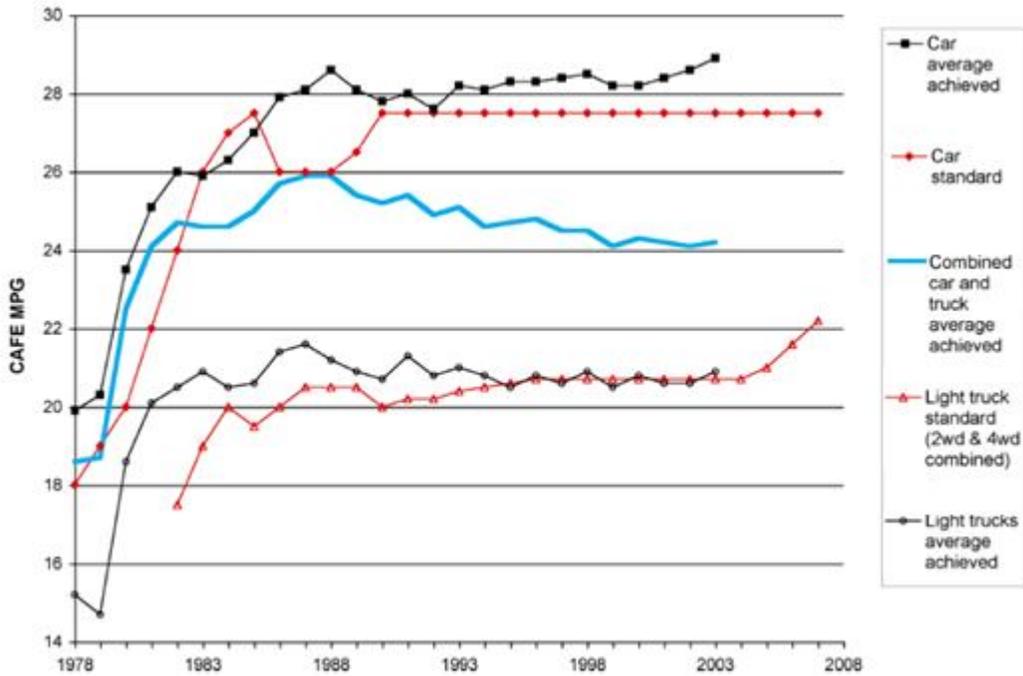


Figura 44. Evolución del rendimiento de combustible de los vehículos en Estados Unidos.

CAFE MPG: millas por galón bajo la norma CAFE

Fuente: (Feng, 2004)

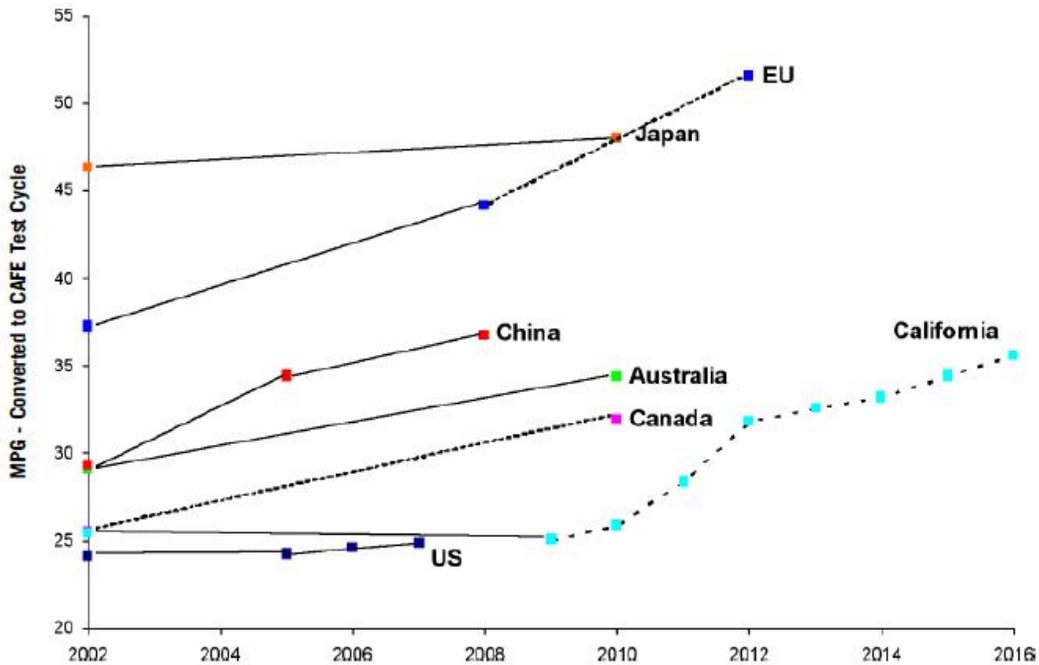


Figura 45. Evolución del rendimiento de combustible en el mundo bajo las normas vigentes en 2004.

MPG: millas por galón.

Fuente: (Feng, 2004)

Actividad vehicular

La Figura 46 muestra el valor de los indicadores pasajeros-kilómetro y las toneladas-kilómetro para el autotransporte público federal. Tanto el transporte de carga como el de pasajeros sufrieron una caída en su actividad durante 2009, año de crisis económica en el que el PIB nacional disminuyó, mostrándose el fuerte vínculo del transporte con la economía. La distancia media anual recorrida para los diferentes modos del autotransporte se muestra en el **Tabla 27**, aunque se calculó el recorrido anual del transporte interurbano, aquí sólo se consigna el promedio del periodo.

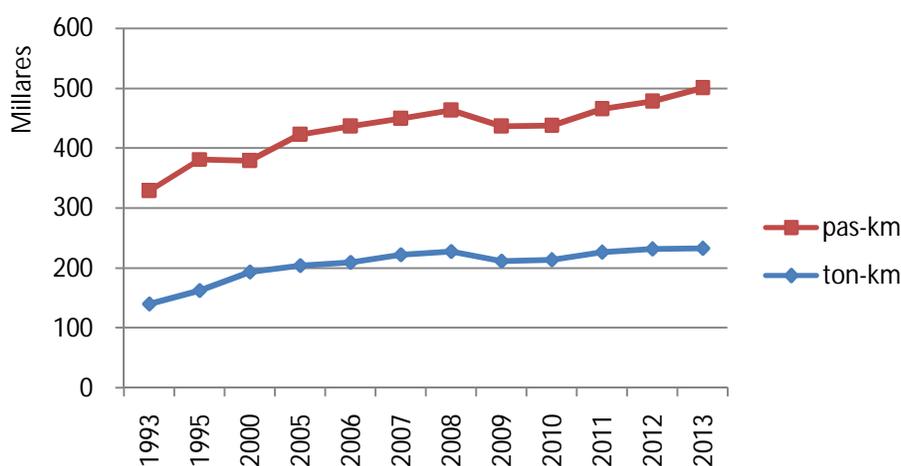


Figura 46. Actividad del transporte interurbano en México
Fuente: Elaboración propia con datos de (SCT, 2010)

Tabla 27. Distancia media anual recorrida en el autotransporte por modo

Tipo de vehículo	km promedio al año
Automóvil	12,487
Camión ligero	23,871
Motocicleta	28,835
Taxi	76,650
Autobús urbano	78,475
Autobús interurbano	230,864
Camión pesado urbano	22,922
Camión pesado interurbano y tractocamión	29,411

Fuente: Elaboración propia a partir de (Sheinbaum et. al., 2010), (SCT, 2010), (Gutiérrez et. al., 2011a), (Gutiérrez et. al., 2011) y (SMA, 2008).

Consumo de combustibles del autotransporte en México en 1990-2010.

El consumo energético del autotransporte prácticamente duplicó su velocidad de crecimiento si comparamos la década 1990-2000 con la que le siguió (**Tabla 28**). En 1990-2000 el diésel creció a mayor velocidad que la gasolina, en 2000-2010 ocurrió lo contrario. El consumo de gas licuado de petróleo tiene comportamiento digno de mención: tuvo bastante impulso en la primera década, pero se le ha olvidado relegado en la segunda. Como efecto neto de los cambios, la gasolina ha mantenido un consumo casi dos veces mayor al del diésel durante las dos décadas.

Tabla 28. Consumo de combustibles (en petajoules) para el autotransporte en México.

Combustible	1990	2010	TMCA (1990-2000)	TMCA (2000-2010)
Gasolina	837.9	1491.4	1.8%	4.1%
Diésel	293.9	537.1	2.4%	3.7%
GLP	15.2	40.9	11.5%	-1.0%
Total	1147.0	2069.4	2.1%	3.9%

Fuente: Cálculos propios con datos de (SENER, 2011)

En el consumo energético de gasolina, desagregado por segmento (**Figura 47**), la mayor participación es para el automóvil privado, pero el camión ligero, utilizado para el transporte de carga, muestra también una proporción muy considerable: para el año 2008, previo a la caída del PIB en 2009 y su ligera recuperación en 2010, el automóvil representó el 40% del consumo de gasolina y el camión ligero el 42%. La escasa reducción del consumo del automóvil en 2009, en comparación con la baja tan significativa en el sector de carga a gasolina, puede explicarse por la necesidad de movilidad de la población, ya que los desplazamientos por motivos de trabajo y escolares no se ven afectados, aún ante la presencia de situaciones de inflación y depresión económica, lo cual en términos económicos se conoce como inelasticidad de la demanda.

El transporte urbano de pasajeros sobre vehículos a gasolina, como los microbuses, se incluye dentro de la categoría *Otros*, cuya participación ha ido disminuyendo notablemente debido al enorme incremento de los automóviles privados. Los picos que esta categoría muestra para los años 2004 y 2008 se desprenden del mismo comportamiento reportado en

el BNE para esos años sin que se disponga de explicación alguna. Es también importante recalcar el peso que comienzan a mostrar las motocicletas, que para el 2010 representaron el 3.4% de la demanda de gasolina.

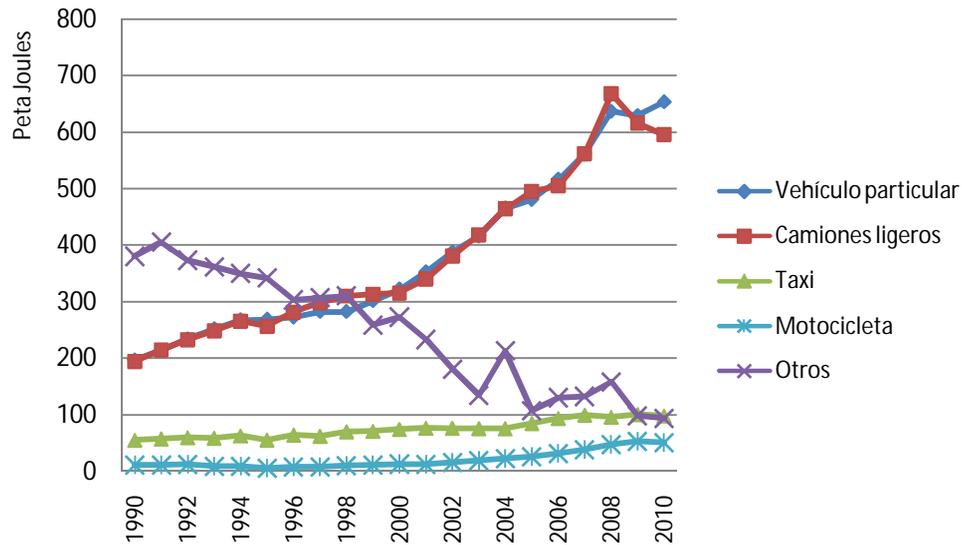


Figura 47. Evolución del consumo de gasolina por modo de transporte.

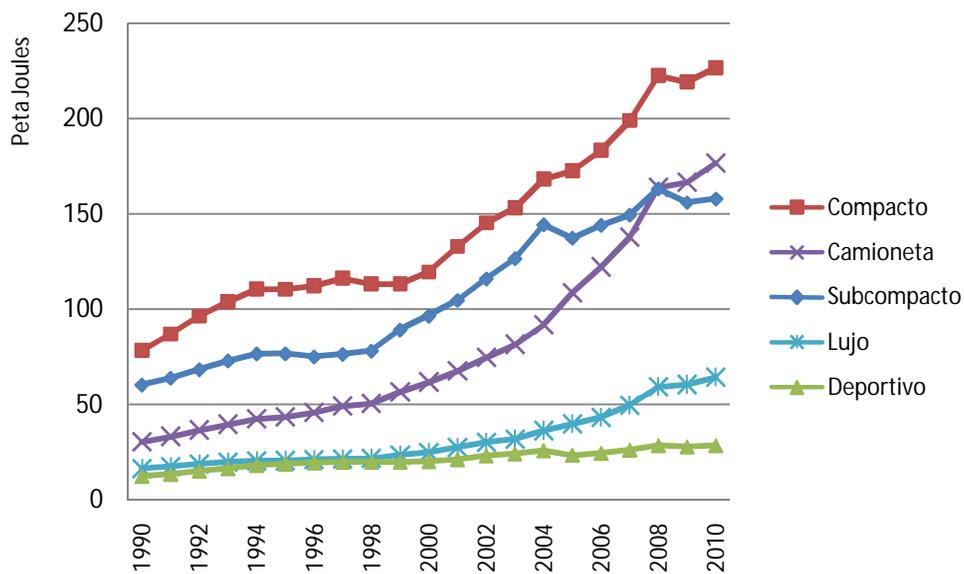


Figura 48. Evolución del consumo de gasolina de los automóviles privados por segmento.

En cuanto al consumo energético del vehículo particular, la mayor aportación es de los vehículos compactos (35% en 2010) seguido por el subcompacto (27%). Entre 2005 y 2010 la participación del vehículo subcompacto disminuyó ligeramente en comparación con los demás modos (**Figura 48**), en parte como consecuencia del ligero pero mayor incremento en su rendimiento de combustible, pero principalmente debido a su menor tasa de crecimiento de su población (a excepción del deportivo). En contraste, el consumo de los automóviles compactos, de las camionetas y de los automóviles de lujo es mucho más marcado, dadas las altas TMCA de sus flotas. Para notar la importancia del rendimiento de combustible, pueden contrastarse la **Figura 40** y la **Figura 48**: si bien en 2010 la camioneta no había alcanzado en número a los subcompactos, habiendo aún una diferencia de 40%, en cuestión de consumo, la camioneta superó al compacto desde 2008.

Para el caso del diésel (**Figura 49**), la categoría de mayor consumo es el autotransporte de pasajeros (autobús interurbano), seguido por el autotransporte interurbano de carga (camiones y tractocamiones). La categoría *Otros*, que presumiblemente son autobuses a diésel urbanos, suburbanos y rurales, tiene una reducción significativa de 1990 a 2002, año en que comienza a aumentar hasta el 2008, lo cual concuerda con los programas que comenzaron a operar en diversas ciudades del país para la sustitución de vehículos de pasajeros a gasolina (como los microbuses) por autobuses que utilizan diésel.

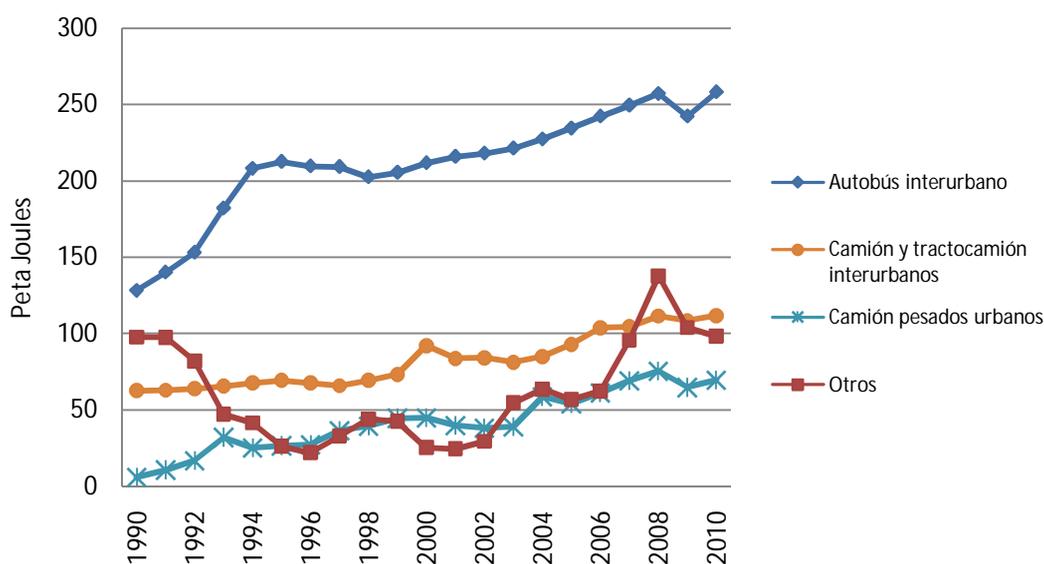


Figura 49. Evolución del consumo de diésel por modo.

Tabla 29. Consumo de energía en el autotransporte, según combustible y modo.

Modo	1990	2000	2010
Automóvil privado	24%	32%	44%
Camiones ligeros	23%	32%	40%
Taxi	7%	8%	7%
Otros gasolina	45%	27%	6%
Motocicleta	1%	1%	3%
Subtotal gasolina	838	997	1,491
Autobús interurbano	44%	57%	48%
Otros diesel	33%	7%	19%
Camión pesado urbano	2%	12%	13%
Tractocamión	7%	15%	13%
Camión pesado interurbano	15%	9%	7%
Subtotal diésel	294	373	537
Subtotal GLP	15	45	41
Consumo total	1,147	1,416	2,069

Emisiones de CO₂ por categoría

Las emisiones de CO₂ del autotransporte crecieron 80% en 20 años pasando de 81 a 146 millones de toneladas de CO₂. Las emisiones del automóvil aumentaron 2.3 veces en el periodo, constituyendo en 2010 casi un tercio del total de las emisiones del autoatransporte. Otro segmento muy importante es el camión ligero que creció 2 veces de 1990 al 2010 en cuanto a sus emisiones. Estos dos modos de transporte representaron en 2010 el 59% de las emisiones de CO₂ (Tabla 30). Por su parte, las emisiones del autobús interurbano se duplicaron entre 1990 y 2010 y las del taxi crecieron en 80%.

La categoría *Otros* fue la única que disminuyó sus emisiones en términos absolutos pasando de 33 a 14 TgCO₂ en el mismo periodo, situación que más que representar un aumento en el rendimiento de combustible o una reducción de la intensidad modal, indica un abandono del transporte público de pasajeros a favor de medios con mayor intensidad modal, como es el automóvil. De hecho, el automóvil es el modo de traslado de personas más ineficiente si de uso de energía y efectos ambientales se trata (

Tabla 31), con 133 gramos de CO₂ emitidos por pasajero-km, de manera que si una persona viaja 15 km diarios en automóvil cinco días a la semana, al año estará generando ella sola media tonelada del gas en promedio. El taxi y la motocicleta no distan mucho de estas altas intensidades modales. Por el contrario, la intensidad modal de los autobuses de pasajeros, referida a las emisiones de CO₂, es en promedio de 27 gramos del gas por cada pasajero-kilómetro, siendo posible llegar a emitir 15g del gas por pas-km en promedio, para sistemas BRT. En este caso, si la persona del ejemplo cambia su modo de transporte a BRT, emitiría al año 88% menos que el caso anterior, es decir, sólo 60kg del gas. Por lo tanto, los medios masivos de transporte de personas (autobuses en general) presentan grandes beneficios energéticos y ambientales, pues cuanto más, consumen el 29% de lo que gastan los automóviles en energía, pero puede llegarse a consumir y a emitir sólo el 11% de lo correspondiente a los viajes en automóvil.

Tabla 30. Participación de las diferentes categorías del autotransporte en las emisiones de CO₂.

Modo	Combustible	1990	2000	2010
Automóvil	Gasolina	17%	22%	31%
Camión ligero	Gasolina	17%	22%	28%
Autobús interurbano	Diésel	12%	16%	13%
Otros	Gasolina y diésel	42%	21%	10%
Camión y tractocamión interurbano	Diésel	6%	7%	5%
Taxi	Gasolina	5%	5%	5%
Camión pesado urbano	Diésel	1%	3%	4%
Motocicletas	Gasolina	1%	1%	2%
Camión ligero	GLP	1%	3%	2%
Total (TgCO ₂)		81	100	146

Además de que el transporte público constituye un modo de baja intensidad energética a través del cual se generan la mayoría de los viajes en las ciudades (70% en la Ciudad de México), este modo de transporte tienen una gran repercusión social: cuanto más bajo sea el ingreso del hogar, mayor es el porcentaje del gasto que se destina al transporte en medios públicos (**Figura 50**) llegando a representar el 69% del gasto en transporte para los deciles más bajos y 10% para el más alto.

Tabla 31. Estimación de la intensidad modal para los modos de transporte de pasajeros en 2010.

Modo de transporte	Factor de ocupación	Veh-km (millones)	Pas-km (millones)	PJ	Energía/pas-km (kJ)	CO ₂ /pas-km (g)
Automóvil privado	1.7	199,890	339,813	653	1,922	133
Taxi	1.7	38,564	65,558	103	1,565	108
Autobús urbano	40	10,021	400,828	139	347	26
Autobús interurbano	25	18,620	465,511	258	554	41
BRT	160	10	1,654	0.34	207	15
Motocicleta	1	33,358	33,358	51	1,538	107

Para el taxi, el factor de ocupación se asume igual al de los automóviles.

El factor de ocupación de las motocicletas es supuesto dada la falta de información.

Fuente: Elaboración propia tomando factores de ocupación de (Fimevic, 2000), (INE, 2007) y (SMA, 2008).

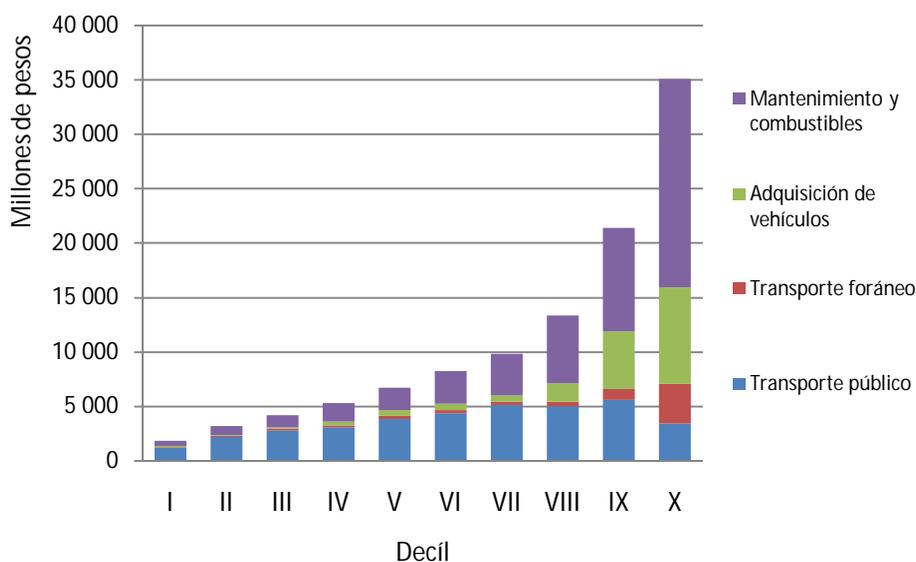


Figura 50. Desagregación de gasto en transporte en los hogares mexicanos en 2012 por decil.

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI-BIE

A todo esto, ¿por qué la inversión en transporte y movilidad de las ciudades parece privilegiar al automóvil particular en menoscabo de un transporte público eficiente y seguro? El tema es complejo y aquí no es lugar para desarrollarlo, pero puede apuntarse que aunque la construcción de nuevas vialidades y su conservación pueden constituir acciones

que no fomentan por sí solas el uso del automóvil, la proporción de los recursos destinadas a aquellas las convierten en objeto de tales cuestionamientos, porque si bien las vialidades son utilizadas tanto por automóviles como por el transporte público⁴⁰, la gran proporción de viajes en automóviles particulares⁴¹ las convierten en la práctica, su privilegio.

En relación con el autotransporte de carga, se encuentra algo semejante a lo que ocurre en el autotransporte de pasajeros, el vehículo con mayor presencia en la flota y con mayor crecimiento, esto es el camión ligero, es el que traslada los bienes de manera menos eficiente (Tabla 32), mientras tanto, el tractocamión es el que menor intensidad modal exhibe.

Tabla 32. Estimación de la intensidad modal para los modos de transporte de carga en 2010.

Modo	Factor de ocupación (ton)	Veh-km (millones)	Ton-km (millones)	PJ	Energía/ton-km (kJ)	CO ₂ /ton-km (g)
Camión ligero	1.3*	141,786	184,321	595	3,229	224
Camión pesado	13.3	6,791	90,356	69	767	57
Tractocamión	32	6,154	196,935	69	349	26

*Se consideró la máxima carga permitida en las especificaciones técnicas de los vehículos.

Fuente: Elaboración propia con factores de carga de (Gutiérrez et. al., 2011a)

Aunque tanto el transporte de carga como el de pasajeros no dejaron de crecer en términos absolutos, resulta que el primero viene cobrando una mayor participación en el total de las emisiones de CO₂. En 1990 el transporte de mercancías generaba el 24% de las emisiones con 20 millones de toneladas de CO₂, pero en 2010 el transporte de bienes llegó al 39%, aportando 57 millones de toneladas del gas; el transporte de personas generó 89 millones de toneladas del gas.

⁴⁰ No puede decirse que las bicicletas puedan hacer un uso compartido de las vialidades, pues su diseño y la educación vial de los conductores pone en riesgo constante a los ciclistas.

⁴¹ Aproximadamente el 80% de red vial en las zonas urbanas del país es utilizada para viajes en automóvil particular (ITDP, 2012). En cualquier caso, las inversiones en vialidades y su conservación pueden ser ponderadas de acuerdo a la proporción de viajes de cada modo.

