

Comparación de dos metodologías de cálculo de emisiones de gases efecto invernadero para vehículos en Costa Rica, 2014¹

Comparison of two methodologies for calculating greenhouse gas emissions for vehicles in Costa Rica, 2014

Priscila Picado-Valenzuela², Javier E. Rodríguez-Yáñez³, José Pablo Sibaja-Brenes⁴

Fecha de recepción: 30 de octubre, 2023
Fecha de aprobación: 17 de febrero, 2024

Picado-Valenzuela, P; Rodríguez-Yáñez, J. E; Sibaja-Brenes, J. P. Comparación de dos metodologías de cálculo de emisiones de gases efecto invernadero para vehículos en Costa Rica, 2014. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 89-99.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6921>



- 1 Artículo basado en tesis de maestría https://uned.cr/ecologiaurbana/images/pdf/Tesis_de_Priscila_Picado.pdf
- 2 Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales, Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica.
 ppicado@icloud.com
 <https://orcid.org/0000-0001-5676-2723>
- 3 Universidad Estatal a Distancia, Vicerrectoría de Investigación. Costa Rica
 jrodriguezy@uned.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5539-3153>
- 4 Universidad Nacional, Escuela de Química, Laboratorio de Química de la Atmósfera. Costa Rica.
 jose.sibaja.brenes@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>

Palabras clave

Factores de emisión; inventario; transporte; modelado; automotores.

Resumen

Contar con métodos confiables para estimar las emisiones antropogénicas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es de vital importancia para diseñar estrategias eficientes para mitigar los efectos del cambio climático. Uno de estos métodos es el software MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator*) diseñado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA). Otra metodología es la implementada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica, la cual se basa en las directrices del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). El objetivo de este trabajo es determinar la factibilidad de utilizar MOVES en el contexto costarricense para la obtención de factores locales que mejoren las estimaciones de emisiones de GEI para fuentes móviles vehiculares en Costa Rica en el 2014. Para esto se evaluaron dos escenarios de emisiones estimadas de GEI calculados mediante el software de modelado MOVES y la metodología de cálculo implementada por el IMN. Para esto se recopiló información de diferentes fuentes oficiales para suplir de datos a ambas metodologías y realizar el análisis. Asimismo, se realizó una comparación cuantitativa con una escala Likert para determinar la confiabilidad de los dos métodos. Como resultados se determinó que MOVES calcula valores de emisión de GEI más altos que la metodología del IMN. Relacionado con esto, el análisis con las categorías Likert demostró que la confiabilidad de los datos de la metodología MOVES para Costa Rica es menor que los utilizados por el IMN. En conclusión la metodología de cálculo de emisiones de GEI por MOVES y por el IMN brindan un rango superior e inferior al cálculo de emisiones de GEI. Asimismo, ambas metodologías plantean aproximaciones complementarias al estudio de las emisiones de GEI.

Keywords

Emission factors; inventory; transport; modeling; automobiles.

Abstract

Having reliable methods to estimate anthropogenic emissions of Greenhouse Gases (GHG) is of vital importance to design efficient strategies to mitigate the effects of climate change. One of these methods is the MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) software designed by the United States Environmental Protection Agency (EPA). Another methodology is the one implemented by the National Meteorological Institute (NMI) of Costa Rica, which is based on the guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The objective of this paper is to determine the feasibility of using MOVES in the Costa Rican context to obtain local factors that improve GHG emission estimates for vehicular mobile sources in Costa Rica in 2014. For these there were evaluated two scenarios of estimated GHG emissions calculated using the MOVES modeling software and the calculation methodology implemented by the NMI. Information was collected from different official sources to supply data to both methodologies and perform the analysis. Likewise, a quantitative comparison was made with a Likert scale to determine the reliability of the two methods. As a result, MOVES calculate higher GHG emission values than the IMN methodology. The analysis with the Likert scale showed that the reliability of the data used for MOVES methodology for Costa Rica is lower than that data used by the IMN. In conclusion, the methodology for calculating GHG emissions by MOVES and by the IMN provide an upper and lower range for the calculation of GHG emissions. Likewise, both methodologies propose complementary approaches to the study of GHG emissions.

