

ESCENARIOS DE MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EMITIDOS POR EL TRANSPORTE VIAL A GASOLINA EN MÉXICO CON AUMENTOS DEL NÚMERO DE OCTANOS

Mitigation scenarios for greenhouse gases emitted by gasoline road transportation in Mexico with the octane number improvement

Allin Yarely JUÁREZ PLATA, Elena María OTAZO SÁNCHEZ*,
César Abelardo GONZÁLEZ RAMÍREZ**, José Roberto VILLAGÓMEZ IBARRA
y Martín HERNÁNDEZ JUÁREZ

Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo, km. 4.5, Colonia Carboneras, 42184 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Autores para correspondencia: *elenamariaotazo@gmail.com, **cramirez@uaeh.edu.mx

(Recibido octubre 2023; aceptado: abril 2024)

Palabras clave: demanda de gasolina, eficiencia energética, GEI, RON, LEAP.

RESUMEN

En México, el sector transporte es responsable del 24.5 % de las emisiones totales de CO₂ que se generan anualmente, de las cuales cerca del 93 % proviene al subsector vial. A pesar de la penetración de autos híbridos y eléctricos, el mercado mexicano de vehículos terrestres convencionales de gasolina presenta una tendencia positiva en las próximas tres décadas, con el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Este estudio presenta una proyección de la demanda de gasolina y sus emisiones de GEI hacia 2050, con dos escenarios de mitigación propuestos basados en la mejora de la eficiencia energética del combustible al aumentar el número de octanos a 92 y 98, utilizando el modelo LEAP. Los resultados demuestran que, el aumento de 87 a 92 octanos de la gasolina magna disminuye su demanda en 5.3 hm³ al 2050 y se mitigarían 10.3 millones de toneladas de CO₂. El escenario ideal de 98 octanos es evidentemente mejor. Se reporta la disminución de contaminantes al aire asociados con este sector y se estima preliminarmente el impacto económico de la menor demanda. Este trabajo permitirá el cálculo de costo/beneficio de estas medidas cuando se reporten los costos correspondientes al cambio de tecnología.

Key words: fuel demand, energy efficiency, GHG, RON, LEAP.

ABSTRACT

Mexican transportation accounts for 24.5% of the country's annual CO₂ emissions, with approximately 93% of this coming from the road subsector. Despite the global penetration of electric and hybrid cars, the Mexican on-road gasoline vehicle market is expected to present a positive trend over the next three decades, resulting in a rise in greenhouse gas (GHG) emissions. This study presents projections of gasoline demand and its associated greenhouse gas (GHG) emissions up to the year 2050, along with two mitigation scenarios that involve improving fuel energy efficiency by increasing the octane number to 92 and 98, using the LEAP model. The results demonstrate that raising the Magna gasoline octanes from 87 to 92 would decrease demand by 5.3 hm³ by 2050, mitigating 10.3 million tons of CO₂. As expected, the ideal increase to

98 octane is even more significant. Additionally, we report on the preliminary economic demand assessment and the reduction of air pollutants associated with this sector. This work will allow us to calculate the cost/benefit of these actions after estimating the technology change amounts.

INTRODUCCIÓN

Los gases de efecto invernadero (GEI) son la causa principal del calentamiento global. Su aumento en la atmósfera proviene de las actividades humanas realizadas durante los últimos 150 años. A nivel mundial, la mayor fuente de emisiones de GEI resulta de la quema de combustibles fósiles para la producción de electricidad y para generar el combustible de los medios de transporte (EPA 2021). La categoría energía es responsable del 76 % de las emisiones de GEI en todo el mundo, de las cuales el 15 % corresponde al sector transporte (WRI 2021), y cerca del 95 % de la energía utilizada para los vehículos tiene su origen en los combustibles fósiles (EPA 2021).

En 2019 se emitieron en el mundo más de 33 Gt de CO₂ relacionadas con el sector energético (IEA 2020), de las cuales 7.2 Gt de CO₂ (24 % del total) corresponden al sector transporte. Los autotransportes generaron el mayor número de emisiones del sector, al registrar 3.6 Gt de CO₂, que corresponde al 50 % de las emisiones totales (Teter 2020).

El autotransporte ha crecido notablemente en las últimas décadas a nivel mundial. De acuerdo con datos reportados en un estudio sobre incremento vehicular, se estima que su tasa anual de crecimiento llegará a 6 % para 2030 en países como Ecuador, Chile, República Dominicana y Egipto, mientras que para India y China el crecimiento será de 8 y 11 %, respectivamente. Se estima que en México la tasa de crecimiento anual para la flota vehicular será del 5 % para 2030 (Dargay et al. 2007), lo que implica un aumento en la demanda de combustible, especialmente de gasolina; por lo tanto, un incremento en las emisiones de GEI.

En la Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2015 se informó que, en México, todos los sectores emitieron un total de 700 MT de CO₂ durante 2015, de las que el 22.9 % correspondió al subsector autotransporte; es decir, más de 159 MT de CO₂ (INECC 2018a).

El futuro de la gasolina en el mundo y en México

Los derivados del petróleo son la mayor fuente de energía para el transporte en todo el mundo, y la

Perspectiva Energética Internacional (IEO, por su sigla en inglés) indica que su consumo se reducirá gradualmente de 96 a 88 % de 2012 a 2040; específicamente, el consumo mundial de gasolina de motor será de 9×10^9 PJ para 2040, por ser el tipo de combustible mayormente utilizado en el sector transporte (EIA 2016). Coincidientemente, la empresa transnacional British Petroleum emitió una proyección del uso de combustibles para el autotransporte a nivel global, asumiendo que la gasolina continuará representando la principal fuente de energía para los vehículos, con más del 90 % de participación, a pesar de la introducción de vehículos eléctricos, híbridos y a gas natural (BP 2019).

El mercado mexicano de gasolina ofrece dos calidades: la Magna de bajo octanaje (87) y la Premium de alto octanaje (92) (CRE 2017). En promedio, cerca del 81 % del consumo nacional de gasolina es del tipo Magna (SIE 2019). La mayoría de los países desarrollados ofrecen gasolinas de 98 octanos y, en algunos, ésta contiene un 10 % de bioetanol.

En México, Solís y Sheinbaum (2016) pronosticaron que el sector transporte generará un consumo energético superior a los 4000 PJ para 2040, de los cuales solamente el 43 % sería atribuido al uso de la gasolina debido a la penetración de la tecnología eléctrica e híbrida en el mercado mexicano.

Beneficios de la gasolina de alto octanaje

El rendimiento energético de los motores a gasolina puede medirse utilizando el número de octano investigativo (RON, por su sigla en inglés) o mediante el número de octano del motor (MON, por su sigla en inglés). Ambos describen el poder antidetonante del combustible en diferentes condiciones. Se ha reportado que los motores que trabajan con un RON alto, a una relación de compresión más alta, presentan beneficios con relación a la eficiencia de combustible, disminuyendo su consumo de gasolina en un mismo recorrido (Stradling et al. 2016).

La simulación de ciclos de conducción de un vehículo automotriz demostró que la demanda de gasolina puede disminuir de 4.5 a 6 % al sustituir la gasolina de 87 octanos por la de 92 octanos, lo que se atribuye a un aumento efectivo en la eficiencia del combustible del vehículo en carretera (Chow et al. 2014).

Otro estudio dio a conocer los beneficios económicos y ambientales de usar gasolina de 98 octanos, mediante simulación de ciclos de manejo y resultados experimentales para estimar la reducción en el consumo de combustible. Se determinó que, al utilizar un RON de 98 el consumo anual de gasolina disminuye en un 4.4 % (Speth et al. 2014). Leone et al. (2015) confirmaron este ahorro mediante diferentes pruebas en vehículos utilizando gasolinas de 91 y 98 octanos, reportando un aumento de 4.4 %, en la eficiencia del combustible y una disminución del 1.1 % en las emisiones de CO₂. Estos investigadores concluyeron que la gasolina con bajo octanaje genera mayor cantidad de emisiones de GEI en comparación con la de alto octanaje. Un estudio realizado para gasolinas mexicanas de 87 y 92 octanos también reportó que las emisiones generadas por la segunda son menores en comparación con la primera (Pérez 2017).

Compromisos de México ante el cambio climático

En 2012 se aprobó la Ley General de Cambio Climático en México, que establece estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero por sector. Específicamente, para el sector autotransporte se proponen, entre otras medidas, la construcción de ciclovías, la implementación de programas de movilidad sostenible en zonas urbanas para reducir el uso de automóviles particulares y el impulso a la penetración tecnológica de vehículos eléctricos e híbridos (SEMARNAT 2012).