Elasticidad para el consumo de gasolina

Los resultados de la **Tabla 33** muestran que el tamaño de la flota vehicular de automóviles privados es la variable más significativa en la demanda de gasolina, seguida del tamaño de la flota de camiones ligeros y del nivel de ingreso en el país. El precio del combustible resulta más bien inelástico para la demanda y no-significante. Lo anterior conduce a decir que la demanda de gasolina en los últimos veinte años ha respondido principalmente al incremento de la flota vehicular y en menor medida al PIB per cápita, mientras que los aumentos del precio del combustible no reducen de manera significativa la demanda.

Tabla 33. Estimación de las elasticidades para la demanda de gasolina (1990-2010)

	B	PIB/cap.	Precio de la Gasolina	Camiones ligeros	Automóviles y camionetas	R total	Error
Constante	-9.85	0.27	-0.05	0.34	0.53	0.997	0.021
Estadística T	(-10.57)	(2.15)	(-0.51)	(2.93)	(4.05)		

Fuente: Elaboración propia con datos de (PEMEX 2001; 2012) y CONAPO (2013)

5. Resultados: 2010-2050.

Venta de vehículos.

Las ventas de vehículos en cada año y la tasa de desecho vehicular son los principales parámetros que definen el cambio en la población de vehículos, aunque también la entrada de vehículos ilegales y regularizados la puede afectar considerablemente. La **Figura 51** muestra los niveles de ventas para los segmentos automotrices. Los vehículos subcompactos y los compactos siguen teniendo la mayoría del mercado de los automóviles con 36% y 33% en 2010, respectivamente, sin embargo, la venta de camionetas ha crecido en mayor medida que los demás segmentos pues en 1990 tenía una cuota de 10% del mercado, pero en 2010 esta fue de 23%, desplazando a los subcompactos que en 1990 tenía el 51% de las ventas de automóviles. Se entiende que la desventaja de la situación radica en el menor rendimiento de combustible que tienen las camionetas frente a los subcompactos.

Las TMCA de ventas para automóviles y motocicletas se muestran en la **Tabla 34**. Se muestran también en las TMCA de la flota vehicular para los modos de transporte de los que no se contó con su tasa de desecho o cuya información no fue apta para estimar su crecimiento con base en las ventas.

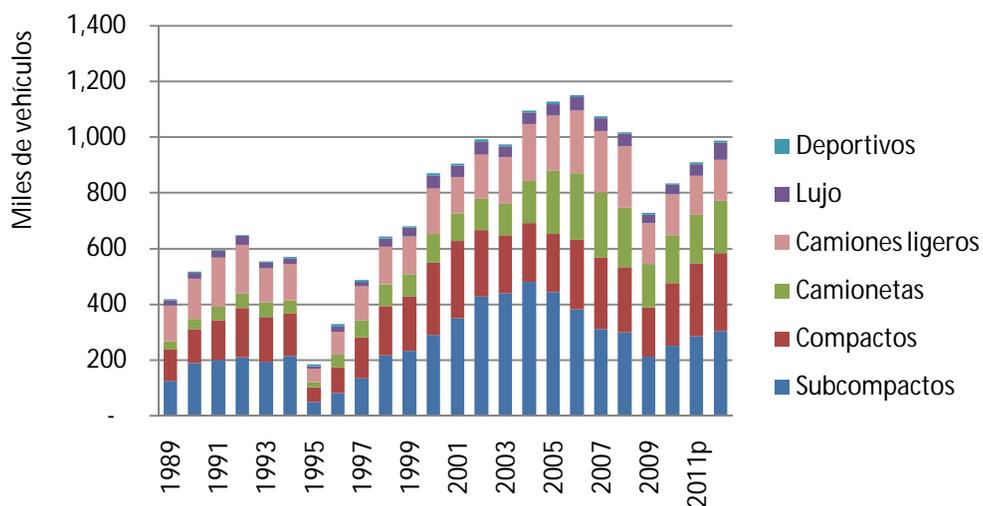


Figura 51. Evolución de las ventas de los segmentos automotrices y de camiones ligeros.
Fuente: Elaboración propia con datos de (INEGI, 2012; INEGI, 2005; INEGI, 1992).

Tabla 34. Tasas medias anuales de crecimiento de las ventas y de la población vehicular.

Segmento	TMCA de ventas	Segmento	TMCA del parque vehicular
Motocicleta	7.6%	Taxi	3.4%
Subcompacto	5.6%	Camión ligero	4.4%
Compacto	4.2%	Autobús interurbano	3.4%
Deportivo	2.7%	Camión pesado urbano	2.9%
Lujo	6.2%	Camión pesado interurbano	2.3%
Camioneta	7.7%	Tractocamión	4.8%

Fuente: Estimación propia con datos de INEGI, SCT y (Melgar, 2011).

A su vez, los factores que determinan las altas ventas de vehículos pueden ser múltiples, aunque generalmente se encuentra que la expansión de las flotas vehiculares son más dependientes del aumento de los ingresos (que hace crecer la propiedad de vehículos) y en menor medida del aumento de población en cada nación (**Figura 52**). Sin embargo, llega a observarse que al interior de México, en las entidades federativas, el crecimiento de la flota de vehículos puede llegar a ser más dependiente del aumento de urbanización que de otros factores. (Moctezuma, 2012)

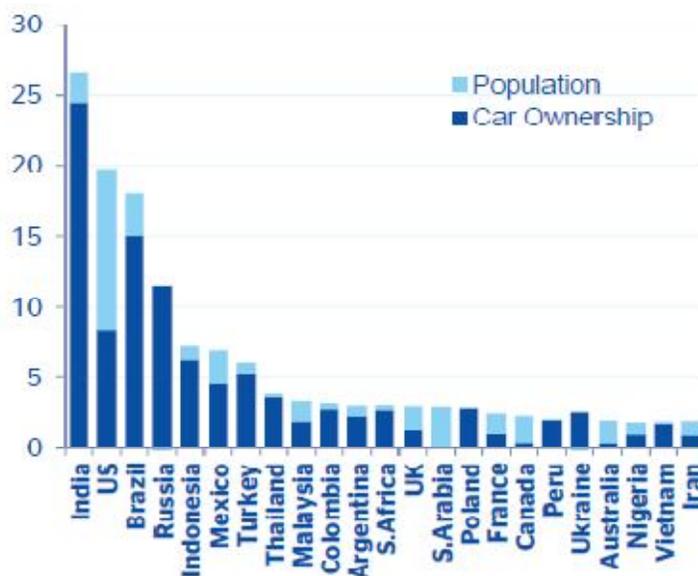


Figura 52. Determinantes de la expansión de la flota para algunos países para (1980-2020). Cifras en millones de automóviles.

Fuente: BBVA Research (2012)

Flota vehicular por categoría

Entre 2010 y 2050 la población de vehículos en México crecerá con una TMCA de 4.5%, pasando de 25.6 millones a 87.6 millones en 2040 y a 151.7 millones en 2050. Con ello, el índice de motorización cambia de 145 en 2010, a 350 en 2040 y a 601 en 2050. Por su parte, la cantidad total de vehículos por cada 1000 habitantes (que podemos llamar índice de posesión de vehículos) pasará de 224 en 2010 a 603 en 2040 y a 1005 en 2050. Es en el año 2047 cuando el límite de 852 vehículos por cada millar de habitantes propuesto en (Dargay et. al, 2007) es sobrepasado. De ser correcto que tal límite existe, algunos años antes, las TMCA de ventas de vehículos y de crecimiento de cada segmento se reducirían y posiblemente las tasas de desecho de los vehículos se elevarían, acercándose así a un equilibrio en el que los ingresos de vehículos son casi iguales (o ligeramente mayores) a las salidas. Sin embargo, dado que otros modelos sugieren límites distintos, como el de 110 millones o el de 150 millones de automóviles privados (Moctezuma, 2012), y siendo que los cálculos arrojan que para 2050 habrá 89 millones de automóviles privados en circulación, se mantienen en el modelo las TMCA señaladas.

Como ya se ha dicho, el crecimiento de la población de vehículos, junto con la escasa mejoría de los rendimientos de combustibles y el bajo desarrollo del transporte público masivo, serán las causas principales del aumento en el consumo de combustibles y de las emisiones de CO₂. En 2010 el vehículo particular representó el 62% del parque, seguido por el camión ligero con el 28%, y si en 2050 estos dos segmentos bajan sus cuotas de participación, lo hacen sólo porque las motocicletas crecen a un ritmo impresionante. De cualquier manera, estos tres segmentos (automóviles, motocicletas y camiones ligeros) retienen prácticamente en todo momento el 95% de la población vehicular (**Tabla 35** y **Tabla 36**).

Al interior del conjunto de vehículos a gasolina, los compactos y subcompactos, que han tenido hasta ahora la mayor participación dentro de los automóviles, serán superados alrededor de 2040 por la camioneta debido a su mayor TMCA (**Figura 53**). Esto es trascendente, como ya se ha dicho, para el consumo de combustibles y para las emisiones de CO₂ porque, en general, las camionetas tienen rendimientos de combustible menores.

Tabla 35. Evolución de la población vehicular en México para 2010-2050.

Modo	2010	2020	2030	2040	2050
Automóvil privado	16,008	20,785	29,293	49,580	88,752
Camión ligero	7,172	10,850	16,443	24,955	37,923
Motocicleta	1,157	2,240	4,618	9,611	20,050
Taxi	503	704	985	1,379	1,930
Tractocamión	213	314	487	803	1,297
Camión pesado urbano	348	463	615	817	1,086
Camión pesado interurbano	129	162	203	255	321
Autobús interurbano	79	111	154	215	301
Autobús urbano	128	133	139	145	151
Total (miles)	25,738	35,762	52,938	87,760	151,810

Fuente: Elaboración propia con base en datos de (Melgar, 2011), INEGI y SCT.

Tabla 36. Estructura de la población vehicular en México para 2010 y 2050.

Modo	2010	2050
Automóvil privado	62.2%	58.5%
Camión ligero	27.9%	25.0%
Motocicleta	4.5%	13.2%
Taxi	2.0%	1.3%
Tractocamión	0.8%	0.9%
Camión pesado urbano	1.4%	0.7%
Camión pesado interurbano	0.5%	0.2%
Autobús interurbano	0.3%	0.2%
Autobús urbano	0.5%	0.1%

Fuente: Elaboración propia con base en datos de (Melgar, 2011), INEGI y SCT.

Debido a las altas tasas de ventas de los automóviles, la flota tendrá cada vez una edad promedio menor a la actual (**Tabla 37**), situación que debería aprovecharse en el diseño de las políticas de reducción de consumo de combustibles y de mitigación de emisiones de CO₂, estableciendo por ejemplo, normas estrictas y de largo plazo que aumenten sustancialmente el rendimiento de combustible de los vehículos.

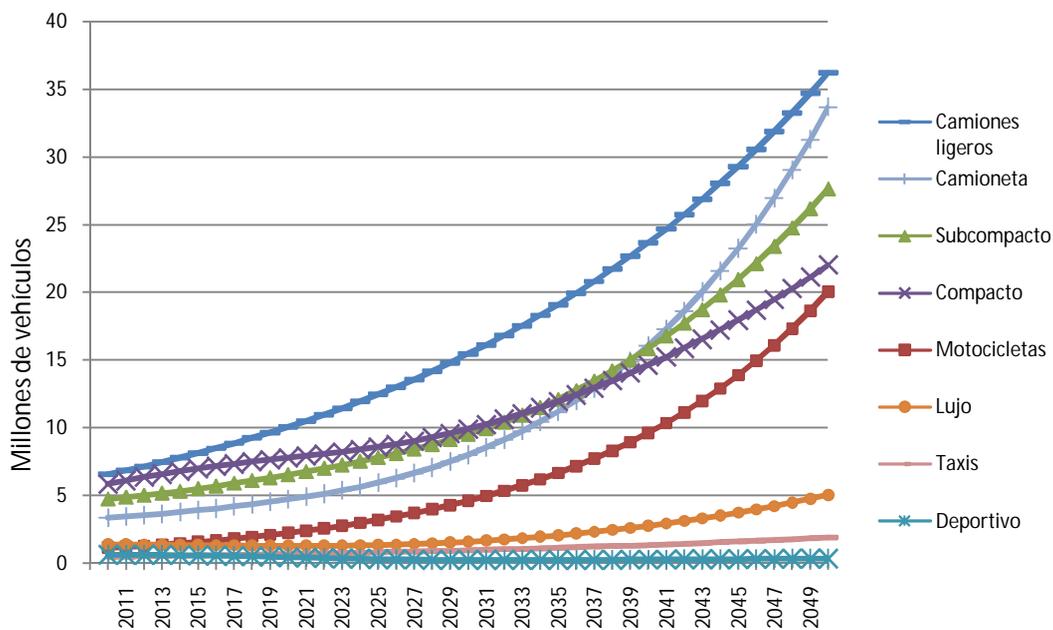


Figura 53. Evolución de la flota de vehículos a gasolina.

Tabla 37. Estructura por edad de los automóviles privados.

Edad en años	2010	2030	2050
0 a 5	25%	32%	35%
6 a 10	25%	23%	24%
11 a 15	21%	18%	18%
16 a 20	21%	13%	13%
21 a 25	8%	14%	10%

Fuente: Elaboración propia con base en datos de (Melgar, 2011), INEGI y SCT.

Consumo de combustibles del autotransporte en México en 2010-2050. Escenario Base.

Para el cálculo del escenario base se consideró que el rendimiento vehicular crece según la tendencia histórica, con lo cual permanece casi constante. Si bien es cierto que existe una nueva norma para regular el rendimiento de combustible de los automóviles y camiones ligeros nuevos, siendo posible un aumento importante de este parámetro, los resultados aún no se aprecian, además, su horizonte de aplicación es de tan sólo tres años. Por otro lado, la estrategia de vincular el rendimiento de combustible al tamaño o peso del vehículo puede

ser riesgosa, pues existe la posibilidad de alentar el consumo y la producción de automóviles y camiones ligeros con cada vez mayores dimensiones, tal como sucedió en la Europa (Cuenot, 2009).

Los resultados muestran que en el escenario tendencial, el consumo de energía en el autotransporte crecerá con una TMCA de 4% y que el consumo de gasolina seguirá siendo predominante (**Tabla 38**) aunque, debido al alto crecimiento de automóviles y camiones ligeros, la proporción de gasolina en el consumo total pasará de 74% en 2010 a 82% en 2050. Si se realiza tal aumento en la importación de gasolinas, la balanza comercial de petrolíferos empeorará.

Tabla 38. Evolución del consumo de combustibles (en PJ) del autotransporte en México.

Combustible	2010	2020	2030	2040	2050
Gasolina	1,491	2,168	3,121	4,876	7,899
Diésel	537	711	937	1,254	1,683
GLP	41	51	63	78	95
Total	2,069	2,930	4,121	6,208	9,677

Dentro del consumo de gasolinas, la mayor proporción seguirá siendo de los camiones ligeros y del automóvil particular, juntos mantendrán el 84% del consumo prácticamente todo el tiempo (aunque con respecto del consumo total de combustibles pasarán del 60% al 68%). La categoría *Otros*, importante por representar al transporte urbano de pasajeros en vehículos como microbuses, reducirá su presencia del 6% al 2% entre 2010 y 2050, situación que no sería tan grave si no fuera porque también disminuirá la participación del autotransporte urbano de pasajeros con vehículos a diésel. Las motocicletas por su parte, aumentarán su peso en el consumo, pues si en 2010 constituyeron el 3% de la demanda de gasolina, en 2050 representarán el 11%.

Dentro del sector de los automóviles privados (**Figura 54**), el mayor consumo de gasolina del segmento lo realizarán las camionetas con el 44% del consumo de 2050, seguido por el subcompacto (25%) y el compacto (24%). Aquí se aprecia todavía mejor el efecto del rendimiento de combustible, pues si hasta 2040 es cuando el número de vehículos

subcompactos será igualado por el de camionetas, en ese año, el consumo de las camionetas será 50% mayor al de los subcompactos.

En cuanto al consumo de diésel, el segmento con mayor consumo será el del autobús interurbano, seguido por el transporte de carga interurbano (**Figura 55**). El consumo de los minibuses y autobuses de pasajeros para el servicio urbano (incluidos en *Otros*) tendrán muy bajo crecimiento, por lo que la proporción en el consumo total se verá reducida al ser desplazados por el automóvil privado como medio de transporte.

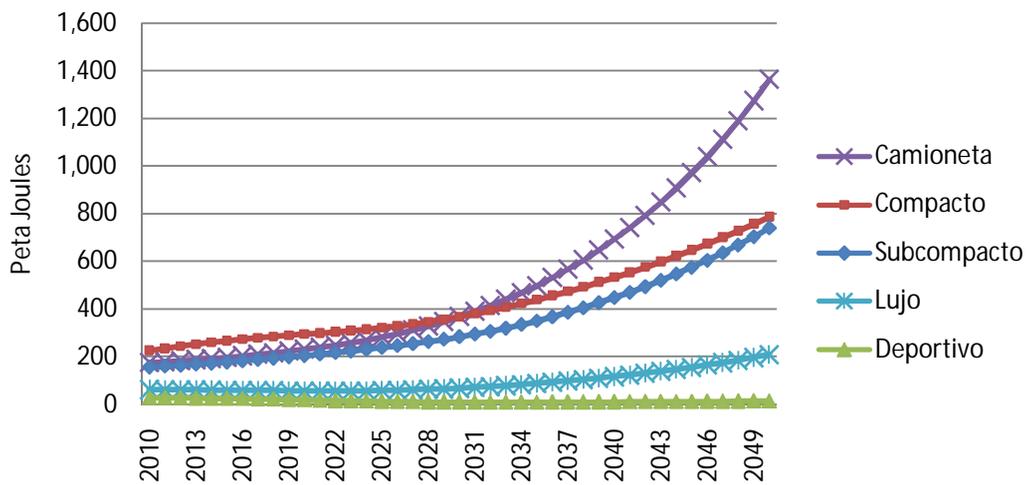


Figura 54. Evolución del consumo de gasolina de los automóviles privados.

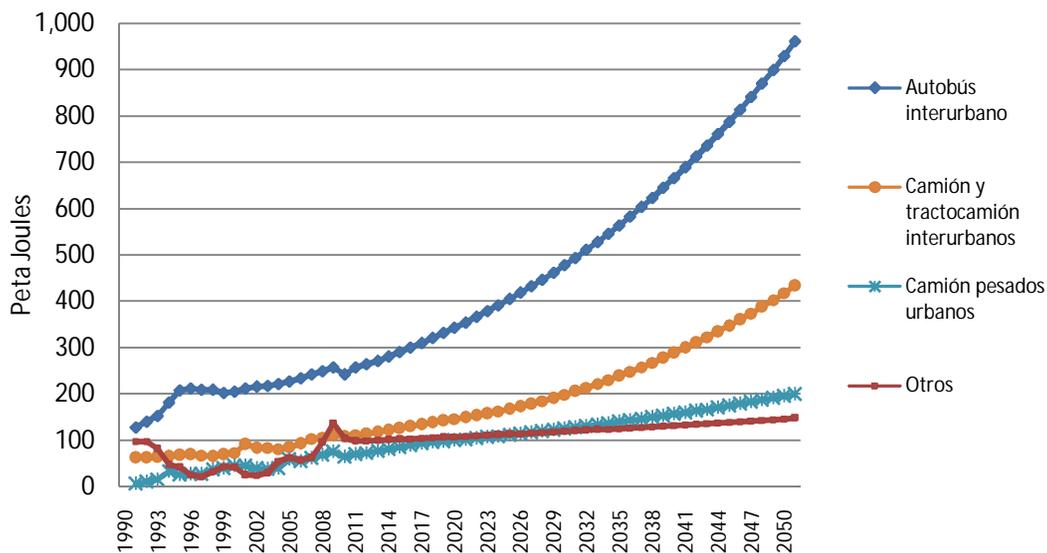


Figura 55. Evolución del consumo de diésel por modo.

Tabla 39. Estructura del consumo de combustibles del autotransporte en México en 2010, 2030 y 2050.

	2010	2030	2050
Automóvil privado	44%	35%	39%
Motocicleta	3%	7%	11%
Taxi	7%	6%	4%
Camiones ligeros	40%	48%	44%
Otros gasolina	6%	4%	2%
Gasolina	1,491	3,121	7,899
Autobús interurbano	48%	53%	57%
Camión pesado interurbano	7%	6%	4%
Tractocamión	13%	14%	16%
Camión pesado urbano	13%	14%	12%
Otros diésel	19%	14%	10%
Diésel	537	937	1,683
GLP	41	63	95
Consumo energético total (PJ)	2,069	4,121	9,677

Tabla 40. Variación en el consumo total de combustibles.

	1990-2010	2010-2030	2030-2050
Crecimiento del periodo	80%	99%	135%
TMCA	3.0%	3.5%	4.4%

Emisiones de CO₂ por categoría para 2010-2050

Entre 2010 y 2050, las emisiones del sector del autotransporte crecerán 370%, pasando de 146 a 678 TgCO₂. En este año, el consumo de gasolina será el responsable del 81% de las emisiones, el 18% corresponderá a la quema de diésel y el restante 1% al GLP. Lo que se ha dicho sobre el consumo desagregado de energía es aplicable aquí, es decir, los automóviles y los camiones ligeros serán los principales causantes de las emisiones, siendo las motocicletas el segmento de mayor crecimiento (16 veces las emisiones de 2010) y las camionetas el que más aumenta dentro de los vehículos particulares de pasajeros. En el

caso del diésel, de manera análoga al consumo energético, el autobús interurbano será el principal contribuyente a las emisiones de CO₂ (Tabla 41).

Tabla 41. Contribución de los modos de autotransporte a las emisiones de CO₂.

Modo	Combustible	2010	2030	2050
Camión ligero	Gasolina	28%	37%	35%
Automóvil	Gasolina	31%	27%	32%
Autobús interurbano	Diésel	13%	13%	11%
Motocicletas	Gasolina	2%	5%	9%
Camión y tractocamión	Diésel	5%	1%	4%
Otros	Gasolina y diésel	10%	7%	3%
Taxi	Gasolina	5%	4%	3%
Camión pesado urbano	Diésel	4%	3%	2%
Camión ligero	GLP	2%	1%	1%
Total (TgCO ₂)		145.7	280.2	678.13

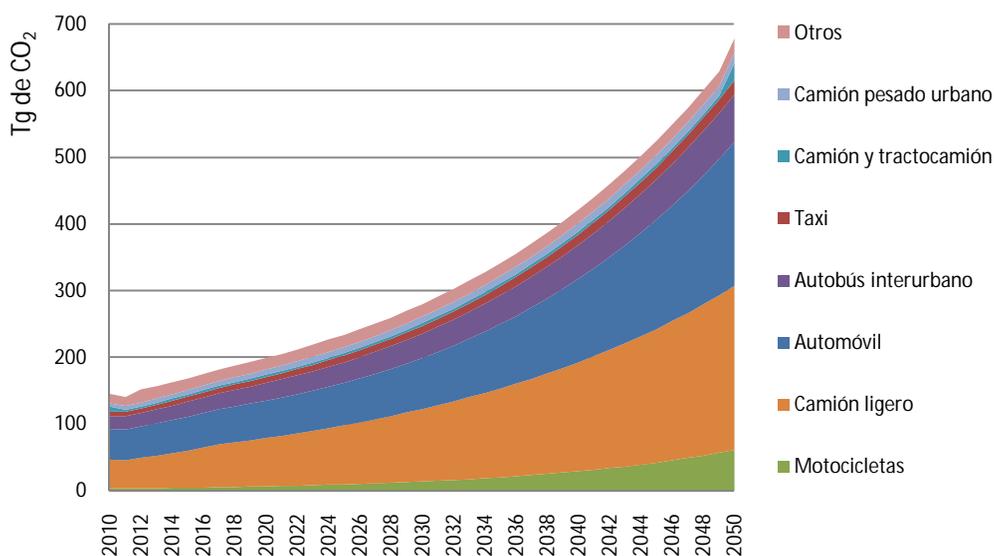


Figura 56. Evolución de las emisiones de CO₂ asociadas al autotransporte en México por modo.

Lo grave de la situación radica nuevamente en que los sectores que más aumentarán su consumo energético, y las emisiones de GEI asociadas, son los que mayores intensidades modales muestran. Si bien éstas últimas disminuyen debido al bajo pero continuo aumento

en el rendimiento del combustible en el escenario base, ello no es suficiente para que los automóviles dejen de ser el modo de transporte de personas más ineficiente (**Tabla 42**); en contraste, el BRT seguirá siendo el medio de transporte de personas de menor intensidad modal.

Tabla 42. Intensidades modales (g/pas-km) del autotransporte en 2010 y 2050 para el escenario base.

Modo	2010	2050
Auto privado	133	115
Motocicleta	107	107
Taxi	108	87
Autobús urbano	26	26
BRT	15	12

Análisis de sensibilidad

Con excepción de la variación a la TMCA de ventas en 2050, el parámetro que en mayor medida influye en las emisiones totales es el factor de emisión, incluso, es el único que hace variar los resultados para fechas anteriores a 2011 (**Tabla 43**), pues a diferencia de los parámetros restantes no está acotado por el BNE (pues este no trata con emisiones). La variación a la TMCA de ventas influye de manera importante en las emisiones totales a largo plazo (2050), puesto que incide en el crecimiento exponencial de la flota vehicular. La actividad vehicular y el rendimiento de combustible son más preponderantes a mediano plazo (2030). Con respecto a la variación de los parámetros permitida por el modelo, la de la actividad vehicular y su rendimiento no pueden ir más allá de los mostrados en el cuadro sin que el modelo arroje consumos y emisiones negativas para los datos históricos, de allí que dichas cifras serían los errores máximos del modelo, que rondan a los valores por defecto definidos por el IPCC. La variación con el signo contrario al mostrado no tienen limitación, pues cabe la posibilidad de que el total del consumo sea absorbido por la categoría *Otros* cuando el rendimiento de los demás tipos de vehículo sea demasiado alto, o cuando su actividad sea demasiado baja, sin embargo, tales extremos no tienen sentido.

Tabla 43. Resultado del análisis de sensibilidad

Parámetro	Variación en las emisiones totales de CO ₂ por cada punto porcentual de variación en el parámetro				Máxima variación permitida por el modelo
	2000	2010	2030	2050	
TMCA de ventas	-	-	0.51%	1.42%	N.A.
Factor de emisión	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%	N.A.
Actividad	-	-	0.42%	0.68%	6.40%
Rendimiento	-	-	-0.42%	-0.67%	-6.00%

6. Escenarios de mitigación del consumo de energía y de emisiones de CO₂.

Mayor rendimiento de combustible en los vehículos nuevos a gasolina.

