

Emisiones de CO₂ del sistema automotriz privado en los estados de la frontera norte de México: un ejercicio de valoración monetaria

CO₂ emissions from the private automotive system in the northern border states of Mexico: a monetary valuation exercise

Pablo Hernández Arias¹, *Beatriz Olivia Camarena Gómez², Jesús Martín Robles Parra³, Vidal Salazar Solano⁴,
Jorge Inés León Balderrama⁵

¹Egresado de Doctorado en Desarrollo Regional, CIAD, A.C., ibthernandez@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-0728-3261>
Coordinación Desarrollo Regional, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Centro SEP-CONACYT.
Sonora, México. CP. 83304. Tel. 2892400

²betica@ciad.mx. <https://orcid.org/0000-0002-7417-6012>

³jrobles@ciad.mx. <https://orcid.org/0000-0001-9578-4810>

⁴avidal@ciad.mx. <https://orcid.org/0000-0002-9906-9168>

⁵jleon@ciad.mx. <https://orcid.org/0000-0001-5550-6162>

*Autor de correspondencia.

Resumen

El crecimiento urbano y demográfico presentado los últimos años por los estados de la frontera norte de México (EFNM) ha impactado sus respectivos sistemas de movilidad terrestre, su demanda de recursos energéticos y sus emisiones de carbono. En tal contexto, el objetivo del estudio es analizar el rendimiento ambiental del sistema privado de movilidad urbana (SPMU) en esta región, a través de valorar sus emisiones de carbono a la atmósfera, con base en una perspectiva eco integradora. Los resultados corroboraron la tendencia creciente del parque vehicular y del valor monetario de las emisiones, pero no una mayor demanda de energía ni un aumento de tales emisiones. Se concluye que la crisis mundial y el contexto macroeconómico nacional determinaron el rendimiento ambiental del SPMU más que factores endógenos. Se recomienda reforzar esta línea de investigación contemplando escenarios alternativos sustentables e integrando más variables al esquema de análisis.

Palabras clave: Rendimiento ambiental; sistema privado de movilidad urbana; externalidades; enfoque eco integrador.

Abstract

The urban and demographic growth presented in recent years by the states of the northern border of Mexico (EFNM) has impacted their respective land mobility systems, their demand for energy resources, and their carbon emissions. In this context, the objective of the study is to analyze the environmental performance of the private urban mobility system (SPMU) in this region, by assessing its carbon emissions into the atmosphere, based on an eco-integrative perspective. The results corroborated the growing trend of the vehicle fleet and the monetary value of emissions, but not a greater demand for energy or an increase in such emissions. It is concluded that the world crisis and the national macroeconomic context determined the environmental performance of the SPMU more than its endogenous factors. It is recommended to reinforce this line of research considering sustainable alternative scenarios and integrating more variables into the analysis scheme.

Keywords: Environmental performance; externalities; private urban mobility system; eco-integrative approach.

Recibido: 30 de junio de 2022

Aceptado: 26 de septiembre de 2022

Publicado: 16 de noviembre de 2022

Cómo citar: Hernández Arias, P., Camarena Gómez, B. O., Robles Parra, J. M., Salazar Solano, V., & León Balderrama, J. I. (2022). Emisiones de CO₂ del sistema automotriz privado en los estados de la frontera norte de México: un ejercicio de valoración monetaria. *Acta Universitaria* 32, e3630. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2022.3630>

Introducción

A partir de los años 80, México presentó un desarrollo regional diferenciado promovido por el crecimiento industrial en las entidades federativas colindantes con Estados Unidos (EFNM). La elevada concentración poblacional en zonas urbanas y periurbanas en tales estados (Mendoza, 2010), junto con la diversificación de prácticas económicas, sociales y culturales, propiciaron cambios constantes en la movilidad de sus moradores, el crecimiento del parque vehicular destinado al transporte de particulares y, por lo mismo, un mayor consumo de energéticos.

El incremento de vehículos motorizados y de los requerimientos de traslado no estuvieron acompañados por el desarrollo de una infraestructura vial adecuada. Esta última en la mayoría de las zonas metropolitanas y ciudades del país sigue presentando limitaciones, es cada vez más común presenciar conflictos de comunicación y traslado terrestre que dificultan las actividades económicas, sociales y culturales. Atender tal situación lleva a plantear la necesidad de impulsar programas de gestión y planeación vial mejor estructurados, que consideren la complejidad del problema y diversas dimensiones involucradas:

...es indispensable abordar el tema del urbanismo como un problema complejo, tomando en cuenta los diversos factores que lo conforman, desde el punto de vista de distintas disciplinas, desde la psicología hasta la economía, pasando por la sociología y la geografía humana, entre otras (García, 2018).

Esfuerzos de planeación que contemplan la movilidad urbana reconocen esa necesidad de incorporar la sustentabilidad en los programas y estrategias de desarrollo urbano (ONU-Hábitat, 2015; Rios *et al.*, 2013). Rios *et al.* (2013), por ejemplo, al estudiar los problemas del sistema de transporte desde la perspectiva de la sustentabilidad en algunas zonas metropolitanas del país (Valle de México, Monterrey, Guadalajara, Cd. Juárez, Chihuahua y León, Guanajuato) y dimensionar los principales problemas de transporte, destacaron la poca articulación de esfuerzos y escasos compromisos a nivel intersectorial para implementar una estrategia nacional de movilidad sustentable que genere cambios y mejoras sustantivas en la movilidad y competitividad de tales ciudades.

En cuanto a la medición de rendimiento de la movilidad privada y de los sistemas de transporte público, como señalan Diana & Daraio (2010), la comunidad científica se ha interesado en ello desde finales de los años ochenta. A nivel conceptual, los primeros estudios se inspiraron en la contribución de Farrell (1957) sobre las medidas de eficiencia productiva, y se complementaron después con técnicas de estimación de frontera para distinguir el diferencial de eficiencia entre procesos (Brons *et al.*, 2005; Diana & Daraio, 2010). Ese concepto de evaluación del rendimiento de la movilidad y del transporte se extendió durante los años 90 por su idoneidad para evaluar y seleccionar alternativas en el ámbito de la sostenibilidad ambiental, acorde a la demanda y planteamientos vertidos en torno al desarrollo sustentable, los cuales fueron detonados al publicarse el primer Informe Brundtland (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 1987). A partir de entonces, se reconoce la necesidad de transitar hacia un sector de transporte sostenible, definido como aquel que:

[...] no ponga en peligro la salud pública de los ecosistemas y cumpla con la movilidad consistente con: a) la utilización de recursos renovables por debajo de su tasa de regeneración; y b) con el uso de los recursos no renovables por debajo de los índices de desarrollo de las energías renovables sustitutas (Peralta, 2020).

En esa línea de investigación se han incorporado métodos de valoración de fenómenos o ecosistemas considerados como externalidades del sistema económico, tanto desde la economía ambiental como desde la economía ecológica.

Para los fines de este trabajo, cuyo propósito es analizar las externalidades ambientales del sistema privado de movilidad urbana (SPMU) del 2008 al 2018 en las seis entidades (Baja California, Chihuahua, Nuevo León, Coahuila, Sonora y Tamaulipas) de la frontera norte de México (EFNM), se retoma la perspectiva de la economía ecológica, particularmente el enfoque eco integrador (Naredo, 2018); toda vez que interesa explorar las interacciones sistémicas del mundo social con el mundo físico (Hernández & Camarena, 2020) y las características concretas del territorio (topografía, litología, clima, suelos, vegetación, infraestructuras, poblaciones, instituciones, bienes raíces) en el cual se inscribe el metabolismo económico del sistema de análisis (Naredo, 2018), desde una óptica transdisciplinaria, para construir respuestas a la problemática ambiental y social (Haro-Martínez & Taddei-Bringas, 2014).

El documento comprende seis apartados: introducción, contexto, materiales y métodos, resultados, discusión y conclusiones. A continuación, a manera de contexto, se presenta el proceso de urbanización que ha caracterizado el desarrollo de México en general y de los EFNM en particular (población, flotilla vehicular, precio y consumo de carburantes, etc).

Contexto. Desarrollo y Urbanización en México y EFNM

Schmidt *et al.* (1995) plantean que el proceso de urbanización en países en vías de desarrollo se ha manifestado en un crecimiento desmedido y desordenado que ha dado origen a megaciudades que tienden a enfrentar complejas problemáticas sociales, económicas, legales, ambientales y de servicios públicos, al grado de generar "... una auténtica bomba ecológica".

La literatura especializada corrobora la existencia de una relación intrínseca entre los procesos de urbanización y de industrialización y desarrollo económico (Sobrinó, 2012), pero también la persistencia de problemas de planeación vial. Borja (2012), por ejemplo, estudió las ciudades emergentes de América Latina y observó que durante tales procesos se detonaron el uso de autobuses, automóviles y prácticas de transporte público y privado que llevaron a una mayor congestión vial, contaminación y, por tanto, más daños a terceros (ruido, aglomeraciones, conflictos viales, etc.). El autor concluye que el mayor uso del automóvil privado fue acompañado de una "pérdida de la densidad de la ciudad" debido a la necesidad de recorrer distancias más largas, lo cual también provocó que se dedicara más tiempo a los traslados y que se elevara la demanda de energía. Montezuma (2003), por su parte, señala que el sistema de movilidad urbana predominante en las ciudades de los países en vías de desarrollo está desconectado del proceso de urbanización; ya que la población se moviliza más utilizando transporte colectivo, a la vez que, paradójicamente, las ciudades se estructuran en favor del transporte privado, fenómeno que produce situaciones de configuración urbana con aglomeraciones extensas y densidades bajas de población, con un alto consumo de espacio y energéticos.

En México se observa algo similar, los procesos de industrialización impulsados desde los años 80 hasta nuestros días han impactado un desarrollo urbanístico dual: a) un descenso del crecimiento de la zona metropolitana de la Ciudad de México y b) un gran crecimiento de las urbes en las regiones del centro del país y de la frontera norte (Sobrinó, 2012). Entre los años 1980 y 2010, 10 regiones del país recibieron el 37% de la migración interna neta: ciudades fronterizas con Estados Unidos (Ciudad Juárez, Monterrey y Tijuana), ciudades cercanas a la zona metropolitana de la Ciudad de México y polos turísticos o nodos de industrialización como Aguascalientes y León, Guanajuato. Estas ciudades presentaron procesos de urbanización desordenados, al igual que un crecimiento poblacional y desarrollo económico e industrial sin planeación, los cuales condujeron a una intensificación de la movilidad urbana, afectando la calidad y capacidad de servicios públicos requeridos por la población.