En el Acuerdo de París, adoptado en diciembre de 2015 en la 21a Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21), el cual entró en vigor en Nueva York en noviembre de 2017, México se comprometió a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 25 % para 2030 (SEMARNAT 2019). Durante la 26a Conferencia de las Partes (COP26), Estados Unidos y la Unión Europea propusieron la reducción de las emisiones de metano en un 30 % para 2030, compromiso al cual se unieron México y otros países (SRE 2021).

El Gobierno Mexicano tiene una estrategia de diversificación energética en el mediano plazo y se ha enfocado principalmente a las estrategias de mitigación en la industria de generación de electricidad, que ocupa el primer lugar nacional en emisiones de GEI. También se observa una política de incremento de la producción de gasolinas con el fin de lograr la autosuficiencia en el mercado nacional, para lo cual se adquirió una refinería en Texas y se construyó otra en Dos Bocas, Tabasco. Por lo tanto, se vislumbra una etapa de varios años en que la flota vehicular de

gasolina pueda sustituirse totalmente por eléctrica o híbrida. Por ello es conveniente valorar alternativas para reducir las emisiones de GEI provenientes del sector autotransporte a gasolina y una opción es aumentar la eficiencia energética mediante el mejoramiento del combustible.

El presente trabajo tiene como objetivo calcular el potencial de mitigación de emisiones GEI para el transporte vial en México, con base en escenarios ideales de aumento de la eficiencia energética del vehículo con gasolina de dos calidades, con número de octano 92 y 98, mediante la Plataforma de Análisis de Bajas Emisiones (LEAP, por su sigla en inglés). Los cálculos realizados con este modelo de simulación servirán para el diseño de nuevas políticas energéticas en cuanto a la mejora de la calidad de la gasolina Magna, como una alternativa para contribuir al cumplimiento del acuerdo de París, en el cual México se comprometió a reducir sus emisiones de CO₂ en un 25 % para 2030. Los resultados obtenidos permitirán realizar el análisis de costo/beneficio del cambio tecnológico para la mejora de la calidad de las gasolinas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se centró en el transporte vial con motor a gasolina en México. Las características de la flota vehicular se tomaron de lo reportado en 2015 por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC 2018b) y ésta se clasificó de acuerdo con el tipo de vehículo, su uso y el tipo de gasolina que emplea, tal como se presenta en el **cuadro I**.

Se asume que el consumo de gasolina Premium para motocicletas, taxis, camiones y autobuses es despreciable, por lo que, de acuerdo con el Balance Energético de la Secretaría de Energía, la gasolina Premium consumida fue distribuida entre automóviles y camionetas de uso particular tal como se muestra en el **cuadro I** (SENER 2015).

Se utilizó el modelo de simulación LEAP (SEI 2018), para emisiones de GEI en el escenario inercial y los correspondientes a dos medidas de mitigación que se describen a continuación.

Escenario base

Para el caso de estudio se seleccionó 2015 como año base para calcular las proyecciones hasta 2050. En el **cuadro II** se presentan los datos utilizados para la simulación con el modelo LEAP, correspondientes a parque vehicular (INECC 2018b), recorrido promedio anual (IMT 2018) y eficiencia energética (IMT 2015) en el módulo “Current accounts” del LEAP.

CUADRO I. CLASIFICACIÓN DE LA FLOTA VEHICULAR EN MÉXICO (2015)*.

Tipo de vehículo	Uso	Tipo de gasolina	Número de vehículos
Motocicleta	Particular	Magna	2 637 264
Automóvil	Particular	Magna	13 218 967
Automóvil	Particular	Premium	3 100 745
Automóvil	Taxi	Magna	555 291
Camioneta	Particular	Magna	4 703 448
Camioneta	Particular	Premium	1 103 278
Camioneta	Carga	Magna	3 951 453
Autobús	Transporte público	Magna	17
Camión menor a 3.8 t	Carga	Magna	983 793
Camión mayor a 3.8 t	Carga	Magna	113 368

*Datos reportados por Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC 2018b).

CUADRO II. PARÁMETROS PARA DETERMINAR LA DEMANDA ENERGÉTICA.

Tipo de vehículo	Recorrido anual promedio *	Eficiencia energética **	Tasa de crecimiento ***
	(km/vehículo)	(MJ/km)	(%)
Motocicleta	28 835	1.7956	4.00
Auto particular	12 487	2.4504	4.20
Taxi	76 650	2.4504	3.40
Camioneta pasajeros	14 600	3.1588	4.00
Camioneta carga	21 900	3.1588	2.03
Autobús	78 475	4.2590	1.00
Camión carga ligera	29 200	3.5586	4.40
Camión carga pesada	22 922	3.6000	2.90

*IMT 2018; **IMT 2015; ***Solís y Sheinbaum 2016.

De acuerdo con la Sexta Comunicación Nacional y el Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (INECC 2018c), los factores de emisión de los compuestos considerados para la gasolina mexicana se presentan en el **cuadro III**.

Escenario de referencia BAU

En el escenario de referencia “business as usual” (BAU) se calculan el crecimiento vehicular y la demanda energética sin algún cambio en las tasas de crecimiento históricas. No se incluye la penetración de vehículos eléctricos e híbridos. Las tasas de crecimiento se introducen en el módulo “Escenarios”. Las emisiones de GEI correspondientes a 2050 se calculan sin propuestas de mitigación utilizando el módulo “Efectos” e introduciendo los factores de emisión y la sintaxis del cálculo correspondiente para cada gas, con base en la actividad (cantidad de combustible

CUADRO III. FACTORES DE EMISIÓN DE LA GASOLINA*.

Compuesto	Valor
CO ₂	73.79 Mt/TJ
CO	8000 kg/TJ
CH ₄	3.8 kg/TJ
N ₂ O	5.7 kg/TJ
NO _x	600 kg/TJ
SO ₂	13.84 kg/TJ
COVDM	1500 kg/TJ
Carbono negro	0.15 kg/TJ
PM _{2.5}	7.38 kg/TJ

*Datos reportados por Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC 2018c).

PM: partículas suspendidas menores a 2.5 μm ; COVDM: compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano.

expresada en PJ). A este tipo de escenario inercial se le denomina habitualmente BAU.

La flota vehicular por tipo de vehículo, *i*, a partir de 2016 y hasta 2050 se calcula mediante la ecuación 1:

$$FV_{BAU,i} = NV_i * TCA_i \quad (1)$$

donde $FV_{BAU,i}$ representa el número de vehículos i para un año en específico, NV_i es el número de vehículos i del año base y TCA_i es la tasa de crecimiento anual para cada vehículo i .

La ecuación 2 representa el cálculo de la demanda de combustible por año para el autotransporte a gasolina en México:

$$DC_{BAU,i} = FV_{BAU,i} * EEV_i * RPA_i \quad (2)$$

donde $DC_{BAU,i}$ es la demanda de combustible para el tipo de vehículo i en MJ, $FV_{BAU,i}$ es la flota vehicular anual i del escenario BAU, EEV_i es la eficiencia energética de i en MJ/km y RPA_i es el recorrido promedio anual de i en km/vehículo.

Escenario de referencia probable

Además del escenario de referencia BAU, se consideró un segundo escenario de referencia más realista, que considera la penetración tecnológica en México de vehículos eléctricos e híbridos en motocicletas, automóviles y camionetas de pasajeros. Se tomaron como referencia los porcentajes de ventas de autos eléctricos registrados a partir de 2015 para calcular la tasa de crecimiento anual y restarla en la ecuación del cálculo de flota vehicular que utiliza gasolina (AMIA 2021).

La flota vehicular por tipo de vehículo, i , a partir de 2016 y hasta 2050, considerando la introducción de autos eléctricos e híbridos se calcula mediante la ecuación 3:

$$FV_{PRO,i} = NV_i * TCA_i * (100 - PEH) \quad (3)$$

donde $FV_{PRO,i}$ representa el número de vehículos i , y PEH representa el porcentaje de ventas anual de vehículos eléctricos e híbridos.

La ecuación 4 representa el cálculo de la demanda de combustible por año para el autotransporte a gasolina en México:

$$DC_{PRO,i} = FV_{PRO,i} * EEV_i * RPA_i \quad (4)$$

donde $DC_{PRO,i}$ es la demanda de combustible para el tipo de vehículo i expresada en MJ.