En este escenario se establece que para 2050 deberá lograrse duplicar el rendimiento vehicular de 2016. Este objetivo no es excesivo, pues en general queda por debajo de los objetivos de la propuesta de regulación para el estado de California (EPA-DOE, 2011) hasta 2025; posteriormente, será necesaria la incorporación de vehículos de muy bajas emisiones, tales como los vehículos híbridos, para lograr la meta.

Como se apuntó en la introducción, según (IEA, 2012) para lograr mantener el incremento de temperatura global en 2°C, el rendimiento de los vehículos ligeros para pasajeros debe aumentar a razón de 2.7% anualmente hasta 2020. Para el escenario diseñado en esta tesis, la TMCA para 2016-2050 es de 2.2% y se mantiene así debido a que puede resultar complicado lograr grandes mejoras en el rendimiento después de los primeros años (después de 2025). De cualquier forma, con dicha TMCA, el rendimiento promedio para los vehículos de pasajeros en circulación en México en 2030 tendría un incremento del 43% con respecto de 2010, no muy lejano del requerimiento del 50% de (IEA, 2012). En 2025 el rendimiento de los vehículos rondará entre 16.5 km/l para las camionetas y los 22 km/l para los subcompactos, cercanos a los 21 km/l esperados para Estados Unidos según (ICCT 2012). El promedio de la flota de vehículos de pasajeros en circulación en México apenas estará en 11.4 km/l (para 2013 fue de 9.3 km/l), aunque para 2050 estará en 19.9 km/l, mientras que en dicho año, la flota de camiones ligeros tendrá un rendimiento de 17 km/l.

En la **Figura 57** se comparan el rendimiento vehicular que desarrollaría la flota de vehículos subcompactos en circulación (ponderando la estructura por edad) para cada una de las propuestas de mitigación. Dado que la propuesta de norma para el estado de California exige aumentos progresivos del rendimiento sólo hasta 2025, después de dicha fecha el rendimiento vehicular de la flota en circulación podría estancarse (en este sentido se considera lo que ocurre con la norma de California para 2025-2050).

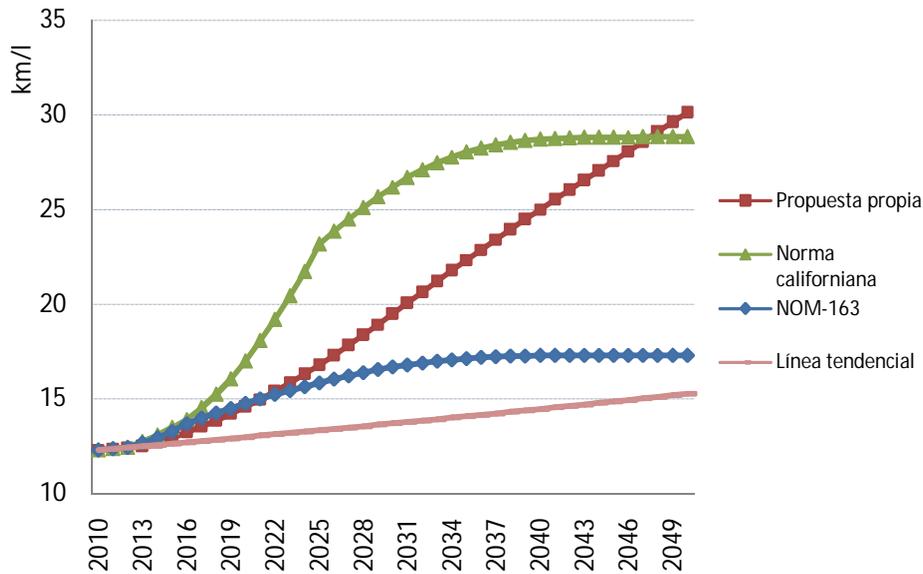


Figura 57. Rendimiento de combustible de los vehículos subcompactos en circulación para cuatro escenarios.

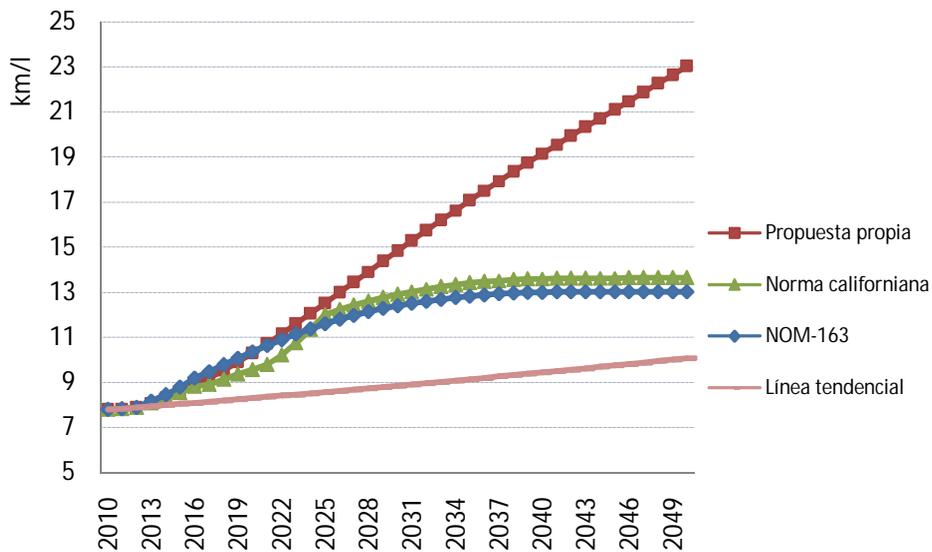


Figura 58. Rendimiento de combustible de las camionetas en circulación para cuatro escenarios.

Es notorio que la propuesta californiana es bastante más exigente que la NOM-163, la cual establece sólo 4 años de regulación (2013-2016) y sólo permitirá elevar el rendimiento general de la flota de vehículos subcompactos durante algunos años, quedando con el tiempo el rendimiento de combustible muy cercano a la línea tendencial. Por su parte, la

propuesta de esta tesis hace continuos los primeros impulsos de la NOM-163 para establecer mejoras continuas hasta 2050. Para el caso del rendimiento de la flota en circulación de camionetas (**Figura 58**), la NOM-163 y la norma de California señalan caminos muy parecidos, obteniéndose considerables mejoras con respecto de la línea tendencial en los rendimientos de las camionetas, aunque después de 2025, de no existir continuidad para la norma, comenzaría a estancarse el rendimiento de combustible. La propuesta propia de esta tesis exige un gran incremento en los rendimientos del segmento. No ocurre que esta exigencia sea desmedida, pues es de la misma magnitud que la hecha a los demás segmentos: duplicar el valor de 2016, más bien, puede decirse que las otras propuestas son laxas para este segmento, corriéndose el riesgo de alentar el consumo de vehículos cada vez más pesados (aumentando las ventas de estos segmentos las armadoras de vehículos corren menos riesgo de sobrepasar los límites ambientales). Por el contrario, con la propuesta de esta tesis se propone alentar un menor consumo de los vehículos menos eficientes. En lo que toca al segmento de camiones ligeros, la propuesta propia mantiene también un crecimiento progresivo de los límites mínimos que deben alcanzarse en el segmento (**Figura 59**). Para este escenario de mitigación el ahorro energético sería de 4,550 petajoules (PJ), a los que le corresponden 315 millones de toneladas de CO₂ evitadas.

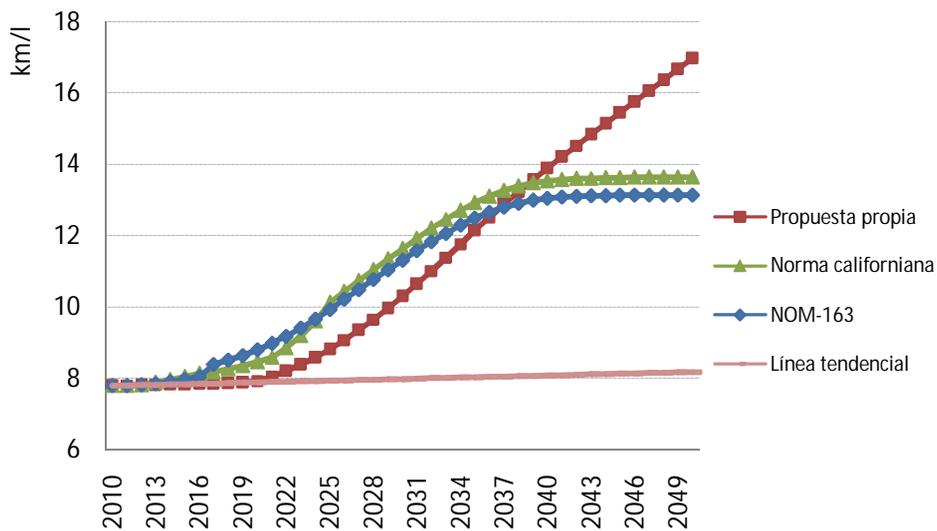


Figura 59. Rendimiento de combustible de los camiones ligeros en circulación para cuatro escenarios.

Mayor rendimiento de combustible en los camiones nuevos a diésel.

Como se dijo en la descripción de la metodología, la referencia tomada para la construcción de este escenario la propuesta de norma estadounidense discutida en (ICCT, 2011). En la **Figura 60** se muestra los efectos de dicha propuesta, y de la propia, sobre el rendimiento alcanzado por la flota de camiones pesados en circulación, así como la línea tendencial. Dado que la propuesta estadounidense sólo exige para 2017 un incremento porcentual en el rendimiento de los vehículos con respecto al de 2014, prontamente los beneficios sobre el total de la flota se ven estancados si no hay incrementos ulteriores en los vehículos nuevos. Es notorio que incluso con el aumento tendencial del rendimiento de combustibles, el escenario base cumpliría sin dificultad dicha propuesta⁴². En la propuesta de esta tesis, la TMCA para 2013-2050 del rendimiento de los camiones a diésel resulta de 2.1%, por debajo del potencial 3.5% anual (ICCT, 2012), sin embargo, de la misma manera que se justificó para los vehículos ligeros, mantener tales tasas de mejora puede ser complicado para largos periodos; por otro lado, aún no entra en vigor en México regulación alguna al respecto, solamente está en operación el programa Transporte Limpio de la SCT-SEMARNAT. Como resultado de la mejora del 2.1% anual en el rendimiento de esta flota, en 2030 la eficiencia de la flota de camiones a diésel aumentaría 32% con respecto de 2010 y para 2050 el cambio sería de 118% con respecto a la misma base. Nuevamente ha de insistirse en que se requerirá de la introducción de camiones híbridos para alcanzar los últimos niveles de rendimiento de esta propuesta de mitigación.

Con la propuesta de esta tesis, en 2050 el ahorro en diésel sería de 745 PJ con respecto a la línea base. Cabe señalar que la propuesta de norma estadounidense se cumpliría por la tendencia histórica estimada para esta tesis. En relación con las emisiones de CO₂ evitadas, en el escenario propio de esta tesis los ahorros alcanzan los 55 millones de toneladas del gas.

⁴²Sin embargo, esta comparación debe tomarse con reservas, pues debido a la escasez de información reciente, la línea tendencial fue construida con datos de la década de los 90's.

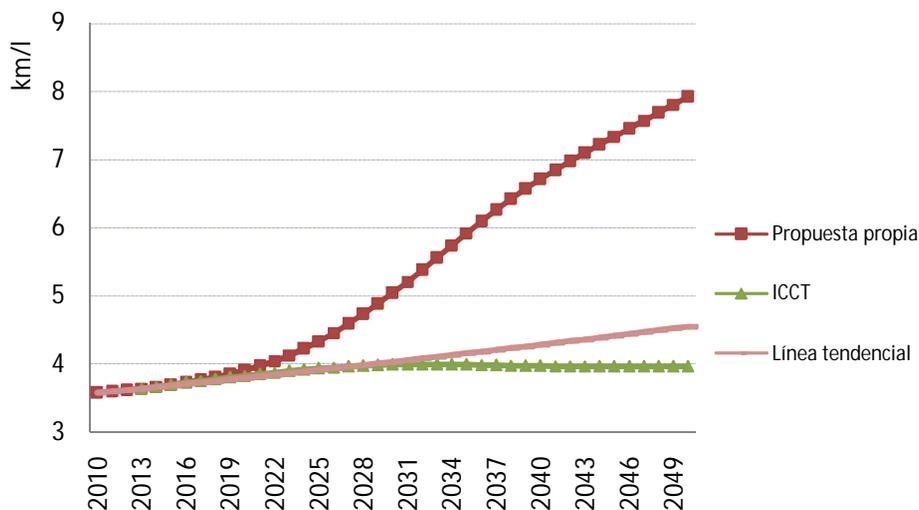


Figura 60. Rendimiento de combustible de los camiones pesados en circulación para tres escenarios.

Restricción al crecimiento de la flota de camionetas de pasajeros.

Aun con el aumento en el rendimiento de combustible en las camionetas, su eficiencia no alcanza los mismos niveles que para los automóviles subcompactos (**Figura 61**). Como resultado del escenario de restricción al crecimiento de las camionetas, esta desventaja es atenuada frenando la incorporación de camionetas. Según el escenario base, la venta de camionetas llegará en 2050 a 3.15 millones de vehículos, en este escenario de mitigación, las ventas se retraen progresivamente y en dicho año se venderían 174 mil unidades. Por supuesto, la venta de vehículos subcompactos se incrementan para absorber la demanda de vehículos.

Con este esquema de mitigación se lograría en 2050 una reducción del consumo energético de 111 PJ, equivalente a poco menos de 3,400 millones de litros de gasolina en ese año, ahorro nada despreciable dada la urgencia de reducción de emisiones, las cuales alcanzarían en este escenario, 7.7 millones de toneladas de CO₂ en 2050.

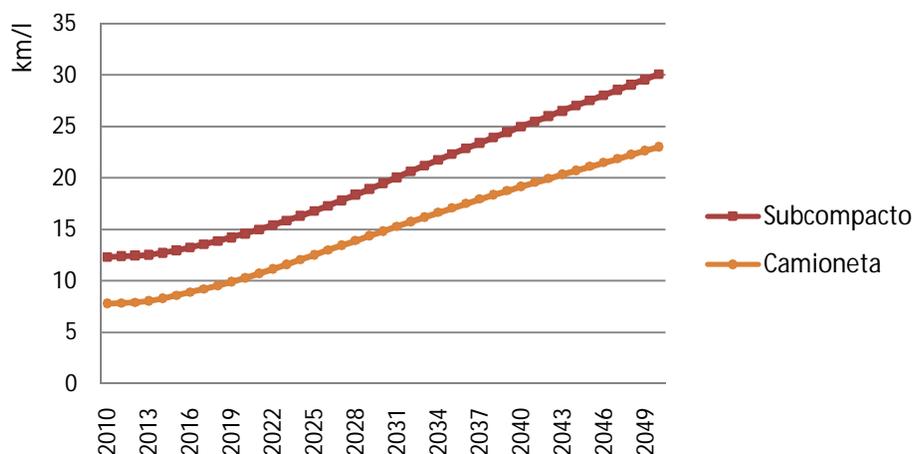


Figura 61. Rendimiento de combustible de subcompactos y camionetas en circulación bajo el escenario de aumento de eficiencia.

Uso de automóviles eléctricos.

La velocidad de penetración de los vehículos eléctricos es una gran incógnita. Existen algunos estudios que proporcionan alguna idea de la participación que tendrán en el mercado los vehículos eléctricos (**Tabla 44**), sin embargo, cuando lo hacen, la mayoría de ellos detalla la información para los vehículos híbridos en 2030, pero no para los vehículos eléctricos totalmente impulsados por baterías (BEV), a excepción de uno de la Agencia Internacional de Energía (IEA) que indica que un 7% para este tipo de vehículos si se requiere alcanzar el escenario 450 ppm, o bien, lo ya dicho en la introducción de acuerdo con ICCT (2012). Como resultado, las estimaciones para los vehículos híbridos son muy inciertas: por ejemplo, desde 3% en la zona Europea en un escenario *Business as Usual* (BAU) hasta 30% de la distancia recorrida por vehículos eléctricos en la misma zona.

En el escenario propuesto en esta tesis se propuso para el año de 2050 una penetración en ventas del 20%, originando una penetración efectiva del 11.7% con respecto a la flota total de vehículos ligeros. En 2030, la proporción de ventas sería cercana al 1.45%, cifra compatible con los pronósticos del 1-2% de (ICCT, 2012). En la **Figura 62** se presenta la penetración de ventas de vehículos BEV y su proporción resultante en la flota de vehículos ligeros. El esquema de penetración es una sigmoide que representa las fases de irrupción, maduración y saturación de un mercado. Como puede apreciarse, la respuesta en la flota vehicular no es inmediata, debido al bajo factor de desecho de la flota, la presencia de

vehículos eléctricos tardará varios años en alcanzar los mismos niveles que las ventas; sólo hasta la fase de maduración comienza a cerrarse la brecha, por lo que los beneficios de este esquema también tardarán tiempo en llegar.

Tabla 44. Estimaciones sobre de la penetración de vehículos eléctricos en Europa, Estados Unidos, y Japón en 2030

Estimación	Región	Instituto
9% de ventas son PHEVs	OCDE	AIE
21% PHEV y 7% BPEV en un escenario 450 ppm	OCDE	AIE
30% de la distancia en automóvil en vehículos eléctricos, principalmente PHEVs (5–38%)	UE	ECN
6% de participación en el mercado de los vehículos eléctricos en un escenario BAU y 12% en un escenario de reducción de carbono	UE	Comisión Europea
3% de participación en el mercado de los vehículos eléctricos en un escenario BAU	UE	Comisión Europea
Los vehículos eléctricos comprenden el 24% de la flota de vehículos ligeros	USA	Berkeley
2% de los vehículos ligeros son PHEV	USA	AIE
20% de la distancia en automóvil se recorre en vehículos eléctricos en 2030 y 50% de la venta de carros es un PHEV	USA	EPRI
Alrededor de 27% de la flota total consistirá en PHEVs	USA	Laboratorio U.S. National Renewable Energy
40% de los vehículos ligeros serán PHEVs en 2030	USA	Laboratorios Argonne National
PHEVs constituirán entre el 10% y el 30% de la flota vehicular	Japón	MIT
80% de la flota de automóviles consistirá de PHEVs	Japón	Universidad de Tokio

UE: Unión Europea
USA: Estados Unidos

Fuente: (Van Vilet, 2011)

En la **Tabla 45** se muestra el consumo energético por cada 100 millas (intensidad energética) para algunos modelos de vehículos eléctricos disponibles comercialmente. Se toma el consumo reportado para el ciclo combinado (ciudad y carretera) para definir las intensidades energéticas usadas en este escenario de mitigación. Debido a los avances en

autonomía, no es posible asegurar que los vehículos eléctricos se usarán únicamente dentro de las ciudades, por lo que no es posible tomar el mayor rendimiento del ciclo citadino. El hecho de incluir los camiones ligeros y las motocicletas en este esquema reduce ligeramente la eficiencia energética promedio, que sigue siendo, por mucho, mejor a la de la flota de vehículos convencionales (Tabla 46). Con datos provenientes de (Van Vleet, 2011) se calcula que las eficiencias de este tipo de vehículos mejorarán a razón de 1% anual.

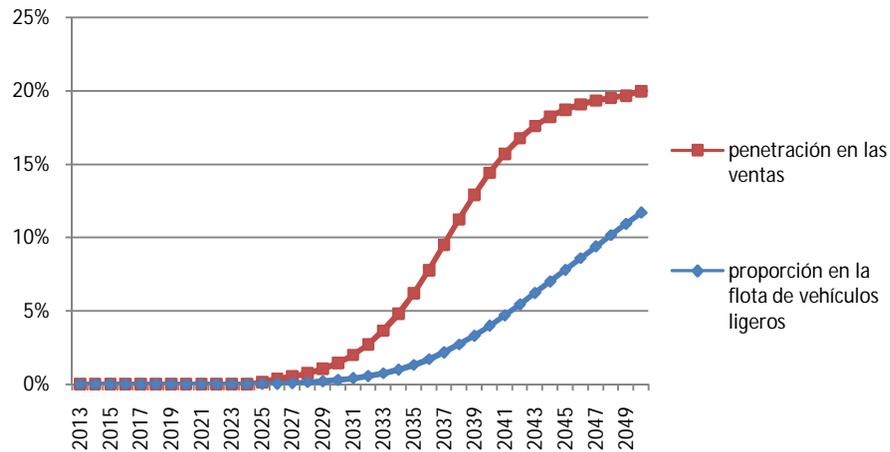


Figura 62. Penetración de los vehículos eléctricos impulsados por baterías bajo dicho esquema de mitigación.

Tabla 45. Consumo energético en el ciclo combinado para algunos modelos de vehículos eléctricos.

Vehículo	Intensidad energética TTW (kWh/100mi)
2013 Mitsubishi i-MiEV	30
2013 Toyota RAV4 EV	44
2013 Tesla Model S	38
2013 Ford Focus	32
2013 Smart fortwo Electric Drive Coupe	32
2013 Fiat 500e	29
2013 Honda FIT EV	29
2012 Azure Dynamics Transit Connect Electric Van	54

Fuente: Consultado en (EPA-DOE, 2013)

Tabla 46. Parámetros de consumo usados en el escenario de mitigación por vehículos eléctricos.

Segmento	kWh/100mi (TTW)	Wh/km (TTW)	Equivalente en km/l
Motocicletas	14	88	103
Subcompacto	30	186	49
Compacto	32	199	46
Deportivo	38	236	38
Lujo	38	236	38
Camioneta	44	273	33
Taxis	30	186	49
Camión ligero	54	336	27
Promedio ponderado automóviles	34	214	43
Promedio ponderado vehículos ligeros	35	221	41

Aún cuando los vehículos eléctricos no generan emisiones de CO₂ durante su tránsito, el uso de esta tecnología no está totalmente exento de emisiones de GEI, las baterías necesitan ser recargadas a través de la red eléctrica, de allí que las emisiones asociadas al uso de vehículos totalmente eléctricos estén en relación con las tecnologías usadas en la generación eléctrica. En México la participación de energías renovables en la generación eléctrica es aún baja, aunque se espera que sea cada vez mayor, y de seguirse la tendencia marcada por el POISE 2011-2025, en 2050 el factor de emisión de la red eléctrica será muy cercano al proveniente de la quema de gasolina en los vehículos de combustión interna (**Figura 63**).

En la (**Figura 64**) se muestra la evolución del rendimiento promedio de los vehículos eléctricos en relación con el rendimiento promedio de la flota vehicular en el escenario de aumento de eficiencia. En 2013, la flota de vehículos eléctricos tendría un rendimiento de cuatro veces la de la flota de vehículos convencionales más híbridos. Ese mismo año, los vehículos eléctricos tendrían un factor de emisión de CO₂ del doble que la de la flota de vehículos convencionales más híbridos. Bajo nuestro escenario de aumento de energía en los motores de combustión interna, en 2050 los vehículos con dichos motores recorrerían,

con la misma cantidad de energía, la mitad de la distancia que los vehículos eléctricos y prácticamente emitirían la misma cantidad de CO₂. De esta manera, el efecto neto sobre las emisiones de CO₂ prácticamente permanecerá constante de 2013 a 2050 bajo nuestros escenarios de mitigación, es decir, la flota de vehículos eléctricos emitirá la mitad de emisiones por unidad de energía que el conjunto de vehículos convencionales e híbridos.

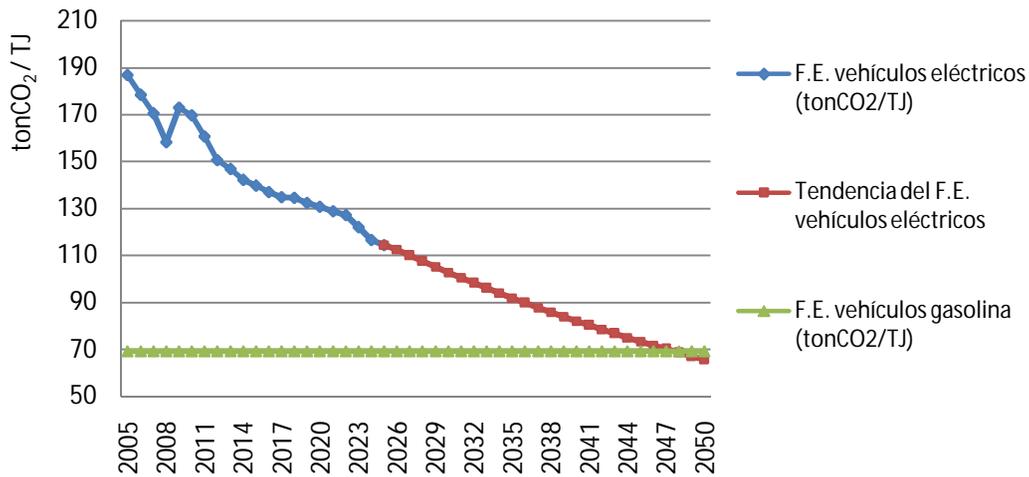


Figura 63. Evolución del factor de emisión (F. E.) del sistema eléctrico mexicano. Fuente: (Sheinbaum, 2013) para 2005-2025 y cálculos propios para 2026-2050.