Introducción

El cambio climático es la crisis más importante de nuestra era [1]. Se estima que para el 2030 la temperatura promedio global podría llegar a aumentar 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales[2]. Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), un aumento de 2 °C pone en riesgo la supervivencia de un sinnúmero de especies en el planeta, entre ellas la especie humana [3]. De las distintas formas de emisiones que se dan en el planeta, las emisiones antropogénicas producidas por el transporte aportaron un 14 % de las emisiones globales de Gases Efecto Invernadero (GEI) para el 2010 [4], donde los GEI más comunes son dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Las directrices del IPCC (2006) sugieren un potencial de calentamiento global (PCG) de 1 para CO₂, 21 para CH₄ y 310 para N₂O, generando su correspondencia en CO₂ equivalente.

Las emisiones de los GEI procedentes de fuentes móviles se clasifican según el tipo de transporte: terrestre por carretera, ferrocarril, aéreo, marítimo y fluvial [5]. En la actualidad, los vehículos en carretera son la principal fuente de GEI del sector transporte, estos aportan cerca de un 25 % del total de las emisiones de CO₂ [6]. Los vehículos que circulan por carretera pueden ser automóviles, motocicletas, vehículos de carga liviana, camiones de carga pesada, tractores, grúas y autobuses[5]. Recientemente, se han desarrollado herramientas de modelación para cuantificar las emisiones de GEI [6]. Estos modelos utilizan algoritmos para representar la realidad y establecer causalidad entre un conjunto de parámetros y la emisión de GEI [7]. En otras palabras, se ha definido la emisión como una variable dependiente vinculada con otros factores tales como lo son el combustible utilizado o la velocidad del movimiento realizado o el tipo de vehículo; donde uno o varios de los factores afectan la variación de estas emisiones [8]. Para esto, se toman datos del parque vehicular (cantidad y tipo de vehículos), de su nivel de actividad (kilómetros recorridos, consumo de combustible) y de factores locales (p.ej., humedad relativa, tipo de carretera), a fin de determinar los factores de emisión y/o estimar las emisiones de GEI [9].

Las metodologías para estimar emisiones de GEI varían según el grado de complejidad y el nivel de detalle de los datos que requieren. Metodologías como las *Tier 1* (Nivel 1) son las más simples, las del tipo *Tier 2* (Nivel 2) son intermedias y las *Tier 3* (Nivel 3) son las más complejas y necesitan de datos muy específicos [5]. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, por sus siglas en inglés) desarrolló el software MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator* – Simulador de Emisiones de Vehículos Motorizados) para estimar las emisiones de GEI provenientes de vehículos en carretera [4]. MOVES es una metodología nivel *Tier 3* e integra las herramientas, los algoritmos, los datos y los conocimientos necesarios para realizar análisis de emisiones de fuentes vehiculares asociados al desarrollo de regulaciones, normas, inventarios y proyecciones [10]. A nivel mundial, las directrices del IPCC para la elaboración de Inventarios Nacionales de GEI son el estándar para el cálculo y el reporte de emisiones [11 y 12]. El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) utiliza una metodología Tier 2 simplificada para los Inventarios de GEI de Costa Rica (INGEI-CR), donde los factores de emisión se expresan en función del tipo combustible y el tipo de tecnología de control de la contaminación (con o sin control), sin asociarlo con el tipo de vehículos [13]. Loría Salazar (2014) indica que la flota vehicular del 2014 estaba conformada por 73,4 % de automóviles particulares y de carga liviana, un 20,6 % de motocicletas, un 2,7 % de vehículos de carga pesada, un 2,1 % de autobuses y taxis y un 1,2 % de otros equipos. El 83 % vehículos con motor de gasolina (1 160 897 unidades) y 17 % con motores diésel (238 186 unidades) [14]. En el 2014 el transporte contribuyó con un 75 % de las emisiones del sector, de las cuales el 95 % correspondieron al transporte terrestre. Los mayores responsables de estas emisiones son los vehículos particulares (48 %), seguidos por los camiones de servicio pesado y autobuses (27 %) y carga liviana con un (21 %). Estas fuentes emiten; entre otros contaminantes, 4 532,41 Gg de CO₂, 1,187 Gg de CH₄ y 0,314 Gg

de N_2O [14]. Esta cantidad de vehículos emiten una serie de GEI que significan un importante aporte a huella de carbono de Costa Rica y afecta en la calidad de aire, sobre todo del Gran Área Metropolitana (GAM) [15].