En el caso de las ciudades capitales de los EFNM, se han presentado patrones de crecimiento urbano desordenados, incentivados a partir de los años 60 por el aumento del empleo, que propició a su vez el arribo y desarrollo de la industria maquiladora. El repunte del proceso de urbanización se presenta sobre todo en la década de los 90, estimulado por un contexto económico y político propicio. La instauración del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en enero de 1994 favoreció el crecimiento económico y un acelerado flujo de trabajadores a la región, en atención a la demanda de personal que detonó la industria maquiladora. Este fenómeno, aparejado con el desmantelamiento del campo mexicano, que también propició el TLC, llevó a que grupos migratorios provenientes del centro y sureste del país arribaran en los EFNM en busca de trabajo en su proceso de tránsito hacia los Estados Unidos, siendo las maquilas la primera oferta de trabajo (Mendoza, 2010).

Entre 1993 y 2006, la economía mexicana reportó un crecimiento del 2.9%, inferior al 4.1% alcanzado por los EFNM (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2017). En esta región, la recepción de flujos de capitales extranjeros de industria manufacturera asentada en Baja California, Chihuahua y Nuevo León estimuló la demanda de mano de obra. En esos años, la población regional creció en 39.3%, al pasar de 15.2 millones en 1995 a 21.2 millones en 2015 (Figura 1), además de que el 89.3% de este flujo se asentó en las zonas urbanas y periurbanas del territorio.

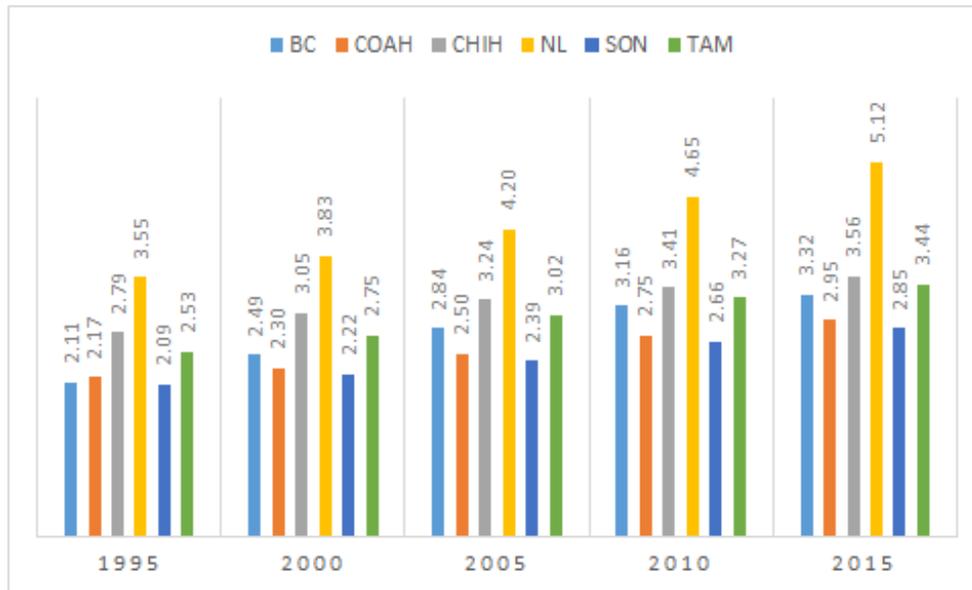


Figura 1. Crecimiento poblacional en EFNM, 1995-2015.
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2017).

En 2015, los EFNM aportaron el 24.2% del PIB nacional, concentraron 607 023 unidades económicas y 4 992 268 empleos (INEGI, 2017). De las unidades económicas, el 3.7% se agrupó en actividades primarias, 43.91% en el sector secundario y 52.36% en el sector de servicios.

Ese crecimiento del sector económico en los EFNM, acompañado del incremento de la población y mayor concentración urbana, fortaleció la demanda de transporte para movilidad de las personas, bienes y productos económicos. El tamaño del parque vehicular privado se elevó de 1 948 012 unidades a 5 033 833, respectivamente (Tabla 1), lo que significa una tasa de crecimiento de 158.4% en promedio anual, superior a la que presentó el crecimiento poblacional (Figura 2).

Tabla 1. Automóviles en circulación en estados del norte de México, 1995-2015.

| Año | Miles de Automóviles Registrados en Circulación | | | | | | Total |
|------|---|--------|---------|---------|--------|--------|---------|
| | B.C. | Coah. | Chih. | N.L. | Son. | Tam. | |
| 1995 | 438.41 | 208.55 | 393.62 | 467.80 | 135.34 | 304.30 | 1948.01 |
| 2000 | 577.67 | 211.98 | 469.93 | 650.13 | 288.64 | 474.38 | 2672.74 |
| 2005 | 876.47 | 385.74 | 630.94 | 990.91 | 373.56 | 677.26 | 3934.87 |
| 2010 | 666.26 | 434.68 | 814.02 | 1389.83 | 583.64 | 647.18 | 4535.61 |
| 2015 | 851.84 | 452.55 | 1033.16 | 1377.43 | 547.31 | 771.54 | 5033.83 |

Nota: Cifras en miles, automóviles registrados en circulación.

Fuente: Elaboración propia con base en datos del sistema estatal y municipal (INEGI, 2017).

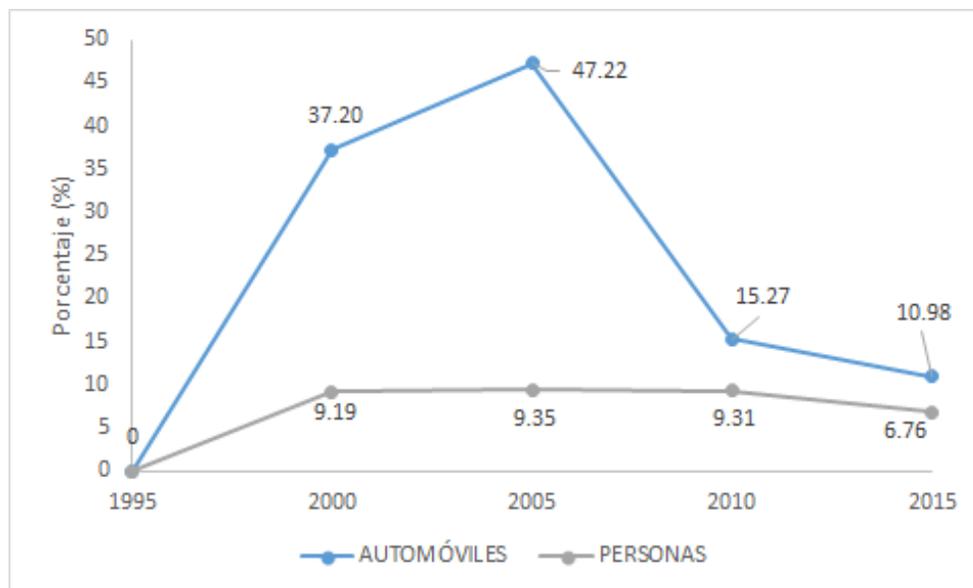


Figura 2. Crecimiento (%) del parque vehicular (automóviles en circulación registrados) vs. crecimiento (%) poblacional, en EFNM, 1995-2015.
Fuente: Elaboración propia con base en datos del Sistema Estatal y Municipal (INEGI, 2017).

La asimetría entre el crecimiento poblacional y el parque vehicular devela la tendencia al alza de la movilidad del SPMU, lo cual se confirma al observar la reducción del índice de motorización reportado para la región: pasó de 7.82 habitantes por vehículo a 4.21 (Tabla 2), una baja de 46% (Figura 3).

Tabla 2. Índices de motorización en EFNM, 1995-2015.

| Año | Habitantes por Automóvil en Circulación (Hab/Aut) | | | | | | Total |
|------|---|-------|-------|------|-------|------|-------|
| | B.C. | Coah. | Chih. | N.L. | Son. | Tam. | |
| 1995 | 4.82 | 10.42 | 7.10 | 7.59 | 15.41 | 8.31 | 7.82 |
| 2000 | 4.31 | 10.84 | 6.50 | 5.90 | 7.68 | 5.80 | 6.23 |
| 2005 | 3.25 | 6.47 | 5.14 | 4.24 | 6.41 | 4.47 | 4.63 |
| 2010 | 4.74 | 6.32 | 4.18 | 3.35 | 4.56 | 5.05 | 4.39 |
| 2015 | 3.89 | 6.53 | 3.44 | 3.72 | 5.21 | 4.46 | 4.22 |

Nota: Número de habitantes por vehículos en circulación registrados.

Fuente: Elaboración propia (INEGI, 2017).

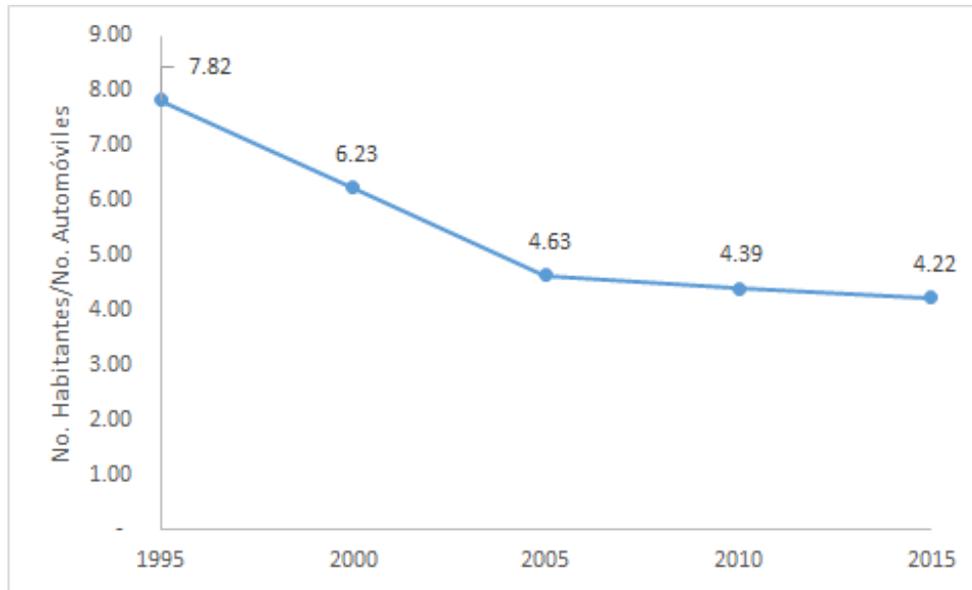


Figura 3. Variación del índice de motorización en las EFNM.
Fuente: Elaboración propia con base en datos publicados por INEGI (2017).