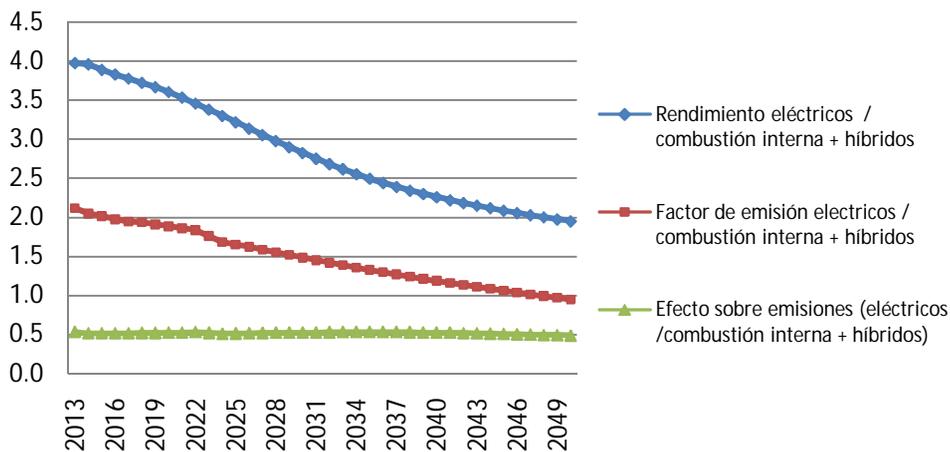


Figura 64. Evolución del rendimiento y del factor de emisión para vehículos eléctricos en relación con la flota de convencionales más híbridos .

En términos absolutos, el ahorro en energía (específicamente de gasolina) es de 249 PJ en 2050 con respecto del escenario base. A dicho monto, corresponden casi 18 millones de toneladas de CO₂ que se evitan arrojar a la atmósfera en el mismo año, las cuales se desglosan como: 28 millones que se evitan por no quemar gasolina, menos 10 millones que se emiten de más con respecto al escenario base debido a la carga de baterías a través de la red eléctrica.

Cambio modal a sistemas BRT

Según (Power Mex, 2006), los resultados del cambio modal debido al BRT en 2006 son los mostrados en la **Figura 65**. De los usuarios que abandonaron su automóvil, 54% lo dejaron estacionado, de manera que puede considerarse el cambio modal efectivo como un 5.2%⁴³ para el automóvil privado. En 2011 la proporción de usuarios del Metrobús que dejaron su automóvil estacionado fue de 16.2% (Metrobús, 2012) (**Tabla 47**) y si bien no se conoce la reducción efectiva de vehículos-km, (ICCT, 2012) la calcula en 9.5% para 2030 considerando las políticas actuales y en 19% para la misma fecha en caso de mantener el paso mostrado últimamente por las inversiones en sistemas BRT

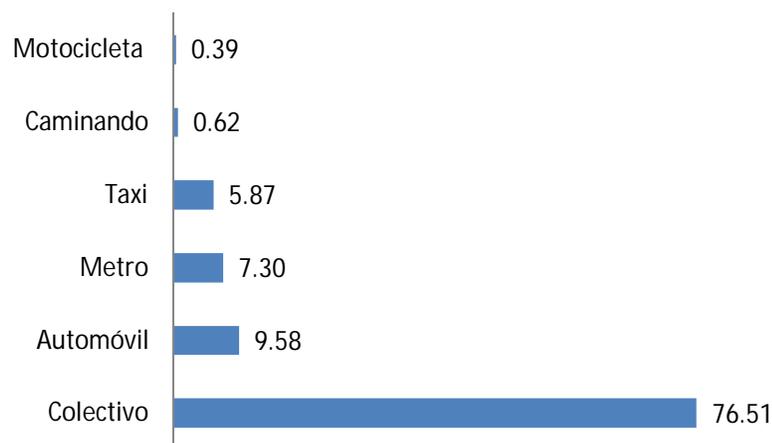


Figura 65. Cambio modal de los usuarios del Metrobús sobre Insurgentes en 2006 como porcentaje de los nuevos usuarios.
Fuente: (Power Mex, 2006).

⁴³ (54%)*(9.58%)

Tabla 47. Cambio modal en el metrobus sobre Insurgentes en 2011 como porcentaje de sus usuarios.

Concepto	Porcentaje
No tiene automóvil	76.3
Automóvil estacionado	16.2
Automóvil ahora lo usa otra persona	4.2
Automóvil descompuesto u otro	3.4

Fuente: (Metrobús, 2012).

Tabla 48. Parámetros considerados en el escenario de mitigación por BRT.

Parámetro	Valor
Factor de ocupación del automóvil privado y taxi	1.7
Factor de ocupación de BRT	160
Distancia diaria promedio recorrida por BRT	280
Rendimiento de combustible del BRT en 2013 (km/l)	1.1
Automóviles privados que reducen su recorrido al 2050	50%
Taxis y motocicletas que reducen su recorrido al 2050	20%
Reducción del recorrido en cada vehículo	50%

Se considera que en 2050, la proporción de usuarios que abandonan su auto a favor del BRT aumentará a 50% (lo cual da como resultado una reducción efectiva del 25% de la actividad en los automóviles y camionetas particulares). Con dicha selección, en 2030 la reducción efectiva sería de 11.8% de los kilómetros recorridos por los vehículos particulares, sólo 2.5 % por encima de las estimaciones de (ICCT, 2012) con políticas actuales, pero 7% por debajo del potencial calculado por la misma fuente. No se asume todo el potencial debido principalmente a que no todos los viajes en automóvil son efectuados en centros urbanos densamente poblados: una porción importante de viajes corresponden a usuarios de automóvil que radican fuera de ciudades y otra porción son realizados por ciudadanos que realizan viajes foráneos. Asimismo, se considera que un 20%

de motocicletas y taxis reducen a la mitad su recorrido para 2050, con lo cual la reducción efectiva en 2030 para estos vehículos sería de 4.7%. Los parámetros necesarios para la modelación del escenario de mitigación por BRT son condensadas en la **Tabla 48**. Por otro lado, en el porcentaje definido se pretende incluir también las emisiones evitadas debido a la sustitución de colectivos, especialmente los microbuses (menos eficientes que los BRT), así como las emisiones adicionales debido al cambio modal desde otros medios de menor intensidad modal que el BRT, tales como la caminata o el Metro.

El resultado de este escenario de mitigación es de 358 PJ de gasolina ahorrados en viajes privados, menos 54 PJ correspondientes al consumo de diésel para mover los camiones BRT, dando una mitigación neta de 304 PJ de energía en 2050. Aplicando el factor correspondiente a la gasolina y al diésel, este escenario brinda un beneficio de casi 21 millones de toneladas de CO₂ que no se emitirían a la atmósfera en dicho año. El número de vehículo-kilómetros que requieren absorberse, así como los autobuses necesarios para las reducciones señaladas, se muestran en la **Tabla 49**. Cabe apuntar que la sensibilidad de este esquema de mitigación es de 0.85, o en otros términos, si el porcentaje de automóviles que disminuyen su recorrido es del 20% (en vez del 40%) las emisiones evitadas de CO₂ bajan 85%.

Tabla 49. Veh-km que debe absorber el BRT y autobuses necesarios.

Concepto	2013	2020	2030	2040	2050
Veh-km que debe absorber el BRT en reemplazo de autos (millones)	16	150	476	1,246	3,011
Veh-km que debe absorber el BRT en reemplazo de taxis y motocicletas (millones)	1	16	62	176	454
Veh-km totales por absorber (millones)	17	166	538	1,422	3,465
Autobuses BRT necesarios	167	1,621	5,259	18,918	33,903

Uso de la mezcla etanol-gasolina

Debido a la necesidad de desarrollar la industria del etanol en México para satisfacer las necesidades energéticas además de las de consumo humano, se propuso la velocidad de penetración mostrada en la **Figura 66**.

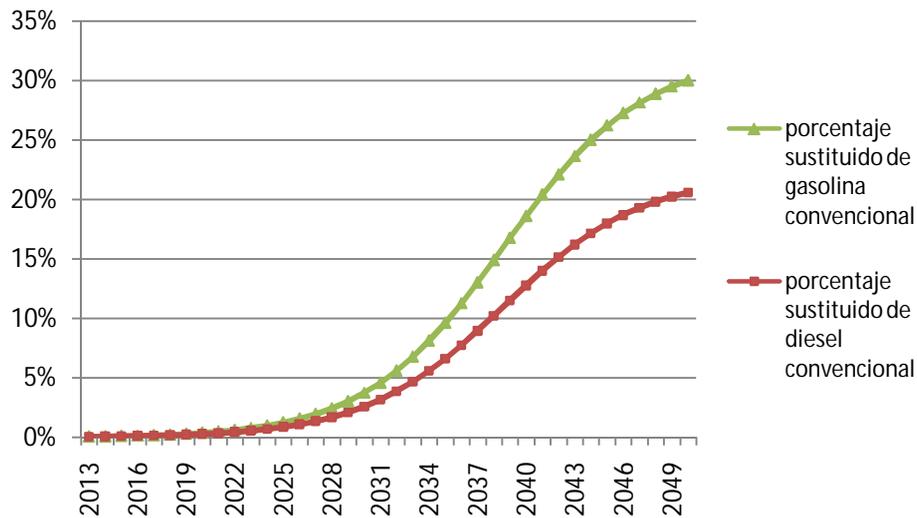


Figura 66. Penetración del consumo de biocombustibles (etanol y biodiésel).

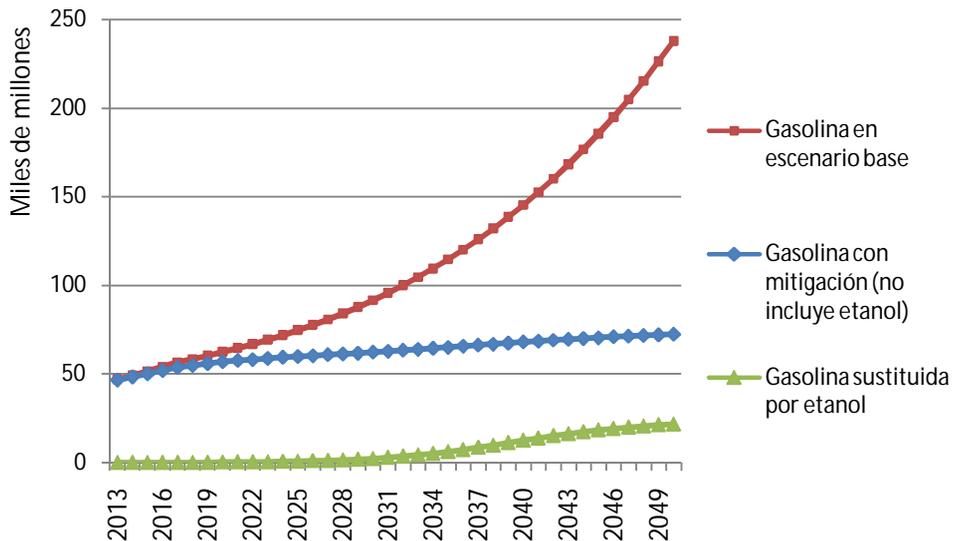


Figura 67. Consumo de gasolina bajo el escenario base y bajo escenarios de mitigación.

Dado que se pretende aplicar conjuntamente los escenarios diseñados en el presente trabajo, la proporción de etanol usado no es con referencia a la gasolina consumida en el escenario base, sino en relación con la cantidad de gasolina que se consumiría bajo la aplicación de los escenarios de mitigación, es decir, debe descontarse del escenario base la gasolina que ya no se consume debido a las mejoras en el rendimiento de combustible, al menor crecimiento de camionetas de pasajeros, a la porción de la flota de vehículos eléctricos, al cambio modal a sistemas BRT y a causa de la disminución en el crecimiento de camiones ligeros. En la **Figura 67** se aprecia la gran diferencia, no puede ahorrarse gasolina donde no se le ha usado, por lo que el etanol sustituye sólo a la gasolina que aún se utiliza (línea intermedia). El hecho de que el consumo de gasolina, bajo los escenarios de mitigación hasta aquí aplicados, vaya descendiendo, produce que la penetración neta del etanol no sea tan abrupta como parece indicar la **Figura 66**: en relación con los niveles de consumo de 2013 la cantidad de etanol requerida cada año no aumenta tan aceleradamente (**Tabla 50**). Esta condición puede ser aprovechada para modificar en la marcha el esquema de mitigación y fomentar en los últimos años un porcentaje más allá del 30% de mezcla de etanol en la gasolina, de manera que la introducción de etanol continúe en franco ascenso aún en el periodo 2041-2050. Dichos niveles requerirían sin embargo, de una importante incorporación de motores flex-fuel.

Tabla 50. Etanol requerido en el escenario de mitigación.

Año	Millones de litros de etanol
2013	37
2015	63
2020	228
2025	752
2030	2,314
2035	6,176
2040	12,530
2045	18,370
2050	21,704

Por otro lado, es importante hacer notar que el uso de biocombustibles, cuando estos se obtienen de del procesamiento de cultivos, no son neutros en cuanto a las emisiones de

GEI. A menos que se destinen superficies actualmente cultivadas (corriéndose el riesgo de desplazar la producción de alimentos), la generación de biocombustibles a través de cultivos tiene importantes impactos de emisiones de GEI debido al cambio en el uso del suelo. Las emisiones de CO₂ equivalente para la producción de etanol en México son de 57.5 kgCO₂e por cada GJ de biocombustible⁴⁴, de las cuales 36.8% están relacionadas con la producción agrícola de la caña de azúcar y 53.6% son debidas al cambio en el uso del suelo derivado del establecimiento de cultivos (**Figura 68**). Esta última porción es la considerada para el cálculo de las emisiones asociadas (emisiones que no son neutras en cuanto a emisiones de GEI) dando como resultado un factor de emisión para la producción del etanol en México de 34.3 kgCO₂e/GJ si se considera un periodo de 20 años para la amortización de las emisiones, pero dado que nuestro periodo de estudio es 2013-2050, el factor de emisiones considerado es de 19.6 kgCO₂e/GJ por año.

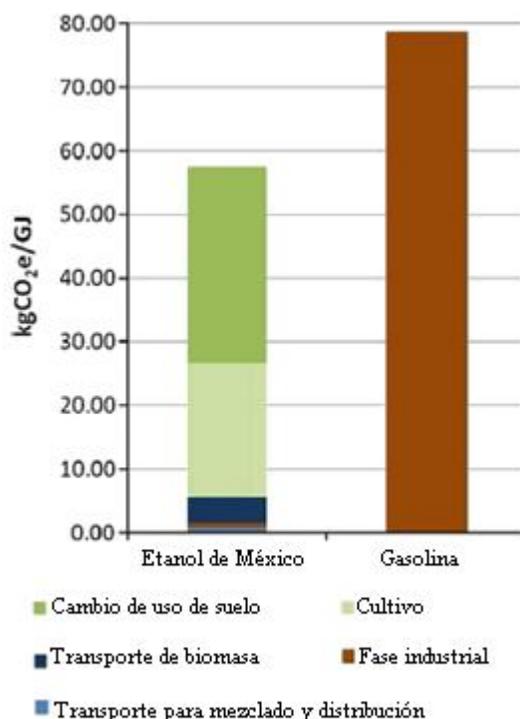


Figura 68. Emisiones de GEI en la producción y distribución de etanol y gasolina en México.
Fuente: (García et. al., 2012)

⁴⁴ Si bien este factor de emisiones es superior al brasileño (30kgCO₂ / GJ de biocombustible como se apuntó en la sección de antecedentes) es aún competitivo en cuanto a mitigación de GEI. Por otro lado, este factor puede mejorar en la medida de que los biocombustibles avanzados vayan incorporándose al mercado.

Con los parámetros expuestos para este escenario se obtiene un ahorro de 748 PJ de gasolina en 2050. A este ahorro se le asocian 39 millones de toneladas de CO₂ que no se emiten a la atmósfera debido a los cultivos usados para la producción de etanol. Las emisiones evitadas no son mayores porque, como ya se ha dicho, se ha considerado el efecto pernicioso del cambio en el uso del suelo.

Para tales niveles de ahorro de energía, se requerirán en 2050 de una producción de etanol de cerca de 21 mil millones de litros sólo para uso como combustible (Tabla 50). En contexto, México tenía en 2005 la infraestructura para producir 66 millones de litros de etanol (principalmente para su uso como bebida y en cuidados de la salud) (Islas et. al., 2007) con la cual se produjeron 50 millones de litros en la zafra de 2005/2006 (Tabla 51), aunque para la de 2011/2012 se obtuvieron sólo 15 millones de litros. Según (Index Mundi), México produjo, tanto en 2010 como en 2011, trescientos barriles diarios de etanol para combustible, lo cual equivale a 17.4 millones de litros por año. Aún cuando dichas cifras sean correctas, lo cierto es que México requerirá de un enorme esfuerzo para alcanzar la producción de etanol requerida para desarrollar este escenario de mitigación. Para 2050, el país debería ser capaz de alcanzar el nivel actual de producción de Brasil o prácticamente la mitad del estadounidense. En otros términos, México deberá aumentar su producción de etanol para combustible en alrededor de mil veces con respecto a la actual (con una TMCA de aproximadamente 21%).

Tabla 51. Producción de alcohol en México para consumo humano (salud y bebidas).

Zafra	Producción de alcohol (millones de litros)
2011/12	15.3
2010/11	19.3
2009/10	11.8
2008/09	14.5
2007/08	19.4
2006/07	38.9
2005/06	50.1
2004/05	59.3
2003/04	34.6

Fuente: Elaboración propia con datos de (UNC)

Tabla 52. Producción mundial de etanol para combustible (Cifras en millones de litros).

País / Región	2007	2008	2009	2010	2011	2012
EE.UU.	24,685	35,238	41,405	50,338	52,799	50,346
Brasil	19,000	24,500	24,900	26,201	21,097	21,111
Europa	2,159	2,777	3,937	4,575	4,420	4,463
China	1,840	1,900	2,052	2,050	2,100	2,101
Canadá	800	900	1,102	1,350	1,750	1,700
Asia (excepto China)	500	590	1,995	925	1,268	1,503
Sudamérica (excepto Brasil)	284	300	314	758	752	844
México & Centroamérica	n.d.	n.d.	n.d.	1,379	148	72
Australia	100	100	216	250	330	269
África	n.d.	n.d.	n.d.	165	145	159
Otros	310	485	935	250	n.d.	n.d.
Mundial	49,676	66,789	76,855	88,241	84,627	82,567

n.d.: No disponible

Fuente: Elaboración propia con datos de (AFDC)

Tabla 53. Consumo de agua en la producción de etanol y gasolina en m³/GJ

	Etanol en México	Gasolina
Agua verde ⁴⁵	122	0
Agua azul	1.0	0.23

Fuente: (García et. al., 2012)

Una preocupación importante para el tema de la producción de biocombustibles es el abasto del agua para los cultivos. En la **Tabla 53** se muestra los requerimientos de agua por GJ de combustible. Como se observa, el requerimiento de agua es considerablemente mayor para la producción de etanol, pero también es cierto que la mayoría de esta agua tiene como

⁴⁵ Agua verde (Green water) hace referencia al agua de lluvia evapo-transpirada durante el crecimiento de los cultivos. Agua azul (Blue water) alude al agua (subterránea y de superficie) usada para la irrigación y los procesos industriales y de refinación.

fuente directa la lluvia⁴⁶. Considerando únicamente el agua azul, los requerimientos del líquido por unidad energética para la producción de etanol son al menos⁴⁷ 4.3 veces que el requerido para la producción de gasolina. Como referencia considérese que en Estados Unidos son necesarios 4.6 litros de agua para producir un solo litro de gasolina (García et. al., 2012).

Tabla 54. Requerimientos de agua azul en millones de m³ bajo el escenario base y el de mitigación sólo por etanol.

Escenario	2013	2030	2050
Escenario base (gasolina)	186	345	872
Escenario de mitigación por etanol	187	405	1244
Diferencia	0.6%	17.5%	42.6%

Se considera sólo la producción nacional de gasolina, descontando para ello las importaciones.
Se mantiene en todo momento el nivel de importaciones de 2011 (52%).

Fuente: Cálculos propios.

Tabla 55. Requerimientos de agua azul en millones de m³ para el escenario base y el de mitigación conjunta

Escenario	2013	2030	2050
Escenario base (gasolina)	186	345	872
Todos los escenarios de mitigación (gasolina)	186	301	874
Diferencia	-0.2%	-12.5%	-0.2%

Se considera sólo la producción nacional de gasolina, descontando para ello las importaciones.
Se mantiene en todo momento el nivel de importaciones de 2011 (52%).

Con estos niveles de consumo y en caso de aplicarse solamente el esquema de mitigación con etanol, se requerirá 1.4 veces la cantidad de agua azul que en el escenario base (**Tabla 54**). En caso de aplicarse todas las medidas de mitigación analizadas, el consumo de agua

⁴⁶ Además, es posible que el cálculo del agua necesaria para la producción de gasolina no esté considerando el agua necesaria para la extracción de crudo.

⁴⁷ En (García et. al., 2012) se consideran únicamente destiladoras autónomas (las cuales no requieren irrigación para los cultivos)

azul se reduce con respecto a la mitigación sólo por etanol para quedar en 2050 en los mismos niveles que en el escenario base (**Tabla 55**). En caso de considerarse también el agua verde, el escenario de mitigación conjunta requiere de 28 veces más agua en 2030 y de 105 veces más agua en 2050 en comparación con el escenario base. Es importante considerar el consumo de agua verde si ésta puede ser destinada a otros cultivos o para servicios ambientales.

Uso de la mezcla biodiésel-diésel

Al igual que en el caso del etanol, la velocidad de introducción del biodiésel asumida para México se trata también de una sigmoide (**Figura 66**) que brinda tiempo para crear las condiciones para la producción nacional del biodiésel.

Debido a las altas tasas de crecimiento de los vehículos a diésel, las cuales superan al crecimiento esperado en su rendimiento, el consumo de diésel logra mitigarse en parte con dicho escenario pero sin alcanzar a estabilizarse (**Figura 69**). Por ello, en comparación con el consumo de etanol, el del biodiésel muestra una tendencia mayormente a la alza (**Tabla 56**). Para comenzar a operar dicho escenario, el primer año se requieren de 7 millones de litros anuales de biodiésel, cantidad muy semejante a los 6 millones que se produjeron en 2007. Sin embargo, desde 2007 y hasta 2011 no hubo ningún incremento en la producción nacional del biocombustible (**Tabla 57**), a diferencia de países como Colombia, Indonesia, Argentina, Tailandia o Brasil que exhiben TMCA en su producción de biodiésel muy altas. El incremento promedio requerido de la producción anual de biodiésel para abastecer a este esquema de mitigación está en el orden de 19% anual, meta alcanzable al comparar dicho nivel con los logros realizados por otras naciones. Para abastecer el biodiésel necesario en 2040 para este escenario, México deberá alcanzar una capacidad de generación semejante a la actual producción argentina, y para 2050, deberá duplicarla. Con el fin de abastecer la creciente demanda de combustibles para el autotransporte sin desatender la problemática ambiental, México deberá impulsar la producción de biodiésel (y su consumo en el autotransporte) a un ritmo exponenciales semejante al mostrado a nivel mundial (**Figura 70**), todo ello sin comprometer el abasto alimentario.

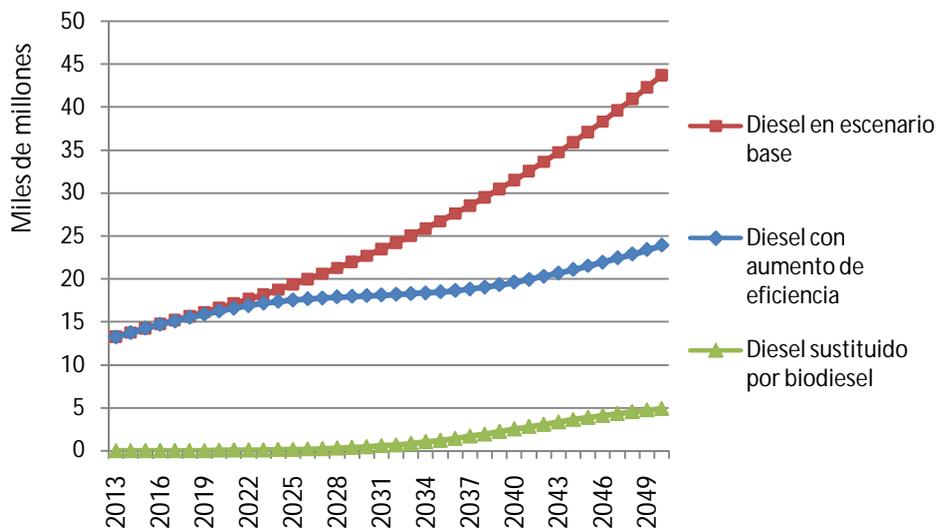


Figura 69. Consumo de diésel bajo el escenario base y bajo escenarios de mitigación.

Tabla 56. Biodiésel requerido en el escenario de mitigación.

Año	Millones de litros de biodiésel
2013	7
2015	12
2020	45
2025	152
2030	464
2035	1,222
2040	2,526
2045	3,937
2050	5,057

Tabla 57. Principales productores de biodiésel en 2011 (en millones de litros anuales).

