



Transporte Eléctrico de Carga: Análisis de los desafíos para su introducción en Uruguay

ANÁLISIS COMPRATIVO DE EMISIONES DE CONTAMINANTES



AUTORES Y AGRADECIMIENTOS

RESPONSABLES TÉCNICO - CIENTÍFICOS

Dr. Ing. Martín Tanco – Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo

Dr. Ing. Daniel Jurburg – director del Centro de Innovación en Organización Industrial (CINOI)

EQUIPO DE INVESTIGACIÓN

Martín Levy – estudiante avanzado de ingeniería industrial

Sebastián Rossi – estudiante avanzado de ingeniería industrial

María Sol Cavallieri – estudiante avanzado de ingeniería industrial

INFORMACIÓN DEL PROYECTO

FSE_1_2019_1_158846

Fondo Sectorial de Energía (Proyecto) – 2019

“Transporte Eléctrico de Carga: Análisis de los desafíos para su introducción en Uruguay”

Duración: octubre 2020 – abril 2022

APOYOS Y COLABORADORES



Contenido

1. Introducción	4
2. Revisión bibliográfica	7
3. Metodología	12
3.1 Flota nacional y segmentación de vehículos.....	13
3.2 Cálculo de emisiones CO ₂	15
3.3 Cálculo de emisiones N ₂ O, CH ₄ , CO y NO _x	18
3.4 Cálculo de CO ₂ equivalente	20
4. Cálculo de emisiones.....	22
5. Escenarios futuros	25
6. Discusión y conclusiones	32
Referencias	36
Anexos	43

1. Introducción

Con su fuerte consumo de productos derivados del petróleo, el sector transporte de carga por carretera es un gran emisor de dióxido de carbono mundialmente. Sus emisiones se estiman en 2.861 Mt CO₂ (Megatoneladas de dióxido de carbono), un 8,1% de todas las emisiones de CO₂ generadas por consumo de combustible en el mundo. Es un sector que se destaca por generar grandes emisiones comparado con la poca cantidad de vehículos que lo componen, ya que está compuesto solamente por 4% de los vehículos que circulan por las calles [1]. Esto es aún más acentuado en el caso de los camiones de más de 3,5 toneladas de carga. En 2018, de entre ómnibus, camiones livianos, medianos y pesados, estos últimos dos (>3,5 toneladas de carga) fueron el 30% del total en unidades mundialmente, pero generaron el 62% de las emisiones, siendo un grupo pequeño responsable de la mayoría de las emisiones del sector [2–4].

Esta situación mundial también se presenta tanto en Latinoamérica como en Uruguay. En Latinoamérica el sector transporte también es el mayor responsable de emisiones de CO₂ [5]. Por su parte, según el Balance Energético Nacional (BEN) de Uruguay de 2020, el sector transporte ha sido históricamente, y sigue siendo, el mayor generador de emisiones de CO₂, de entre todas las industrias de la energía y sus consumidores. Desde 2006 que este sector está generalmente en aumento, siendo el principal causante el consumo de gasolina, que aumentó un 145% en este período. Cabe destacar que se tuvo una pequeña reducción en emisiones en 2018 y otra de 6% en 2020. En 2020, el año del estudio, las emisiones de este sector fueron de 3.514 kilotoneladas de CO₂, siendo aproximadamente un 57% de las emisiones totales del país de ese año [6].

A pesar de que Uruguay solo representa el 0,04% de las emisiones de CO₂ mundiales, es un país que se ve altamente afectado por el cambio climático debido a que la base de su economía es agropecuaria [7]. Es por este motivo que, en diciembre 2021, Uruguay publicó una Estrategia de Largo Plazo para un Desarrollo Bajo en Emisiones y Resiliente al Clima con la cual busca combatir el aumento de las emisiones en todos los sectores para lograr la neutralidad de CO₂ en 2050 [7]. Otras naciones también presentaron sus estrategias a largo plazo. Por ejemplo, la Unión Europea presentó un plan en marzo de 2020, que apunta a alcanzar la neutralidad climática para 2050. Por su parte China presentó su estrategia en octubre de 2021 y Estados Unidos en noviembre del mismo año [8,9]. Por más que en países desarrollados estas estrategias incluyen medidas de reducción

de emisiones de camiones, necesitan ser más ambiciosas para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París [2].