Materiales y métodos

se ejecutó una comparación cuantitativa de dos metodologías para determinar su confiabilidad y aplicabilidad para el contexto costarricense. Se recopilaron datos meteorológicos y de características técnicas del parque vehicular para estimar las emisiones de GEI generadas por las fuentes automotores que circularon en carretera en Costa Rica durante el 2014. La recolección de los datos consideró todos los días de la semana y en todos los horarios, para todo el territorio del país. Para los análisis con el software MOVES [9] y la metodología utilizada por el IMN [16] se utilizan variables diferenciadas (cuadro 1).

Cuadro 1. Lista de variables utilizadas para la estimación de GEI emitidos por el parque vehicular para el 2014 con el software MOVES y con la metodología del IMN.

MOVES	IMN
Parámetros meteorológicos.	Consumo de combustible (L).
Parámetros vehiculares técnicos.	Factor de emisión de los gases contaminantes.
Parámetros fisicoquímicos del combustible y consumo.	Potencial de Calentamiento Global de los gases.
Parámetros de circulación de los vehículos.	
Procesos de emisión.	

Estimación de GEI con MOVES

MOVES utiliza un sistema de manejo de base de datos con relaciones MYSQL para el ordenamiento de los datos. Los parámetros para el análisis fueron:

1. Parámetros meteorológicos

Aportados por el IMN y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), de las estaciones meteorológicas automáticas distribuidas a lo largo de Costa Rica. Se recolectó la temperatura horaria promedio, la Humedad relativa promedio y la Presión barométrica (se asumió una presión barométrica a baja altura de 29,8 in Hg debido a que la mayoría de las carreteras de circulación están a menos de 1 680 m s.n.m.).

2. Parámetros vehiculares técnicos

Se clasificaron los datos vehiculares según el año del modelo, el tipo de vehículo y el combustible, con una antigüedad máxima de 30 años (de 1984 al 2014, los vehículos anteriores a 1984 se incluyen en ese año). Se obtuvo estos datos del registro del pago del impuesto de circulación del Instituto Nacional de Seguros (INS) en el 2015 [30].

3. Parámetros fisicoquímicos del combustible y consumo

Los combustibles considerados fueron gasolina (regular y super) y diésel y los datos fueron aportados por la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). No se tomaron en cuenta los datos de vehículos cuyo combustible es Gas Licuado de Petróleo (GLP), debido a

la reducida información disponible. Tampoco se consideraron combustibles como etanol y gas natural. Los valores de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles se promediaron según el consumo de cada uno y los brindó la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE).

4. Parámetros de circulación de los vehículos

A. Tipos de ruta: Se clasificaron las carreteras de la Red Vial Nacional en rutas primarias, secundarias y terciarias. Además, se reclasificaron dichas categorías como rural y urbana. Los datos fueron obtenidos del Ministerio de Obras Públicas y Transporte [17]. B. Distancia recorrida por cada una de las categorías vehiculares: como medida de distancia recorrida se utilizó el valor promedio de las lecturas de los tacómetros de cada categoría vehicular. Estos datos se recopilaban a partir de las inspecciones periódicas realizadas por Revisión Técnica Vehicular (RTV) durante el 2016 y el anuario de información del MOPT [17]. C. Velocidad promedio de circulación por categoría vehicular y por tipo de ruta. Se obtuvo esta información de datos recolectados de las estaciones de conteo de tránsito del MOPT a través de la Dirección de Cambio Climático.

5. Procesos de emisión

Se contabilizaron las emisiones al momento del arranque y durante la circulación por carretera. Se ingresaron todos los parámetros en el programa MOVES y se estimaron las emisiones totales en toneladas de CO₂ equivalente (t CO₂eq) y el factor de emisión promedio (en g/km) de tres GEI: CO₂, CH₄ y N₂O. Se calcularon dichos GEI según el tipo de combustible, tipo de vehículo y por año del modelo.