Posición global	País	2007	2011	Participación en 2011	TMCA (2007-1011)
1	Estados Unidos	1,854	3,662	15.6%	19%
2	Alemania	3,308	3,018	12.9%	-2%
3	Argentina	209	2,747	11.7%	90%
4	Brasil	404	2,673	11.4%	60%
5	Francia	1,085	1,973	8.4%	16%
6	Indonesia	58	1,161	5.0%	111%
7	España	203	696	3.0%	36%
8	Italia	534	650	2.8%	5%
9	Tailandia	70	592	2.5%	71%
10	Holanda	99	557	2.4%	54%
11	Colombia	6	522	2.2%	208%
12	Bélgica	186	505	2.2%	28%
13	China	116	453	1.9%	41%
14	Polonia	52	435	1.9%	70%
15	Corea del Sur	99	366	1.6%	39%
16	Austria	302	360	1.5%	4%
17	Portugal	203	319	1.4%	12%
18	Suecia	128	290	1.2%	23%
19	República Checa	93	238	1.0%	27%
20	Finlandia	46	232	1.0%	50%
46	México	6	6	0.025%	0%
	Subtotal	9,060	21,454	92%	24%
	Resto del mundo	1,318	1,975	8%	11%
	Producción Mundial	10,378	23,429	100%	23%

Fuente: Elaboración propia con datos de (US-EIA)

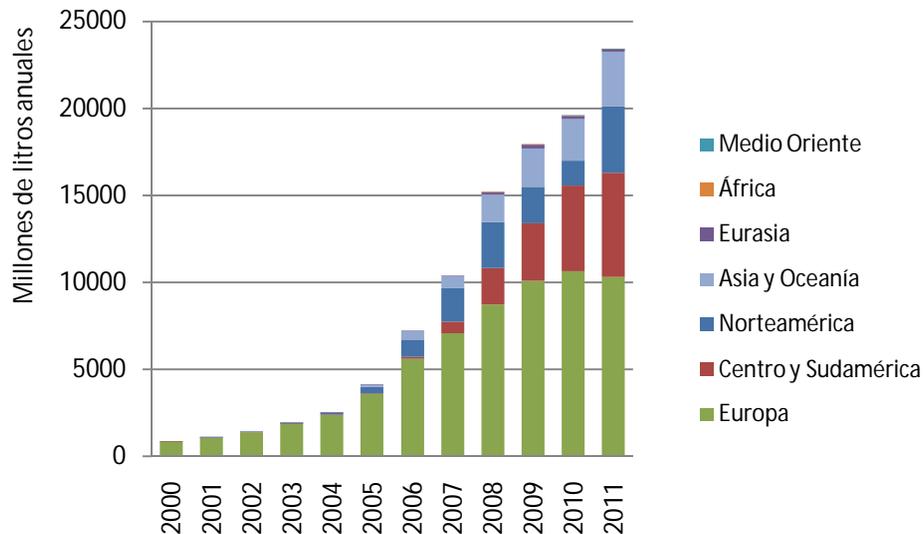


Figura 70. Producción mundial de biodiésel por región.
Fuente: Elaboración propia con datos de (US-EIA)

No se cuenta con de estudios específicos que determinen las emisiones asociadas a los cambios uso de suelo para cultivos destinados a la producción de biodiésel en México, pero se tiene en consideración que los factores pueden ser equivalentes o mayores a los considerados para el etanol proveniente de la caña de azúcar (Tabla 58). A menos que la producción de biodiésel no implique ningún cambio en el uso de suelo, debería considerarse las emisiones asociadas al cambio de suelo por la asignación de tierra para los cultivos. Se considera, de manera muy conservadora, la misma proporción que la obtenida para el caso del etanol (44.5% para una amortización de las emisiones a 20 años y 24% para una amortización a 37 años), quedando aún muy debajo del 66% mostrado en la Tabla 58 como promedio para el cultivo de la palma. De esta manera se asume que se emiten al menos 17.8 kgCO₂ por cada GJ de biodiésel producido.

Con las consideraciones hechas, en este escenario de mitigación se ahorra el consumo de 215 PJ de diésel en 2050, sustituyéndolos por la misma cantidad de biodiésel⁴⁸. La quema de este biocombustible está exenta de emisiones de GEI, sin embargo a su producción se le

⁴⁸Tal como se apuntó en la metodología, se consideró que el rendimiento de consumo de combustible (o su inverso, la intensidad de combustible) no cambia. Si bien el poder calorífico del biodiésel es menor que el diésel, la adición del primero al segundo mejora su índice de cetano, generando así un mejor aprovechamiento de la combustión en el motor.

asocian 3.8 millones de toneladas de CO₂ en 2050, dejando el beneficio neto de este esquema de mitigación en 12.1 millones de toneladas de CO₂ que evitan ser arrojadas a la atmósfera en 2050.

Tabla 58. Emisiones promedio de CO₂ debidas a cambio de uso de suelo, expresadas como kg CO₂/GJ de biocombustible y como porcentaje de las emisiones de carbón del combustible remplazado.

Biocombustible	kgCO ₂ /GJ	%
1a. gen. etanol	29	34
Etanol de azúcar de remolacha	42	50
Etanol de trigo	35	42
Etanol de maíz	55	65
Etanol de azúcar de caña	38	45
2a. gen. etanol, residuos	0	0
2a. gen. etanol, cultivos	?	?
1a. gen. biodiésel	47	56
Biodiésel de canola	36	43
Biodiésel de soya	54	64
Biodiésel de girasol	64	76
Biodiésel de aceite de palma	55	66
Biodiésel de aceite usado	0	0
HFO Palm	57	68

HFO: Heavy Fuel Oil

Fuente: (Croezen, 2010)

Con respecto del agua necesaria para los cultivos destinados al biodiésel, tampoco existen datos específicos para México, sin embargo, analizando los promedios mundiales (Tabla 59) se cree que es muy probable que la producción de biodiésel requiera de una mayor proporción de agua por unidad de energía producida que en el caso de la producción de etanol a partir de la caña de azúcar. En el caso de la *Jatropha*, considerada como factible para México junto con la palma africana, el cultivo requiere en promedio de 4.3 veces más agua que el de la caña de azúcar por cada GJ de combustible (3.9 veces más agua verde y 4.8 veces más agua azul).

Tabla 59. Promedio mundial de la huella de agua para 10 cultivos para etanol y 3 para biodiésel, en (m³/GJ)

Cultivo	Huella de agua total	Huella de agua azul	Huella de agua verde
Etanol			
Remolacha	59	35	24
Papa	103	46	56
Caña de azúcar	108	58	49
Maíz	110	43	67
Yuca	125	18	107
Cebada	159	89	70
Centeno	171	79	92
Arroz con cáscara (paddy rice)	191	70	121
Trigo	211	123	89
Sorgo	419	182	238
Biodiésel			
Soya	394	217	177
Canola	409	245	165
Jatropha*	574	335	239

.Nota: Los cultivos listados constituyen el 80% de la producción global.

*Cifras promedio para 5 países (India, Indonesia, Nicaragua, Brasil y Guatemala)

Fuente: (Gerbens-Leenes, 2009)

Dadas estas proporciones en el uso de agua, bajo el escenario de mitigación conjunta (aumento de rendimiento de vehículos a diésel más incorporación de biodiésel) se requiere en 2050 de 270 veces más agua azul que en el escenario base. Si a esta cantidad se le agrega el agua verde que puede ser destinada a otros cultivos o servicios ambientales, la cantidad de agua total (azul y verde) requerida en 2050 sería de 464 veces la del escenario base (**Tabla 60**). De cualquier manera, esta es sólo una estimación provisional que requiere de estudios específicos de los cultivos mexicanos, tanto para determinar las emisiones debidas al cambio de uso de suelo, como el consumo de agua.

Tabla 60. Requerimientos de agua azul en millones de m³ para el escenario base y el de mitigación (Biodiésel + aumento de rendimiento en vehículos a diésel).

Escenario	2013	2030	2050
Escenario base (diésel)	89	144	265
Todos los escenarios de mitigación (diésel)	196	6,816	72,082
Diferencia (veces más agua)	1.2	46	270

Aquí se considera únicamente la producción nacional de gasolina, descontando para ello las importaciones, se mantiene constante el nivel de importaciones de 2011 (34%) y se asume que el diésel requiere de la misma cantidad de agua que la gasolina en su producción.

Aplicación simultánea de los escenarios de mitigación.

Según los resultados obtenidos, ninguno de los escenarios modelados es suficiente, por sí sólo, para estabilizar el consumo y las emisiones de CO₂. Con sólo uno de ellos (el de aumento de rendimiento de gasolina en vehículos) se lograría evitar consumir, cuanto más, el 47% de la energía del transporte del escenario base, y al aplicar un esquema de mitigación a cada combustible (uno para gasolina y uno para diesel) se alcanzaría una reducción de 54%. Sin embargo, en caso de aplicar varios escenarios de mitigación simultáneamente, las emisiones de GEI evitadas no alcanzan las mismas proporciones que al aplicarlos de manera aislada. Por ejemplo, al tener un aumento considerable en la eficiencia vehicular, se reducirá el ahorro que se obtendrá de un cambio modal a sistemas BRT, pues los kilómetros de automóviles privados que pueden ahorrarse, se recorren ahora con mayor eficiencia y por lo tanto equivalen a menos litros de gasolina. Por otro lado, puede esperarse en este escenario que se reduzca el consumo de los automóviles urbanos de pasajeros, pero no el de los vehículos de carga. Por otro lado, al reducir el crecimiento de los camiones ligeros se reduce también los ahorros disponibles por aumento de eficiencia. Es por estas interdependencias entre los escenarios, entre otras más, que al aplicar sucesivamente un escenario tras otro, los beneficios son cada vez más difíciles de lograr (**Figura 71**).

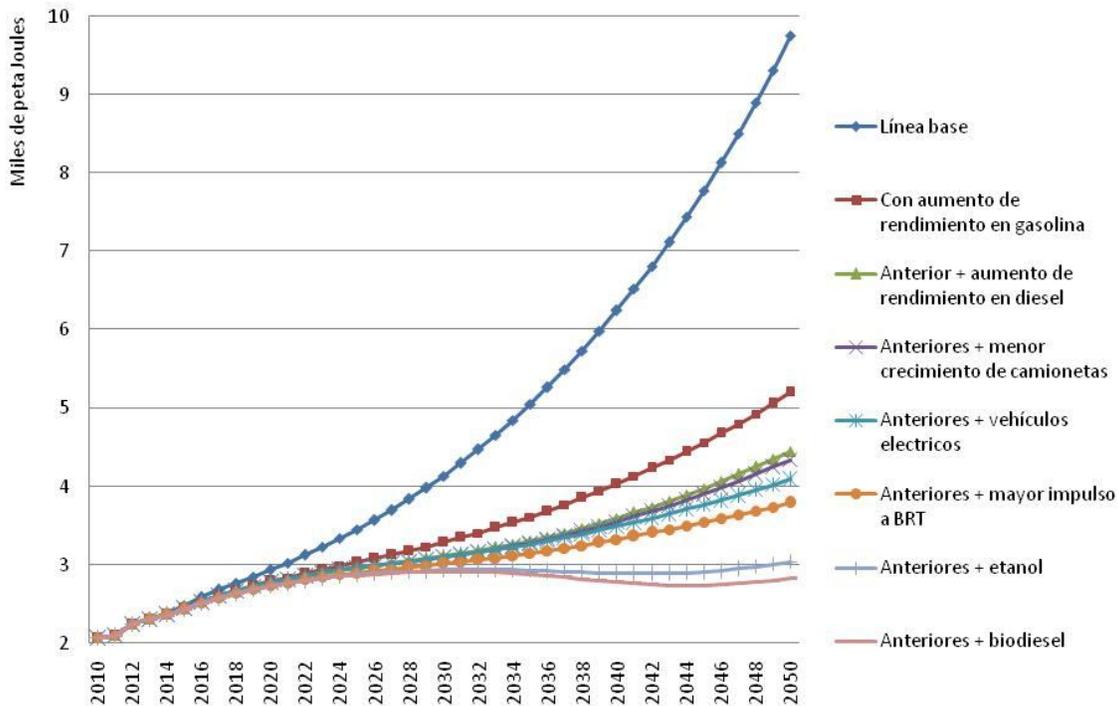


Figura 71. Consumo de energía bajo la línea base y para cada escenario de mitigación aplicado sucesivamente.

Los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios de mitigación en aplicación simultánea se concentran en la **Tabla 61**. El aumento en el rendimiento de los vehículos a gasolina es el esquema que mayores emisiones evita en 2050, debido principalmente al gran nivel de ventas esperado. Los restantes esquemas de mitigación del consumo de gasolina (sustitución de una porción de gasolina por etanol, darle mayor impulso a los sistemas BRT, uso de vehículos eléctricos y frenar el crecimiento de camionetas de pasajeros para favorecer los autos subcompactos) así como la incorporación de biodiésel, tendrán potenciales de mitigación mucho más limitados que en su aplicación independiente por las razones ya comentadas. Esto no implica que sea preferible la aplicación de pocos esquemas de mitigación, todo lo contrario: para lograr alguna estabilización de las emisiones de GEI se requerirá de un número considerable de medidas de mitigación y será necesario implementar incluso las medidas que muestran los menores ahorros de emisiones.

Tabla 61. Emisiones de CO₂ evitadas para la aplicación simultánea de los esquemas de mitigación.

Escenario	2020	2030	2050	Acumulado (2013-2050)	Diferencia al 2050 vs escenario base	
	millones tonCO ₂			millones tonCO ₂	millones tonCO ₂	PJ
Mayor eficiencia vehicular gasolina	10.0	58.7	315.3	3,782	46.1%	46.7%
Mayor eficiencia vehicular diesel	1.1	12.9	55.2	750	8.1%	7.6%
Uso de etanol en gasolina	0.4	4.2	39.4	484	5.8%	7.7%
Mayor uso de BRT	2.5	5.9	20.8	301	3.0%	3.1%
Uso de biodiésel en diesel	0.1	1.1	12.2	137	1.8%	2.2%
Uso de automóvil eléctrico	0.0	0.1	17.8	119	2.6%	2.6%
Menor crecimiento camionetas	0.1	0.8	7.7	76	1.1%	1.1%
Todos los escenarios	14	84	468	5,650	68.5%	71.0%

El resultado final de todos los esquemas es la reducción del 71% del consumo energético y del 68.5% de las emisiones de CO₂ con respecto al escenario base. Bajo este conjunto de esquemas de mitigación, el consumo de energía del sector autotransporte alcanza su máximo en 2031 con 2,915 PJ, sin embargo, dadas las altas TMCA de la mayoría de los segmentos automotrices, los esquemas de mitigación no soportan la presión del crecimiento de las flotas vehiculares y para los años posteriores a 2045 el consumo energético mostraría una nueva tendencia a incrementarse, perdiéndose la estabilización brevemente alcanzada. Esta estabilización, únicamente momentánea, puede apreciarse mejor en la **Figura 72** pues, en cuanto a las emisiones de CO₂, si bien son ampliamente mitigadas, no dejan de aumentar, llegando en 2050 a la emisión de 215 TgCO₂. Aún así, en el transcurso de 2013-2050, gracias a los esquemas de mitigación, se evitaría 43% de emisiones de CO₂ con respecto al escenario base.

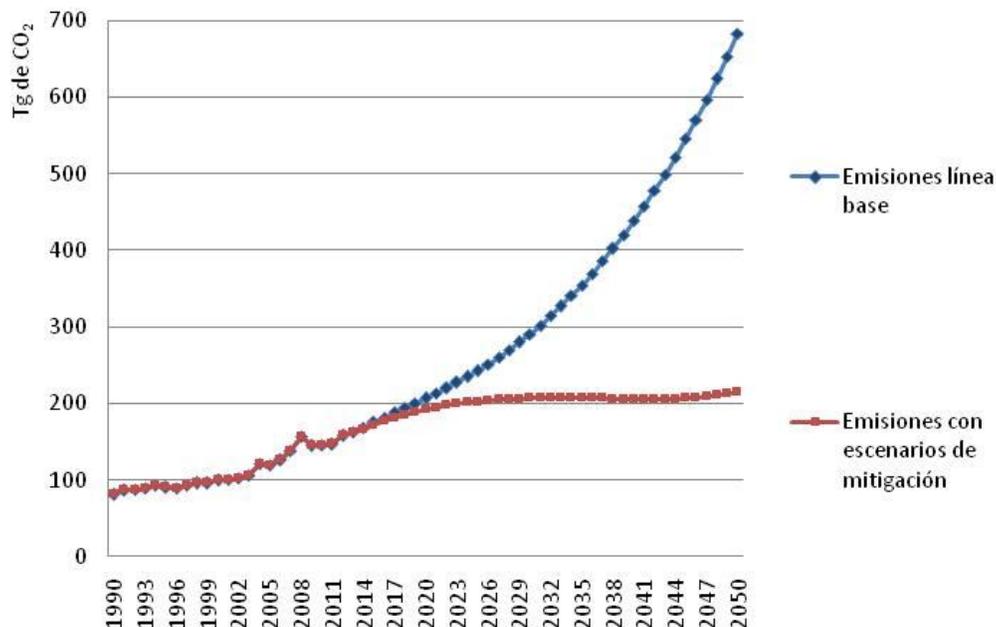


Figura 72. Emisiones de CO₂ bajo la línea base y con la aplicación de los escenarios de mitigación.

Con los escenarios de mitigación propuestos, los automóviles incrementan considerablemente su rendimiento de combustible y por consiguiente su intensidad modal se reduce (Tabla 62), se reduce incluso la diferencia que los separa de la eficiencia modal de los autobuses gracias a la introducción de vehículos eléctricos con sus altas eficiencias, sin embargo, es claro que los autobuses también mejorarían su desempeño con la introducción de tecnologías más limpias. Se espera incluso que los sistemas BRT incorporen vehículos híbridos⁴⁹ que permitan aumentar su rendimiento de combustible a la par que la de los automóviles, en este caso los beneficios del esquema de mitigación por BRT serán aún mayores que los presentados aquí y su intensidad modal se reduciría tal vez en las mismas proporciones que la de los automóviles. Tampoco se ha incluido en los cálculos los ahorros de combustible debido al aumento en la velocidad de circulación de los automóviles que puede ocasionar la sustitución de colectivos por el BRT. Sin embargo, para que todas estas ventajas puedan recogerse, será necesario el uso de instrumentos que inhiban la preferencia por el automóvil privado y de preferencia al uso de los BRT, como por ejemplo, los impuestos al uso del carbón y la inversión en transporte público masivo.

⁴⁹No se incluyeron por falta de información sobre su rendimiento.

Tabla 62. Reducción de la intensidad modal en el transporte de pasajeros debido a las mejoras en los rendimientos de combustible y de consumo eléctrico.

Modo	Factor de ocupación	Energía/pas-km (kJ)	CO ₂ /pas-km (g)
Auto privado	1.7	731	51
Motocicleta	1	385	27
Autobús interurbano	25	262	19
BRT	160	98	7

Factor de ocupación del BRT: 160 pasajeros.

Actividad del transporte urbano: 136,875 km al año

Escenario de reducción de la tasa de crecimiento de los vehículos ligeros.

Como se ha mostrado, aún con todos los escenarios de mitigación simulados hasta aquí, no se lograría reducir los niveles de consumo energético ni de las emisiones de CO₂ asociadas por debajo de los tenidos en 2013. Por otro lado, la presión que se ejerce sobre los demás escenarios de mitigación es amplia y existe la posibilidad de no alcanzar los niveles requeridos en la producción sustentable de biocombustibles o en la incorporación de vehículos eléctricos. Para superar estos problemas parece necesario tomar medidas adicionales, como la de contener el crecimiento de los segmentos de vehículos con mayor expansión.

Frenar el crecimiento de los vehículos ligeros no implica necesariamente reducir las ventas actuales, lo cual, aunque deseable, puede resultar sumamente complicado. Más factible es mantener estables las ventas en los niveles actuales, o acaso permitir que se eleven pero con TMCA menores a las actuales, y ejercer un mayor control sobre los vehículos regularizados y sobre los ilegales que entran al país, los cuales, como ya se ha dicho, tienen rendimientos de combustibles menores a la de los vehículos legales. Por ejemplo, aunque los vehículos nacionales (legales) tienen una edad de 9.3 años (Tabla 23 y Figura 73), debido a que 41% de los vehículos son regularizados o ilegales, la edad de la flota se eleva a un promedio de 12.1 años, mostrándose la posibilidad de que esta obsolescencia se eleve aún más, pues es clara la tendencia de que cada año una mayor cantidad de vehículos regularizados e ilegales

entran al país (Figura 41). Dada la alta proporción de vehículos ilegales y regularizados, frenar su entrada es una opción para reducir la TMCA de este segmento.

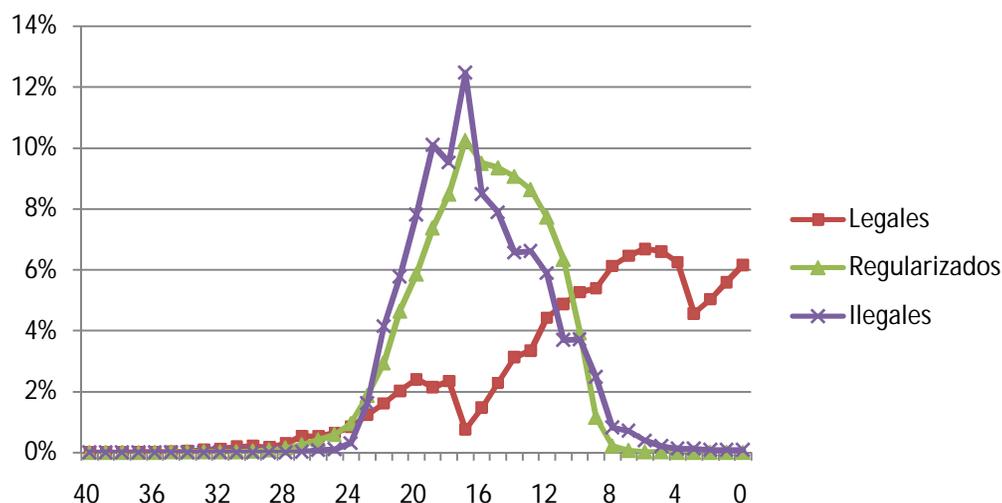


Figura 73. Estructura por edad según procedencia legal de los vehículos en 2012. En las abscisas se representa la antigüedad.

Tabla 63. TMCA de ventas de vehículos ligeros.

Segmento	TMCA escenario base	TMCA reducida
Subcompacto	5.6%	3.9%
Compacto	4.2%	2.9%
Deportivo	2.7%	1.9%
Lujo	6.2%	4.4%
Camioneta	7.7%	5.4%
Camión ligero	4.4%	3.1%

Nota: La TMCA de los camiones ligeros se refiere al crecimiento de la flota vehicular, no a ventas.

Para lograr reducciones continuadas en las emisiones de CO₂, a la vez que se disminuye la presión sobre los demás esquemas de mitigación, deberá reducirse las TMCA de los vehículos ligeros en al menos un 30% (Tabla 63). Así, la flota de vehículos ligeros se reduciría notablemente respecto del escenario base (Figura 74) de manera que en 2050 la flota del sector para el escenario de mitigación solamente representaría el 61% de la flota

del escenario base. Para dicha reducción, el ahorro en gasolina en camiones ligeros sería de 1,316 PJ del combustible y el ahorro en vehículos ligeros de pasajeros de 1,243 PJ, para constituir un ahorro conjunto de 2,558 PJ, los cuales representan 1.1 veces el consumo total de energía del autotransporte en 2012. A este ahorro le corresponden 177 millones de toneladas de CO₂ que no se emitirían a la atmósfera.

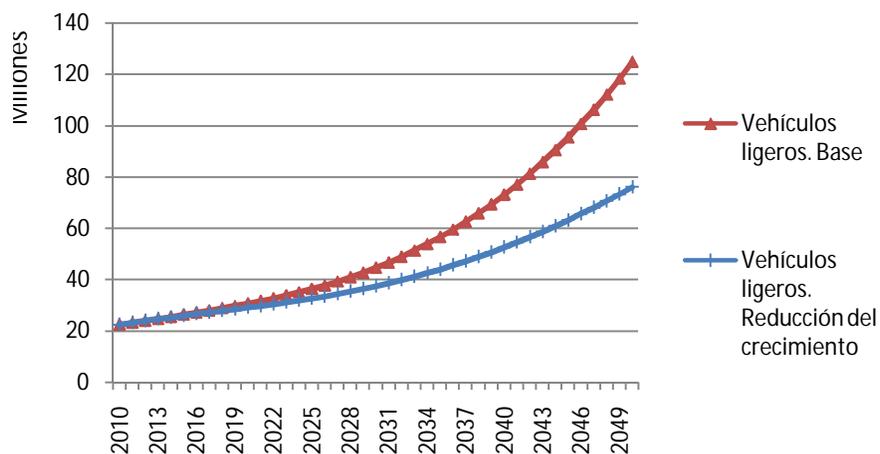


Figura 74. Flota de vehículos ligeros para el escenario base y el de mitigación.

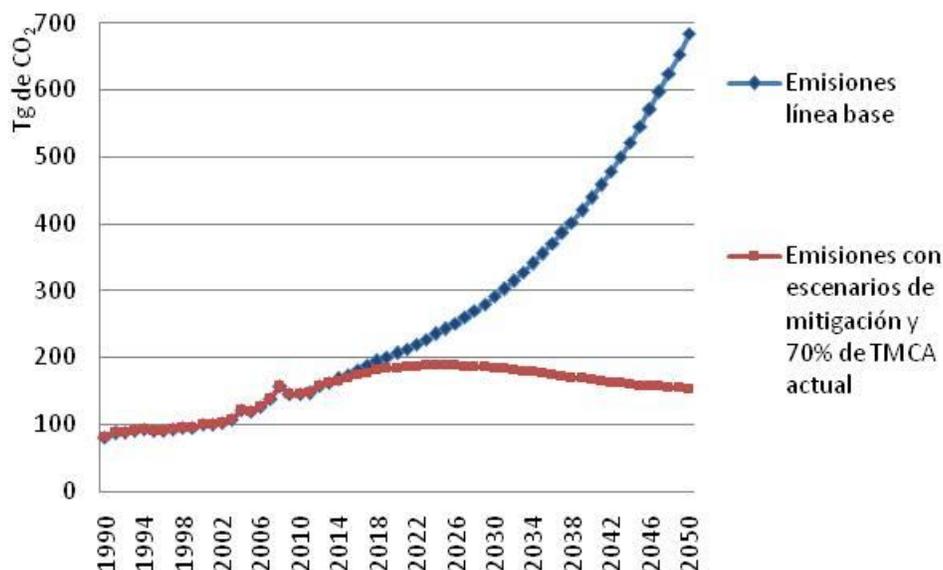


Figura 75. Emisiones de CO₂ bajo la línea base y con la aplicación de los escenarios de mitigación.

De esta manera, reduciendo la velocidad de expansión de los vehículos ligeros, se calcula que las emisiones de CO₂ sigan la tendencia marcada en la **Figura 75**, mostrando descensos sostenidos debido a que la mitigación conjunta ahora sí es capaz de soportar los niveles de crecimiento de la flota vehicular. Por supuesto, dado que cada esquema de mitigación está ligado con los demás, su contribución cambia en comparación con lo expuesto anteriormente (**Tabla 64**), reduciéndose además la producción requerida de etanol (prácticamente a la mitad) y la cantidad de autobuses BRT que deben incorporarse (**Tabla 65**) entre otros parámetros. Si bien el resultado global muestra un ahorro acumulado de 3,869 TgCO₂ para 2013 - 2050 (menor al caso en que no se reducen las TMCA de los vehículos ligeros) las emisiones alcanzan un máximo de 188 TgCO₂ en 2024 y descienden a 153 TgCO₂ en 2050, mientras que sin restringir la expansión de los vehículos se llega a 215 TgCO₂ con una tendencia a incrementarse.