Las tendencias apuntan a que las principales urbes de los EFNM seguirán elevando el índice de motorización y que, de prevalecer una limitada planeación urbana, el traslado de las personas para llevar a cabo sus actividades cotidianas será cada vez más complicado, afectando las diversas actividades económicas, productivas y sociales de la región. Tal problemática de movilidad urbana es similar a la que presentan la mayoría de las urbes del mundo, situación que ha llevado a reconocer la necesidad de impulsar procesos de gestión urbana que contemplen esquemas de transporte más eficientes para mejorar la vida y la economía de las personas, instituciones y empresas. La propia ONU invita a transitar a esquemas de transporte sustentables y eficientes, respetuosos del medio ambiente, que garanticen la movilidad de peatones, de ciclistas y del transporte masivo (ONU-Hábitat, 2015).

Ese llamado a transitar a esquemas de transporte sostenibles justifica el objetivo del presente trabajo: dimensionar las externalidades del SPMU visibilizando sus interacciones sistémicas y factores que determinan su comportamiento. Interesa generar información que oriente a los tomadores de decisiones en el diseño de programas de planeación urbana centrados en impulsar un sistema de transporte integral, sustentable, que beneficie el desarrollo económico, ambiental y social de la región.

Materiales y métodos

Los métodos de valoración de fenómenos o ecosistemas considerados como externalidades del sistema económico, es decir, carentes de atributos inherentes a los objetos sujetos a determinado valor de mercado, son cada vez más utilizados (García & Chávez, 2017; García *et al.*, 2015; Valdivia-Alcalá *et al.*, 2012). Entre otros, están por ejemplo los métodos de costos evitados, los de costos de viaje, los de precios hedónicos y los de valoración contingente, cada vez más utilizados para orientar el diseño de políticas públicas ambientales (Ripka *et al.*, 2018).

Brevemente, se puede decir que el método de costos evitados se centra en evaluar los diferentes valores de uso de productos (directo o indirecto); el método de costos de viaje se enfoca en valorar la demanda de una actividad directamente ligada a un espacio o recurso natural; el de precios hedónicos en valorar cada parte de un producto o servicio; y el de valoración contingente en medir la disposición a pagar por adquirir un servicio o subsanar o evitar un daño ambiental.

Cada uno de estos métodos surge y se estructura mediante los mecanismos de la economía convencional o estándar, es decir, utilizando criterios de valoración de mercado a través de determinar la demanda del bien sujeto de análisis, o bien el impacto que causaría el deterioro o pérdida de tal bien respecto de la satisfacción de una necesidad social.

En lo que respecta a la economía ecológica, el abordaje de las externalidades del sistema económico se hace de una forma transdisciplinaria, considerando las interacciones ecosistémicas del fenómeno en estudio. En esta vía se inscribe el enfoque eco integrador, el cual:

...prioriza el principio de integración del conocimiento y contempla un objeto de estudio más amplio ...al abarcar los recursos, antes de que hayan sido valorados y, tras considerar el proceso económico a través de las actividades de apropiación, transformación y uso, se sigue preocupando de ellos cuando siguen existiendo en forma de residuos, aunque su valor se haya consumido (Naredo, 2018).

Bajo ese marco, el propósito del estudio que aquí se presenta es determinar el rendimiento ambiental del SPMU a través de valorar en términos monetarios sus externalidades, particularmente las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Se entiende por externalidad las fallas de mercado, o bien, las...

... rigideces del mercado donde los impactos, positivos y negativos, no están reflejados en los precios, es decir, los beneficios los llevan los terceros y los costos los incurren terceros y, como ni los beneficios ni los gastos están reflejados en los precios, el desarrollo del equilibrio económico los excluye impidiendo al óptimo de Pareto teórico (Rojas, 2015).

Asimismo, rendimiento ambiental se refiere a la medida cualitativa o cuantitativa del funcionamiento ambiental del sistema que permite representar una valoración del intercambio de energía que establece dicho sistema con los otros sistemas adyacentes, particularidad que permite "incorporar diferentes aspectos que podrían ser tomados en cuenta a la hora de evaluar el funcionamiento de un sistema determinado" (Soria & Valenzuela, 2015).

Ese tejido de interacciones ambientales, sociales y económicas implicadas en el sector transporte justifica estudiar el comportamiento del SPMU en los EFNM a través de estimar su rendimiento ambiental desde una perspectiva eco integradora que contemple:

...el metabolismo del proceso económico desde sus fuentes hasta sus sumideros, considerando también los posibles bucles de reciclaje; y que precisamente ese metabolismo se inscribe... en el territorio en el que tenga lugar, con sus características concretas (topografía, litología, clima, suelos, vegetación, infraestructuras, poblaciones, instituciones, bienes raíces) (Naredo, 2018).

El proceso de valoración de los componentes de la biósfera (externalidades) que permite el enfoque eco integrador contempla la incorporación de variables de carácter ecológico al proceso de estimación económica, particularmente los flujos de materia que propician el cambio en un sistema, y aproxima así una valoración económica de los procesos involucrados que competen a la termodinámica y la entropía en el ámbito de la termo economía. El ejercicio de valoración de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) del SPMU que aquí se realiza parte de un supuesto hipotético: que el rendimiento ambiental de un sistema es dado por el cambio de energía que este presenta y el costo de las externalidades (costo de los energéticos asociados con las emisiones de carbono). Para identificar y cuantificar la energía disipada por el SPMU en los sistemas adyacentes, primero se mide el rendimiento económico del consumo de gasolinas en la región (sistema) y después se determina el costo de la energía disipada a la atmósfera.

Es importante precisar que el rendimiento ambiental implica valorar la cantidad de energía utilizada por el sistema, las pérdidas de energía de tal sistema y, finalmente, el costo económico de tal energía en el sistema de origen y en los adyacentes.

La estimación de las emisiones de CO₂ correspondiente al SPMU en los EFNM comprende el periodo 2008-2018, los volúmenes de ventas de combustibles por entidad federativa y el poder calorífico neto (PCN) de las mismas, este último medido en megajoules (MJ) (Sener, 2019).

Para la estimación de las emisiones de CO₂ se emplean los factores de emisión nacionales publicados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014), con base en las Directrices del IPCC para la elaboración de inventarios nacionales de GEI (Davies *et al.*, 2006). La medida de referencia utilizada para valorar tales emisiones se retomó de la categoría Transporte Carretero 1990-2020 y de los inventarios de GEI alusivos a cada EFNM (Cocef, 2010), elaborados con base en las Directrices IPCC 1996 para la elaboración de inventarios nacionales de GEI. Para el sector de energía, la referencia metodológica fueron las Directrices IPCC, versión 2006.

La correspondiente valoración monetaria de las emisiones de carbono fue a través del balance de materia y energía de dicho sistema (Figura 4).

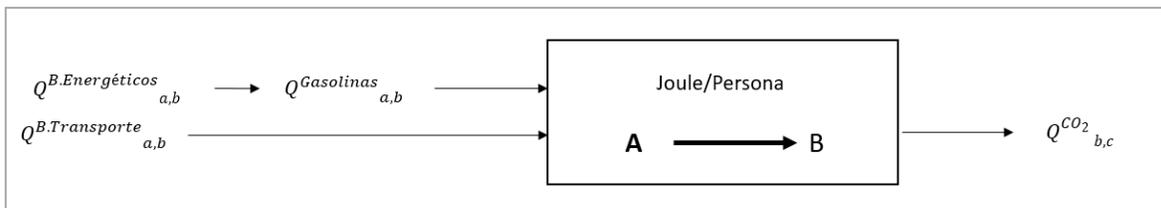


Figura 4. Esquema del balance de energía del sistema de movilidad urbana; uso del automóvil privado para el transporte de personas.
Fuente: Retomado de Hernández & Camarena (2020).

El valor de $Q_{Gasolinasab}$ equivale al valor de la energía contenida en las gasolinas, estimado con el PCN obtenido del Balance Nacional de Energía. Las pérdidas energéticas del sistema origen se estiman al cuantificar el calor que ese sistema disipa a través del CO₂ y cede al sistema atmósfera. Ese dato se obtiene de estimar la cantidad de energía (Q2) que hay en un mol de CO₂ al salir del automóvil (SPMU) a una temperatura promedio de 500 °C (Scheibe, 2009) y que se transfiere al sistema atmósfera (ecuación 1), considerando la temperatura promedio del sitio donde se generan las emisiones.

$$Q^2_{b,c} = \frac{\left(\frac{\text{Emisión}_{b,c}}{44\frac{\text{g}}{\text{mol}}} \right) * \left(C_p^0 \text{CO}_2^{T.M.^{\circ}\text{C}} * (T_2 - T_1) \right)}{1000}$$

donde:

| | |
|---|--|
| Q ² b, c | = Energía contenida en el dióxido de carbono generado por año y origen de la emisión (MJ) |
| Emisión b, c | = Emisiones de dióxido de carbono por año y origen de la emisión (g) |
| C _p ⁰ CO ₂ ^{25°C} | = Capacidad calorífica a presión constante del dióxido de carbono a la temperatura media de la región donde se generó la emisión(J/mol*K) |
| T ₁ | = Temperatura Inicial |
| T ₂ | = Temperatura final |
| b | = Año |
| c | = Origen de la emisión o de la energía (por ejemplo, emisiones o energía provenientes de la quema de combustible para adquirir bienes energéticos o de transporte, emisiones provenientes de la quema de combustible para el transporte terrestre) |
| 44g/mol | = Peso molecular del dióxido de carbono |

Ecuación 1. Ecuación para determinar la energía que el sistema cede al medio en forma de CO₂, con valores de capacidad calorífica a la temperatura media donde se hizo la emisión y presión constante.
Fuente: Hernández & Camarena (2020) y Hernández-Arias (2021).

Los cambios que presenta el parque vehicular con relación al consumo de energía se expresarán en el rendimiento económico del sistema vehicular en conjunto al recaer en los combustibles consumidos, y como la energía consumida por tal flota vehicular se disipa en los sistemas adyacentes, el costo de tales energéticos se verá reflejado en sus emisiones de CO₂. De esta manera, el rendimiento ambiental queda expresado en el valor de tales externalidades. Sin duda, es necesario integrar más variables a este procedimiento metodológico para ampliar el alcance del análisis que sugiere el enfoque eco integrador, pero se presenta como una primera aproximación metodológica a este tipo de estudios.