Estimación de GEI según el IMN

Se estimó el cálculo de las emisiones de GEI para el parque vehicular [16] con:

$$T \text{ CO}_2 \text{ eq} = (L_{\text{comb}} \times FE_{\text{CH}_4} \times 21 + L_{\text{comb}} \times FE_{\text{CO}_2} \times 1 + L_{\text{comb}} \times FE_{\text{N}_2\text{O}} \times 310) / 1000$$

donde T CO₂ eq son las toneladas de CO₂ equivalente, L_{comb} es la cantidad de combustible (gasolina o diésel) en litros, FE_{gas} es el factor de emisión del GEI (cuadro 2) [5].

Cuadro 2. Factores de emisión de GEI utilizados por el IMN para fuentes móviles [18].

Combustible	GEI		
	CO ₂ (kg/L)	CH ₄ (g/L)	N ₂ O (g/L)
Gasolina (sin catalizador)	2,231	1,176	0,116
Gasolina (con catalizador)		0,907	0,283
Diésel	2,613	0,149	0,154

Los datos correspondientes al consumo de combustible se obtuvieron del portal de datos abiertos de la Refinadora Costarricense de Petróleo [19] y del Balance Energético para el 2014 elaborado por la Secretaría de Planificación del Subsector Energía [20]. Se utilizaron los factores de emisión de GEI publicados por el IMN para el 2021. La elección del factor de emisión se determinó según la tecnología del vehículo con o sin catalizador. Para vehículos anteriores a 1990 se asumió que no tenían catalizador, mientras que para vehículos posteriores

a 1991 se tomó en cuenta que sí tenían catalizador. Esto debido a que la Normativa EURO 0 para Estándares de Emisión determinó la obligatoriedad de la presencia del catalizador en la manufactura de vehículos a partir de 1991 [21].

Comparación de las estimaciones de GEI calculadas con MOVES y según el IMN

Se realizó una comparación cuantitativa tipo Likert [22] de las dos metodologías de estimación de GEI. Para esto, se aplicó una escala Likert adaptada por [23] a gases contaminantes tóxicos. Se definieron cinco rangos, que abarcaron desde parámetros con alta precisión, exactitud y el alcance adecuado, hasta parámetros con datos insuficientes (Tabla 3). Se definieron estos rangos con valores entre cero a uno y se utilizó la siguiente fórmula para estimar la confiabilidad total de los parámetros:

donde $n_{\text{categoría}}$ es el número de parámetros en cada categoría Likert, valor categoría Likert según corresponda (cuadro 3) y $n_{\text{metodología}}$ es el total de parámetros utilizados en cada metodología. Valores de confiabilidad más cercanos a uno indican mayor confiabilidad, valores más cercanos a cero indican baja confiabilidad.

Cuadro 3. Escala de calificación de la confiabilidad de los datos, categorías Likert

Rangos	Criterios
0,8	Basados en datos exhaustivos específicos para Costa Rica
0,6	Basado en datos limitados o extrapolados específicos para Costa Rica
0,4	Basado en el discernimiento de expertos
0,2	Basado en factores globales o externos
0,0	Datos insuficientes

Resultados

Factores de emisión estimados por MOVES

Con el software MOVES se calcularon los factores de emisión para cada categoría vehicular. Se estimó que los autobuses tienen el factor de emisión de CO₂ más alto, seguido por los vehículos de pasajeros que utilizan gasolina y los vehículos de carga pesada (cuadro 4). Esto puede estar asociado a que los autobuses del parque vehicular son relativamente antiguos con respecto a los vehículos de otras categorías. También, se consideraron los kilómetros recorridos por cada tipo de vehículo. En este sentido, los autobuses, son los que presentan un valor mayor, en comparación con los otros los otros vehículos, lo que también afecta su emisión total [24]. Los vehículos de pasajero que utilizan diésel tienen el factor de emisión de CO₂ más bajo, lo que se relaciona con la cantidad de vehículos en el parque vehicular [17, 18]. Por otro lado, los factores de emisión de CH₄ y N₂O fueron más altos para vehículos de pasajeros y de carga liviana de gasolina. En contraposición, los vehículos de pasajero y de carga liviana de diésel tienen los factores de emisión de CH₄ y N₂O más bajo. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que el factor de calentamiento global de estos gases es mayor. Por lo que el aporte de estas emisiones es considerable.

Cuadro 4. Factores de emisión con MOVES para el parque vehicular en el 2014.