El sector de transporte se ha comprometido a centrarse en tecnologías alternativas que puedan sustituir a los vehículos convencionales con motor de combustión interna debido al potencial que tienen estos de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero [10–13]. Dentro de las tecnologías de vehículos con energéticos alternativos, se destacan los vehículos eléctricos a batería (BEV) y los vehículos eléctricos a hidrógeno (FCEV). Por un lado, los BEV cuentan con packs de batería que almacenen la electricidad necesaria para accionar al motor eléctrico. Por otro lado los FCEV también son impulsados por electricidad, pero almacenan su energía en forma de hidrógeno, que es convertido a partir de reacciones químicas [14]. Un estudio previo enfocado en el punto de quiebre de los camiones eléctricos en América Latina reveló que tanto Uruguay como Chile están liderando los esfuerzos en alcanzar la paridad de costos totales de propiedad (TCO) entre camiones eléctricos a batería (BEV) y camiones a combustión interna (ICEV) [15]. Estos resultados son fuertes motivadores para conducir este estudio enfocado en Uruguay.

Actualmente ya se están tomando medidas para implementar estas tecnologías, pero será de utilidad cuantificar su impacto para definir en cuáles profundizar su promoción. Con respecto a los BEV se está avanzando en su incorporación en el transporte público con ómnibus y taxis [16]. Sin embargo, los camiones eléctricos medianos recién se están comenzando a adoptar en las empresas. Por otra parte, aunque los FCEV aún no están comercialmente disponibles, en 2021 se comenzó un proyecto piloto en Uruguay de producción de hidrógeno verde, el cual consiste en uno de los primeros pasos para consolidar al país como proveedor y exportador de este producto [17]. Este proyecto incluye un plan para transporte pesado, con el cual se busca atacar a desafíos energéticos actuales, como lo es la dependencia de los combustibles fósiles en el sector industrial.

Debido a la necesidad de generar información acerca de las emisiones de CO₂ [10,11,18], este estudio busca aportar a estos esfuerzos generando información valiosa con respecto a las emisiones en Uruguay. El mayor aporte de valor y objetivo principal del estudio es presentar y analizar escenarios en los cuales se aplican distintas estrategias de reducción de emisiones. Dentro de estas estrategias se incluye el uso de nuevas tecnologías, cuyo correcto análisis en el impacto de las emisiones es fundamental para promover o no su uso.

Las restantes partes de este estudio están estructuradas de la siguiente manera. En primer lugar, la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta una revisión bibliográfica de la temática. Luego, en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se explica la metodología utilizada para calcular las emisiones del sector, en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el cálculo de emisiones de gases contaminantes y en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se analizan proyecciones de escenarios de inserción de la tecnología en Uruguay. Posteriormente, el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las conclusiones y la discusión. Finalmente, la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** detalla los entregables de este capítulo.

2. Revisión bibliográfica

El sector de transporte de carga es fundamental para el desarrollo de las economías [19]. Sin embargo, este sector es uno de los principales causantes del aumento de la contaminación atmosférica, principalmente debida a las emisiones GEI [20].

Las emisiones de contaminantes y el consumo de combustible se deben principalmente al tipo de transporte, el combustible utilizado, la tecnología del motor de combustión, la antigüedad del vehículo y los procedimientos de mantenimiento llevados a cabo [19,20]. Además, los niveles de emisiones pueden ser afectados por factores relacionados a la conducción del vehículo, tales como la cantidad de aceleraciones, las paradas repentinas y el tipo de carretera [20]. Sin embargo, la variable más influyente en las emisiones anuales en un país son las distancias recorridas por estos vehículos [21].

Existen numerosos combustibles utilizados en el sector de transporte, tales como diésel, nafta, gas licuado de petróleo, gas natural, biocombustibles y electricidad, entre otros. Dentro de los combustibles fósiles utilizados para el transporte, la nafta y el diésel son predominantes para el transporte de carga [22,23]. El primero de ellos se encuentra en aplicaciones de vehículos livianos y, el segundo, predominantemente en vehículos pesados [23]. La reacción química de combustión que transcurre en el motor de los vehículos de combustión interna (ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle) tiene como productos principales el dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O) [23]. Sin embargo, debido a que esta reacción no es completa, se tienen subproductos tales como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y material particulado (PM) [23]. Además, se produce la oxidación de elementos no combustibles que dan lugar a emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), debido al nitrógeno (N_2) presente en el aire, y óxidos de azufre (SO_x), debido al azufre presente en los lubricantes [19,23]. Además de las emisiones de escape producto de la reacción de combustión, existen otras emisiones involucradas en el transporte debidas a la evaporación del combustible, al desgaste de neumáticos, frenos y al desgaste de la carretera [23].