Resultados

Comportamiento de la demanda de energía del SPMU en los EFNM.

Entre el 2008 y el 2018, la tendencia de venta/consumo de gasolinas en los EFNM presenta dos momentos distintos (Figura 5). El primero transcurre del 2008 al 2016, con una baja significativa en las ventas de gasolina de 93 octanos (Pemex premium), que fue compensada entre 2009 y 2012 por el incremento en las ventas de gasolina de 87 octanos (Pemex magna). A partir de entonces, la gasolina de 93 octanos retoma una tendencia positiva, a la vez que las ventas de gasolina de 87 octanos presentan una leve reducción. El segundo momento corresponde al periodo del 2016 al 2018, lapso en el cual la venta de gasolina de 93 octanos presenta una caída sensible, pero a diferencia del periodo anterior, tal baja no fue compensada por el incremento de la gasolina magna, las ventas de esta también presentaron una tendencia a la baja (Secretaría de Energía [Sener], 2017).

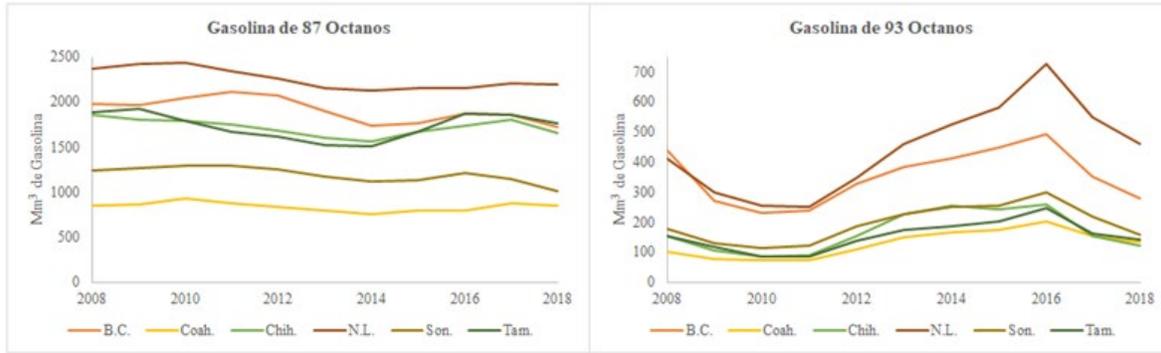


Figura 5. Variación en las ventas de gasolinas de 87 y 93 octanos en EFNM, 2008-2018. Fuente: Elaboración propia con base en datos del Sistema de Información Energética de la Sener (2017).

El periodo de análisis de este estudio comprende los años del 2008-2018, pero para contextualizar el fenómeno se tomaron como referencia los años 1995, 2000, 2005, 2010 y 2015 (Censos y Conteos de población, INEGI).

Emisiones de CO₂ asociadas al SPMU de EFNM.

El incremento de las emisiones de GEI se asocia a la mayor demanda de energía que supone el crecimiento del parque vehicular. Específicamente, en este trabajo, la medida de referencia para valorar el impacto ambiental del SPMU fueron las emisiones de CO₂ de la categoría Transporte Carretero 1990-2020 y los inventarios nacionales de GEI elaborados con base en las Directrices IPCC 1996. Y para el sector energía la referencia metodológica fueron las Directrices IPCC, versión 2006. Los datos reportados en estos inventarios permitieron inferir que entre 1990 y 2020 las emisiones del transporte carretero en dicha región representaron, en promedio, el 21.8% del sector energía (Tabla 3).

Tabla 3. Aportación porcentual de la categoría transporte carretero al total de emisiones de GEI del sector energía en las EFNM, 1990-2020.

| Año | Porcentaje del transporte carretero en el total de emisiones de GEI del Sector Energía | | | | | |
|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| | B.C. | Coah. | Chih. | N.L. | Son. | Tam. |
| 1990 | 35.25 | 14.52 | 19.70 | 12.53 | 17.19 | 14.73 |
| 1995 | 42.20 | 12.57 | 23.61 | 11.84 | 14.11 | 22.23 |
| 2000 | 35.81 | 11.92 | 23.11 | 11.99 | 14.74 | 17.08 |
| 2005 | 33.07 | 14.02 | 27.43 | 16.18 | 18.21 | 23.94 |
| 2010 | 33.23 | 15.68 | 27.37 | 20.96 | 20.19 | 26.47 |
| 2015 | 34.45 | 14.78 | 29.06 | 21.18 | 19.33 | 26.62 |
| 2020 | 33.40 | 15.45 | 27.87 | 20.43 | 18.52 | 26.20 |

Nota: Proyecciones con base en datos de emisiones de GEI para Baja California, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Sonora y Tamaulipas. Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de GEI por entidad, publicado por Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (Cocef) (2010); por entidad fueron Chacón-Anaya *et al.* (2010a, 2010b, 2010c, 2010d, 2010e).

Tanto las emisiones del sector energético como las del sector transporte presentan una tendencia positiva creciente en todo el periodo, pero año con año se observa que la brecha de separación entre ambos con relación a sus respectivas emisiones fue cada vez más estrecha. La tasa de crecimiento anual de las emisiones del sector energía fue del 12.65%, superada por la del sector transporte, que se ubicó en 18.90% en promedio anual (Figura 6).

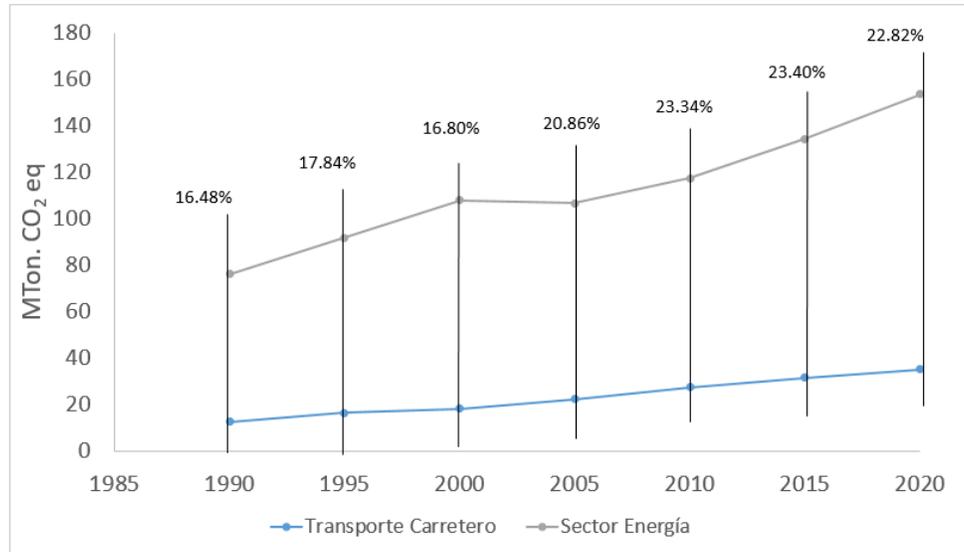


Figura 6. Variación (%) de las emisiones de GEI del sector energía y del transporte carretero de los EFNM.

Fuente: Elaboración propia con base en inventarios de emisiones de GEI por entidad federativa y proyecciones correspondientes (Chacón-Anaya *et al.*, 2010a, 2010b, 2010c, 2010d, 2010e; Cocef, 2010).

Valoración monetaria de las emisiones de CO₂: energía entrante y energía disipada SPMU.

El procedimiento metodológico seguido para estimar en términos monetarios las emisiones de CO₂ del SPMU consideró el balance de materia y energía del SPMU; que el valor de QGasolinasab equivale al valor de la energía contenida en las gasolinas, estimado con el PCN obtenido del Balance Nacional de Energía; y que se puede cuantificar el calor que se disipa a través del CO₂ que el SPMU cede al sistema atmósfera. Los resultados obtenidos de QGasolinasab y Q CO₂ que permitieron elaborar dicho balance de energía se muestran a continuación (Tabla 4).

Tabla 4. Energía de las gasolinas y energía disipada al sistema atmósfera del SPMU de las EFNM, 2008-2018.

| Año | Peta-Joules | | | | |
|------|-------------|------------------|------|-------------|------------------|
| | Q Gasolinas | QCO ₂ | Año | Q Gasolinas | QCO ₂ |
| 2008 | 405.39 | 272.24 | 2014 | 342.39 | 229.91 |
| 2009 | 366.43 | 245.89 | 2015 | 390.70 | 262.40 |
| 2010 | 356.49 | 239.33 | 2016 | 385.41 | 258.74 |
| 2011 | 353.43 | 237.15 | 2017 | 382.40 | 256.54 |
| 2012 | 353.84 | 237.46 | 2018 | 354.06 | 237.61 |
| 2013 | 346.37 | 232.60 | 2019 | N.D. | N.D. |

Nota: El valor de QGasolinasab equivale al valor de la energía contenida en las gasolinas, estimado con el PCN obtenido del Balance Nacional de Energía. Las pérdidas energéticas del sistema se estiman mediante la cuantificación del calor que se disipa a través del CO₂ que el SPMU cede al sistema atmósfera.

Fuente: Elaboración propia con base en estimación de pérdidas energéticas (ecuación 1).

A través de la estimación de la energía disipada, y tomando en cuenta el precio de la energía, en este caso de gasolinas (Tabla 5), se valoraron las emisiones de CO₂, tomando como referencia el precio de la energía en el año que fueron generadas las emisiones.

Tabla 5. Precios de la energía en México, 2008-2018.

| Año | C/Kwh | Año | C/Kwh |
|------|--------|------|--------|
| 2008 | 141.98 | 2014 | 167.54 |
| 2009 | 128.36 | 2015 | 153.05 |
| 2010 | 140.51 | 2016 | 156.59 |
| 2011 | 150.84 | 2017 | 183.85 |
| 2012 | 158.70 | 2018 | 202.11 |
| 2013 | 162.35 | 2019 | N.D. |

Fuente: Elaboración propia con base en datos del Sistema de Información Energética de la Sener (2017).

Los resultados de tales estimaciones en los seis estados de la región en estudio muestran que el precio o valor monetario de las emisiones de CO₂, por tipo de combustible, presenta una tendencia creciente en todas las entidades (Tabla 6). Fue similar en todos los estados los años 2008, 2010, 2011, 2012 y 2014, y presentó ligeras diferencias los años 2009, 2013, 2015, 2017 y 2018.