Escenario de mitigación posible

Para reducir la cantidad de emisiones de GEI provenientes de la gasolina del autotransporte, se propone aumentar la eficiencia energética de los vehículos mediante el mejoramiento de la calidad de

la gasolina, es decir, incrementar el número de octanos del combustible. En este escenario se establece la eliminación de la producción de gasolina Magna (87 octanos) y ofrecer únicamente gasolina Premium (92 octanos).

Para el cálculo de la demanda energética y las emisiones de GEI, se asumieron los siguientes criterios:

- La proyección se realiza de 2015 a 2050, iniciando la sustitución de combustible Magna por Premium a partir de 2025.
- El aumento de 5 octanos en la gasolina es proporcional a un decremento en la demanda de combustible del 5 % anual para los vehículos a gasolina en México.

Las ecuaciones 5 y 6 representan el cálculo de la demanda de combustible por año para cada i a partir del escenario BAU y del escenario probable, respectivamente, para el escenario de mitigación posible.

$$DC_{Pos, BAU,i} = FV_{BAU,i} * EEV_i * RPA_i * (100 - 5\%) \quad (5)$$

$$DC_{Pos, PRO,i} = FV_{PRO,i} * EEV_i * RPA_i * (100 - 5\%) \quad (6)$$

donde $DC_{Pos, BAU,i}$ es la demanda de combustible para el tipo de vehículo i a partir del escenario BAU, mientras que $DC_{Pos, PRO,i}$ es la demanda de combustible para cada i a partir del escenario probable, expresada en MJ.

Escenario de mitigación deseable

Este escenario de mitigación consiste en aumentar el número de octanos de toda la gasolina ofertada en México a 98 octanos, como sucede en el presente en algunos países de la Unión Europea. Al igual que en el primer escenario, se asume la disminución de la demanda energética a medida que aumenta el número de octanos.

Para el cálculo de la demanda energética y las emisiones de GEI, se asumieron los siguientes criterios:

- La proyección se realiza de 2015 a 2050, iniciando la sustitución de combustible Magna y Premium por combustible de 98 octanos a partir de 2025.
- Se considera una disminución de 8 % anual en la demanda energética al incrementar el octanaje a 98.

Las ecuaciones 7 y 8 representan el cálculo de la demanda de combustible anual para cada i a partir del escenario BAU y del escenario probable,

respectivamente, para el escenario de mitigación deseable.

$$DC_{Des, BAU,i} = FV_{BAU,i} * EEV_i * RPA_i * (100 - 8\%) \quad (7)$$

$$DC_{Des, PRO,i} = FV_{PRO,i} * EEV_i * RPA_i * (100 - 8\%) \quad (8)$$

donde $DC_{Des, BAU,i}$ es la demanda de combustible del escenario de mitigación posible para el tipo de vehículo i a partir del escenario BAU, mientras que $DC_{Des, PRO,i}$ es la demanda de combustible para cada i a partir del escenario probable en MJ.

Escenarios no ideales

Los escenarios posible y deseable son ideales, ya que se calculan solamente con base en la demanda. Para los escenarios no ideales correspondientes a los anteriores, se definen otros escenarios más cercanos a la realidad, estimando una disminución del 20 % de la mitigación de todos los gases emitidos debido a la disminución de la eficiencia de los vehículos en el tiempo, las constantes paradas que suceden en los recorridos, especialmente en las ciudades, entre otros factores no considerados en los escenarios ideales.

Cálculo del costo de la mitigación de la demanda de gasolina.

No se tiene el costo de producción de gasolina de 92-98 octanos, pero el Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM reportó el costo de producción de la gasolina Magna (IIE 2012). Tentativamente, se calculó el costo de la disminución de

la demanda con ese dato, aunque en realidad podría ser mayor.

RESULTADOS

Como se mencionó previamente, en este trabajo se definen dos escenarios de referencia para compararlos con las medidas de mitigación propuestas. En el primer escenario (BAU) se considera que el estado actual permanece inalterado. El segundo escenario (probable) contempla la introducción de autos híbridos y eléctricos.

En la **figura 1** se muestra la proyección del parque vehicular de México correspondiente al escenario BAU, calculada a partir de los datos presentados en los **cuadros I y II**, que prácticamente se triplica en 2050. Se aprecia que los autos particulares que utilizan gasolina siguen representando la mayor parte, siendo el total de autos compactos y camionetas particulares (que utilizan gasolinas Premium y Magna) de 22 millones de unidades, aproximadamente, mientras que el tipo de vehículo que ocupa el segundo lugar es la camioneta particular de carga con poco menos de cuatro millones. Por este motivo, en lo adelante se analizarán los totales de GEI y contaminantes, en el entendido de que los mayores emisores son los vehículos mencionados.

Demanda energética

De acuerdo con el escenario BAU, al no considerar la penetración de tecnologías de autos híbridos y eléctricos, la demanda energética del autotransporte a

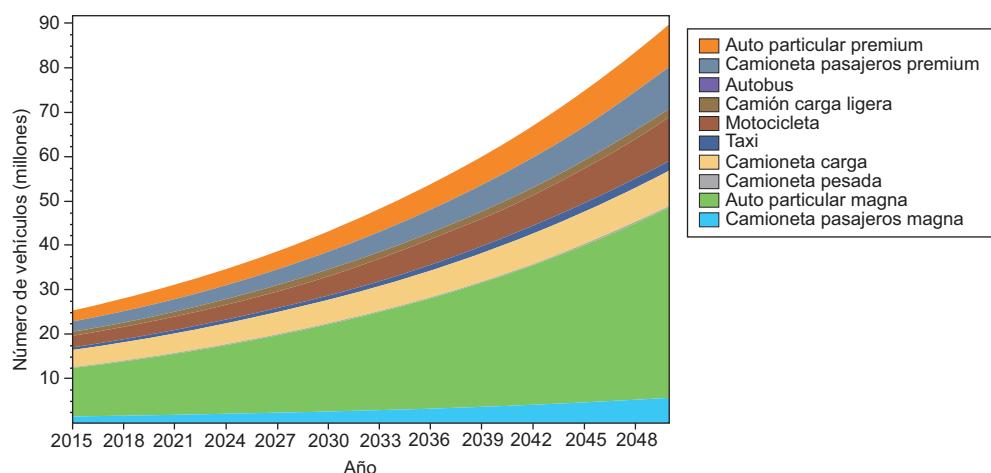


Fig. 1. Demanda de vehículos a gasolina en México en el escenario inercial BAU, calculada con los datos de los **cuadros I y II**. (BAU: business as usual.)

gasolina en México aumentará de 1526 PJ (48.4 hm³) en 2025 a 3586 PJ en 2050, tal como se muestra en la **figura 2a**. En términos de volumen, el consumo de gasolina para 2025 será de 48 hm³ y la demanda esperada para 2050 será de 113 hm³. La gasolina Magna será la de mayor consumo, principalmente en autos particulares.

Para el escenario inercial probable, la demanda energética crece ligeramente por debajo de la demanda proyectada en el escenario BAU, es decir, en 2025 la demanda será de 1516 PJ (48.03 hm³), y para 2050 será de 3490 PJ. Este menor crecimiento se debe a la introducción de tecnologías de autos eléctricos e

híbridos considerada en este escenario probable. En términos de volumen, para 2050 se estarían consumiendo 111 hm³ de gasolina. La **figura 2b** muestra la demanda energética del escenario probable.