Categoría vehicular	Combustible	Factor de emisión (g/km)		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Motocicleta	Gasolina	54,76	5,24x10 ⁻³	3,91x10 ⁻⁴
Vehículo de pasajeros	Gasolina	235,39	1,85x10 ⁻²	1,54x10 ⁻²
	Diésel	32,06	6,32x10 ⁻⁶	2,22x10 ⁻⁶
Carga liviana	Gasolina	101,38	6,29x10 ⁻³	5,22x10 ⁻³
	Diésel	37,09	2,82x10 ⁻⁵	1,74x10 ⁻⁵
Autobús	Diésel	476,14	1,39x10 ⁻³	8,11x10 ⁻⁴
Carga pesada	Diésel	227,19	7,34x10 ⁻⁴	4,94x10 ⁻⁴

Resumen de emisiones por cada método

Con el software MOVES se estimó que, en Costa Rica se produjeron un total de 6 245,81 Gg CO₂eq. De este total, un 55 % de las emisiones de CO₂eq corresponden a gasolina, donde el CO₂ representa en ambos combustibles más del 95 % de las emisiones. Las emisiones de CH₄ son mayores que las de N₂O en cada combustible, pero los valores de CO₂ eq son mayores para el N₂O (cuadro 5). Con la metodología del IMN se estimó que, en Costa Rica, se produjeron un total de 4 912,44 Gg CO₂eq. De este total, un 51 % de las emisiones de CO₂eq corresponden a gasolina, de la misma forma que en el MOVES, los porcentajes de emisión y las tendencias se mantienen.

Cuadro 5. Emisiones estimadas para cada GEI con el software MOVES y con la metodología del IMN en Costa Rica para el 2014.

Metodología	Combustible	GEI (Gg)			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq
MOVES	Gasolina	3 367,81	0,99	0,15	3 433,49
	Diésel	2 778,47	0,14	0,10	2 812,33
	Total				6 245,81
IMN	Gasolina	2 438,26	1,14	0,11	2 496,30
	Diésel	2 374,76	0,13	0,13	2 416,14
	Total				4 912,44
Relación (MOVES/IMN)	Gasolina	1,38	0,87	1,32	1,38
	Diésel	1,17	1,09	0,80	1,17
	Total				1,27

Comparación de las estimaciones de GEI calculadas con MOVES y según el IMN

La estimación de CO₂eq con MOVES es en términos generales un 27 % superior al valor calculado por el método del IMN. Las emisiones globales de CO₂ son mayores por MOVES en un 28 %, en tanto que para CH₄ son menores en un 10 %, mientras que las de N₂O resultan similares.

En relación con los combustibles las emisiones de gasolina son mayores que las de diésel en casi todos los parámetros. Los vehículos de gasolina aportan alrededor del 55 % en MOVES y 51 % en IMN. Esto está asociado con la estructura del parque vehicular donde la cantidad de

vehículos a gasolina es mayor. En cuanto a las emisiones calculadas por cada GEI según tipo de combustible, se observa que MOVES presenta valores mayores que el IMN para CO_2 y N_2O en gasolina, y para CO_2 y CH_4 en diésel.

Confiabilidad de los datos

Según el índice de confiabilidad de los datos con la escala Likert, los valores obtenidos para la metodología del IMN son más confiables (valor 0,70; buena confiabilidad), que los obtenidos para el software MOVES (valor 0,56; leve confiabilidad). El método aplicado por el IMN requiere pocos datos, con información disponible. Por el contrario, MOVES requiere más parámetros para su funcionamiento, los cuales tienen un alcance limitado y/o son valores extrapolados para Costa Rica. En caso del método MOVES los parámetros meteorológicos, así como los de tipo de vehículo y las características del combustible, son insumos exhaustivos y específicos para Costa Rica. Por el contrario, los parámetros de circulación de vehículos y de consumo de combustible por tipo de vehículos son menos confiables, ya que son extrapolaciones. Por otro lado, no se cuenta con datos de procesos de emisión y otros parámetros como tiempo reposo y arranque. Para la metodología del IMN, los datos de consumo de combustible son óptimos para realizar las estimaciones de emisión de GEI, mientras que los factores de emisión de GEI son de menor precisión y exactitud, ya que provienen de datos extrapolados para Costa Rica.