Tabla 6. Estimación de las emisiones de CO₂ por tipo de combustible (87 o 93 octanos) para cada EFNM, 2008-2018.

| Año | \$/Kg CO ₂ | | | | | | | | | | | |
|------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | B.C. | | Coah. | | Chih. | | N.L. | | Son. | | Tam. | |
| | 87Oct. | 93Oct. | 87Oct. | 93Oct. | 87Oct. | 93Oct. | 87Oct. | 93Oct. | 87Oct. | 93Oct. | 87Oct. | 93Oct. |
| 2008 | 1.9 | 2.4 | 1.9 | 2.4 | 1.9 | 2.4 | 1.9 | 2.4 | 1.9 | 2.4 | 1.9 | 2.4 |
| 2009 | 2.2 | 2.7 | 2.1 | 2.7 | 2.2 | 2.7 | 2.1 | 2.7 | 2.1 | 2.7 | 2.1 | 2.7 |
| 2010 | 2.4 | 2.8 | 2.4 | 2.8 | 2.4 | 2.8 | 2.4 | 2.8 | 2.4 | 2.8 | 2.4 | 2.8 |
| 2011 | 2.6 | 2.9 | 2.6 | 2.9 | 2.6 | 2.9 | 2.6 | 2.9 | 2.6 | 2.9 | 2.6 | 2.9 |
| 2012 | 2.9 | 3.1 | 2.9 | 3.1 | 2.9 | 3.1 | 2.9 | 3.1 | 2.9 | 3.1 | 2.9 | 3.1 |
| 2013 | 3.3 | 3.4 | 3.2 | 3.4 | 3.3 | 3.4 | 3.2 | 3.4 | 3.2 | 3.4 | 3.2 | 3.4 |
| 2014 | 3.6 | 3.8 | 3.6 | 3.8 | 3.6 | 3.8 | 3.6 | 3.8 | 3.6 | 3.8 | 3.6 | 3.8 |
| 2015 | 3.5 | 3.7 | 3.5 | 3.7 | 3.5 | 3.7 | 3.4 | 3.7 | 3.4 | 3.7 | 3.4 | 3.7 |
| 2016 | 3.8 | 4.1 | 3.8 | 4.1 | 3.8 | 4.1 | 3.8 | 4.1 | 3.8 | 4.1 | 3.8 | 4.0 |
| 2017 | 4.3 | 4.8 | 4.3 | 4.8 | 4.0 | 4.6 | 4.4 | 4.9 | 4.3 | 4.8 | 3.8 | 4.4 |
| 2018 | 5.0 | 5.4 | 5.0 | 5.4 | 4.7 | 5.2 | 5.1 | 5.5 | 4.9 | 5.3 | 4.3 | 4.9 |
| TCA | 10.2 | 8.8 | 10.2 | 8.8 | 9.5 | 8.2 | 10.5 | 9.1 | 10.0 | 8.6 | 8.8 | 7.7 |

Nota: Las estimaciones son en pesos mexicanos por kilogramo de CO₂ (\$/Kg CO₂).

Fuente: Elaboración propia, con base en estimación de emisiones por tipo de combustible para cada entidad (ecuación 1).

En los años 2009 y 2014 el combustible de menor octanaje derivó en una valoración menor de las emisiones de CO₂, particularmente en los estados de Coahuila, Nuevo León, Sonora y Tamaulipas, e igual comportamiento se observó el año 2015 en Nuevo León, Sonora y Tamaulipas. En el año 2016 solo fue menor el valor de las emisiones asociadas al combustible de mayor octanaje en el estado de Tamaulipas. El comportamiento más irregular se observa en el año 2017, cuando el mayor precio de las emisiones asociadas a los dos tipos de combustibles lo presenta Nuevo León, seguido de Baja California y Sonora, después Chihuahua y finalmente Tamaulipas con los menores precios. En el año 2018, el valor más alto alcanzado por las emisiones fue en Nuevo León, en ambos combustibles; le siguen Baja California y Coahuila; después Sonora; seguido por Chihuahua; y por último Tamaulipas.

La mayor tasa de crecimiento anual del valor de las emisiones de CO₂, derivado del consumo de gasolina de ambos tipos (87 y 93 octanos), se presentó en Nuevo León, después en Baja California y Coahuila, seguido de Chihuahua, y finalmente Tamaulipas.

Por tipo de combustible, la estimación del valor de las emisiones de CO₂ arrojó los resultados siguientes. En el caso de las emisiones derivadas de la gasolina de 87 octanos, el mayor precio se presentó en el estado de Tamaulipas, excepto los años 2017 y 2018, cuando fue superado por Coahuila, mientras que el precio más bajo se presentó en Chihuahua (en los años del 2009 al 2013, 2015 y 2016), Sonora (2008, 2017 y 2018) y Baja California (2014) (Tabla 7).

Tabla 7. Valor de emisiones (€/Kg de CO₂) asociadas al consumo de gasolina de 87 octanos por cada EFNM, 2008-2018.

| Año | €/Kg CO ₂ (87 Octanos) | | | | | | Mínimo Máximo |
|------|-----------------------------------|---------|----------|---------|---------|---------|------------------|
| | B.C. | COAH. | CHIH. | N.L. | SON. | TAM. | |
| 2008 | 1908.55 | 2368.40 | 1905.34 | 2364.41 | 1910.93 | 2371.35 | |
| 2009 | 2152.93 | 2663.52 | 2148.57 | 2658.13 | 2155.44 | 2666.62 | |
| 2010 | 2361.44 | 2815.51 | 2359.46 | 2813.15 | 2364.59 | 2819.26 | |
| 2011 | 2609.77 | 2930.30 | 2601.87 | 2921.42 | 2609.77 | 2930.30 | |
| 2012 | 2913.88 | 3109.16 | 2,907.73 | 3102.60 | 2915.34 | 3110.73 | |
| 2013 | 3252.38 | 3424.97 | 3248.80 | 3421.21 | 3258.64 | 3431.56 | |
| 2014 | 3588.67 | 3801.82 | 3590.81 | 3804.09 | 3599.86 | 3813.68 | |
| 2015 | 3450.41 | 3683.93 | 3450.71 | 3684.24 | 3457.07 | 3691.03 | |
| 2016 | 3824.37 | 4060.33 | 3822.75 | 4058.60 | 3832.42 | 4068.88 | |
| 2017 | 4349.84 | 4820.77 | 4267.79 | 4771.20 | 4046.71 | 4643.06 | |
| 2018 | 5008.68 | 5435.30 | 4988.64 | 5406.90 | 4665.96 | 5159.26 | |

Nota: Las estimaciones son en €/Kg CO₂.

Fuente: Elaboración propia con base en estimación de valor de emisiones de gasolina de 87 octanos, para cada entidad.

En cuanto a la gasolina de 93 octanos, el valor de las emisiones de CO₂ más alto se presentó en Sonora, excepto en los años 2017 y 2018, donde Baja California presentó los valores más altos. El precio más bajo de las emisiones se observa en el estado de Tamaulipas, con excepción del 2017 y 2018, cuando Nuevo León arrojó la estimación más baja (Tabla 8).

Tabla 8. Valor de emisiones (€/Kg de CO₂) asociadas al consumo de gasolina de 93 octanos por cada EFNM, 2008-2018.

| Año | €/Kg CO ₂ (93 Octanos) | | | | | | Mínimo Máximo |
|------|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|
| | B.C. | COAH. | CHIH. | N.L. | SON. | TAM. | |
| 2008 | 2368.40 | 1905.34 | 2364.41 | 1910.93 | 2371.35 | 1904.37 | |
| 2009 | 2663.52 | 2148.57 | 2658.13 | 2155.44 | 2666.62 | 2147.66 | |
| 2010 | 2815.51 | 2359.46 | 2813.15 | 2364.59 | 2819.26 | 2358.07 | |
| 2011 | 2930.30 | 2601.87 | 2921.42 | 2609.77 | 2930.30 | 2601.20 | |
| 2012 | 3109.16 | 2907.73 | 3102.60 | 2915.34 | 3110.73 | 2906.98 | |
| 2013 | 3424.97 | 3248.80 | 3421.21 | 3258.64 | 3431.56 | 3248.53 | |
| 2014 | 3801.82 | 3590.81 | 3804.09 | 3599.86 | 3813.68 | 3590.50 | |
| 2015 | 3683.93 | 3450.71 | 3684.24 | 3457.07 | 3691.03 | 3446.91 | |
| 2016 | 4060.33 | 3822.75 | 4058.60 | 3832.42 | 4068.88 | 3819.81 | |
| 2017 | 4820.77 | 4267.79 | 4771.20 | 4046.71 | 4643.06 | 4413.54 | |
| 2018 | 5435.30 | 4988.64 | 5406.90 | 4665.96 | 5159.26 | 5092.03 | |

Nota: Las estimaciones son en €/Kg CO₂.

Fuente: Elaboración propia con base en estimación de valor de emisiones de gasolina de 93 octanos, para cada entidad.

Gasto monetario en la compra de gasolinas y el calor disipado al sistema atmósfera.

La compra de gasolina se incrementó en una tasa promedio anual de 129.17% del 2008 al 2018, una tasa mayor a la que presentó la estimación del costo correspondiente a la disipación de energía a la atmosfera en el mismo periodo, la cual se ubicó en 117.6% (Figura 7).

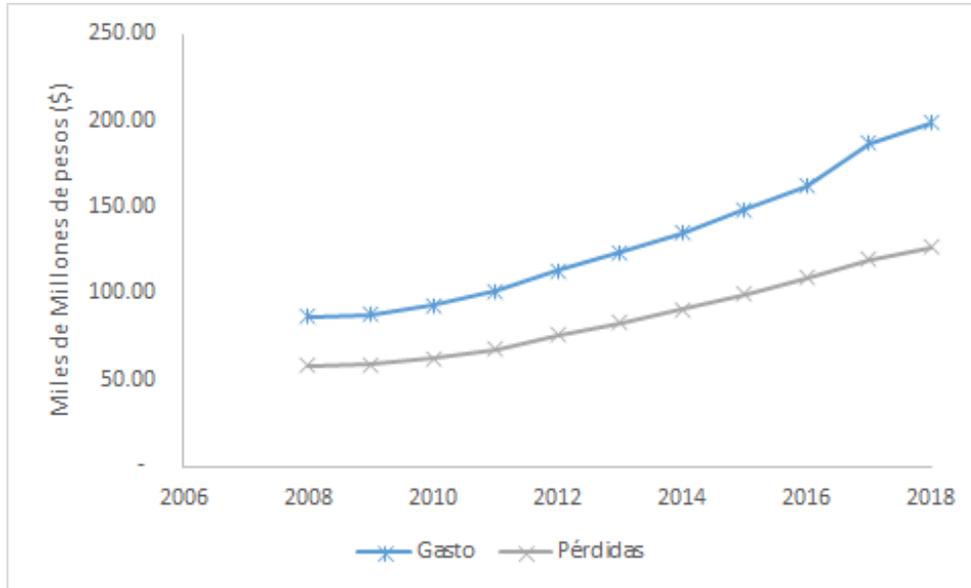


Figura 7. Tendencia de gasto monetario para adquisición de gasolinas y del gasto monetario del calor disipado al sistema atmósfera de las EFNM, 2008-2018.

Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones correspondientes.

Rendimiento económico del SPMU.

Los precios del combustible y el gasto destinado al consumo de tal insumo fueron los datos utilizados para estimar el rendimiento económico del sistema. Los resultados indican que el rendimiento o energía neta utilizada en el traslado de personas pasó de 32.8% en el año 2008 al 36.2% en el año 2018, esto implicó un crecimiento promedio anual de 1.03% en dicho periodo. En los primeros ocho años (2008-2015), tal rendimiento económico fue constante a pesar del precio fluctuante del combustible, pero del 2016 en adelante se disparó al aumentar de manera significativa el precio de las gasolinas (Figura 8).

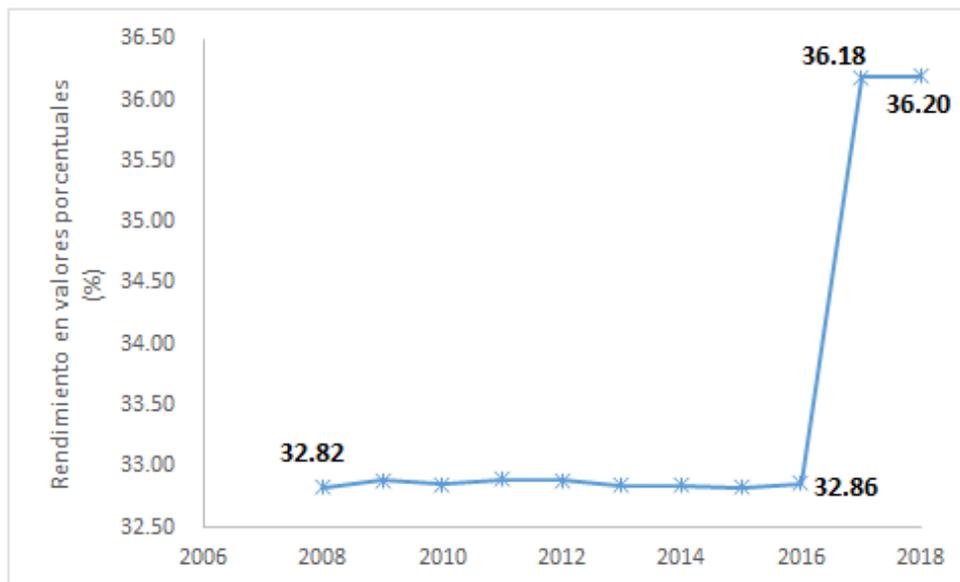


Figura 8. Rendimiento económico del SPMU en las EFNM, 2008-2018.
Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones correspondientes.

Por tipo de combustible (87 y 93 octanos), el rendimiento económico presentó diferencias debido al costo de cada carburante, lo cual impactó su correspondiente demanda y consumo. En todo el periodo, el rendimiento económico de la gasolina de 87 octanos fue mayor al que presentó la gasolina de 93 octanos, superándolo en 2.46% en promedio anual del 2006 al 2016, diferencia que se elevó a 6.25% del 2017 al 2018 (Figura 9).

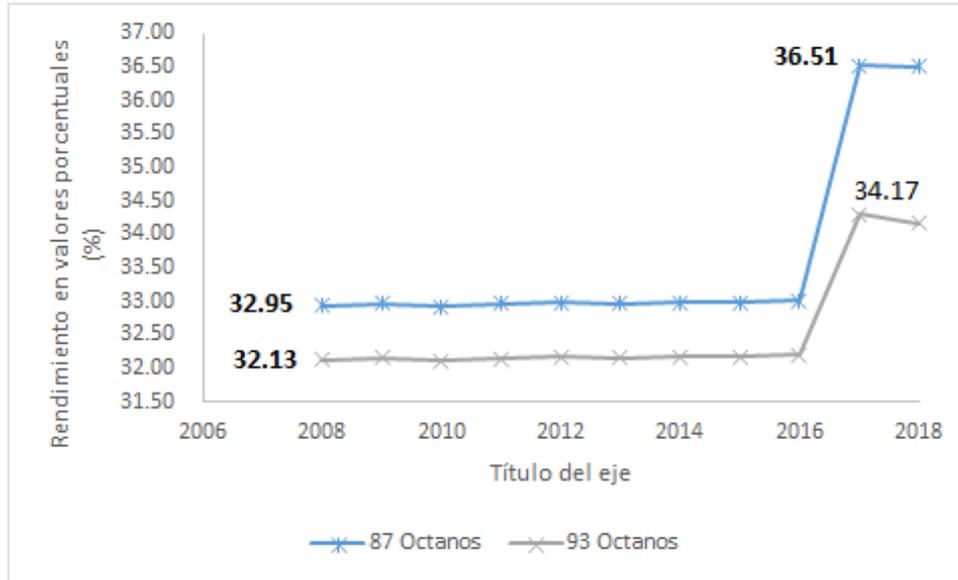


Figura 9. SPMU en los EFNM, 2008-2018: Variación del rendimiento económico por tipo de combustible (87 y 93 octanos).
Fuente: Elaboración propia con base en estimaciones realizadas del rendimiento económico por tipo de combustible.

Discusión

El comportamiento de la demanda de energía del SPMU en los EFNM del 2008 al 2018 presentó dos momentos diferenciados. En el primero (2008-2016) hubo una baja significativa en las ventas de gasolina de 93 octanos (Pemex premium) que del 2009 al 2012 fue compensado por el incremento en las ventas de gasolina de 87 octanos (Pemex magna), pero desde ese entonces en adelante la gasolina de 93 octanos retoma una tendencia positiva, a la vez que se reduce la venta de gasolina de 87 octanos. En el segundo momento (2016-2018), la venta de gasolina de 93 octanos reduce significativamente, pero tal baja no fue compensada por el incremento de la de 87 octanos, cuyas ventas también fueron a la baja (Sener, 2017). Se puede decir que el comportamiento del consumo de los dos tipos de gasolina en ambos periodos guarda relación con la crisis energética global, dado que esta afectó la directriz y lineamientos de la política económica nacional en lo que respecta al precio de los energéticos. El primer periodo se enmarca en los efectos de la crisis económica del 2008-2009, detonada por la problemática financiera mundial y la recesión de Estados Unidos por el colapso de la burbuja inmobiliaria el año 2006 (conocida como crisis de las hipotecas subprime):

...originaron choques externos negativos para México en la forma de menores exportaciones y contracción de las entradas de capital (...y redundaron...) en depreciación del tipo de cambio, desplome del precio de las acciones, y pérdida de confianza de consumidores y productores (Cuevas, 2013).

Las medidas tomadas por el lado de los ingresos públicos en apoyo a la economía familiar y a las empresas fueron desde la reducción de aranceles hasta:

...el aumento de cuotas de importación de productos básicos, para inducir una mayor oferta y una baja en los precios. También se redujo el precio del gas licuado en 10%, se congeló temporalmente el precio de la gasolina, y se extendió de dos a seis meses la cobertura de seguro social para los trabajadores que perdieran su empleo (Cuevas, 2013).

Y respecto al siguiente periodo, 2016 al 2018, la tendencia a la baja del consumo en los dos tipos de combustible fue precisamente en respuesta al incremento de precio que generó la reforma energética aprobada por el Senado de la República a finales del 2013, implementada durante la administración federal del 2012-2018, que implicó el retiro de los subsidios a los combustibles. Para contextualizar, en el fenómeno se presentan los datos de los años 1995, 2000, 2005, 2010 y 2015.

Ibarra & Sotres (2008) reconocen que las ciudades de la frontera norte del país fueron más sensibles a los problemas económicos del contexto internacional, precisamente por ser más receptoras de la intensidad de las relaciones binacionales. Esos años se presentó una caída en los viajes intrafronterizos por efecto de la crisis mundial, a lo cual se sumó la variación de precios de la gasolina; por tanto, presentaron una baja significativa en la demanda del carburante, un comportamiento más marcado en Baja California.

No obstante, las emisiones de CO₂ del SPMU de los EFNM se elevaron, lo cual se asocia al crecimiento del parque vehicular. Tanto la tasa de emisiones del sector energía como las correspondientes al transporte carretero fueron positivas, y la brecha de separación entre ambas fue cada vez más estrecha debido al mayor crecimiento que presentaron las emisiones de Transporte (tasas promedio anual de 12.65% vs. 18.90%, respectivamente). Por entidad, las emisiones de CO₂ por el uso de automóvil durante el periodo 2008-2018 fueron mayores en Tamaulipas y Baja California, seguidos por Sonora, Nuevo León y Coahuila (Tabla 9). Estos datos y su particular tendencia por entidad contrastan con la información de los inventarios consultados, lo cual explica porqué cuando estos publicaron tal información no se había contemplado la liberación del precio de las gasolinas ni el retiro de los subsidios a la misma, como tampoco la reforma energética que elevó los precios de los combustibles al consumidor. Por tanto, es recomendable tomar con cautela la tasa de crecimiento negativa de las emisiones de CO₂ e incluso la tasa positiva que presentó Chihuahua.