En el escenario de mitigación posible se generaron las demandas de combustible y se calculan sus diferencias con los escenarios BAU y probable, tal como se muestra en la **figura 3a y b**, respectivamente. Las áreas blancas indican el potencial de mitigación posible para cada año y el tipo de gas emitido. En 2050 se tendría un potencial de mitigación total de 234 PJ, lo que equivale a 7.4 hm³ a partir del escenario BAU, en tanto que el potencial de mitigación

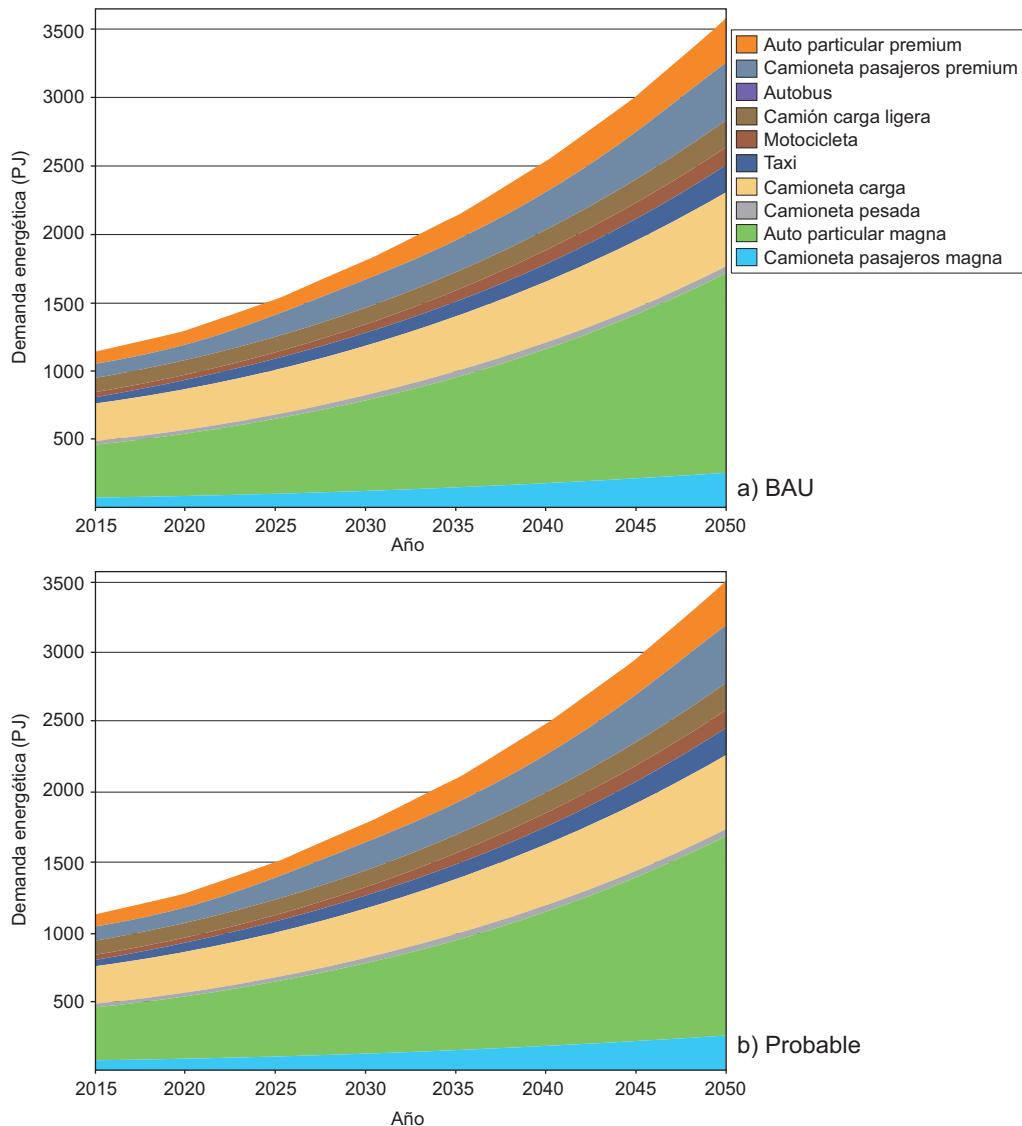


Fig. 2. Demanda energética (PJ) por tipo de vehículo en los escenarios iniciales: (a) BAU y (b) probable, hasta 2050. (BAU: business as usual.)

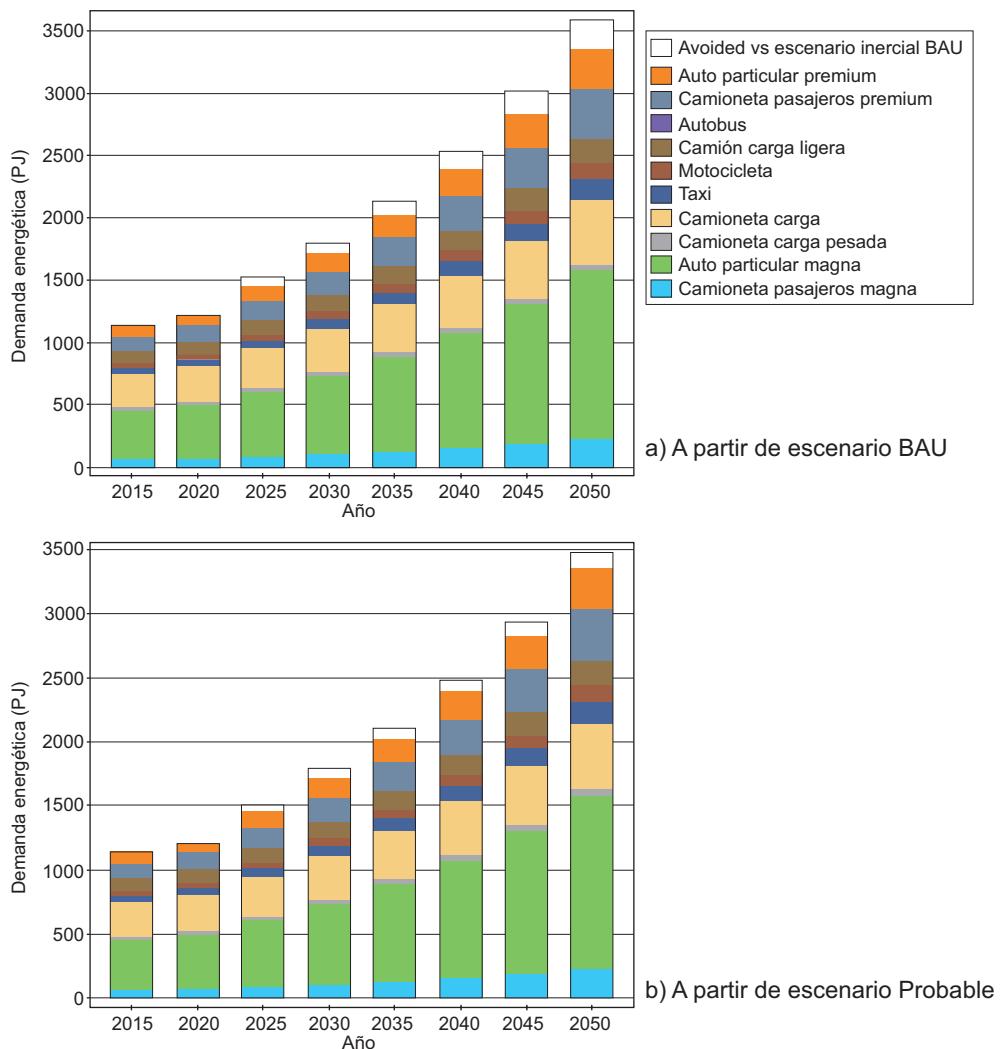


Fig. 3. Potencial de mitigación (cuadros en blanco) de la demanda energética (PJ) por tipo de vehículo en el escenario posible a partir de los escenarios (a) BAU y (b) probable, hasta 2050. (BAU: business as usual.)

en el escenario inercial probable sería de 134 PJ, equivalentes a 4.4 hm³ totales de gasolina.

El potencial de mitigación de la demanda energética en el escenario deseable sería de 11.1 hm³ totales de gasolina partiendo del escenario BAU, mientras que, a partir del escenario probable se podrían mitigar más de 8 hm³ totales de gasolina para 2050. La figura 4 muestra las gráficas con el potencial de mitigación para el escenario deseable.