Discusión

En el análisis general se encontró que el patrón de emisión de GEI en ambos métodos es similar ($\text{CO}_2 \gg \text{CH}_4 > \text{N}_2\text{O}$) y concuerda con lo indicado por el IPCC en la mayoría de los países, en relación con su parque vehicular [3]. De la misma forma, esta tendencia de emisión para vehículos por carretera concuerda con los resultados del INGEI costarricense y la aplicación de otros métodos de modelado de emisiones a nivel global [18, 26, 27]. MOVES estimó emisiones totales de GEI en CO_2eq un 27 % superiores a lo estimado con el método del IMN (Tabla 5). Otros estudios, en los que se compara MOVES con otros softwares de modelación, han encontrado una tendencia similar, donde MOVES estima un valor de emisión superior al método de comparación [25, 26, 27, 28]. La causa más probable de esta diferencia es que MOVES requiere de datos a nivel *Tier 3* [7, 10], los cuales son más complejos y altamente específicos [6, 28]. Adicionalmente, en la utilización de MOVES, se recomienda hacer un ajuste para el parque vehicular fuera de Estados Unidos. Por ejemplo, las motocicletas en Estados Unidos tienen una potencia de motor de 10 HP a 15 HP mientras que, en Latinoamérica, los rangos de potencia media están entre los 6,5 HP y 10 HP. También, Liu et al. (2013) sugieren realizar el cálculo de un factor de deterioro de la flota vehicular para que las categorías vehiculares sean comparables. Finalmente, la utilización de MOVES tiene una aplicabilidad limitada a sistemas y lugares con baja disponibilidad de datos para la mayoría de los parámetros [29]. El índice de confiabilidad de datos para MOVES, aplicando la escala Likert, fue bajo debido a las extrapolaciones. Aun así, es necesario resaltar el valor agregado de esta metodología en la obtención de los factores de emisión asociados a cada tipo de vehículo, lo que permite una posible valoración posterior específica para cada categoría vehicular. El cuadro 6 muestra las ventajas y las desventajas de los modelos utilizados.

Cuadro 6. Ventajas y desventajas de las dos metodologías de estimación de GEI.

Modelo	Ventajas	Desventajas
MOVES	<ol style="list-style-type: none"> 1. Permite caracterizar la emisión de GEI. 2. Genera factores de emisión específicos para el sistema de estudio. 3. Permite identificar el impacto de la aplicación de políticas públicas, tránsito, tecnología de motores en las emisiones de GEI. 4. Es aplicable a diferentes escalas (país, municipio, proyecto). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Requiere personal capacitado en manejo de base de datos. 2. Es necesario ajustar algunos parámetros (p.ej., características del parque vehicular) al contexto fuera de los EE. UU. 3. Limitado a sistemas que tengan disponibilidad de datos de la mayoría de los parámetros.
IMN	<ol style="list-style-type: none"> 1. Amplio registro histórico, lo que facilita estudios comparativos temporales, entre sectores y entre países. 2. Es fácil de entender debido a que requiere de pocos parámetros para su implementación. 3. Fácil de aplicar y los datos son accesibles. 4. Metodología conocida por expertos y personal no especializado. 5. No requiere de conocimiento previo en manejo de bases de datos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. No permite caracterizar la emisión de GEI. 2. Utiliza factores de emisión globales o nacionales, mas no específicos por categoría vehicular. 3. La exactitud del cálculo de emisión de GEI tiene espacio para mejora.

En cuanto al método aplicado por el IMN, este ha utilizado el mismo para el reporte del INGEI de varios sectores desde 1990 [16]. Esto permite que las estimaciones se puedan comparar con años anteriores y entre sectores. Por otro lado, este método también es utilizado por los países miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), lo que permite la comparación entre regiones y países [3, 17]. La fórmula que utiliza el IMN requiere de datos que son fáciles de adquirir, confiables y no es necesario que la persona usuaria sea experta con el manejo de bases de datos. En contraposición con el MOVES, el método aplicado por el IMN no permite desagregar la emisión de GEI por tipo de vehículo, lo cual limita el tipo de comparaciones que se pueden realizar. Para una mejor eficiencia de MOVES se recomienda realizar esfuerzos para tener mayor disponibilidad de datos de nivel *Tier 3*. Sin embargo, esto implica una inversión económica alta y un trabajo interinstitucional más eficiente, por lo que la relación costo/beneficio probablemente sea baja.