Tabla 64. Emisiones de CO₂ evitadas con los esquemas de mitigación (se incluye 30% de reducción en las TMCA de los vehículos ligeros)

Escenario	2020	2030	2050	Acumulado (2013-2050)	Diferencia al 2050 vs escenario base	
	millones tonCO ₂				millones tonCO ₂	millones tonCO ₂
Mayor eficiencia vehicular gasolina	9.2	48.8	213.4	2,798	31.2%	31.6%
Menor crecimiento vehículos ligeros	8.3	31.9	177.3	2,087	25.9%	26.2%
Mayor eficiencia vehicular diésel	1.1	12.9	55.2	750	8.1%	7.6%
Menor crecimiento camionetas	0.5	3.1	23.2	243	3.4%	3.4%
Uso de etanol en gasolina	0.4	3.6	22.0	328	3.2%	4.3%
Uso de vehículos eléctricos	0.0	0.1	13.5	92	2.0%	1.9%
Mayor uso de BRT	2.5	5.2	13.3	232	1.9%	2.0%
Uso de biodiésel en diésel	0.1	1.1	12.1	137	1.8%	2.2%
Todos los escenarios	22	107	530	3,869	78%	79%

Tabla 65. Requerimientos para los escenarios de mitigación con TMCA de los vehículos ligeros reducida.

Año	Millones de litros de etanol	Autobuses BRT
2013	37	167
2020	215	1,607
2030	1,928	5,028
2040	8,860	12,587
2050	11,588	28,715

Más opciones de mitigación.

Aún pueden analizarse más opciones o variaciones a los escenarios de mitigación analizados, sobre todo, cuando con el conjunto de esquemas propuestos, las emisiones en 2050 lograr reducirse sólo hasta los niveles de 2012. Bajo este contexto, con la incorporación de una proporción mayor de biocombustibles pudiera lograrse una reducción aún más pronunciada del consumo energético y de las emisiones. Como ejemplo, los residuos agroforestales son una fuente importante para la producción de etanol (**Tabla 66**), por ejemplo, los residuos de cosechas tienen un potencial de 2.4 veces la energía requerida para el escenario de etanol analizado, siendo además una opción para eliminarlas emisiones por cambio en el uso de suelo, aunque para ello, deberá tenerse la evolución tecnológica suficiente que los vuelva atractivos económicamente.

En caso de lograrse una penetración del 85% en el uso del etanol proveniente de residuos con emisiones nulas de carbono, las emisiones logran estabilizarse en 2050 a los niveles de 1998 con 93 millones de toneladas de CO₂ emitidas al año (**Figura 76**). Por supuesto que para esta condición requerirá de una mayor introducción de motores flex-fuel y una infraestructura para producir 31 mil millones de litros de etanol en 2050 (algo más de la mitad de la producción actual de E.U.) en vez de los 11 mil millones del escenario de mitigación con TMCA reducida, y que en términos energético equivale a 1,132 PJ en 2050. Es claro que esta implementación también debería ser gradual para permitir la introducción de las tecnologías que hagan factible procesar el 75% de los residuos agrícolas y municipales para la producción de etanol a un costo razonable.

Tabla 66. Potencial de recursos bioenergéticos evaluados en 2004.

Fuente de Bioenergía	Potencial de energía (PJ/año)
<i>Combustibles madereros</i>	
Bosques naturales	997-1716
Plantaciones forestales	450-1246
Residuos de aserraderos y extracción forestal	71
<i>Combustibles agrícolas</i>	
Residuos de cosechas	863
Residuos agro-industriales	202
Residuos de ganado	148
Residuos de cosechas energéticas	269
<i>Residuos municipales</i>	
	35
Total	3035-4550

Fuente: (Islas et. al., 2007)

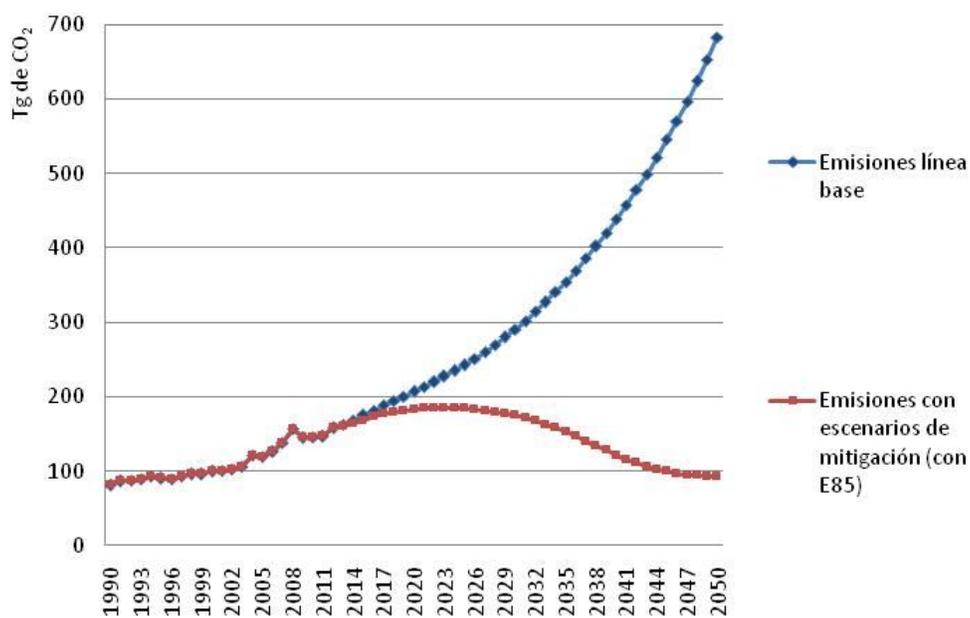


Figura 76. Emisiones de CO₂ bajo la línea base y con la aplicación de escenarios de mitigación con E85.

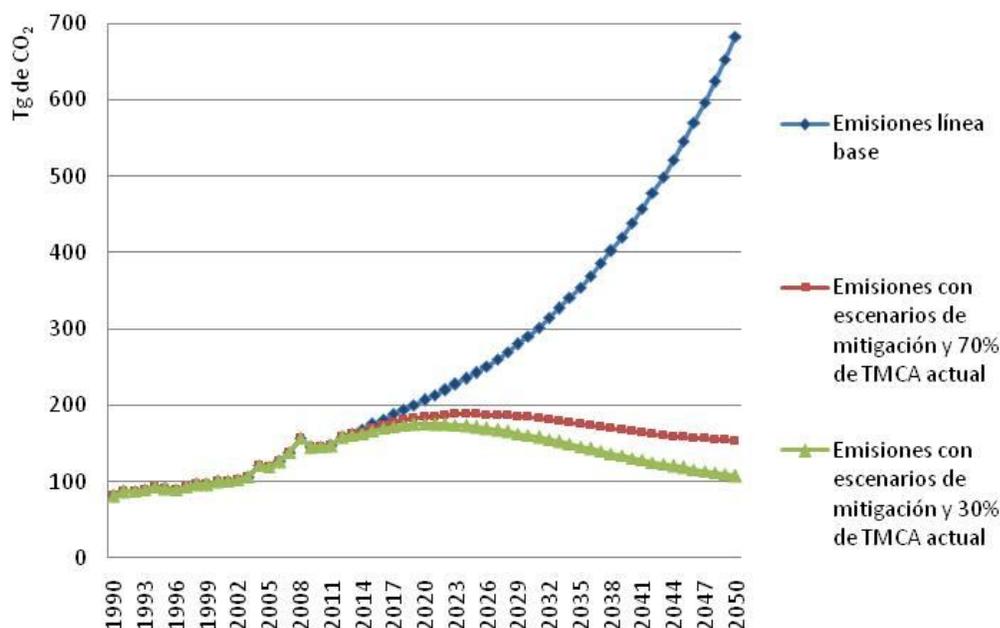


Figura 77. Emisiones de CO₂ bajo la línea base, con los escenarios de mitigación y bajo una reducción del 70% en la TMCA de los vehículos ligeros (se exceptúan motocicletas).

Para lograr reducir aún más las emisiones puede pensarse en recurrir aún a la introducción del biodiésel. Para lograr en 2050 la estabilización de emisiones a niveles de 1990, deberá introducirse además de E85, otro esquema adicional, tal como el uso de biodiésel en niveles de B50. Sin embargo, para ello se requiere de una producción de 11,600 millones de litros del combustible anuales en 2050, lo cual parece complicado al tratarse de la mitad de la producción mundial actual.

Como se aprecia, aún con el uso de biocombustibles avanzados, las reducciones ulteriores serán muy complicadas. Por ello se insiste en la necesidad de frenar la expansión vehicular, reforzando sistemas de transporte masivo como el BRT mediante la asignación de recursos suficientes para la creación de la infraestructura de transporte público que supla la demanda por el cambio modal. En este sentido, si con una reducción del 30% en las TMCA de los vehículos ligeros se logra reducir los niveles de emisiones a los niveles de 2012, reducir en 70% la tasa de expansión de los vehículos ligeros y aplicar además los esquemas de mitigación explorados, llevará a alcanzar los niveles de emisión de 2003 (**Figura 77**).

Solamente así podrán estabilizarse las emisiones a dichos niveles sin forzar demasiado la implementación de los otros esquemas de mitigación tales como los biocombustibles, que pueden competir con la generación de alimentos.

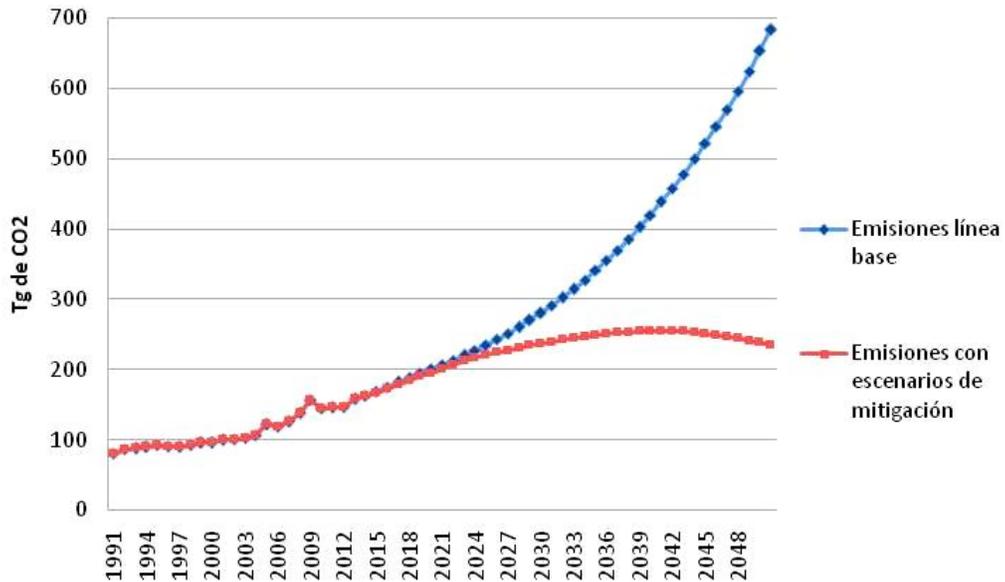


Figura 78. Emisiones de CO₂ bajo la línea base y con escenarios de mitigación aplicados 10 años después.

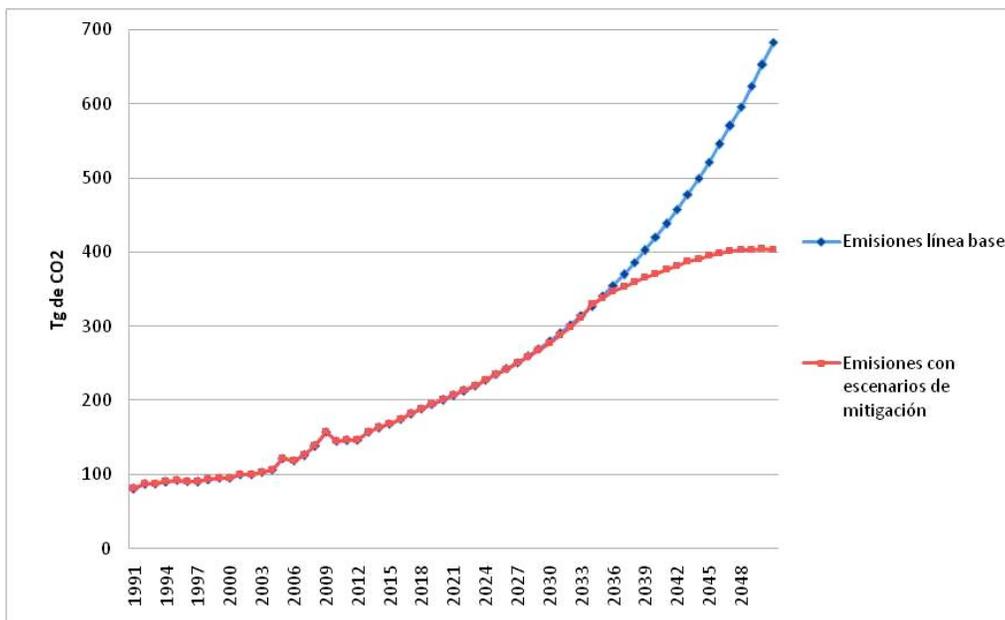


Figura 79. Emisiones de CO₂ bajo la línea base y con escenarios de mitigación aplicados 20 años después.

Finalmente, se debe llamar la atención sobre la necesidad comenzar de inmediato la mitigación de las emisiones de CO₂. El modelo muestra que, en caso de demorar la aplicación de estos escenarios sólo 10 años, las emisiones no llegarán a un máximo de 188 millones de toneladas del gas, sino a 255 millones en 2040 (**Figura 78**). En caso de retrasarlos 20 años (iniciarlos en 2033), el CO₂ llegará a 403 millones de toneladas del contaminante en 2050, 1.6 veces más que si se comienza a mitigar en 2013, sin haberse logrado estabilizar aún las emisiones para dicho año (**Figura 79**).

7. Conclusiones

Dominado por los automóviles y por los camiones ligeros, la flota vehicular en México crece a un ritmo de 6.3% anual, arrastrando consigo al consumo energético a niveles insostenibles en cuanto a la importación de gasolinas, por un lado, y en cuanto a la cantidad de emisiones asociadas de CO₂, por otro. El problema se vio agravado por el aumento casi nulo de los rendimientos vehiculares, que no han alcanzado a contrarrestar las elevadas tasas de crecimiento anual de vehículos, así como por la carencia de programas de transporte público que reduzcan la actividad vehicular.

El problema aún sigue y, como se ha mostrado, si no se hacen esfuerzos por mitigar el consumo energético, los problemas de abasto de combustibles y de emisiones contaminantes se agravarán, principalmente porque la flota vehicular sigue aumentando a gran velocidad. De manera especial, las camionetas llegarán a ser uno de los tipos de vehículos con mayor participación, ocasionando con sus bajos rendimientos mayores consumos energéticos por persona transportada. Pero no sólo aquellas, sino que también los camiones ligeros serán tan numerosos que será el principal segmento que demande gasolinas. Este resultado es significativo, pues aunque comunmente se asocia el consumo de gasolina al automóvil, es un hecho que un porcentaje muy significativo (44% del consumo de gasolina en 2050) está asociado al transporte de mercancías en camiones ligeros. En contraste, en el escenario base el transporte público de pasajeros vendrá teniendo cada vez menor presencia, pese a ser el tipo de transporte de mayor eficiencia en cuanto a consumo energético y emisiones ambientales por pasajero-kilómetro transportado. Otro segmento, al que hasta ahora se le ha prestado poca atención y que muestra un gran crecimiento, es el de las motocicletas; aparecerán cada vez más problemático, llegando a consumir el 11% de la gasolina y cuadruplicando en 2050 sus emisiones de CO₂.

La notable preponderancia del automóvil privado y el transporte ligero de mercancías en el consumo de combustibles y en las emisiones de CO₂, orientan claramente las políticas de mitigación hacia estos sectores en primera instancia. En esta perspectiva es indispensable promover una regulación para el aumento del rendimiento vehicular en ambos segmentos.

Los resultados de los escenarios de mitigación lo confirman, dado que el aumento de rendimiento vehicular es el que mayores ahorros en energía promete, siempre y cuando los requerimientos de una norma de eficiencia vehicular lleven a aumentar el rendimiento de los automóviles nuevos con una TMCA de 2.2% anual. Siendo esta velocidad mucho menor a la del crecimiento de la flota vehicular, serán necesarios otros esquemas de mitigación para lograr estabilizar las emisiones de GEI debido al autotransporte en el país. Las proyecciones indican que otros esquemas de mitigación con importantes beneficios son la incorporación de biocombustibles, el fomento de los sistemas BRT y la incorporación del automóvil eléctrico. Este último esquema puede considerarse como un caso especial de aumento de rendimiento en los vehículos y sería deseable una gran penetración en el mercado, sin embargo, no se prevé que ocurra en gran medida. Se requerirá entonces, generar nuevas opciones de transporte e instrumentos que fomenten el cambio hacia vehículos más eficientes por otras vías, generando a la par la capacidad de producción y distribución de biocombustibles a un costo aceptable en términos social, ambiental y económico. Pero aún a pesar de la incorporación de varios esquemas de mitigación, gracias a los cuales se logra frenar momentáneamente el crecimiento en las emisiones de CO₂, la expansión de los vehículos ligeros ejercerá una presión tal que en 2050 se mostraría un nuevo aumento del consumo energético y de sus emisiones de GEI. Por ello, se muestra indispensable disminuir las TMCA de los vehículos ligeros en al menos un 30% con base en los niveles actuales, obteniéndose con ello reducciones sostenidas de CO₂, a la vez que se libera aún más la presión sobre la seguridad energética y sobre otros esquemas de mitigación.

Cabe apuntar que, si bien en el escenario total de mitigación conjunta, el esquema de incorporación de sistemas eficientes de transporte público no se muestra con las más altas efectividades en la reducción de emisiones, pueden apuntarse tres cosas: la primera es que pudiera exigírsele a este esquema de mitigación más del 25% de reducción de los viajes en automóvil (50% de los automóviles reducen su recorrido a la mitad), la segunda: los sistemas de transporte público pueden ser quienes eviten los efectos de rebote de reducir los rendimientos vehiculares siempre y cuando consigan convertirse en una opción suficiente y eficiente para el traslado de personas dentro de las ciudades, y la tercera: dado que la predominancia del automóvil privado está creando graves tensiones sociales al generar congestiones, contaminación, inseguridad y al privar de una movilidad adecuada a

algunos sectores de la población, los sistemas de transporte público se convierten también en factores de equidad y justicia.

Será necesario modelar aún otros esquemas de mitigación no considerados en este trabajo, tales como la gestión del tráfico o la optimización de logística para los vehículos de carga, pues resulta en extremo importante aprovechar la capacidad ya instalada para incrementar el valor del transporte de carga y reducir sus externalidades negativas, sobre todo cuando el camión ligero será uno de los dos modos que mayor contribuirá a las emisiones de CO₂, sin que esquemas como el BRT puedan mitigar su crecimiento.

Podrán surgir nuevas ideas para la mitigación del consumo energético y de las emisiones contaminantes asociadas, pero se muestra imprescindible empezar de inmediato con políticas integradas que incentiven la migración a tecnologías más limpias, tales como vehículos más eficientes, el uso sostenible de biocombustibles o los vehículos eléctricos, pero que sobre todo disuadan del uso del vehículo particular y fomenten el uso del transporte de manera más racional, favoreciendo el uso de transporte público y sin olvidarnos de la labor de contención al crecimiento horizontal de las zonas urbanas.

Finalmente, sigue siendo necesario que se dediquen recursos para desarrollar encuestas y sistemas de información que permitan conocer con mayor precisión la cantidad de vehículos, su actividad y su rendimiento para los diversos modos del autotransporte en México; la ZMVM no es el país entero y basar las estimaciones en los datos de esta región puede hacer perder la exactitud en las estimaciones. En este sentido se requiere de censos y encuestas que sean representativos de la realidad nacional, no tanto para hacer los estudios energéticos y ambientales más sencillos como para hacerlos más precisos.

8. Referencias

- Anable J, Brand C, Tran M, Eyre N. Modelling transport energy demand: A socio-technical approach. *Energy Policy* 2012; 41:125-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.08.020>.
- Atsushi F, Nivitchanyong S. Potential of greenhouse gas emission reduction in Thai road transport by ethanol bus technology. *Applied Energy* 2013; 102:112-123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.039>.
- Alternative Fuels Data Center. AFDC. <http://www.afdc.energy.gov>. [consultado: 3 de septiembre de 2013].
- BBVA Research. *The Future of World Car Fleet: The Road Ahead (A BBVA Research model for long-term automobile projections)*, 2012.
- Chávez C, Sheinbaum C. Sustainable passenger road transport scenarios to reduce fuel consumption, air pollutants and GHG (greenhouse gas) emissions in the Mexico City Metropolitan Area. *Energy* 2014; 66:624-634.
- Chollacoop N, Saisirirat P, Sukkasi S, Tongroon M, Fukuda T, Han H, Geng Y, Wang H, Ouyang M. Regional disparity of urban passenger transport associated GHG (greenhouse gas) emissions in China: A review. *Energy* 2014; artículo en prensa.
- CONAPO. República Mexicana: Indicadores demográficos, 1990-2010. Consejo Nacional de Población; 2013 [<http://www.conapo.gob.mx>. Consultado 12 de marzo de 2013].
- Cravioto J, Yamasue E, Okumura H, Keiichi N. Road transport externalities in Mexico: Estimates and international comparisons. *Transport Policy* 2013; 30:63-76.
- Croezen H, Bergsma G, Otten M, van Valkengoed M. *Biofuels: indirect land use change and climate impact*. Delft, CE Delft 2010 [<http://www.ce.nl>. Consultado 16 de enero de 2014].
- François C. 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* 2009; 37(10):3832-3842. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.036>.
- Daly H, Gallachóir B. Future energy and emissions policy scenarios in Ireland for private car transport. *Energy Policy* 2012; 51:172-183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.066>.
- Dargay J, Gatley D, Sommer M. Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030. *Energy Journal* 2007; 28(4).

-
- Davis S, Diegel S, Boundy R. Transportation energy data book. Center for Transportation Analysis. Energy and Transportation Science Division. ORNL-6986; (Edition 30 of ORNL-5198). Prepared for the Vehicle Technologies Program Office of Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy 30th edition. 2011 [<http://cta.ornl.gov/data>. Consultado Febrero 16, 2012].
- Diario Oficial de la Federación. DOF. Publicación de 21/06/2013. Norma Oficial Mexicana NOM-163-SEMARNAT-ENER-SCFI-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 vehicular de hasta 3,857 kilogramos [<http://www.dof.gob.mx> Consultado 20 de enero de 2014]
- Environmental Protection Agency. Updating Fuel Economy Estimates in MOBILE6.3, USA. EPA; 2002
- Environmental Protection Agency – Department of Energy. EPA-DOE. The official U.S. government source for fuel economy information. [<http://www.fueleconomy.gov/>. Consultado 10 de enero de 2014]
- Environmental Protection Agency - National Highway Traffic Safety Administration. 2017 and Later Model Year Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emissions and Corporate Average Fuel Economy Standards. A Proposed Rule. USA. EPA-DOE; 2011. [<https://www.federalregister.gov/articles/2011/12/01/2011-30358/2017-and-later-model-year-light-duty-vehicle-greenhouse-gas-emissions-and-corporate-average-fuel>]
- Eom J, Schipper L, Thompson L. We keep on truckin': Trends in freight energy use and carbon emissions in 11 IEA countries. Energy Policy 2012; 45:327-341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.040>.
- Feng A, Sauer A. Comparison of Passenger Vehicle Fuel Economy And Greenhouse Gas Emission Standards Around the World, Pew Center on Global Climate Change, 2004.
- Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal. Diagnóstico de la movilidad de las personas en la Ciudad de México: FIMEVIC; 2000 [<http://www.fimevic.df.gob.mx/problemas/1diagnostico.htm>. Consultado 4 de noviembre de 2013].
- Figueroa M, Fulton L, Tiwari G. Avoiding, transforming, transitioning: pathways to sustainable low carbon passenger transport in developing countries, Current Opinion in Environmental Sustainability 2013; 5(2):184-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2013.02.006>.

- García C, Manzini F. Environmental and economic feasibility of sugarcane ethanol for the Mexican transport sector. *Solar Energy* 2012; 86(4):1063–1069.
- Gerbens-Leenes PW, van Lienden A, Hoekstra A, van der Meer T. Biofuel scenarios in a water perspective: The global blue and green water footprint of road transport in 2030. *Global Environmental Change* 2012; 22:764–775.
- Gerbens-Leenes PW, Hoekstra A, van der Meer T. The water footprint of bioenergy. *PNAS* 2009; 106(25): 10219–10223. [<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0812619106>. Consultado: 20 de enero de 2014].
- Gutiérrez J, Soria V. Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 2010. Instituto Mexicano del Transporte, Documento Técnico No. 48. Sanfandila, Qro: 2011a [<http://www.imt.mx>].
- Gutiérrez J, Soria V. Análisis estadístico de la información recopilada para autobuses, en las estaciones instaladas en el 2010. Instituto Mexicano del Transporte, Documento Técnico No. 49. Sanfandila, Qro: 2011b [<http://www.imt.mx>].
- Hidalgo D, Cornie H. Implementation of sustainable urban transport in Latin America. *Research in Transportation Economics* 2013; 40(1):66-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2012.06.034>.
- Hyard A. Non-technological innovations for sustainable transport. *Technological Forecasting and Social Change* 2013; 80(7):1375-1386. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2012.11.009>.
- Index Mundi. Base de datos estadísticos. [<http://www.indexmundi.com/energy.aspx?country=mx&product=ethanol&graph=production+consumption>. Consultado: 25 de enero de 2014.
- Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo México. Diagnóstico de fondos federales para transporte y accesibilidad urbana. Cómo gastamos nuestros recursos en México en 2011. México: ITDP; 2012.
- Instituto Mexicano del Transporte. Manual Estadístico del Sector Transporte 2012, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Sanfandila, Qro: IMT; 2012.
- Instituto Mexicano del Transporte. Productividad en el Transporte Mexicano, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Publicación Técnica No. 149, Sanfandila, Qro: IMT; 2000.
- Instituto Nacional de Ecología - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 - 2010, para la Categoría de Energía: INECC- PNUD; 2012 [<http://www.inec.gob.mx/cpcc-lineas/597-cpcc-inventario>].