Desde 1970 existe legislación europea para controlar las emisiones de los vehículos del sector y desde 1992 los estándares “Euro” son obligatorios en la comunidad europea [23]. Las normativas cada vez más exigentes obligaron a los fabricantes de vehículos a mejorar continuamente la tecnología de los motores a su vez que introdujeron sistemas de control

de emisiones en los vehículos [20,23]. La norma más reciente corresponde a la Euro 6 y reduce algunos de los contaminantes hasta un 96% comparado a los límites establecidos en 1992 [24]. Adicionalmente, la Unión Europea está desarrollando el siguiente estándar de emisiones, Euro 7, y pretende implementarla en 2025 [25]. Esta norma tiene previsto reducir considerablemente las emisiones, lo cual obligará a los fabricantes a mejorar las eficiencias de los motores y los sistemas de control de emisiones [25].

Adicional a las normativas y a las restricciones de emisión, existen otras alternativas para disminuir la contaminación atmosférica que incluye el uso de vehículos con biocombustibles, vehículos eléctricos y vehículos híbridos [23]. Para el transporte de carga, las tecnologías que principalmente se están discutiendo para hacer frente al cambio climático en este sector son los camiones eléctricos a batería y los camiones con celda de combustible [10–13]. A pesar de que se encuentran en la literatura numerosos estudios enfocados en calcular proyecciones e inventarios de emisiones en distintos países causadas por el sector de transporte [18,19,34,35,26–33], los estudios que contemplan la inserción de tecnologías alternativas en la proyección de las emisiones aún son escasos [13,36–38]. Un estudio reciente en Reino Unido toma en cuenta vehículos híbridos enchufables (PHEV) y vehículos a batería de pasajeros para evaluar el efecto que tiene la introducción de estas alternativas en los objetivos de emisiones establecidos [38]. En este estudio se refleja la dificultad de determinar el ritmo de inserción de estas tecnologías en el futuro y se concluye que con el ritmo que se tiene actualmente no se lograría cumplir con los objetivos propuestos, principalmente debido a que los ICEVs se desplazarían del mercado a un ritmo menor que el deseado [38].

La estimación de las emisiones del sector es necesaria para evaluar el impacto de estas, el efecto de las normativas vigentes y la necesidad de acciones para lograr los objetivos medioambientales [27]. La complejidad del cálculo del inventario de emisiones causado por el transporte de carga radica principalmente en la obtención de la información necesaria para la estimación, la correcta segmentación de los tipos de vehículos y la correcta elección de factores de emisión [23,29]. Es por este motivo que se establecen distintos niveles para realizar la estimación, diferenciados por la cantidad de variables necesarias. El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [39] propone una guía basada en tres niveles (Tiers) utilizada por numerosos estudios [23,27]. Cada Tier representa un nivel de complejidad metodológica. El Tier 1 supone el análisis básico, utilizando únicamente el consumo de combustibles y sus respectivos factores de emisión.

No se recomienda el uso de esta metodología por su poco alcance y se cree mandatorio que los países pongan esfuerzos en recopilar la información estadística necesaria para utilizar una metodología de mayor nivel. El Tier 2 toma en cuenta una segmentación de vehículos, los kilómetros diarios y los distintos tipos de combustible. Finalmente, el Tier 3 contempla adicionalmente, información acerca de las velocidades promedio de los vehículos. La herramienta COPERT que es reconocida mundialmente es un ejemplo del alcance del Tier 3 y del alcance bottom-up, explicado a continuación. También existen investigaciones que optan por una versión híbrida entre Tier 2 y Tier 3 [40].

Definidas las variables a utilizar según el nivel, existen dos metodologías comunes para estimar el inventario de emisiones: bottom-up (BU) y top-down (TD) [20]. La primera metodología utiliza factores de emisión específicos para cada tecnología junto con los kilómetros anuales conducidos y la cantidad de vehículos para lograr calcular un inventario anual de emisiones [20,40]. Esta metodología contempla las emisiones a nivel micro y de forma ascendente se agrega la información para lograr niveles macro. Adicionalmente, es muy recomendada por la literatura para evaluar la calidad del aire en zonas donde el transporte es la fuente principal de contaminación [37,41] y es la metodología adoptada por el United States Environmental Protection Agency [20]. Por otro lado, el estudio top-down utiliza datos reales a partir del monitoreo de la contaminación ambiental o inventarios nacionales existente [42]. Luego, en el caso del transporte de carga, se desagrega la información con datos acerca de la población residente, las ventas de combustible, la longitud de las carreteras, entre otros [41,42]. A pesar de que las metodologías son complementarias e incluso se recomienda utilizar ambas a modo de verificación, el alcance del BU se basa en una elección de parámetros más transparente que implica una estimación más sólida [29,37]. Además, existen otras alternativas para la verificación de las estimaciones tales como estimar las emisiones a partir de los consumos nacionales de combustibles y verificar con los inventarios calculados por instituciones nacionales, en el caso de que el país lo realice [37,39,41].