Conclusiones y recomendaciones

Ambas metodologías presentaron aproximaciones complementarias al estudio de las emisiones de GEI para fuentes vehiculares móviles. Por un lado, MOVES permite un análisis más detallado con respecto a los factores de emisión e identifica como influyen los parámetros del parque vehicular y de conducción, en el valor de las emisiones. Mientras que el método del IMN, aunque es más simple, permite comparaciones históricas e intersectoriales [3, 12, 19, 27]. La aplicación del software MOVES, para el contexto costarricense, es posible, sin embargo, es necesario una labor previa de generación de información con mayor nivel de detalle y la estandarización de bases de datos. Estos esfuerzos contribuirían a mejorar la métrica de emisiones del sector transporte terrestre del país. Adicionalmente, permitirá dar seguimiento, evaluar y proponer escenarios para considerar propuestas de mitigación. El MOVES también genera un aporte a los esfuerzos de transparencia y mejora continua de los INGEI, así como otros esfuerzos país

asociados con la mitigación y la adaptación al cambio climático, como lo son el Programa País para la Carbono Neutralidad, el Plan Nacional de Descarbonización y la Política Nacional de Adaptación [16].

Agradecimientos

A la Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía (DCC-MINAE), por el apoyo ante las instituciones públicas para la solicitud de la información requerida, como: Dirección Sectorial de Energía, Instituto Meteorológico Nacional, Refinadora Costarricense de Petróleo, Instituto Costarricense de Electricidad, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Ministerio de Ambiente y Energía, Instituto Nacional de Seguros, Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, y Riteve SyC. Además, al Colaboratorio Nacional de Computación Avanzada del Centro Nacional de Alta Tecnología (CNCA-CeNAT) en la asesoría en la aplicación del modelo MOVES y la utilización de su clúster para la corrida. Este trabajo tuvo el apoyo del Fondo Especial para la Educación Superior Pública (FEES) y de las Beca CENAT.

Referencias

- [1] von Stechow, C., McCollum, D., Riahi, K., Minx, J. C., Kriegler, E., van Vuuren, D. P., Jewell, J., Robledo-Abad, C., Hertwich, E., Tavoni, M., Mirasgedis, S., Lah, O., Roy, J., Mulugetta, Y., Dubash, N. K., Bollen, J., Ürge-Vorsatz, D., & Edenhofer, O. (2015). Integrating Global Climate Change Mitigation Goals with Other Sustainability Objectives: A Synthesis. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 363–394. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021113-095626>
- [2] World Economic Forum. (2022). *The Global Risks Report 2022 17th Edition*.
- [3] IPCC. (2022). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. In V. Masson-Delmotte & P. Zhai (Eds.), *Global Warming of 1.5°C*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- [4] IPCC. (2014). *Cambio climático 2014 Mitigación del cambio climático Resumen para responsables de políticas*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_es-1.pdf
- [5] IPCC. (2006). Chapter 3: Mobile Combustion. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2, 1–78
- [6] Edelenbosch, O. Y., McCollum, D. L., van Vuuren, D. P., Bertram, C., Carrara, S., Daly, H., Fujimori, S., Kitous, A., Kyle, P., Ó Broin, E., Karkatsoulis, P., & Sano, F. (2017). Decomposing passenger transport futures: Comparing results of global integrated assessment models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 281–293. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.07.003>
- [7] Reynolds, A. W., & Broderick, B. M. (2002). Development of an emissions inventory model for mobile sources. *Transportation Research Part D* 5, 5(2), 77–101. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(99)00025-5)
- [8] Zhang, K., Lei, Y., & Guofang, L. I. (2013). Factors affecting vehicular emissions and emission model. *Fourth International Conference on Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- [9] United States Environment Protection Agency (2012). *Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES): User Guide Version, MOVES2010b*. <https://www.epa.gov/moves>
- [10] Tolvett, S., Osses, M., & Lents, J. M. (2009). Análisis de emisiones en ruta de vehículos diésel en Ciudad de México, Santiago y São Paulo, Tesis de Maestría en Ingeniería, 177–181, Universidad de Chile, Santiago, Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102234>
- [11] Vicuña, S. (2014). *Inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero: Un análisis para Chile, El Salvador, México y el Uruguay*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), repositorio. cepal.org/handle/11362/37624
- [12] Alcaldía Mayor de Bogotá (2009). *Elementos técnicos del plan decenal de descontaminación de Bogotá – Parte 2, inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Fijas y Móviles* https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3437