-
- Instituto Nacional de Ecología. The Benefits and Costs of a Bus Rapid Transit System in Mexico City. Final Report. México D.F.: INE; 2007.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Boletín de Prensa Núm. 408/13 del 22 de octubre de 2013. Ags, México: INEGI; 2013.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Consulta interactiva de la base datos: INEGI; 2012a [disponible en <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cubos/>. Consultada 4 abril de 2010].
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. La industria automotriz en México 2012. Series Estadísticas Sectoriales. Ags, México: INEGI; 2012b.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. La industria automotriz en México 2005. Series Estadísticas Sectoriales. Ags, México: INEGI; 2005.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. La industria automotriz en México 2000. Series Estadísticas Sectoriales. Ags, México: INEGI; 2000.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. La industria automotriz en México 1992. Series Estadísticas Sectoriales. Ags, México: INEGI; 1992.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte México, 2007. Ags, México: INEGI; 2007.
- Banco de Información Económica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía: INEGI-BIE; 2013 [<http://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/>. Consultado: 2013].
- International Council on Clean Transportation. Global Transportation Energy and Climate Roadmap. The impact of transportation policies and their potential to reduce oil consumption and greenhouse gas emissions. Washington, DC, United States of America: ICCT; 2012.
- The International Council of Clean Transportation. U.S. Greenhouse Gas Emissions and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and Vehicles: ICCT; 2011.
- International Energy Agency. CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2013 – Highlights. IEA, Paris, France: IEA; 2013.
- International Energy Agency. Key World Energy Statistics. IEA, Paris, France: IEA; 2013b.
- International Energy Agency. World Energy Outlook. IEA, Paris, France: IEA; 2013c.
- International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2012. Pathways to a Clean Energy System. IEA, Paris, France: IEA; 2012.

International Energy Agency. CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2011 – Highlights. IEA, Paris, France: IEA; 2011.

International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2012. Scenarios & strategies to 2050. IEA, Paris, France: IEA; 2010.

International Energy Agency. The Link Between Energy and Human Activity, OECD Publishing. doi: 10.1787/9789264181793-en: IEA; 1998.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I: IPCC; 2013.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza: IPCC; 2007.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, NY, USA, 852 pp: IPCC; 2007b.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume Energy, Hayama, Japan: IPCC; 2006.

Jennings M, Gallachóir B, Schipper L. Irish passenger transport: Data refinements, international comparisons, and decomposition analysis. Energy Policy 2013; 56:151-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.002>.

Islas J, Manzini F, Masera O. A prospective study of bioenergy use in Mexico, Energy 2007; 32:2306–2320

Li, J. Decoupling urban transport from GHG emissions in Indian cities-A critical review and perspectives. Energy Policy 2011; 39(6): 3503–3514.

Ling-Yun H, Chen Y. Thou shalt drive electric and hybrid vehicles: Scenario analysis on energy saving and emission mitigation for road transportation sector in China, Transport Policy 2013; 25:30-40.

Liimatainen H, Kallionpää E, Pöllänen M, Stenholm P, Tapio P, McKinnon A. Decarbonizing road freight in the future - Detailed scenarios of the carbon emissions of Finnish road freight transport in 2030 using a Delphi method approach. Technological Forecasting and Social Change 2014; 81:177-191. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2013.03.001>.

Liimatainen Heikki, Markus Pöllänen, (2013b) The impact of sectoral economic development on the energy efficiency and CO₂ emissions of road freight transport.

-
- Transport Policy, Volume 27, May 2013, Pages 150-157, ISSN 0967-070X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.01.005>.
- Boqiang L, Xie C. Estimation on oil demand and oil saving potential of China's road transport sector. *Energy Policy* 2013; 61:472-482. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.017>.
- Lipsy P, Schipper L. Energy efficiency in the Japanese transport sector. *Energy Policy* 2013; 56:248-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.045>.
- Liu W, Lund H., Mathiesen V. Modelling the transport system in China and evaluating the current strategies towards the sustainable transport development. *Energy Policy* 2013; 58: 347-357. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.032>.
- Lozada I, Islas J, Grande G. Environmental and economic feasibility of palm oil biodiesel in the Mexican transportation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14 (1):486-492.
- Melgar y Asociados. Base de datos de parque vehicular por edad, nacional y para los estados. Legal, regularizados e ilegales. México D. F.: Melgar; 2011.
- Metrobús. Reporte de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero durante el sexto año de operación del Corredor Metrobús Insurgente, 2012 [<http://www.metrobus.df.gob.mx>. Consultado 14 de septiembre de 2013].
- Slobodan M. Urban transport lending by the World Bank: The last decade. *Research in Transportation Economics* 2013; 40(1):19-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2012.06.036>.
- Moctezuma E. Estudio de la motorización en México mediante la dinámica de posesión vehicular: determinantes macro y microeconómicos, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 374, Sanfandila, Qro, 2012.
- Monzón A, Pérez-Martínez P. Transport and climate change in Spain: Problems and prospects. *Carreteras* 2009; 4(167):44-50.
- Musso A, Werner R. Internalisation of external costs of transport—A target driven approach with a focus on climate change. *Transport Policy* 2013; 29:303-314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.07.001>.
- Nealer R, Matthews S, Hendrickson C. Assessing the energy and greenhouse gas emissions mitigation effectiveness of potential US modal freight policies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 2012; 46(3):588-601. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2011.11.010>.
- Páez, A. Energy-urban transition: The Mexican case. *Energy Policy* 2010; 38(11): 7226-7234.

- Petróleos Mexicanos. Anuario Estadístico 2012: PEMEX; 2012 [<http://www.ri.pemex.com>]
- Petróleos Mexicanos. Anuario Estadístico 2001: PEMEX; 2001 [<http://www.ri.pemex.com>]
- Pietzcker R, Longden T, Wenying C, Fu S, Kriegler E, Kyle P, Luderer G. Long-term transport energy demand and climate policy: Alternative visions on transport decarbonization in energy-economy models. *Energy* 2013; 64:95-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.059>.
- Power Mex Clean Energy & Efficiency. Resultados del Metrobús en la Reducción de Emisiones, XII Seminario de Ahorro de Energía, Cogeneración y Energía Renovable: Power Mex; 2006 [<http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4289/2/guillermocalderon.pdf>. Consultado 5 de abril de 2013].
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Diseño de una nueva ruta baja en carbono para el desarrollo. Lineamientos para la planificación integrada del cambio climático para gobiernos regionales: PNUD; 2009.
- Saboori Behnaz, Sapri M, bin Baba M. Economic growth, energy consumption and CO2 emissions in OECD (Organization for Economic Co-operation and Development)'s transport sector: A fully modified bi-directional relationship approach. *Energy* 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.048>.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Estadística básica del auto transporte federal 2012: SCT; 2012. [<http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/autotransporte-federal/estadistica-basica-del-autotransporte-federal>].
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Principales Estadísticas del Sector Comunicaciones y Transportes 2008, México: SCT; 2010.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Anuario Estadístico del Sector Comunicaciones y Transportes 2007, México: SCT; 2008.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Anuario Estadístico del Sector Comunicaciones y Transportes 2000, México: SCT; 2000.
- Secretaría de Energía. Balance Nacional de Energía 2011, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, México, Distrito Federal: SENER; 2012.
- Secretaría de Energía. Balance Nacional de Energía 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, México, Distrito Federal: SENER; 2011.
- Secretaría de Energía. Balance Nacional de Energía 1999, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, México, Distrito Federal: SENER; 2000.
- Secretaría de Energía. Balance Nacional de Energía 1996, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, México, Distrito Federal: SENER; 1997.

-
- Secretaría de Energía. Sistema de Información Energética. México: SIE-SENER [http://www.sener.gob.mx/portal/Default.aspx?id=1428].
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Inventario de emisiones criterio, 2006. México: SMA; 2008 [http://www.sma.df.gob.mx].
- Schipper L, Saenger C, Sudardshan, A. Transport and Carbon Emissions in the United States: The Long View. *Energies* 2011; 4:563-581.doi:10.3390/en4040563
- Schipper L. Automobile use, fuel economy and CO2 emissions in industrialized countries: Encouraging trends through 2008? *Transport Policy* 2011; 18(2):358–372.
- Sheinbaum C. Factores de emisión del sistema eléctrico mexicano. Documento de trabajo, 2013.
- Sheinbaum C, Chávez C. Fuel efficiency of new cars in Mexico: trends from 1988 to 2008. *Energy Policy* 2011; 39(12): 8153-8162.
- Sheinbaum C, Solís J, García C. GHG emission scenarios related to passenger road transport energy use in the main Mexican metropolitan areas. Proceedings of 11th IAEE European Conference. Transport and CO2, 2010.
- Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Inventario de emisiones criterio, 2006. México: SMA; 2008 [http://www.sma.df.gob.mx. Consultado: 25 de noviembre de 2013]
- U.S. Energy Information Administration. US-EIA. [http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm . Consultado 18 de enero de 2014]
- Van Vliet O, Sjoerd A, Kuramochi T, van den Broek M, Faai A. Energy use, cost and CO2 emissions of electric cars. *Journal of Power Sources* 2011; 196:2298–2310.
- The World Bank: WB; 2013 [http://data.worldbank.org/indicator/IS.VEH.NVEH.P3. Consultado 11 de enero de 2014]
- Piyush T, Gulati M. An analysis of trends in passenger and freight transport energy consumption in India. *Research in Transportation Economics* 2013; 38(1):84-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2012.05.003>.
- Unión Nacional de Cañeros. UNC [http://caneros.org.mx/site_caneros/estadisticas/nacional.pdf. Consultado 2 de febrero de 2014]
- United Nations Framework Convention on Climate Change. UNFCCC [http://unfccc.int/parties_and_observers/items/2704.php. Consultado 14 de enero de 2014]
- Yan X, Crookes R. Energy demand and emissions from road transportation vehicles in China. *Progress in Energy and Combustion Science* 2010; 36(6):651-676.

Zhang L, Feng Y, Chen B. Alternative scenarios for the development of a low-carbon city:
A case study of Beijing, China. *Energies* 2011; 4(12):2295-2310.

9. Anexo: Artículo publicado.

Energy for Sustainable Development 17 (2013) 286–287



Contents lists available at ScienceDirect

Energy for Sustainable Development



Energy consumption and greenhouse gas emission trends in Mexican road transport

Juan Carlos Solís, Claudia Sheinbaum*

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, DF, México

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 November 2012

Revised 7 December 2012

Accepted 7 December 2012

Available online 18 January 2013

Keywords:

CO₂ emissions

Bottom-up

Road transport

Mexico

ABSTRACT

The transport sector is the main contributor to CO₂ emissions in Mexico accounting for 39% in 2010, of which road transport represented 92%. This paper presents a disaggregation of the fuel consumption and its related CO₂ emissions from passenger and freight road transport in Mexico, based on a bottom-up model. Results show that private gasoline-powered vehicles represented 32.6% of CO₂ emissions in 2010, followed by gasoline light duty freight vehicles with 25%, diesel in suburban buses, 11.3% and diesel heavy duty freight vehicles, 12%. A simple econometric model shows that gasoline price increases have not impacted gasoline demand. Mitigation of GHG emissions must be based on policies aimed to reduce fuel consumption in gasoline vehicles, such as through fuel efficiency standards, but also reduction of the use of private cars by public transportation and logistics operation for light freight transportation.

© 2012 International Energy Initiative. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

Introduction

In 2008, world greenhouse gas (GHG) emissions attributed to the transport sector accounted for 23% of the total emissions from energy, but it represented the highest growth in emissions of all sectors (IEA, 2012). The share of transport GHG emissions that corresponds to non-OECD countries was 36%, but it is expected to grow to 46% by 2050 if current trends continue (IEA, 2011).

Transportation facilities and activities have significant sustainability impacts besides increasing CO₂ emissions, such as the cost of travel time caused by congestion in urban areas and the subsequent erosion of the quality of life, air and water pollution and its consequences in human health, and accident damages (Tiwari et al., 2011; Litman and Burwell, 2006).

Mexico represents about 1.7% of the global GHG emissions and it forms part of the countries that did not have emission reduction commitments under the Kyoto Protocol, which expired at the end of 2012. However, in the context of a future international agreement on climate change Post-Kyoto Protocol, the United Nations Framework Convention on Climate Change is putting pressure on countries such as China and India, in Asia, and Mexico and Brazil, in Latin America, in order for them to acquire some commitment for GHG emission reductions. Under this setting, but also with the perspective of a low-carbon future that meets sustainable development goals such as: energy security, reduction of other environmental impacts, and

the improvement of the quality of life, it is essential to analyze the energy consumption trends in Mexico and its impact on GHG emissions, in particular, in the transport sector.

The transport sector portrays the fastest growth of GHG emissions in Mexico (INE, 2010). In 2010, transport accounted for 39% of CO₂ emissions associated with the production and use of energy, followed by the generation of electrical energy (28%), industry (14%), the consumption of the energy sector (11%), residential (5%), agriculture (2%) and commercial sector (1%).

Besides the environmental impact, the rapid increase of oil consumption in road transport has generated an increase in gasoline and diesel imports with effects on the balance of payments. In 1990, Mexico was a net oil exporter (including petroleum products); however, in 2008, 43% of the gasoline and 18% of the diesel consumed in the country mainly was imported, in 2010 46% of the gasoline and 29% of the diesel sold in the country came from imports. This year, crude oil exports accounted for 36 billion dollars revenue and oil imports accounted for a 20 billion dollars outflow (Secretaría de Energía, 2012a, 2012b).

The National Energy Balance (NEB; SE, 2011) only disaggregates transport energy consumption into road transport, aviation, shipping and rail. Of these, road transport accounts for 92% of the consumption in the sector, with an annual growth of 4% over the last 10 years (SE, 2012a). Despite its importance, there are no official data that break down the energy consumption in the different sub-modes of road transport (freight, passenger, public transport with its different modalities, private transport – cars or trucks –, city transport, intercity transport, etc.). Based on various sources of data and estimates, a “bottom-up” model has been developed in this paper, which quantifies the road transport final energy consumption and its related GHG emissions from 1990 to 2010. The causes of the energy and CO₂ emissions growth

* Corresponding author at: Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyocacán CP, 04510, México DF, México. Tel.: +52 556233699.

E-mail address: csheinbaum@iia.unam.mx (C. Sheinbaum).

have been understood with the help of this analysis, and thus, the basis for GHG emissions mitigation policies for this important sub-sector are presented. In addition to bottom-up model a simple econometric regression is applied to find the importance of gasoline price in gasoline demand. Only CO₂ emissions are discussed in this paper, since the other greenhouse gases from road transport represent less than 2% of the total (INE, 2008).

There is a wide range of analysis on transport energy consumption and associated GHG emissions in various countries. For instance, Schipper et al. (2011) analyzed the transport GHG emissions in the United States from 1960 to 2008, through: economic growth, modal shift, efficiency and carbon content; meanwhile, changes in transport energy consumption due to use and a fuel based economy are presented by Schipper (2011) for several industrialized countries. Transport emission trends in Spain, within the context of the European Union are analyzed in Morón de Cáceres and Pérez-Marín (2009). Andres et al. (2011) analyze opportunities for reducing GHG emissions in the United States' transportation sector. The energy demand in China for road transport is analyzed in Yan and Crookes (2010) with a methodology that is similar to the one presented in this paper; the causes of energy consumption growth and related emissions in urban transport in cities of India, as well as policies to reduce them are discussed in Li (2011). A study of energy and energy efficiencies of transport in China is presented in Zhang et al. (2011); while our goal does not include an exergy efficiency analysis, this paper is relevant for the disaggregation of consumption in five sub-sectors with nine modes.

Regarding Mexico, fuel economy evolution for private vehicles is analyzed in a recently published paper by Scheinbaum-Pardo and Chávez-Baltesa (2011); furthermore, the potential use of biodiesel for transport in Mexico is discussed in Lozada et al. (2010). Pérez (2010) studies the Mexican transport under the framework of future energy transition. An energy consumption breakdown for road transport for year 2010 is presented in a recently published joint study by the Ministry of Energy in collaboration with the International Energy Agency (2011). However, neither nationwide consumption trends nor an annual breakdown for road transport modes for different years are shown in any of these studies.

The path towards sustainable transport needs to focus not only on reducing CO₂ emissions from a unit of transportation but understanding different strategies that also reduce other economic, social and environmental impacts. The Avoid-Shift-Improve-Finance (ASIF2) framework (Dalkmann and Brannigan, 2007; Mani et al., 2012; Schipper et al., 2000; Tiwari et al., 2011) helps understanding different strategies towards sustainable transportation: (1) avoid unnecessary trips, e.g. through information technologies; (2) shift to more sustainable transport modes, e.g. public transport and rail for freight; (3) improve performance in all modes; and (4) finance investment in urban development and transport to achieve reduced CO₂ levels and sustainability.

The present paper is divided into four parts. Following the introduction, the methodology and sources of information are presented. The results are shown in the third section, and the conclusions in the fourth.

Methodology and data sources

For all sectors, and particularly for the on road transport, CO₂ emissions are calculated following the methodology and emission factors from the IPCC (2006), according to Eq. (1).

$$CO_2 = \sum_j E_{ij} * FE_j \tag{1}$$

where E is the consumption of fuel j for sector s for year t, and FE is the emission factor for fuel j.

In the case of road transport, in a bottom-up model the fuel consumption is expressed generally by the following relation (Schipper and Meyers, 1993; Schipper et al., 1997; Scholl et al. 1996):

$$E_t = \sum_{ikj} (Pkm_{ikj} * IEp_{ikj}) + \sum_{ikj} (Tkm_{ikj} * IEc_{ikj}) \tag{2}$$

where:

- Pkm_{ikj} Passenger-kilometers (pass-km) for passenger transport submode i, model year k, fuel j, in year t.
- IEp_{ikj} Energy intensity (energy consumption per passenger kilometer) submode i, model year k, using fuel j in year t.

And similarly for Tkm_{ikj} (ton-km for freight transport) and IEc_{ikj}. The passenger road transport sub-modes commonly include private cars and SUVs, taxis, minibuses, and buses. They can also be split into urban and intercity transport. Similarly, the freight road transport sub-modes include in general: light truck (less than 3.5 tons) and heavy trucks. The freight transport also may be divided into urban (freight distribution) and intercity (freight transport).

Because in Mexico there is not enough data to estimate the energy consumption to the disaggregation level proposed in Eq. (2), a different model, shown in Eq. (3) is formulated according to the available information. A disaggregation is proposed for the different road transport sub-modes (i index in Eq. (3)) as shown in Fig. 1.

$$E_t = \sum_{ikj} (V_{ikj} * D_{ikj} * R_{ikj} * PC_j) \tag{3}$$

where:

- V_{ikj} The vehicles quantity for i type (submode), k model-year, with j fuel in t year.
- D_{ikj} Annual distance traveled (kilometers) by each ikj type vehicle in t year.
- R_{ikj} Fuel economy for ikj type vehicle (l/km) in t year.
- PC_j Calorific value for j fuel in t year (joules/liter).

Data on the number of passenger vehicles were taken from SCT (2000, 2008, 2010), INEGI (2012a) and Melgar (1997–2011). Since

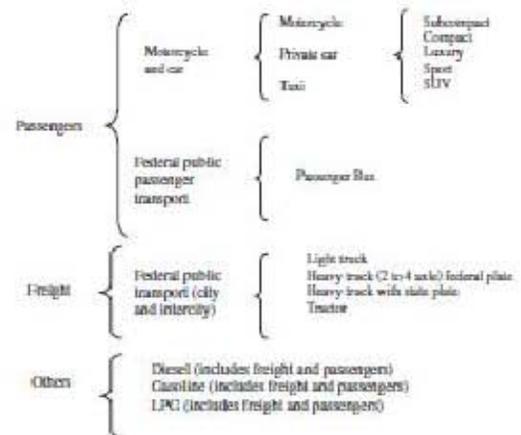


Fig. 1. Proposed modes for road transport breakdown according to the available information.

99.8% of all cars and trucks that were sold in Mexico from 1990 to 2010 were gasoline vehicles (INEGI, 2012b), it is assumed that all motorcycles and all cars run on this fuel. It is also assumed that the entire federal public passenger transport (intercity buses) run on diesel. For freight transport, it is assumed that light trucks run on gasoline, and heavy trucks run on diesel.

Data on the annual average distance traveled (D_{AVE}) are obtained as follows:

- For private cars, taxis and motorcycles, this parameter is considered constant for all years and equal to the average distance traveled in the three major metropolitan areas in the country according to Steinhilber et al. (2010). These three areas account for 45% of the total vehicle sales in the country, and 32% of the vehicle fleet (INEGI 2012a).
- Data on total ton-km and total pass-km reported by the Federal Ministry of Transport and Communication (SCT) were taken for federal public service and were adjusted in accordance with the data on average distance and load factor from Gutiérrez Hernández and Soría Arguiano (2011a, 2011b).
- For urban transport, data from the three metropolitan areas were used adjusting some years according to the energy consumption.

The fuel economy figures for private cars and taxis, for each vehicle type and for each year were obtained up to 2008 from Steinhilber-Pardo and Chávez-Bahesa (2011); the methodology reported in this paper was used to calculate 2009 and 2010. For the other transport modes, these figures were considered to be constant and numbers were obtained from Giannelli et al. (2005) and Davis et al. (2011). The calorific power value was proposed as the average of the figures reported by the BNE (SE, 1992, 2011) for diesel and gasoline in the period 1990–2010.

The category "others" was constructed as the difference between the fuel consumption reported by the BNE for each year, and the results obtained with the presented model. This category is associated with urban buses.

For elasticity calculations, a standard dynamic constant elasticity-demand function has been applied to estimate income, price, and vehicle fleet size elasticity for the period 1970–1990. An aggregate analysis is useful in determining the relative weight of large-scale variables in passenger transport energy demand. It is assumed that:

$$\ln E_t = \beta + A_1 \ln P_t + A_2 \ln Y_t + A_3 \ln C_t + A_4 \ln T_t \quad (4)$$

where E_t = gasoline energy demand in year t , P_t = real gasoline price in year t in 2003 constant pesos, Y_t = real average per capita GDP in year t in 2003 constant pesos, C_t = car fleet size and T_t = light gasoline truck fleet size.

Table 1

Vehicle fleet.

	1990	1995	2000	2005	2010
Private car	5,011,424	6,205,641	8,168,596	12,248,444	16,471,828
Intercity bus	30,579	50,945	56,802	73,836	79,353
Taxi	263,222	264,002	350,515	423,456	569,433
Motorcycle	248,547	128,680	208,324	588,543	1,158,879
Light truck	1,079,966	2,753,425	3,463,862	5,013,723	7,172,424
Heavy truck (2 to 4 axle)	128,333	107,830	94,365	110,837	128,835
Tractor-truck	40,502	91,327	133,050	168,225	203,606
City heavy truck	190,686	210,053	273,574	381,869	484,486

Sources: Authors' calculations based on data from Melgar (1997–2011), INEGI (2012a), SCT (2000, 2012), INEGI (2010).

Table 2

Vehicle fleet structure.

Category	
Private car	62.6%
Light truck (gasoline)	27.3%
Motorcycle	4.4%
Taxi	2.2%
Heavy truck (state piece)	1.7%
Intercity bus	1.4%
Heavy truck (federal piece)	0.5%

Sources: Authors' calculations based on data from Melgar (1997–2011), INEGI (2012a), SCT (2000, 2012), INEGI (2010).

Results and discussion

Vehicle fleet by category

Between 1990 and 2010, the passenger and freight vehicle fleet grew at an annual rate of 6.2%, increasing from 7.9 million units in 1990 to 26.5 million in 2010. This growth is undoubtedly the major cause of the increase in fuel consumption and CO₂ emissions. Table 1 shows the vehicle fleet for key years. By 2010, the private car accounted for 62.1% of the vehicle fleet, followed by light duty gasoline-fueled truck with 27.1% (Table 2).

Fig. 2 shows the vehicle fleet breakdown for private cars; this fleet includes legal, illegal and legalized vehicles according to Melgar (2011). Illegal cars refer to vehicles brought from the US to Mexico from the border, generally from Mexican emigrants to the US that return to the country. Legalized cars refer to illegal vehicles that have been regularized from the government by different programs. In the last 10 years the SUVs growth is higher than the rest of the vehicles. This is relevant to fuel consumption and the related CO₂ emissions, because those vehicles have lower fuel economies.

As shown in Fig. 3, regularized vehicles reached 9% of total private car fleet. Meanwhile, illegal vehicles accounted for about 13% of the fleet during the 2000–2010 period. Most illegal vehicles are compact cars (51.9%), followed by subcompact (15.5%), sports (12.9%), SUVs (12.3%) and luxury (7.4%). Generally illegal vehicles are old used vehicles coming from the US with low fuel economy.

Table 3 shows the age of the vehicle fleet by category for the year 2010, according to Melgar (2011) data.

Fuel economy

Steinhilber-Pardo and Chávez-Bahesa (2011) reported new car fuel economies between 1988 and 2008. Using the same methodology, the analysis was updated to 2010. Based on this information and the vehicle fleet by age, vehicle fuel economies by vehicle type are estimated for passenger cars in use. This evolution is shown in Fig. 4.

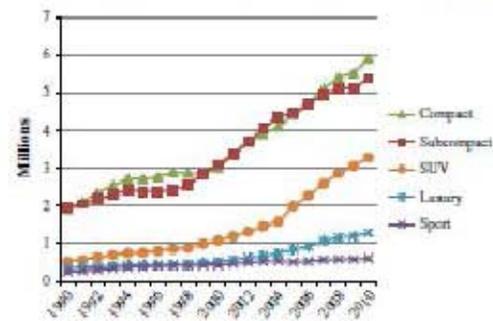


Fig. 2. Private vehicle fleet evolution.