Emisiones de GEI y otros contaminantes

La demanda energética de combustible en los vehículos a gasolina está directamente relacionada con las emisiones de GEI y otros contaminantes

atmosféricos. Mientras mayor sea el consumo de combustible, mayor será la cantidad de contaminantes emitidos. La figura 5 presenta las emisiones de GEI proyectadas a 2050 en los escenarios iniciales. Si no se considera la introducción de autos eléctricos e híbridos, es decir, en el escenario BAU, el sector transporte a gasolina emitirá 265 millones de toneladas de CO₂ para 2050 (Fig. 5a), mientras que, en el escenario probable, las emisiones de CO₂ serán de 257 millones de toneladas (Fig. 5b). La generación de emisiones de GEI a partir del escenario BAU serán mayores debido a que no se consideran autos eléctricos; sin embargo, es necesario tomar en cuenta que la introducción de estos vehículos en México

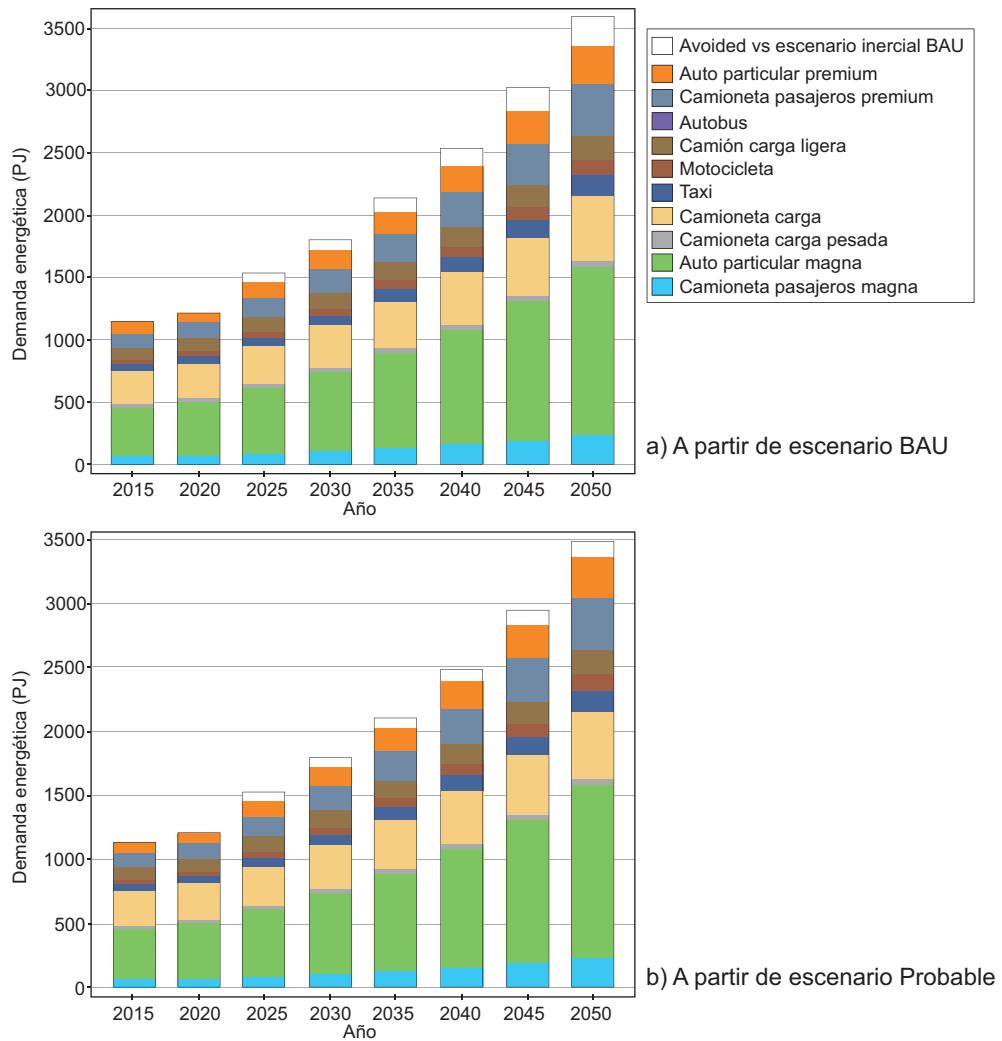


Fig. 4. Potencial de mitigación (cuadros en blanco) de la demanda energética (PJ) por tipo de vehículo en el escenario deseable a partir de los escenarios (a) BAU y (b) probable, hasta 2050. (BAU: business as usual.)

aumentará gradualmente (ver **Cuadro IV**). Cabe mencionar que, para ambos escenarios iniciales, las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄ provienen principalmente de los autos particulares que utilizan gasolina Magna, debido a que representan la mayor parte del parque vehicular. El resto de los gases contaminantes corresponde a las emisiones de CO, compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano (COVDM), NO_x, SO₂, PM_{2.5} y carbono negro, se muestran en la **figura 6**. Se aprecia que predominan las emisiones de CO, con un total de hasta 28.7 millones de toneladas para 2050, lo que resulta preocupante debido al impacto ambiental que implican por su alta toxicidad y por ser precursores de ozono.

Para el escenario posible, el potencial de mitigación de CO₂, CH₄ y N₂O se muestra en los cuadros blancos de la **figura 7a, c y e**. Se calcula que para 2050 se puedan mitigar 11 millones de toneladas de CO₂. Por otra parte, en el escenario deseable, el potencial de mitigación sería de 19 millones de toneladas de CO₂ para 2050 (**Fig. 7b, d y f**). Se puede observar que las emisiones de GEI son superiores en el escenario de mitigación posible en comparación con el escenario de mitigación deseable, ya que, como era de esperarse, la demanda de combustible y generación de emisiones es mayor cuando la flota vehicular utiliza gasolina de 92 octanos que cuando utiliza la de 98, tal como se aprecia en la **figura 8**.

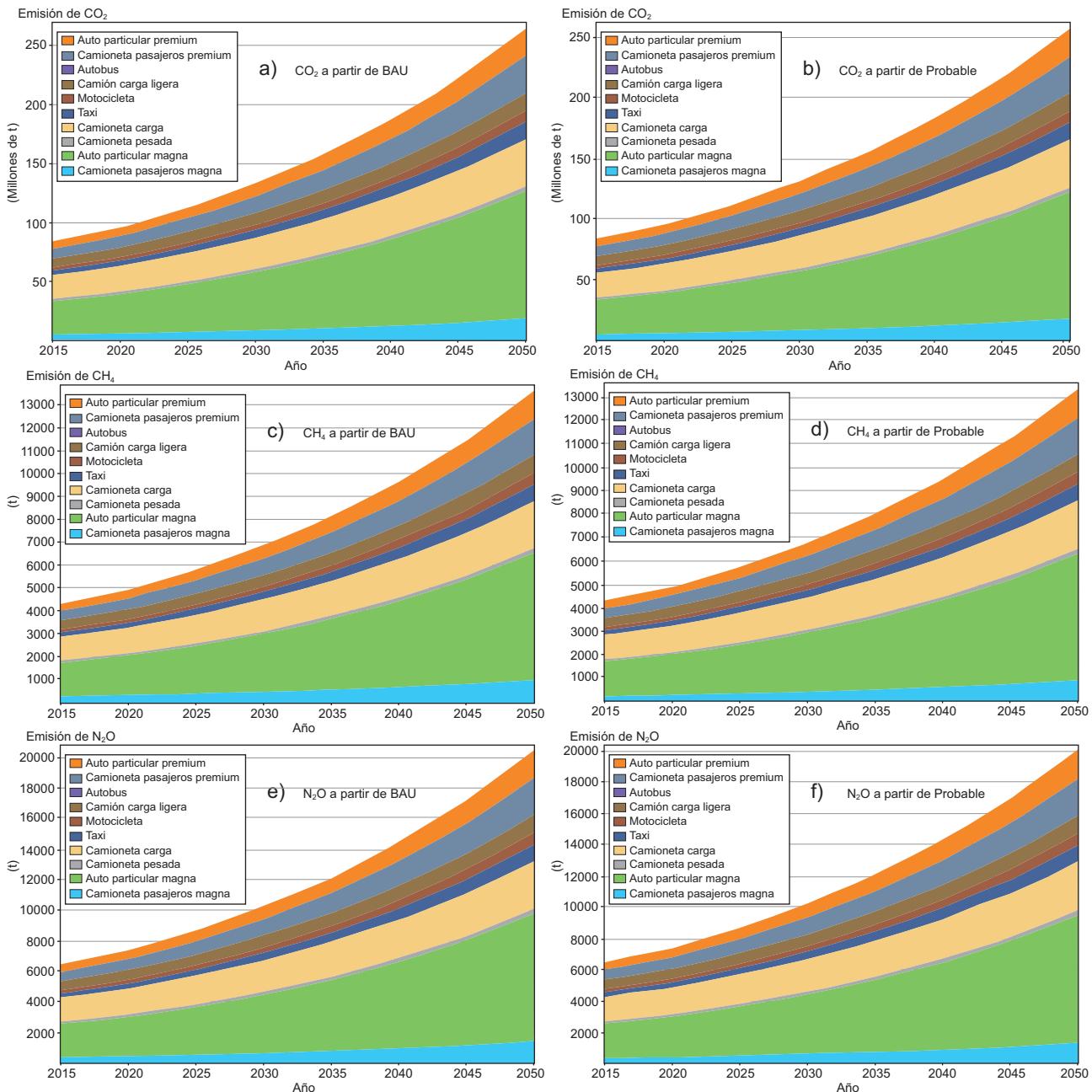


Fig. 5. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por tipo de vehículo en los escenarios iniciales (a, c y e) BAU y (b, d y f) probable, hasta 2050. (BAU: business as usual.)