La fiabilidad de los resultados de los cálculos, más que recaer en la metodología escogida, recae sobre la calidad de los datos que se utilizan. Los factores de emisión constituyen uno de los parámetros más complejos para definir [29,32]. Estos se obtienen a través de mediciones y pruebas de ciclos de conducción, y dependen esencialmente de la calidad del combustible, el tipo de vehículo, la antigüedad, los factores climáticos presentes así como políticas de control de emisiones, entre otros [20,23,32,42]. El factor de emisión se

define como “la masa de contaminante emitida por un vehículo cuando se conduce una cierta distancia, generalmente expresada en g/km” [20]. Existen muchas estimaciones de los factores de emisión realizados tanto por instituciones internacionales, como por países. El IPCC [39] y la European Environment Agency (EEA) [23] proporcionan la base de datos de factores de emisión más utilizadas en estudios internacionales cuando no se disponen de datos locales. Incluso, un estudio realizado por la EEA [23] prueba la consistencia entre las dos fuentes de información.

Cuando se trata de vehículos eléctricos puros, las emisiones de CO₂ en el escape son cero y, según el alcance del análisis, las únicas emisiones que se deben tener en cuenta son fruto de la producción de electricidad [23]. Es por este motivo por el cual en regiones en donde la generación de energía es mayoritariamente en base a fuentes renovables, la incorporación de estos vehículos al transporte de carga puede significar una disminución significativa en las emisiones de GEI y otros contaminantes [13]. Además, la cuantificación de las emisiones producidas por el transporte de carga es fundamental para acelerar la implementación de tecnologías y políticas con medidas de mitigación de emisiones [19].

En Uruguay, se han realizado numerosos estudios acerca de la cuantificación de emisiones generadas por distintos sectores. En 1997 la Unidad de Cambio Climático (UCC) realizó los primeros estudios e inventarios de GEI tomando como año base 1990 [43]. Adicionalmente, la Dirección Nacional de Energía (DNE) del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) recaba anualmente en el Balance Energético Nacional los datos de consumo total de energía del sector energético y, desde 2012, incluye las emisiones de CO₂ en Uruguay. También se realizan anualmente los inventarios de gases de efecto invernadero (INGEI) emitidos y capturados por los sectores: Energía, Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU), Agricultura, Silvicultura y otros Usos de la Tierra (AFOLU) y Desechos [44]. El reporte que cuantifica y recopila estos resultados aplica la metodología de Tier 1, planteada por el IPCC [39] y mencionada anteriormente, con el objetivo de desarrollar políticas nacionales que contribuyan a la descarbonización [44]. Además, se realiza el análisis top-down y se plantea como futura mejora la desagregación de la información según tipos de vehículos [44].

Sin embargo, ninguno de los estudios mencionados previamente muestra las emisiones generadas específicamente por el sector de transporte de carga. M. Aresti (2016) [43]

utiliza la metodología propuesta por el IPCC y el modelo COPERT 4 para cuantificar las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O del sector. Adicionalmente, el Centro de Innovación en Organización Industrial (CINOI) realizó en 2019, junto al Ministerio de Transporte y obras Públicas (MTOP) una cuantificación de las emisiones de GEI del sector. Este estudio incorporó además las proyecciones de emisiones con la incorporación de camiones eléctricos [45]. Finalmente, proyecciones similares son incluidas en la Estrategia Climática de Largo Plazo en Uruguay con el objetivo de alcanzar la neutralidad de CO₂ en 2050 [46].

3. Metodología

En primer lugar, los gases de efecto invernadero (GEI) pueden ser divididos en dos grupos. Por un lado, se encuentran los gases directos que contribuyen al efecto invernadero tal como son emitidos a la atmósfera. Estos gases son el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFCs), hexafluoruro de azufre (SF_6) y perfluorocarbonos (PFC) [47]. Por otro lado, se encuentran los gases precursores de ozono troposférico que además de contaminar la atmósfera se convierten en gases de efecto invernadero directos y son: monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos distintos del metano (COVDM), óxidos de nitrógeno (NO_x , que incluyen NO y NO_2) y dióxido de azufre (SO_2) [47]. En este estudio se contemplan, dentro de los GEI directos, el CO_2 , N_2O y el CH_4 debido a que estos gases son los más significativos en cuanto al aporte al calentamiento global [48]. También se toman en cuenta, dentro de los gases precursores de ozono troposférico, los NO_x y el CO debido a la relevancia de estos contaminantes en los avances de las normativas Euro. Además, estos contaminantes se asocian a la emisión de N_2O conforme los convertidores catalíticos de los vehículos se vuelven más eficientes en la reducción de CO y NO_x , debido a la oxidación de estos [49]. Estas oxidaciones ocasionan que el NO reaccione con el nitrógeno presente en la superficie del catalizador y se forme N_2O [49].