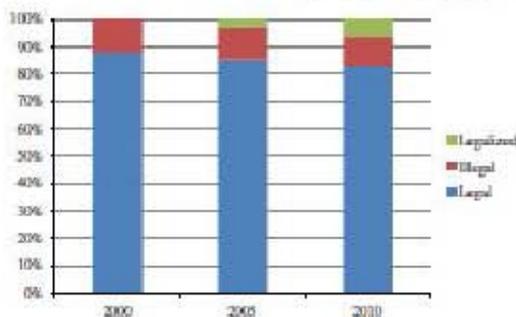


Fig. 3. Private car fleet composition by legal status (Mexico, 2011).

Table 3
Percentage of vehicles by model year (2009).

	Before 1990	1990–1994	1995–1999	2000–2004	2005–2009
Private cars	7.5%	28.7%	21.0%	25.2%	25.5%
Light trucks (gasoline)	0.8%	30.5%	30.7%	13.5%	14.5%
Interurban bus	15.7%	27.5%	0.7%	26.3%	20.8%
Heavy truck	13.8%	23.0%	17.8%	20.3%	25.3%

Source: Authors' calculations based on data from Melgar (2011).

The weighted average according to fleet age structure reveals that in 1990 the average fuel economy for the circulating vehicle was 10.11 km/l and it only increased to 10.33 km/l in 2010. That is, in 20 years, private car fuel economy only increased 2.2%. This is another factor influencing the increase in fuel consumption and CO₂ emissions. As explained in the methodology section, bus and truck fuel economies are considered constant (given the lack of information) and data from the Environmental Protection Agency (EPA, 2010) and Davis et al. (2011) are taken into account. These are presented in Table 4.

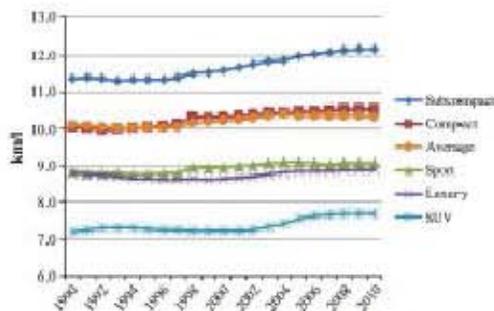


Fig. 4. Fuel economy for the circulating vehicle fleet.

Table 4
Fuel economy for buses and trucks.

Vehicle type	km/l
Diesel bus	2.8
Freight heavy truck/diesel	2.1

Source: EPA, 2010; Davis et al., 2011.

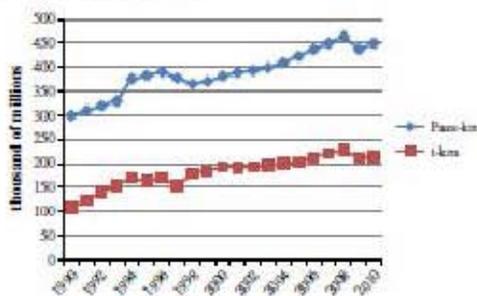


Fig. 5. Inter-city transport activity. Note: The inter-city transport has federal license plate and it is known as Federal Public Road Transport.

Table 5
Annual average distance by category.

Vehicle type	Average km per year
Private car	12,775
Light truck (gasoline)	28,371
Motorcycle	28,385
Taxi	79,000
Heavy truck (state plate)	14,800
Interurban bus (federal plate)	21,153
Freight interurban heavy truck (federal plate)	28,148

Source: Authors' calculations based on data from Steinbaum et al. (2010); SCT (2010); Gutiérrez Hernández and Soría Anguiano (2010).

Distance travelled

Fig. 5 shows the passenger-km and ton-km figures for federal public road transport (SCT, 2010). Both freight and passenger transport suffered a drop in their activity as a product of the GDP decrease in 2009, which was higher in the freight because it is more closely linked with the economy. The annual average distance traveled by the different vehicle types is shown in Table 5.

Estimation of road transport fuel consumption

Fig. 6 shows gasoline consumption breakdown by category. Private cars account for the largest share of gasoline consumption; however, the light trucks have also a very important share. In 2008, prior to the GDP fall in 2009 and its slight recovery in 2010, private passenger vehicles accounted for 41% of fuel consumption and the light trucks for 37%. As explained in the methodology section, the category "others" is obtained by subtracting fuel consumption (according to BNE) from the car, light truck and taxi figures derived in this study. This category is mainly related to passenger gasoline minibuses and microbuses for city transport, whose share has been declining. The category "other" also shows peaks between 2004 and 2008, which do not have a clear explanation, but are a result of applying the methodology explained previously, and reflect the jumps in gasoline consumption reported in the BNE for those years. The significant reduction of freight transport in gasoline vehicles by 2009 and 2010 is associated with the GDP fall.

Gasoline consumption breakdown by private vehicle segments is presented in Fig. 7. The analysis of this figure shows that the major gasoline consumption in private cars was in compact vehicles (34% in 2010), followed by subcompacts (27% in 2010).¹ Between 2005

¹ Car models can be grouped into categories according to general characteristics. The Mexican Automotive Industry Association grouped car models into five categories: subcompact, compact, luxury, sport and multipurpose or SUV (Steinbaum-Pardo and Chávez-Salazar, 2011).

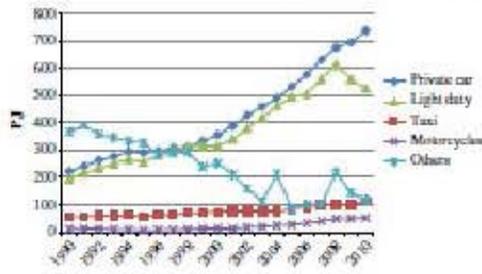


Fig. 6. Gasoline consumption by mode.

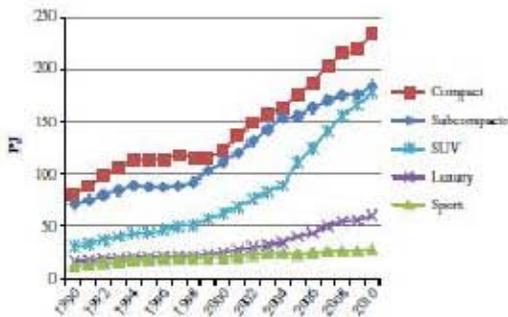


Fig. 7. Private car fuel consumption.

and 2010 subcompact vehicles share in energy consumption declined. This is due to the increase in the fuel economy for this segment, which is higher compared to the other (Fig. 4). The increase in energy consumption for trucks and luxury vehicles is also significant, and it is clearly associated with an increase in these fleets.

The disaggregation for diesel consumption is shown in Fig. 8. The category with the largest diesel consumption is passenger transport, followed by heavy freight truck. The category “others,” which presumably are diesel buses with state plate and other freight vehicles, had a significant reduction in consumption from 1990 to 2002,

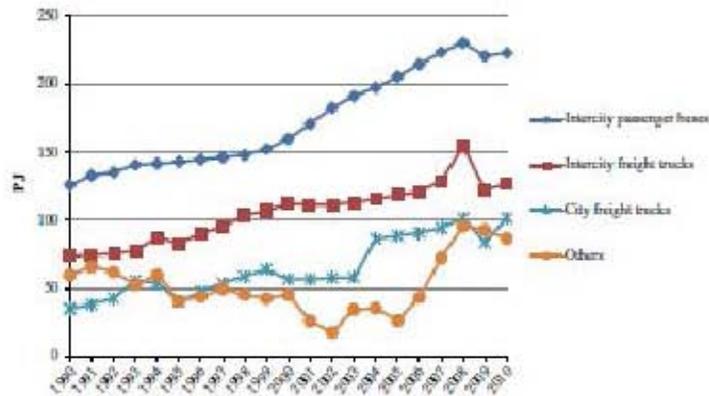


Fig. 8. Diesel consumption by mode.

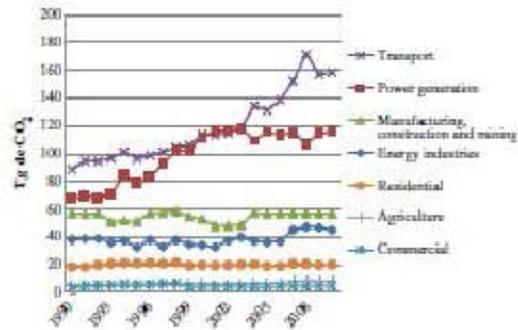


Fig. 9. CO₂ emissions associated with energy production and consumption in Mexico.

followed by an increase until 2008. This pattern is consistent with bus substitution programs developed in several Mexican cities, particularly in Mexico City, that support bus owners to replace old microbuses for new buses. In general new for passenger buses are run by diesel.

Transport sector CO₂ emissions: up down

Between 1990 and 2008 the CO₂ emissions related to energy in Mexico increased by 50%, and from 2008 to 2010 decreased by 2% because of GDP fall (fell 6.2% in 2008–2009 and rose 5.5% in 2009–2010). As shown in Fig. 9 the transport sector has shown the largest increase in emissions. During the period 1990–1998, the average annual growth rate for emissions in this sector was 1.7%, while from 1998 to 2008 it was 5.1% per year. From 2008 to 2009 emissions decreased by 9.7% due to the fall in GDP and from 2009 to 2010 they increased slightly by 0.9% (SE, 1997, 2011). In 2010 the transport sector accounted for 42% of total CO₂ emissions, followed by electricity generation 25%, industry 14%.

Road transport accounted for 92% of total transport CO₂ emissions in 2010, followed by aviation (5%), shipping (2%) and rail (1%). From 1990 to 2010, rail emissions fell by 1%, while the aviation increased by 99%, shipping by 32% and road transport by 80% (Fig. 10). The structure of road transport energy consumption according to the fuel used is shown in Fig. 11. From 1990 to 2010 the usage proportion of

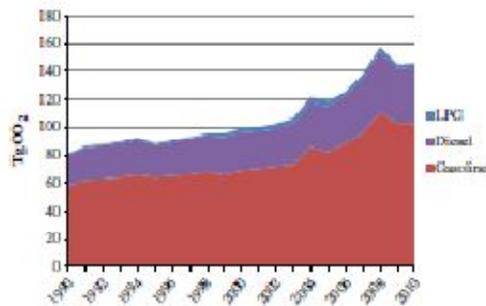


Fig. 10. Share of fuel in CO₂ emissions for the transport sector in Mexico.

each fuel has suffered only little changes: the liquefied petroleum gas (LPG) varied from 1.3% to 2.0%, gasoline from 73% to 72%, and diesel from 25.6% to 26.0%. Natural gas represented only 0.02% and thus, it is not considered in this analysis.

CO₂ emissions by category: bottom up

The CO₂ emissions by category are shown in Fig. 12. The CO₂ emissions for private cars (including SUVs) increased 2.4 times in 20 years, rising from 18% to 34% of road-transport emissions between 1990 and 2010. Second in importance are light trucks, which grew 1.7 fold from 1990 to 2010 and increased its CO₂ emissions share from 17% to 26% in that period. In 2010 these two transport modes accounted for 60% of the total CO₂ emissions (Table 6). Meanwhile, in 2010 the CO₂ emissions federal or intercity bus accounted for 11.9% of the total road-transport and grew 77% in the period 1990–2010. Furthermore, emissions from taxis doubled and reached 5.6% of total transport emissions in 2010.

The CO₂ emissions from freight trucks (with state plate) increased 191%, rising from 3.2% in 1990 to 5.2% of the total in 2010, while the emissions from intercity freight trucks (or trucks with federal plate) grew by 72% although slightly decreasing its share from 6.7% to 6.4%. Taxi CO₂ emissions increased their share in road transport from 4.7% in 1990 to 5.3% in 2010, and motorcycles from 1.0% to 2.5%.

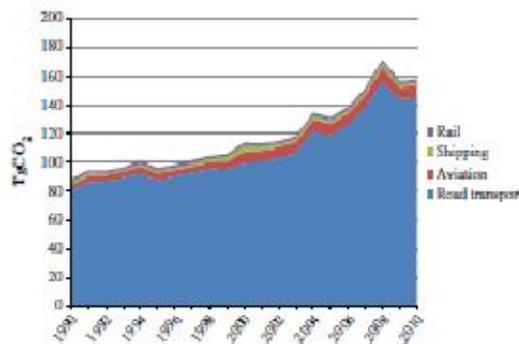


Fig. 11. Contribution of all mode to CO₂ transport emissions in Mexico.

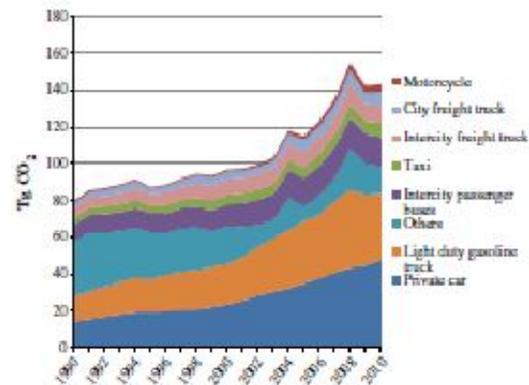


Fig. 12. CO₂ emissions in kg of road transport in Mexico.

Finally, the emission contributions from LPG vehicles rose from 1.2% to 1.9% between 1990 and 2010. The category “others” which includes city passenger transportation and some freight fell from 36.8% to 10% between 1990 and 2010. Regardless of the categories “others” and LPG vehicles, freight transport contributed with 36.6% of the CO₂ and passengers transport with 51.7%.

Elasticities for gasoline consumption

The results are shown in Table 7. They show that private car fleet size was the most important variable, followed by income and light truck fleet size. Price has been inelastic with respect to gasoline demand and non-significant. This means that gasoline demand in the last 20 years has been driven mainly by the increase in the number of vehicles and the increase in GDP/cap, and while gasoline price increase reduced gasoline demand but not significant.

Table 6
Contribution of each mode to transport CO₂ emissions in Mexico.

		1990	2010
Private car	Gasoline	18.1%	32.6%
Light truck (gasoline)	Gasoline	16.7%	25.0%
Other	Gasoline and diesel	36.8%	10.0%
Intercity bus (federal plate)	Diesel	11.5%	11.3%
Freight intercity heavy truck (federal plate)	Diesel	6.7%	6.4%
Heavy truck (state plate)	Diesel	3.2%	5.2%
Taxi	Gasoline	4.7%	5.3%
Motorcycle	Gasoline	1.0%	2.5%
CLP vehicles	CLP	1.2%	1.9%
Total (Tg CO₂)		80380	14573

Source: Authors' calculations.

Table 7
Estimation of elasticities for gasoline demand (1990–2010).

β	GDP/cap	Gasoline price	Number of light trucks	Number of private cars and SUVs	β total	Error
-10.31	0.96	-0.05	0.24	0.59	0.008	0.017
(-12.67)	(3.29)	(-0.56)	(2.46)	(5.39)		

Conclusions

In 2010, freight and passenger transport accounted for 36% of total CO₂ emissions related to energy in Mexico (145.73 Tg of CO₂). Between 1990 and 2008, CO₂ emissions from road transport increased by 95%, and they decreased by 7.3% in the period from 2008 to 2010 due to the GDP decline. Regarding the fuel structure, in 2010 CO₂ emissions associated with gasoline consumption accounted for 71%, diesel for 27% and the rest LPG. The fuel structure has remained fairly constant over the past 20 years.

A model for disaggregation of energy consumption and related CO₂ emissions in road transport has been presented as follows: passenger road transport has been divided into private cars, taxis, intercity or with federal plate buses and motorcycles (though this mode also serves for freight). The freight transport has been split into light vehicles and heavy vehicles (those with federal or state plate). Due to lack of data, the category "others" has been introduced and it is obtained by subtracting the road-transport energy consumption reported by BNE from the "bottom-up" estimate developed in the present research. This category includes freight and passengers. LPG consumption and its related emissions are reported without any disaggregation.

Regardless of the category "others" and LPG vehicles, in 2010 freight transportation accounted for 36.6% of CO₂ emissions while passenger transport contributed with 51.7%. Within passenger transport, the CO₂ emissions share for private vehicles grew from 51% to 63%, while the intercity passenger buses decreased from 3.3% to 2.2%. Within the freight transportation the light vehicles increased their share from 62% to 68% the freight urban transport from 1.2% to 14% and the intercity trucks fell from 25% to 18%. In the latter category, trucks with 2 to 4 axles are included and have increased their importance from 7% to 11%.

CO₂ emissions from private vehicles increased 2.4 times in 20 years, in the period from 1990 to 2010, and increased their share in emissions from 18% to 34%. Second in importance is the freight light truck, which grew 1.7 times in the period from 1990 to 2010 by increasing its CO₂ emissions share from 17% to 26%. In 2010 these two transport modes accounted for 60% of transport CO₂ emissions.

In 2010, private cars consumed 49% of the gasoline sold in the country and the freight light transport 35%, but in 2008, before the economic crisis, the latter had consumed 38% of gasoline. This result is significant because the gasoline consumption is commonly associated with usage of private cars; however, an important percentage is related with the transport of goods, which has a stronger link to the economy.

The growth in private car emissions is connected not only to the increase of the fleet, which rose from 5.0 million to 16.5 million vehicles (2.3 times) in the period under review, but also with the minor increase in average fuel economy, given that only increased by 2.2%, from 10.11 km/l in 1990 to 10.33 km/l in 2010. This is due not only to the small increase in each model fuel economy, but also to the increase in the share of SUVs in the vehicle fleet, which rose from 10.6% in 1990 to 19.9% in 2010. The SUVs have greater physical weight than the compact vehicle and thus lower fuel economy. Also, freight light trucks grew between 1990 and 2010 from 2.0 million to 2.2 million (2.6 times). The simple econometric model shows that gasoline price is has not been a significant variable in gasoline demand, while number of vehicles and GDP/capita.

The significant contribution of private car and light truck transport to CO₂ emissions should clearly guide mitigation policies towards these vehicles in the first instance. With this perspective, it is essential to follow different strategies to start reducing CO₂ emissions while providing mobility for passengers and goods. The Avoid-Shift-Improve-Finance (ASIF) strategy offers a framework to understand them: (1) avoid unnecessary trips, and reduce automobile and light truck intensive development, demand side strategies for passenger transport

and logistics for freight; (2) shift to more sustainable transport modes, such as Bus Rapid Transport that have started to develop in some Mexican cities; (3) improve performance in all modes such as increase vehicle fuel economy in both segments. As Tiwari et al. (2011) pointed out "improve" also refers to the operation and efficiency of transport and urban spaces. This can be achieved through higher occupancy of both private and public transport, as well as technological improvements. Furthermore, improved traffic flows reduce carbon emissions. Finally, if public transport journeys are made quicker, greater public transport patronage is usually the result. (4) Finance to investment in urban development and transport to achieve reduced CO₂ levels and sustainability.

In particular, regarding (3), Mexico is one of the few OECD countries that have had problems to approved a vehicular fuel economy or CO₂ emissions standards (Sheinbaum-Pardo and Chávez-Iñahua, 2011). Neither does it has enough policies and projects that discourage the use of private cars and encourage sustainable public transport usage and not motorized transport, nor the use of logistic systems for freight, nor the use of alternative sources of energy such as the electricity or the sustainable use of biofuels for transport.

Finally, it is essential that the Mexican government develop information systems and surveys to show the energy consumption for different modes of road transport every year in Mexico.

Acknowledgments

We would like to acknowledge Sebastián Lelo de Larrea for the revision of this paper.

References

- Andres D, Nguyen TD, Dai S. Reducing GHG emissions in the United States of transportation sector. *Energy Sustain Dev* 2011;15(2):117–36.
- Dallmann H, Brannigan C. Transport and climate change, module 5c, sustainable transport. A user manual for policy-makers in developing cities. GIZ global. Eschborn, Germany: Federal Ministry for Economic Cooperation and Development; 2007.
- Davis SC, Diegel SW, Boundy RT. Transportation energy data book. Center for Transportation Analysis, Energy and Transportation Science Division. OBNL-4986; (Edition 30 of OBNL-5198). Prepared for the Vehicle Technologies Program Office of Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy 2008 edition. 2011 [<http://cta.energy.gov/data>]. Retrieved October 6, 2012.
- Environmental Protection Agency. Fuel Economy Guide. EPA; 2010 [<http://www.epa.gov/fueleconomy/>]. Retrieved September 10, 2012.
- Gianelli R, Nam BK, Helmer K, Younglove T, Soria C, Barth M. Heavy-duty diesel vehicle fuel consumption modeling based on road load and power train parameters. Center for Environmental Research and Technology, Boozis College of Engineering, UC Riverside. SAE World Congress; 2005 [<http://techdata.sae.org/techdata/techdata/25>]. Retrieved September 10, 2012.
- Gutiérrez Hernández JJ, Soría Argüelles VJ. Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 2010. Instituto Mexicano del Transporte, Documento Técnico No. 40. San Sebastián, Quer; 2011a [<http://www.imt.mx>]. Retrieved September 10, 2012.
- Gutiérrez Hernández JJ, Soría Argüelles VJ. Análisis estadístico de la información recopilada para autobuses, en las estaciones instaladas en el 2010. Instituto Mexicano del Transporte, Documento Técnico No. 40. San Sebastián, Quer; 2011b [<http://www.imt.mx>]. Retrieved September 10, 2012.
- IEA. World energy outlook 2010. Paris, Fr.: International Energy Agency; 2011.
- IEA. CO₂ emissions from fuel combustion 2011—highlights. Paris, Fr.: International Energy Agency; 2012.
- INE. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990–2006. DF, Mex: Instituto Nacional de Ecología; 2008.
- INE. Cuarta Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. DF, Mex: Instituto Nacional de Ecología; 2010.
- INEGI. Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 2009. Agu. Mex: Instituto Nacional de Estadística y Geografía; 2010.
- INEGI. La industria automotriz en México 2011. Agu. Mex: Instituto Nacional de Estadística y Geografía; 2012a.
- INEGI. Base interna de datos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía; 2012b [<http://www.inegi.org.mx>]. Retrieved September 10, 2012.
- IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, volume 3, energy. Inter-governmental Panel on Climate Change; 2006 [<http://www.ipcc-nggip.org/404/404public/2006/guidelines.html>]. Retrieved September 10, 2012.
- Li J. Decoupling urban transport from GHG emissions in Indian cities—a critical review and perspective. *Energy Policy* 2011;39(8):3518–34.
- Limao T, Barro D. Issues in sustainable transportation. *Int J Club Econ Issues* 2006;5(4):331–47.

- Lozada Uribe J, Grande G. Environmental and economic feasibility of palm oil biodiesel in the Mexican transportation sector. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14(1):488–92.
- Muni A, Pai M, Aggarwal R. Sustainable urban transport in India: role of the auto-rickshaw sector. *World Resources Institute, EMARQ*. http://pdf.wri.org/sustainable_urban_transport_india.pdf [Retrieved November 26, 2012].
- Méjyar y Asociados. Base de datos de parque vehicular por estado, nacional y para los estados. Legal, regularizados e ilegales. México DF; 2011.
- Morón de Cáceres A, Méndez-Martínez JF. Transporte y cambio climático en España: problemas y perspectivas. *Geografía* 2009;4(187):44–50.
- Pérez A. Energy-urban transition in the Mexican case. *Energy Policy* 2010;38(11):7226–34.
- Schipper L. Automobile use, fuel economy and CO₂ emissions in industrialized countries: encouraging trends through 2000? *Transp Policy* 2011;18(2):358–72.
- Schipper L, Meijer S. *Energy efficiency and human activity: past trends, future prospects*. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 1993.
- Schipper L, Sitchell L, Price L. Energy use and carbon emissions from freight in 10 industrialized countries: an analysis of trends from 1973 to 1992. *Transp Res D: Transp Environ* 1997;2(1):57–76.
- Schipper L, Marin-Lillo C, Garbim B. Fixing the link between transport and greenhouse gas emissions: a path for the World Bank. *Brief International Energy Agency*; 2000.
- Schipper L, Saenger C, Santandrea A. Transport and carbon emissions in the United States: the long view. *Energy* 2011;42:563–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.036>.
- Scholl L, Schipper L, Kiang M. CO₂ emissions from passenger transport: a comparison of international trends from 1973 to 1992. *Energy Policy* 1996;24(1):17–30.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Anuario Estadístico del Sector Comunicaciones y Transportes 2000. México DF: SCT; 2000 [2001].
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Anuario Estadístico del Sector Comunicaciones y Transportes 2002. México DF: SCT; 2002.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2003. Principales Estadísticas del Sector Comunicaciones y Transportes. México DF: SCT; 2010.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Estadística Mésica del auto transporte federal. SCT; 2012 [<http://www.cctgob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/auto-transporte-federal/estadistica-basica-del-auto-transporte-federal/>]. Retrieved September 10, 2012.
- Secretaría de Energía. Balance Nacional de Energía 1965–1996. México DF: Secretaría de Energía; 1997.
- Secretaría de Energía. Balance Nacional de Energía 2000–2010. México DF: Secretaría de Energía; 2012a [www.sem.gob.mx/Archivos/Res/05_y_017/psk/Balanco_2010.pdf]. Retrieved September 10, 2012.
- Secretaría de Energía. Sistema de Información Energética. Secretaría de Energía. <http://sistemenergia.gob.mx> [Retrieved September 10, 2012].
- Secretaría de Energía-Agencia Internacional de Energía. Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 años más, 5 retos. SE-IB 0040 Embargo; 2011.
- Steinbaum C, Solís JC, García C. GHG emission scenarios related to passenger road transport energy use in the main Mexican metropolitan areas. *Proceedings of 11th International Association for Energy Economics, European Conference*; 2010 [Retrieved October 12, 2012].
- Steinbaum-Pardo C, Chávez-Balderas C. Fuel efficiency of new cars in Mexico: trends from 1988 to 2008. *Energy Policy* 2011;39(12):8153–62.
- Tiwari R, Corvee R, Schipper L. Driving CO₂ reduction by integrating transport and urban design strategies. *Cities* 2011;28(5):304–405.
- Wan X, Crockett RJ. Energy demand and emissions from road transportation vehicles in China. *Prog Energy Combust Sci* 2010;36(6):651–76.
- Zhang L, Feng Y, Chen B. Alternative scenarios for the development of a low-carbon city: a case study of Beijing, China. *Energy* 2011;42(12):2295–310.