El potencial de mitigación es mayor en el escenario deseable por la disminución notable de la demanda de combustible y de emisiones calculadas, pero no es una medida cercana a la realidad, ya que seguramente requiere una mayor inversión en tecnología.

En el cuadro V se presenta un resumen del ahorro total de combustible que se puede alcanzar para 2050

si la flota vehicular en México utiliza exclusivamente gasolina de 92 o 98 octanos. Como era de esperar, el mayor ahorro de gasolina se registra en el escenario deseable, es decir, el de 98 octanos partiendo del escenario BAU; no obstante, se considera pertinente seleccionar los resultados generados a partir del escenario probable, ya que es el que contempla la

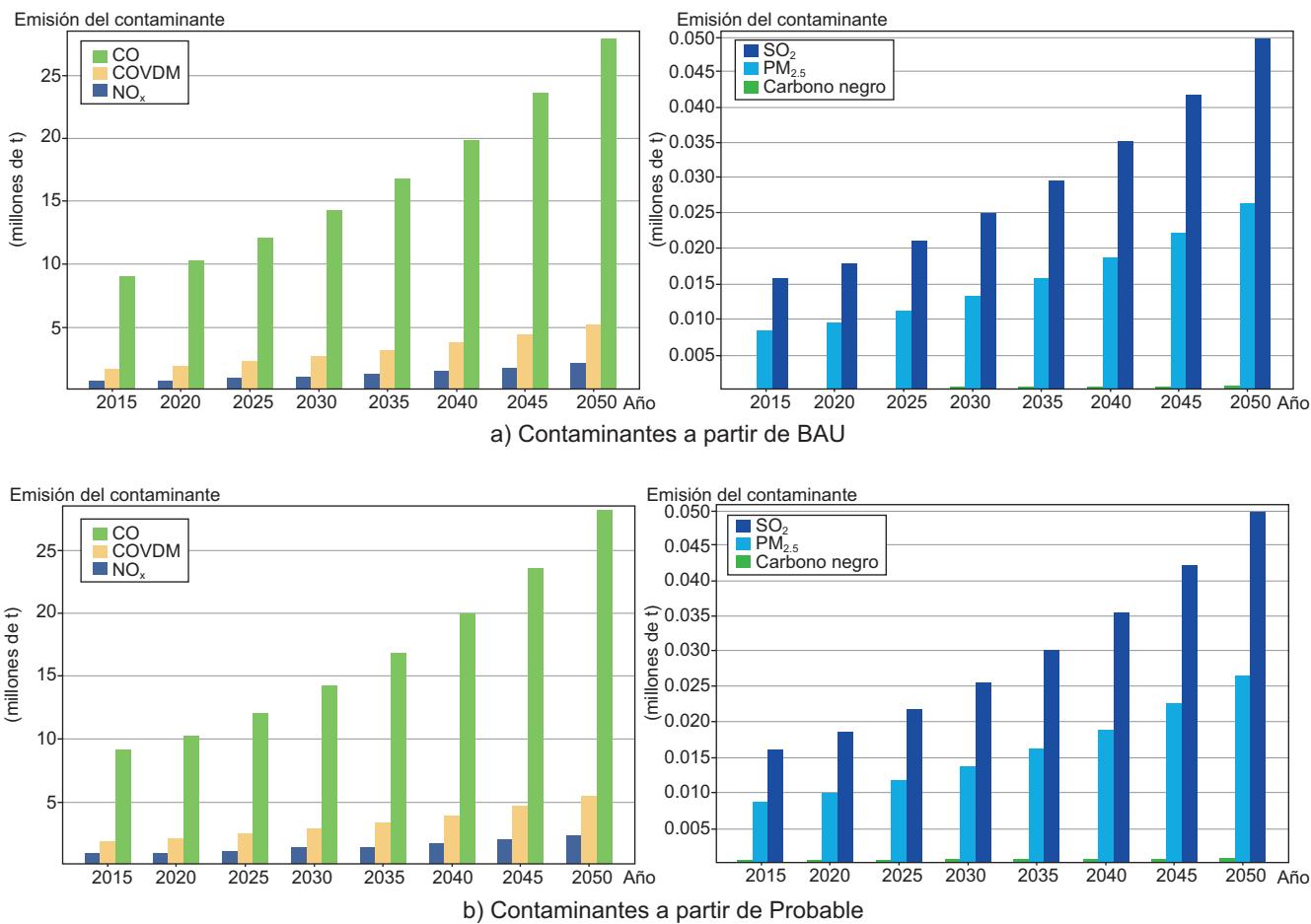


Fig. 6. Emisiones de otros contaminantes en los escenarios inerciales (a) BAU y (b) probable hasta 2050. (BAU: business as usual; COVDM: compuestos orgánicos diferentes al metano; PM: partículas suspendidas.)

introducción de autos eléctricos e híbridos, lo cual ya es una realidad en México.

Por otra parte, en el **cuadro VI** se muestra el potencial de mitigación total de GEI y otros contaminantes estimado para 2050. Se puede apreciar una disminución considerable de emisiones si se implementa a corto plazo el uso exclusivo de gasolina de 92 octanos, y, en un futuro (probablemente lejano) el uso exclusivo de gasolina de 98 octanos, tal como se realiza en Estados Unidos y algunos países de la Unión Europea.

Costos para satisfacer la demanda

No se cuenta con un registro público de costos de producción de hidrocarburos. Sin embargo, las instituciones públicas federales indican que los costos son muy similares a los estándares establecidos por la Agencia Internacional de Energía, según la cual el costo de producción de gasolina se distribuye de la siguiente forma: 57.1 % es el costo del petróleo

crudo, 17.7 % el costo de refinación, 12.4 % el costo de distribución y mercadotecnia, y 12.8 % corresponde a impuestos (EIA 2023).

Un estudio realizado por investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México reportó que el costo por litro de gasolina producido es de 2.7 pesos (IIE 2012). Con base en el volumen de producción para los escenarios probable y posible se realizó una comparación del costo para conocer el ahorro en pesos que se tendría en 2050. El **cuadro VII** muestra que, de llevarse a cabo el escenario de mitigación posible, se podrían ahorrar más de 11 billones de pesos para ese año.

CONCLUSIONES

La introducción de autos eléctricos e híbridos en el país aumentará gradualmente durante los próximos años, pero no en el corto plazo, debido a altos precios