Las metodologías propuestas por el IPCC [39] y EEA [23] para el cálculo de las emisiones de estos gases son reconocidas y aplicadas ampliamente por instituciones internacionales y países. Se utilizarán dos metodologías, en las cuales las emisiones se pueden estimar a partir del combustible consumido, que se puede tomar como el combustible vendido, o a partir de la distancia recorrida por los vehículos [39]. En general, debido a que las emisiones del CO_2 dependen principalmente del contenido de carbono del combustible, se utiliza el primer método de cálculo. En cuanto a las emisiones del CH_4 , N_2O , CO y NO_x , estas varían en función de varios factores, tales como la normativa de emisión y la clasificación de peso bruto, y es por este motivo que se utiliza comúnmente el segundo método presentado.

Tal como fue mencionado en la sección anterior, existen diversos alcances para realizar estos cálculos, definidos por la cantidad y calidad de datos disponibles. En este estudio, el cálculo de las emisiones de CO_2 fueron realizadas con un Tier 1 mientras que el cálculo de las emisiones de N_2O , CH_4 , CO y NO_x fueron realizadas con un Tier 2. Por otro lado,

la información disponible para realizar este estudio permitió utilizar un análisis del tipo bottom-up. Para ambos casos fue necesario conocer la flota nacional de camiones y sus respectivas categorías en función del peso bruto total combinado.

Finalmente, con el objetivo de verificar la metodología de cálculo de CO₂ se utilizó el consumo de diésel anual por el sector transporte proporcionado por el BEN [6].

3.1 Flota nacional y segmentación de vehículos

Para determinar los camiones presentes en la flota uruguaya se utilizaron varias fuentes. Por un lado, se utilizó una base de datos de los camiones registrados hasta 2014 en Uruguay, compilada por la Sociedad Uruguaya de Control Técnico Automotriz (SUCTA). En esta se registran el modelo de camión, año de fabricación, peso bruto total combinado (PBTC), y los kilómetros recorridos por ese camión en los años 2013 y 2014. Esta base de datos fue actualizada con datos de SUCTA de 2017 y con datos de 2021 de APPLUS, sucesora de SUCTA. La base de datos final incluye los camiones habilitados actualmente a circular en Uruguay, sus modelos, su año de fabricación y su peso bruto total combinado. Además, se realizaron estimaciones de sus kilómetros recorridos en 2021 a partir de los kilómetros recorridos en 2013 y 2014 y su normativa Euro.

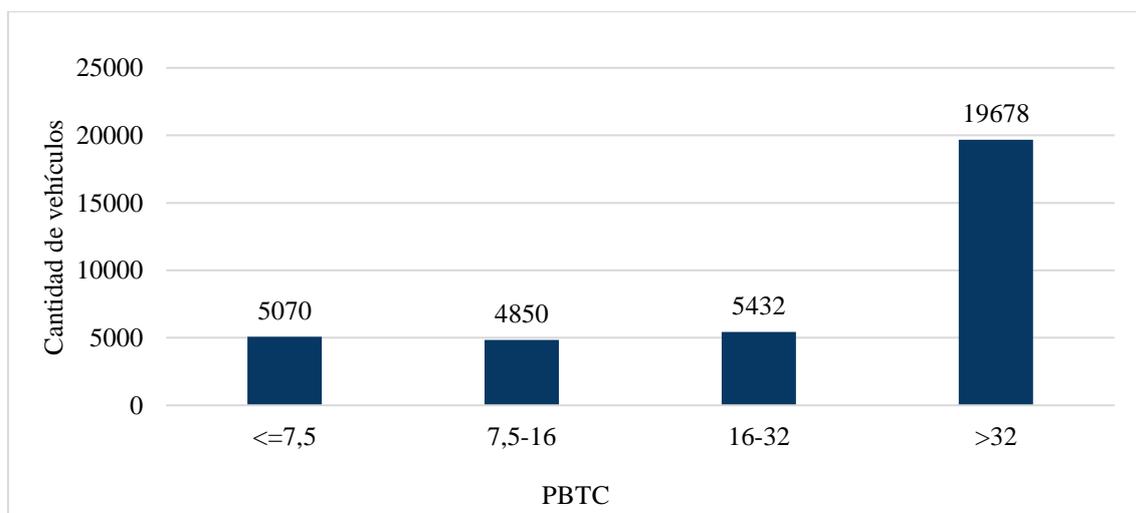
Para presentar los datos acumulados obtenidos, se utilizó la segmentación de vehículos según los rangos de pesos utilizados propuesta por EEA en el documento Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016 [23]. Estos datos acumulados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos acumulados de flota nacional de camiones