Tabla 9. Emisiones de CO₂ a la atmosfera por uso de automóvil en los EFNM, 2008-2018.

| Año | MTon. CO ₂ | | | | | | Total |
|------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | B.C. | Coah. | Chih. | N.L. | Son. | Tam. | |
| 2008 | 6.18 | 3.30 | 2.43 | 4.98 | 5.11 | 6.41 | 28.41 |
| 2009 | 5.32 | 2.71 | 2.25 | 4.48 | 4.55 | 6.01 | 25.32 |
| 2010 | 5.32 | 2.72 | 2.35 | 4.36 | 4.39 | 5.89 | 25.04 |
| 2011 | 5.57 | 2.64 | 2.24 | 4.29 | 4.34 | 5.75 | 24.83 |
| 2012 | 5.65 | 2.73 | 2.21 | 4.23 | 4.33 | 5.67 | 24.83 |
| 2013 | 5.36 | 2.79 | 2.23 | 4.10 | 4.29 | 5.59 | 24.36 |
| 2014 | 5.07 | 2.76 | 2.18 | 4.08 | 4.29 | 5.61 | 23.98 |
| 2015 | 5.70 | 3.21 | 2.51 | 4.75 | 4.92 | 6.15 | 27.24 |
| 2016 | 5.61 | 3.07 | 2.37 | 4.60 | 4.74 | 5.74 | 26.13 |
| 2017 | 5.45 | 3.03 | 2.53 | 4.82 | 4.82 | 5.82 | 26.47 |
| 2018 | 4.94 | 2.78 | 2.42 | 4.40 | 4.37 | 5.71 | 24.62 |
| TCA | -1.96 | -1.36 | 0.15 | -1.00 | -1.35 | -1.06 | -1.25 |

Nota: Datos en millones de toneladas.

Fuente: Elaboración propia con base en inventario de emisiones de GEI por entidad, publicado por Cocef (2010).

En todo caso, los datos estimados muestran que del 2008 al 2018, visto de largo plazo, la tasa de crecimiento promedio anual de las emisiones de CO₂ presenta una tendencia negativa (Figura 10), lo cual significaría una baja en la generación de tales emisiones. En términos ecológicos, la tendencia es positiva.

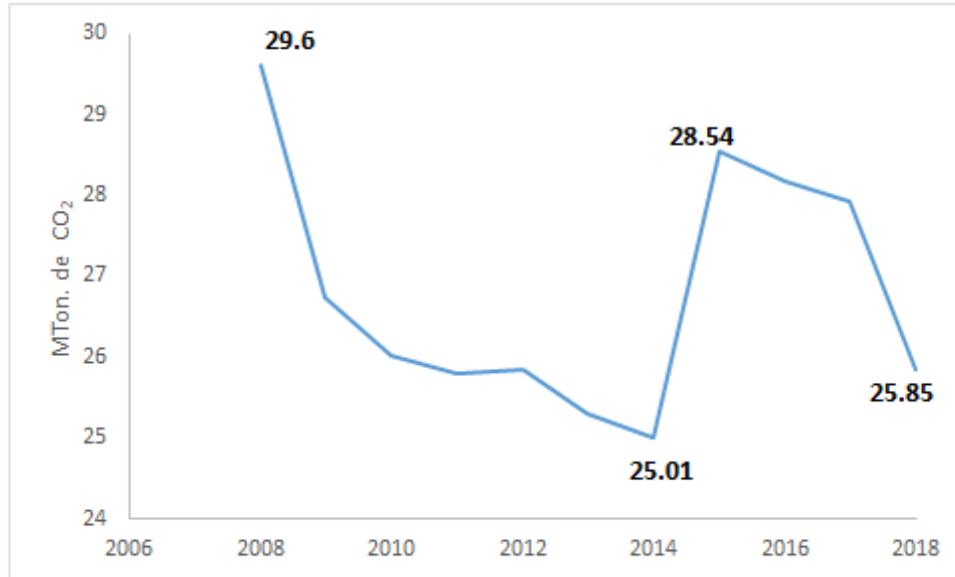


Figura 10. Variación de las emisiones totales de CO₂ en las EFNM, 2008-2018.

Fuente: Elaboración con base en inventarios de emisiones de GEI por entidad federativa y proyecciones correspondientes (Cocef, 2010).

Sin embargo, la interpretación no es tan sencilla. Es necesario observar los factores que pudieron determinar tal comportamiento y revisar el origen de los datos retomados en tal procedimiento metodológico. En esa perspectiva, otra variable considerada en esta aproximación metodológica ha sido precisamente considerar el costo económico de tales emisiones. Al hacer los cálculos correspondientes, se obtuvo una tendencia contraria. La tendencia contraria se explica porque el procedimiento de estimación de valor de las emisiones integra el precio que tuvo para la población la adquisición de energía, además de la temperatura media del sitio donde se originaron las emisiones. En ese sentido, los ajustes en el costo del energético se reflejan en los sistemas adyacentes, mientras que el rendimiento económico se refleja en la estimación de las externalidades correspondiente a las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Esto, en el caso del SPMU, permite establecer a través de un lenguaje común, equiparable, el comportamiento de variables correspondientes a los sistemas económico y ambiental involucrados y orientar la toma de decisiones más convenientes.

El gasto monetario para la compra de gasolinas presentó una tasa de crecimiento promedio anual de 129.17% del 2008 al 2018, ligeramente menor a la tasa del 117.6% que presentó el costo estimado de la disipación de energía a la atmósfera en el mismo periodo. En los dos casos, la estimación monetaria y ecológica de las emisiones se mantuvo creciente, y el diferencial de las tasas de valor en ambas estimaciones (costo de gasolina y costo de emisiones) se mantuvo constante y relativamente creciente. La tendencia creciente en relación con el aprovechamiento de la energía fue superada por la del rendimiento económico, explicada a su vez por el fuerte aumento del precio del energético (Figura 11).

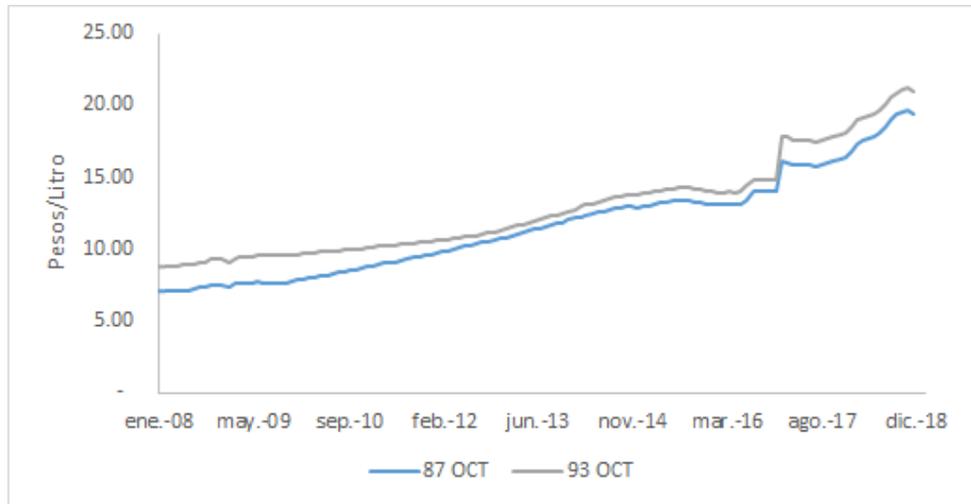


Figura 11. Precios mensuales de las gasolinas en México al público.
Fuente: Elaboración propia con base en datos de la Comisión Reguladora de Energía (CRE, 2020).

Los cambios que presentó el precio del carburante -y por ende su demanda de consumo- se asocian en gran parte con las variables macroeconómicas del contexto internacional y nacional. La tendencia creciente de los precios de la gasolina en México afectó el consumo o demanda de tal insumo a partir del 2016, a lo cual se sumó, en el caso de las ciudades de la frontera con Estados Unidos, la caída que presentó la intensidad de interacciones fronterizas debido a la crisis mundial. La movilidad urbana y el uso de transporte sufrieron afectaciones, y fue cada vez más notoria la necesidad de adoptar alternativas de traslado más sustentables.

El ejercicio de valoración económica de las externalidades del SPMU de los EFNM, en este caso de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, mostró un rendimiento ecológico positivo que fue superado por el rendimiento económico, siendo este último el que determinó el rendimiento ambiental del sector. Los problemas asociados al contexto macroeconómico mundial y nacional se transfieren al SPMU a través del precio de los carburantes que impacta la demanda de consumo y, finalmente, el rendimiento ambiental del sistema.

En esa lógica analítica, se puede afirmar entonces que el comportamiento del rendimiento ambiental del SPMU fue determinado por factores exógenos al sistema. Y tomando en cuenta el contexto actual de límites planetarios (World Wildlife Fund [WWF], 2018), se confirma la necesidad de impactar a la baja el calor disipado al sistema atmósfera (emisiones de CO₂).

En relación con el transporte, lo más adecuado será reforzar aquél que brinde oportunidades de movilidad de una forma segura, asequible, eficiente y sostenible, que garantice una mayor accesibilidad, productividad e integración económica entre zonas urbanas y rurales (Litman 2012, en Peralta, 2020). Asimismo, los programas de gestión urbana deberán considerar el fortalecimiento de opciones de transporte colectivo para desincentivar el uso del automóvil privado, por ejemplo, sistemas de transporte multimodales, de comunicación y vehículos que favorezcan procesos de mitigación ambiental Zhang & Ferrari, 2013, en Peralta, 2020).

El desafío está en cómo fortalecer, precisamente, ese tránsito de los sistemas de transporte y movilidad urbana actual hacia modelos de transporte alternativos, centrados en mitigar sus afectaciones sociales y ambientales.

Conclusiones

Los EFNM presentaron del 2008 al 2018 un proceso de asimetría entre el crecimiento poblacional y el parque vehicular en favor de este, indicativo de una tendencia al alza de la movilidad del SPMU. La reducción del índice de motorización confirma tal proceso, toda vez que se pasó de 7.82 habitantes por vehículo el primer año al 4.21 en el último, una baja de 46%, más unidades automotrices en circulación con menos tripulantes.

El contexto de crisis mundial afectó la economía nacional y el SPMU al impactar el precio de los carburantes y la demanda de consumo asociada a tal insumo. Tanto el consumo de gasolinas como las prácticas de traslado de la población sufrieron alteraciones por esas fluctuaciones constantes, y con tendencia creciente, que presentó el precio de los carburantes.

Las estimaciones realizadas permiten apreciar cómo esas variables transferidas al SPMU (precio y consumo de gasolina) impactan el rendimiento ambiental del sistema en general y en cada EFNM. Tanto el comportamiento del consumo de combustible como el de las emisiones de CO₂ presentaron una tendencia a la baja, pero en términos de valor (precio), la tendencia se revierte. Se observó una asimetría entre el incremento del gasto destinado a la compra de energéticos y la reducción de las emisiones de CO₂, pero al estimar el valor de estas últimas, se advierte que la variable de mayor impacto fue el incremento real del costo de los carburantes y no la intensificación de su consumo o demanda.