- [13] Loría Salazar, L. G. (2014). Vigésimoprimer informe estado de la nación en desarrollo humano sostenible (2014). Informe Final. Implicaciones en infraestructura y transporte, <https://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/892>
- [14] Ministerio del Ambiente y Energía. (2019). Costa Rica 2019: Inventario Nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono 2015, <https://cambioclimatico.go.cr/inventario-nacional-de-gases-de-efecto-invernadero-ingei/>
- [15] Steinvorth Álvarez, A. (2016). Mejoras en la calidad de aire mediante la reducción de emisiones vehiculares de carbono negro en Costa Rica. *Éxito Empresarial*, 303, 1–4.
- [16] Ministerio del Ambiente y Energía. (2021). Costa Rica 2021: Cuarta Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/cuarta-comunicacionnacional/>
- [17] Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2015). Anuario estadístico del sector transporte e infraestructura 2014. <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/164/388.1-1.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [18] Instituto Meteorológico Nacional. (2021). Factores de emisión de gases de efecto invernadero. <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/factores-de-emision-gei-decima-edicion-2021/>
- [19] Refinadora Costarricense de Petróleo. (2017). Ventas de productos. <https://datosabiertos.recope.go.cr/conjunto/ventas>
- [20] Secretaría de Planificación del Subsector Energía. (2018). Balance Energético Nacional 2014. <http://www.sinamecc.go.cr/datos-abiertos/bne>
- [21] Hooftman, N., Messagie, M., van Mierlo, J., & Coosemans, T. (2018). A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 86, 1–21, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.012>
- [22] Cremades, L. v., & Rincón, G. (2011). Valoración cualitativa de la calidad de un inventario de emisiones industriales para el modelado de dispersión de contaminantes en la costa nororiental de Venezuela. *Interciencia*, 36(2), 128–134.
- [23] Rodríguez-Yáñez, J. E. (2018). Estimación cualitativa de la incertidumbre para el inventario de contaminantes tóxicos del aire del gran área metropolitana en el 2007. *Repertorio Científico*, 21(2), 15–22. DOI: <https://doi.org/10.22458/rc.v21i2.2406>
- [24] Schipper, L., Deakin, E., McAndrews, C. (2011). Carbon Dioxide Emissions from Urban Road Transport in Latin America: CO2 Reduction as a Co-Benefit of Transport Strategies. In: Rothengatter, W., Hayashi, Y., Schade, W. (eds) *Transport Moving to Climate Intelligence. Transportation Research, Economics and Policy*. Springer, New York, NY. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7643-7_8
- [25] Zhang, T. C., & Surampalli, R. Y. (2013). *Climate Change Modeling, Mitigation, and Adaptation*, Capítulo 5: Impact of Greenhouse Gas Emissions and Climate Change, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- [26] Bai, S., Eisinger, D., & Niemeier, D. (2009). MOVES vs. EMFAC: A Comparison of Greenhouse Gas Emissions Using Los Angeles County, Transportation Research Board 2009 Annual Meeting, <https://www.researchgate.net/publication/228646270>
- [27] Zhao, J., Yun, M., Chen, Z., & Mo, H. (2014). The method for determining vehicle's fuel consumption and exhaust emissions under different traffic conditions, Conference: 14th COTA International Conference of Transportation Professionals, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.
- [28] Liu, H., Wei, H., & Yao, Z. (2014). Validating MOVES PM2.5 Emission Factor Empirically by Considering Accumulative Emission Effect. 14th COTA International Conference of Transportation Professionals, 3017–3028.
- [29] Al-Ghandour, M. (2014). Analysis of Fuel Consumption and Emissions at Roundabout with Slip Lane, Using SIDRA and Validation by MOVES Simulation, Second Transportation & Development Congress DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784413586.029>
- [30] Instituto Nacional de Seguros. (2015). Registro de marchamo 1984- 2015.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.