PBTC	Normativa	Cantidad	km promedio
≤7.5	Previo	240	67.125
	Euro 1	15	112.639
	Euro 2	1.112	40.191
	Euro 3	3.235	49.247
	Euro 4	466	26.417
	Euro 5	2	59.124
7,5 – 16 inc.	Previo	177	129.828
	Euro 1	24	130.469
	Euro 2	661	50.890
	Euro 3	3.747	53.505
	Euro 4	69	27.314
	Euro 5	172	78.401
16 – 32 inc.	Previo	2.767	85.724
	Euro 1	787	59.262
	Euro 2	259	56.869
	Euro 3	1.277	56.211
	Euro 4	0	0
	Euro 5	342	72.760
>32	Previo	2.593	92.760
	Euro 1	1.566	79.895
	Euro 2	1.802	77.701
	Euro 3	12.526	92.457
	Euro 4	133	55.880
	Euro 5	1.058	86.899

A continuación, se puede observar cómo está segmentada la flota de camiones en Uruguay. En la Figura 1 se presenta la cantidad de vehículos según su peso bruto combinado total (PBTC).

Figura 1: Segmentación de flota de camiones uruguayana según peso bruto total



Por otro lado, en la Figura 2 se presenta la segmentación según categoría Euro. Se destaca que más de la mitad de los camiones uruguayos son Euro 3, y un 34% no alcanza esta categoría. Solamente un 7% de los camiones supera el Euro 3. Esta situación se debe principalmente a que, según el decreto N° 111/008, desde 2008 no se permite adquirir camiones nuevos que no cumplan con la normativa Euro 3 [50]. Uniendo las figuras anteriores se obtiene la Figura 3.

Figura 2: Segmentación de flota de camiones uruguayos según normativa Euro

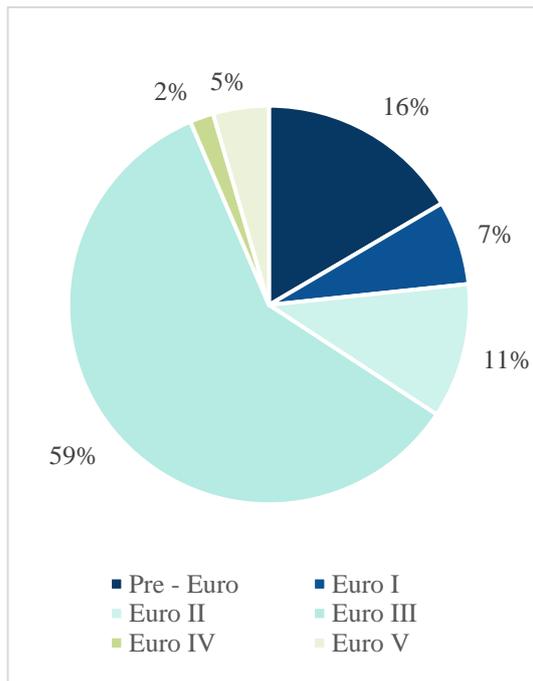
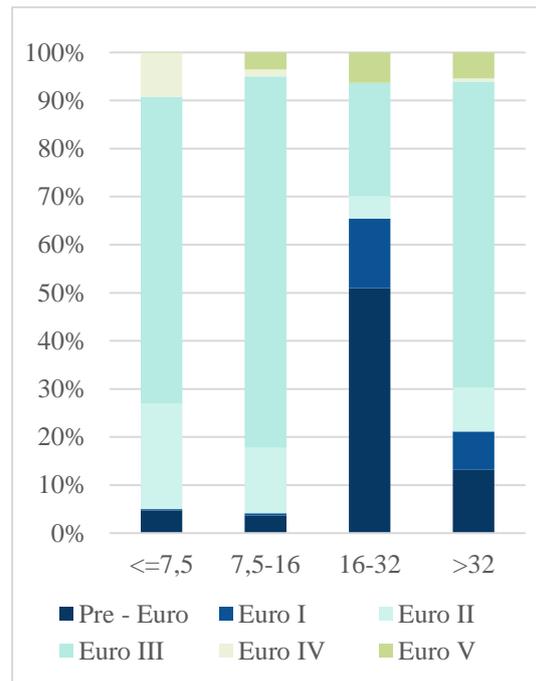