El esquema metodológico utilizado en este ejercicio en relación con el rendimiento ambiental como base conceptual y el enfoque eco integrador como guía analítica representa una aproximación al proceso de valoración de la sustentabilidad ambiental del sistema de transporte privado. El propósito ha sido visibilizar las interacciones sistémicas, ambientales y económicas, del SPMU. Se reconoce la necesidad de integrar más variables alusivas al contexto de cada entidad y metabolismo del sistema, pero la propuesta metodológica y los resultados obtenidos se presentan como un primer avance en esta línea de investigación, en el afán de coadyuvar a resolver las asimetrías en el abordaje de los costos/beneficios sociales y ambientales, características de los estudios económicos convencionales.

Referencias

- Borja, J. (2012). Ciudad y planificación. En M. Balbo, R. Jordán & D. Simoni (eds.), *Cuadernos de la CEPAL-la ciudad inclusiva* (pp. 81-104). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/27814/S2003002_es.pdf
- Brons, M., Nijkamp, P., Pels, E., & Rietveld, P. (2005). Efficiency of urban public transit: a meta analysis. *Journal of Transportation*, 32, 1-21. doi: <http://hdl.handle.net/10.1007/s11116-004-0939-4>
- Cuevas, V. M. (2013). La crisis hipotecaria subprime y sus efectos sobre México. *Análisis Económico*, 28(67), 123-151. <http://www.analisiseconomico.azc.uam.mx/index.php/rae/article/view/170>
- Chacón-Anaya, D., Giner, M. E., Vázquez, M., Maldonado, J. A., Roe, S. M., & Anderson, R. (2010a). *Emisiones de gases de efecto invernadero en Coahuila y proyecciones de casos de referencia 1990-2025*. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (Cocef). <https://xdoc.mx/preview/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-en-coahuila-y-5dd0582602ca7>
- Chacón-Anaya, D., Giner, M. E., Vázquez, M., Maldonado, J. A., Roe, S. M., & Anderson, R. (2010b). *Emisiones de gases de efecto invernadero en Sonora y proyecciones de casos de referencia 1990-2020*. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (Cocef). <https://docplayer.es/11800994-Emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-en-sonora-y-proyecciones-de-casos-de-referencia-1990-2020.html>

- Chacon-Anaya, D., Giner, M., Roe, S., Maldonado, J., Lindquist, H., Strode, B., & Shreiber, J. (2010c). *Emisiones de gases de efecto invernadero en Tamaulipas y proyecciones de casos de referencia 1990-2025*. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (Cocef).
https://www.nadb.org/uploads/files/inventario_oficial_gei_de_tamaulipas_junio_2010.pdf
- Chacón-Anaya, D., Giner, M., Vázquez, M., Roe, S., Maldonado, J., Lindquist, H., & Schreiber, J. (2010d). *Emisión de gases de efecto invernadero en Nuevo León y proyecciones de Referencia 1990-2025*. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (Cocef).
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164936/2010_nl_inventario.pdf
- Chacon, D., Giner, M., Vázquez, M., Roe, S., Maldonado, J., Lindquist, H., & Shreiber, J. (2010e). *Emisiones de gases de efecto invernadero en Chihuahua y proyecciones de casos de referencia 1990-2025*. Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (Cocef).
https://www.nadb.org/uploads/files/inventario_emisiones_gei_chihuahua_junio_2010.pdf
- BNamericas (2010). [Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (Cocef)]. BNamericas.
<https://www.bnamericas.com/es/perfil-empresa/comision-de-cooperacion-ecologica-fronteriza>
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2020). *Precios de gasolinas y diésel*. Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/cre/articulos/precios-vigentes-de-gasolinas-y-diesel>
- Diana, M., & Daraio, C. (2010). Performance indicators for urban public transport systems with a focus on transport policy effectiveness issues (Conference). *12th World Conference on Transport Research, 2010 (WCTR, 2010)*, Lisbon.
https://www.researchgate.net/publication/235910939_Performance_indicators_for_urban_public_transport_systems_with_a_focus_on_transport_policy_effectiveness_issues
- Davies, C., Harnisch, J., Lucon, O., Mckibbin, R. S., Saile, S. B., Wagner, F., & Walsh, M. P. (2006). Combustión móvil. En S. Eggleston, L. Buendía, K. Miwa, T. Ngara & K. Tanbe (eds.), *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 2: Energía* (pp. 1–78). Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC).
http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/2_Volume2/V2_0_Cover.pdf
- Farrell, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(3), 253-290. doi: <https://doi.org/10.2307/2343100>
- García, J., & Chávez, E. (2017). Valoración económica para la protección socioambiental de la vaquita marina, una especie endémica. *Región y Sociedad* 29(6), 5-29. <https://doi.org/10.22198/rys.2017.70.a818>
- García, A. (2018). Externalidades y cultura vial. Fenómenos en torno al uso del automóvil en Xalapa, Veracruz, México. *Clivajes. Revista de Ciencias Sociales*. 5(9) 170-184.
<https://clivajes.uv.mx/index.php/Clivajes/article/view/2539/4427>
- García, C. A., García, J. C., & Vaca, M. L. (2015). Valoración económica en salud y medio ambiente del control de contaminantes orgánicos persistentes en Colombia. *Revista Salud Pública*, 17(6), 951–960. doi: <https://doi.org/10.15446/rsap.v17n6.51717>
- Haro-Martínez, A. A., & Taddei-Bringas, I. C. (2014). Sustentabilidad y economía: la controversia de la valoración ambiental. *Economía Sociedad y Territorio*, 16(46), 743-767.
doi: <https://doi.org/10.22136/est002014395>
- Hernández, P., & Camarena, B. (2020). El rendimiento ambiental del sistema privado de movilidad urbana desde el enfoque EcoinTEGRADOR. *Nova Scientia*, 12(24), 1-27. doi: <https://doi.org/10.21640/ns.v12i24.2359>
- Ibarra, J., & Sotres, L. (2008). La demanda de gasolina en México: el efecto en la frontera norte. *Frontera Norte*, 20(39), 131–156. doi: <https://doi.org/10.17428/rfn.v20i39.998>
- Hernández-Arias, Pablo. (2021). *Propuesta metodológica para la evaluación del rendimiento ambiental del sistema privado de movilidad urbana: Hermosillo, Sonora, 2005-2015* (Tesis de Doctorado). CIAD, A.C.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles que se consumen en México*. Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/inecc/documentos/factores-de-emision-para-los-diferentes-tipos-de-combustible-fosiles-que-se-consumen-en-mexico>

- Instituto nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Producto Interno Bruto por entidad federativa 2017*. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/OtrTemEcon/PIBEntFed2017.pdf>
- Instituto nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Vehículos en circulación 2017, información anual*. <https://www.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/373/datafile/F4/V27>
- Mendoza, J. E. (2010). El mercado laboral en la frontera norte de México: estructura y políticas de empleo. *Estudios Fronterizos*, 11(21), 9-42. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-69612010000100001
- Montezuma, R. (2003). Ciudad y transporte. En M. Balbo, R. Jordán & D. Simoni (eds.), *Cuadernos de la CEPAL-La Ciudad Inclusiva* (pp. 175-191). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/27814/S2003002_es.pdf
- Naredo, J. M. (2018). Orígenes y enfoques de la economía ecológica. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 35-48. doi: <https://doi.org/10.15446/ga.v21n1supl.75332>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: our common future*. ONU. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU)-Hábitat. (2015). *Por un mejor futuro urbano. Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México, 2014-2015*. Senado de la República y Grupo Mexicano de Parlamentarios para el Hábitat. <https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/Reporte-Nacional-de-Movilidad-Urbana-en-Mexico-2014-2015.pdf>
- Peralta, F. J. (2020). Sustentabilidad y transporte desde un enfoque de jerarquización para la ciudad de Mexicali, Baja California. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 35(1), 215-242. doi: <http://dx.doi.org/10.24201/edu.v35i1.1920>
- Rios, R. A., Arango, F., Vicentini, V. L., & Acevedo-Daunas, R. (2013). *Estrategias de mitigación y métodos para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Estrategias-de-mitigaci%C3%B3n-y-m%C3%A9todos-para-la-estimaci%C3%B3n-de-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-en-el-transporte.pdf>
- Ripka, A., Luiz, C., & Hernández, A. (2018). Métodos de valoración económica ambiental: instrumentos para el desarrollo de políticas ambientales. *Universidad y Sociedad*, 10(1), 134-141. <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>
- Rojas, J. (2015). *Fallos del mercado: externalidades* (Monografía). Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/31911/secme-19448.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Scheibe, R. R. (2009). *Motor vehicle fire research investigation. Computer-based training*. Depts.washington.edu. <https://depts.washington.edu/vehfire/welcome.html>
- Schmidt, S., Gil, J., & Castro, J. (1995). El desarrollo urbano en la frontera México Estados Unidos. Estudio Delphi en ocho ciudades fronterizas. *Frontera Norte*, 7(13), 49-66. <https://fronteranorte.colef.mx/index.php/fronteranorte/article/view/1522/0>
- Secretaría de Energía (Sener). (2017). *Sistema de Información Energética* (SIE). <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cveca=PMXE2C03>
- Secretaría de Energía (Sener). (2019). *Balance Nacional de Energía 2018*. <http://sie.energia.gob.mx>
- Sobrino, J. (2012). La urbanización en el México contemporáneo. En C. Martínez-Gómez, J. Martínez, G. Bay, F. Del Popolo, S. Huenchaun, D. Jaspers-Faijer & L. Cuevas (eds.), *Notas de Población* (pp. 93-12). Organización de las Naciones Unidas (ONU). https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/jaime_sobrino.pdf
- Soria, J. A., & Valenzuela, L. M. (2015). Dimensiones relevantes para la evaluación ambiental proactiva de la movilidad urbana. *Investigaciones Geográficas*, (87). doi: <https://doi.org/10.14350/ig.34416>
- Valdivia-Alcalá, R., Abelino-Torres, G., Lopez-Santiago, M. A., & Zavala-Pineda, M. J. (2012). Valoración económica del reciclaje de desechos urbanos. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(3), 435-447. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.07.044>
- World Wildlife Fund (WWF). (2018). *Informe Planeta Vivo - 2018: Apuntando más alto*. WWF. http://awsassets.wwf.es/downloads/informe_planeta_vivo_2018.pdf