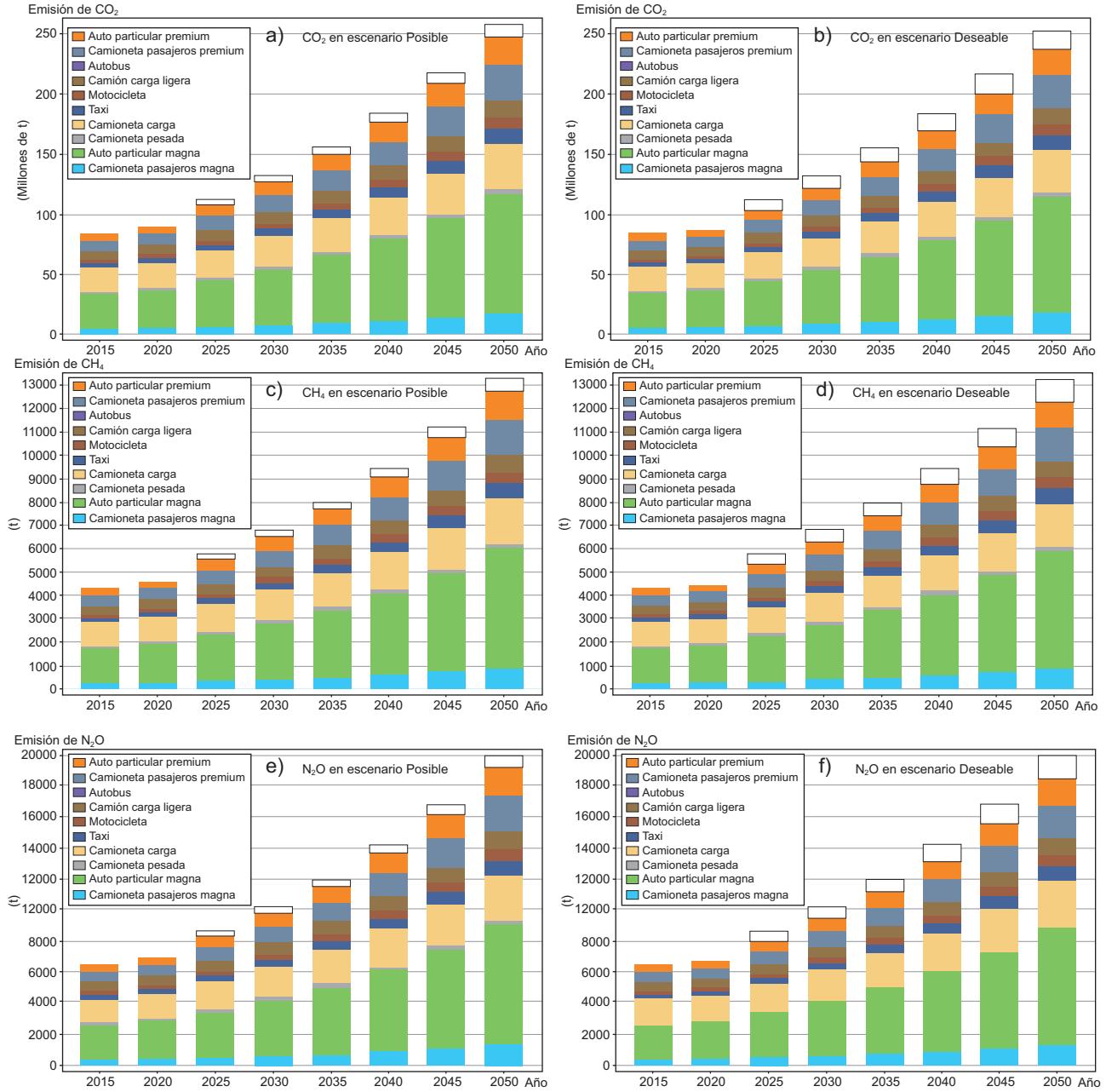


Fig. 7. Potencial de mitigación (cuadros en blanco) de CO₂, CH₄ y N₂O por tipo de vehículo en los escenarios (a, c y e) posible y (b, d y f) deseable (ideales), hasta 2050, con relación al escenario de referencia probable.

de estos vehículos y la ausencia de cobertura de carga para los primeros.

La creciente demanda en el parque vehicular indica que es necesario establecer medidas de mitigación de GEI provenientes de los combustibles fósiles. Los escenarios de mitigación propuestos son una alternativa para reducir las emisiones de GEI provenientes del transporte vial a gasolina en México. Es posible mitigar más de 10 millones de toneladas de CO₂ para 2050 si se aumenta a 92 el número de

octanos en la gasolina Magna para toda la flota vehicular mexicana, lo cual implica una disminución en la demanda como resultado de esta mejora en la eficiencia energética. Este escenario es la opción más realista y conservadora, y sirve de base para restar otros efectos en la eficiencia del motor que puedan disminuir el potencial de mitigación.

Considerando la penetración tecnológica de autos eléctricos e híbridos, para este escenario se calcula un ahorro de más de 4.4 hm³ de gasolina para 2050,

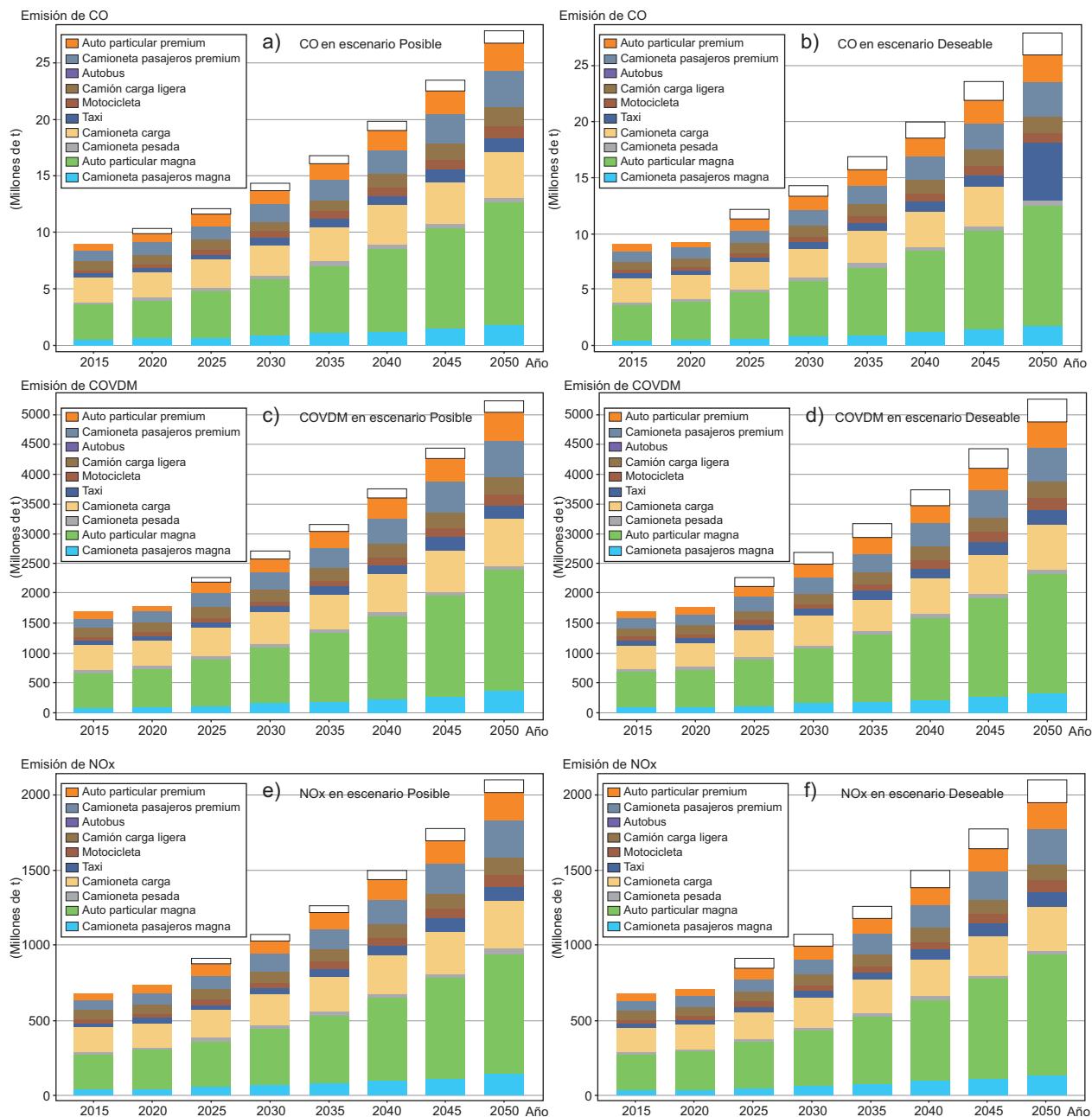


Fig. 8. Potencial de mitigación (cuadros en blanco) de otros contaminantes por tipo de vehículo en los escenarios (a, c y e) posible y (b, d y f) deseable (ideales), hasta 2050, con relación al escenario de referencia probable. (COVDM: compuestos orgánicos diferentes al metano).

cerca de 11.8 billones de pesos y la mitigación de emisiones de contaminantes.

El uso de gasolina de 98 octanos sería el escenario ideal, pero menos probable en el mediano plazo. Podría considerarse como un objetivo a largo plazo, ya que la eficiencia energética del combustible reduciría aún más el consumo de gasolina y las emisiones de GEI.

Hay otras opciones relacionadas con la propia tecnología de combustión interna, que deben considerarse en las normas para aumentar la eficiencia en el diseño de automóviles a gasolina durante la etapa de transición de la flota vehicular a gasolina a la de vehículos eléctricos y híbridos.

Las alternativas planteadas en este trabajo pueden considerarse como posibles medidas de mitigación

CUADRO IV. PORCENTAJES DE VENTAS DE AUTOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS EN MÉXICO*.

Año	% de ventas
2016	0.03
2017	0.04
2018	0.06
2019	0.09
2020	0.08
2021	0.13

*Datos reportados por la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA 2021).

CUADRO V. AHORRO DE COMBUSTIBLE TOTAL PARA 2050.

Escenario inercial de referencia	Escenario de mitigación	Ahorro de gasolina (hm ³)*
BAU	Possible	8.3
	Deseable	11.1
Probable	Possible	5.3
	Deseable	8.1

*El ahorro se calcula respecto al escenario de referencia indicado en la primera columna.

BAU: business as usual.