Figura 3: Segmentación de flota de camiones uruguayos según peso bruto total y normativa Euro



3.2 Cálculo de emisiones CO₂

La estimación de las emisiones de CO₂ es comúnmente calculada en función del combustible consumido y su contenido de carbono [39]. Para este cálculo la IPCC propone dos alcances distintos. En primer lugar, el Tier 1 propone calcular las emisiones de CO₂ mediante la multiplicación del combustible vendido con un factor de emisión de CO₂ de literatura. Por otro lado, el alcance del Tier 2 utiliza la misma metodología excepto que el factor de emisión utilizada corresponde al específico de la región o país en donde se halla.

Debido a que en Uruguay no existen cálculos de factores de emisión adaptados a las condiciones nacionales [51], se optó por utilizar el alcance del Tier 1 propuesto por la IPCC [39] y se hallaron las emisiones de CO₂ según la Ecuación 1.

Ecuación 1: Cálculo de emisiones de CO₂

$$Emisiones = \sum_a (Combustible_a * EF_a)$$

En la cual:

- Emisiones= emisiones de CO₂ (kg)
- Combustible_a= combustible del tipo a consumido (TJ)
- EF_a= Factor de emisión del combustible a (kg/TJ)

En este estudio, el único combustible tomado en cuenta es el diésel, por ende, la sumatoria resulta en un único término. La obtención de la cantidad de combustible consumido fue hallada a partir de las distancias totales recorridas por los vehículos. El cálculo se puede ver en la Ecuación 2 y posteriormente se detallan los factores involucrados y la metodología utilizada para hallarlos.

Ecuación 2: Cálculo de emisiones de CO₂ con desarrollo de combustible consumido

$$Emisiones(kg) = \sum_{ij} \frac{K_{ij}(km) * C \left(\frac{tep}{m^3} \right)}{P_i \left(\frac{km}{l} \right) * 1000 \left(\frac{l}{m^3} \right) * 1000 \left(\frac{tep}{ktep} \right)} * EF \left(\frac{kg}{TJ} \right) * 41,868 \left(\frac{TJ}{ktep} \right)$$

En la cual:

- Emisiones = emisiones de CO₂ (kg)
- K = distancia promedio recorrida anual total por los vehículos de categoría i con normativa j (km)
- C = factor de conversión (tep/m³)
- P = rendimiento de los vehículos de categoría i (km/l)
- EF= factor de emisión (kg/TJ)

Por un lado, las distancias recorridas promedio anuales (K_{ij}) por los vehículos de cada categoría y normativa fueron detalladas en el apartado anterior (*¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*). El factor de conversión (C) define la energía contenida en un volumen de energía y se utiliza 0,7890 tep/m³, valor que se encuentra en el BEN [51]. Para los rendimientos de los camiones de cada categoría, se utilizó un estudio realizado previamente por Tanco (2018) [15]. En este estudio se consideran categorías de camiones

y se halla en base a la literatura los rendimientos para condiciones de distribución urbana, suburbana y larga distancia. Además, se diferencian los rendimientos en función del porcentaje de carga del camión (50% o 100%). A los efectos de este análisis, se toman los promedios de los rendimientos para cada condición de operación cuando el camión tiene un 50% de carga. Los valores utilizados se encuentran en la Tabla 2. En cuanto al factor de emisión utilizado para el diésel se utilizó el valor de 74.100 (kg/TJ) obtenido de la base de datos de factores de emisión de IPCC [39] debido a que no existe este dato para el país.

Tabla 2: Rendimientos promedio según categoría

Categoría	Rendimiento (km/l)
≤7,5 ton	6,20
7,5 – 16 ton	4,35
16 – 32 ton	2,49
> 32 ton	2,49

3.2.1 Validación de cálculo de CO₂

El Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016 de EEA [23] recomienda calcular un balance de combustible para corroborar que todo el combustible utilizado realmente haya sido tomado en cuenta en los cálculos de emisiones. Cuando se realizan comparaciones entre combustibles se suele utilizar un balance energético, ya que cada combustible tiene poderes caloríficos distintos. Es por este motivo que en este estudio se utiliza un balance energético para el diésel.

En la Ecuación 3 se presenta la energía consumida por el sector transporte, a partir del cálculo de emisiones de la sección anterior.