CUADRO VI. POTENCIAL DE MITIGACIÓN DE GEI Y OTROS CONTAMINANTES PARA 2050 PARA LOS ESCENARIOS BASADOS EN LA DEMANDA (IDEALES)*.

Escenario de referencia	Escenario de mitigación	Potencial de mitigación** (miles de toneladas)								
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	NO _x	COVDM	SO ₂	Carbono negro	PM _{2.5}
BAU	Possible	17 304	0.89	1.34	1876	140.70	351.76	3.25	0.04	1.73
	Deseable	25 851	1.33	2.00	2802	210.20	525.50	4.85	0.05	2.59
Probable	Possible	10 229	0.53	0.75	1109	83.17	207.94	1.92	0.02	1.02
	Deseable	18 776	0.97	1.49	2035	152.67	381.68	3.52	0.04	1.88

*El potencial de mitigación no ideal, considerando las pérdidas de eficiencia, es el 80 % del valor; **el potencial de mitigación se calcula respecto al escenario de referencia indicado en la primera columna.

GEI: gases de efecto invernadero; BAU: business as usual; COVDM: compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano; PM_{2.5}: partículas suspendidas menores a 2.5 μm.

CUADRO VII. AHORRO ESTIMADO EN VOLÚMENES Y COSTO DE DEMANDA DE GASOLINA.

Año	Escenario de referencia posible		Escenario de mitigación probable		Ahorro (millones de MXN)
	Volumen de gasolina (hm ³)	Costo de la demanda* (millones de MXN)	Volumen de la gasolina (hm ³)	Costo de la demanda* (millones de MXN)	
2015	36.008	\$97 220.890	36.008	\$97 220.890	\$0
2020	39.238	\$105 941.781	39.238	\$105 941.781	\$0
2025	48.099	\$129 868.151	46.132	\$124 555.651	\$5 312.500
2030	56.636	\$152 916.098	54.334	\$146 701.199	\$6 214.897
2035	66.802	\$180 365.582	64.104	\$173 079.623	\$7 285.959
2040	78.925	\$213 096.747	75.755	\$204 538.527	\$8 558.219
2045	93.395	\$252 166.952	89.666	\$242 098.459	\$10 068.493
2050	110.687	\$298 856.164	106.292	\$286 988.014	\$11 868.151

*Este valor es tentativo, ya que se calcula con el costo de producción reportado por el Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM (IIE 2012) sin hacer cambios en la tecnología.

aplicables, previo estudio técnico-económico del cambio tecnológico para la mejora del número de octanos en la gasolina. Con un cálculo económico real y los resultados de este trabajo será posible calcular la relación costo/beneficio de las medidas propuestas, requisito necesario para valorar su implementación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por su apoyo y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por la beca doctoral otorgada durante el desarrollo del presente trabajo. Se reconoce a los administradores del programa LEAP del Stockholm Environmental Institute (sede de Somerfield, Boston) por el uso gratuito de su plataforma para los cálculos de este estudio.

REFERENCIAS

- AMIA (2021). Reporte de ventas de vehículos eléctricos e híbridos a octubre de 2021. Asociación Mexicana de la Industria Automotriz [en línea]. <https://amia.com.mx/2021/08/23/reportes-de-venta-de-vehiculos-hibridos-y-electricos-mayo-2021/#:~:text=Durante%20octubre%20de%202021%20la,h%C3%ADbidos%20conectables%20y%202%2C666%20h%C3%ADbidos%2023/08/2023>
- BP (2019). BP energy outlook. British Petroleum [en línea]. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf> 20/11/2020
- Chow E., Heywood J. y Speth R. (2014). Benefits of a higher-octane standard gasoline for the U.S. light-duty vehicle fleet. SAE Technical Paper 2014-01-1961. Society of Automotive Engineers, Massachusetts, EUA. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1961>
- CRE (2017). Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, Especificaciones de calidad de los petrolíferos. Comisión Reguladora de Energía. Diario Oficial de la Federación, México, 29 de agosto.
- Dargay J., Gately D. y Sommer M. (2007). Vehicle ownership and income growth. Worldwide: 1960-2030. The Energy Journal 28 (4), 143-170. <https://doi.org/10.5547/issn0195-6574-ej-vol28-no4-7>
- EIA (2016). DOE/EIA-0484. International Energy Outlook 2016. US Energy Information Administration, Washington DC, EUA, 290 pp. [en línea]. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf) 17/09/2020
- EIA (2023). Gasoline explained. Factors affecting gasoline prices. US Energy Information Administration, Washington DC, EUA [en línea]. <https://www.eia.gov/energyexplained/gasoline/factors-affecting-gasoline-prices.php> 16/09/2023.
- EPA (2021). Global greenhouse gas emissions data. United States Environmental Protection Agency [en línea]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data> 27/07/2021
- IEA (2020). Global CO₂ emissions in 2019. International Energy Agency [en línea]. <https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019> 26/05/2021
- IIE (2012). ¿Cuánto cuesta producir un litro de gasolina en México? Instituto de Investigaciones Económicas, Universidad Nacional Autónoma de México [en línea]. https://ru.iiec.unam.mx/2743/1/Boletin_19Momento_Economico-nueva_epoca.pdf 16/09/2023
- IMT (2015). Manual estadístico del sector transporte 2015. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes [en línea]. www.imt.mx 27/07/2021
- IMT (2018). Desarrollo de metodología para la estimación de los vehículos-kilómetro recorridos anualmente a nivel nacional. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes [en línea]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt517.pdf> 17/09/2020
- INECC (2018a). Sexta comunicación nacional y segundo informe bienal de actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Ciudad de México, México [en línea]. <https://www.gob.mx/inecc/articulos/sexta-comunicacion-nacional-ante-la-cmnucc?idiom=es> 17/09/2020
- INECC (2018b). Elementos para inventario de fuentes móviles, informe final. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Ciudad de México [en línea]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/427685/INFORME_FINAL_MOVES-IE2016f.pdf 27/07/2021
- INECC (2018c). Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Ciudad de México [en línea]. <https://cambioclimatico.gob.mx/estadosymunicipios/Emisiones.html> 27/08/2021
- Leone T.G., Anderson J.E., Davis R.S., Iqbal A., Reese R.A., Shelby M.H. y Studzinski W.M. (2015). The effect of compression ratio, fuel octane rating, and ethanol content on spark-ignition engine efficiency. Environmental Science and Technology 49 (18), 10778-10789. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01420>
- Pérez D.A. (2017). Estudio de emisiones contaminantes utilizando combustibles locales. Innova Research

- Journal 2, 23-34. <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n11.2017.302>
- SEMARNAT (2012). Ley General de Cambio Climático. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 6 de junio.
- SEMARNAT (2019). Comunicado: México reitera su compromiso con el cumplimiento del Acuerdo de París. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [en línea]. <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/mexico-reitera-su-compromiso-con-el-cumplimiento-del-acuerdo-de-paris> 01/09/2021
- SEI (2018). Low Emissions Analysis Platform (LEAP). Stockholm Environment Institute [en línea]. <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/leap-long-range-energy-alternatives-planning-system/> 01/09/2019
- SIE (2020). Balance nacional de energía 2019. Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía, México [en línea]. <https://sie.energia.gob.mx/movil.do?action=applyOptions> 15/10/2021
- Solís J. y Sheinbaum C. (2016). Consumo de energía y emisiones de CO₂ del autotransporte en México y escenarios de mitigación. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 32, 7-23.
- Speth R.L., Chow E.W., Malina R., Barrett S.R.H., Heywood J.B. y Green W.H. (2014). Economic and environmental benefits of higher-octane gasoline. Environmental Science and Technology 48 (12), 6561-6568. <https://doi.org/10.1021/es405557p>
- SRE (2021). Comunicado: México se adhirió al Compromiso Global de Metano en la COP26. Secretaría de Relaciones Exteriores [en línea]. <https://www.gob.mx/sre/prensa/mexico-se-adhirio-al-compromiso-global-de-metano-en-la-cop26?state=published> 01/09/2021
- Stradling R., Williams J., Hamje H. y Rickeard D. (2016). Effect of octane on performance, energy consumption and emissions of two Euro 4 passenger cars. Transportation Research Procedia 14, 3159-3168. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.256>
- Teter J. (2020). Tracking transport 2020. International Energy Agency, France [en línea]. <https://coilink.org/20.500.12592/k9qqc5> 26/08/2021.
- WRI (2021). Emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector. World Resources Institute [en línea]. <https://wrimexico.org/bloga/cuatro-gr%C3%A1ficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pa%C3%ADs-y-por> 27/12/2021