Ecuación 3: Cálculo de energía consumida por el sector transporte

$$\text{Energía teórica (ktep)} = \frac{\text{Emisiones de CO}_2(\text{kg})}{EF \left(\frac{\text{kg}}{\text{TJ}}\right) * 41,868 \left(\frac{\text{TJ}}{\text{ktep}}\right) * \%_{\text{gasoil destinado a transporte por calle}}}$$

En la cual:

- Energía teórica = Energía que consumieron los camiones según los cálculos de emisiones realizados anteriormente en ktep
- Emisiones de CO₂ = Emisiones calculadas con la metodología explicada en la sección 3.2 en kg de CO₂

- EF = factor de emisión de combustible diésel (kg/TJ) = 74.100 (kg/TJ) [39]
- %gasoil destinado a transporte por calle = 99% [6]

Para hacer la validación se compara la energía calculada de la Ecuación 3 con la energía consumida por el sector transporte según reportado por el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) [6]. La metodología del cálculo de la variación entre estos dos valores se presenta en la Ecuación 4.

Ecuación 4: Cálculo de la variación entre energía consumida por el sector transporte teórica y real

$$\text{Variación (\%)} = \frac{\text{Energía teórica (ktep)} - \text{Energía real(ktep)}}{\text{Energía teórica(ktep)}} * 100$$

3.3 Cálculo de emisiones N₂O, CH₄, CO y NO_x

La emisiones de N₂O, CH₄, CO y NO_x dependen estrechamente de la tecnología de combustión y del control de emisiones presente en los vehículos [39] diferenciados en este estudio según las distintas normativas Euro. Es por este motivo por el cual, tanto la metodología de cálculo de estas emisiones propuesta por IPCC, como la propuesta por EEA, sugieren utilizar Tiers mayores, preferentemente el Tier 2 y Tier 3.

Por un lado, el Tier 2 toma en cuenta el combustible utilizado por cada clase de vehículos según las normas Euro y sus respectivos estándares de emisión [23]. Por otro lado, el Tier 3 hace una diferenciación entre dos tipos de emisiones: aquellas que se dan cuando está operando en condiciones normales y aquellas emisiones durante el funcionamiento transitorio del motor [23].

Para este estudio, se optó por utilizar el Tier 2 debido a la disponibilidad de información. En la Ecuación 5 se muestra el método de cálculo de las emisiones de N₂O, CH₄, CO y NO_x.

Ecuación 5: Cálculo de emisiones de N₂O, CH₄, CO y NO_x

$$\text{Emisiones}_i = \sum_{j,k} N_{j,k} * M_{j,k} * EF_{i,j,k}$$

En la cual:

- Emisiones = emisiones del contaminante i
- N_{j,k}= cantidad de vehículos de la categoría j y normativa k
- M_{j,k} = distancia promedio recorrida por los vehículos de la categoría j y normativa k (km)

- $EF_{i,j,k}$ = factores de emisión del contaminante i para la categoría de vehículo j y la normativa k (g/km)

Tanto la distancia promedio recorrida por los vehículos y la cantidad de vehículos fueron detalladas anteriormente. Los factores de emisión de los gases fueron extraídos de EEA [23] y se muestran en la Tabla 3. Por un lado, los factores de emisión de N_2O , CO y NO_x fueron directamente extraídos según categoría de vehículo y normativa. En el caso de los factores de emisión de NO_x , estos se encuentran expresados en NO_2 equivalente. Por otro lado, los factores de emisión del CH_4 son proporcionados en función del tipo de operación y del peso bruto total. Para la categoría de vehículos con peso bruto total menor a 7,5 toneladas, los factores de emisión proporcionados por EEA [23] se distinguen entre factores de emisión en operación normales y transitorias. Para esta categoría se supuso un tipo de transporte urbano y se realizó un promedio de los dos factores mencionados. Para las demás categorías de vehículos se utilizaron los factores de emisión propuestos por EEA [23], que corresponden a transporte por carretera. Un resumen de los factores de emisión utilizados se encuentra en la Tabla 3.

Tabla 3: Factores de emisión utilizados.

Categoría	Normativa	N ₂ O (g/km)	CH ₄ (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)
≤7,5 ton	Previo	0,029	0,025	1,85	4,70
	Euro I	0,005	0,0145	0,66	3,37
	Euro II	0,004	0,0065	0,54	3,49
	Euro III	0,003	0,003	0,58	2,63
	Euro IV	0,006	0,0011	0,047	1,64
	Euro V	0,017	0,0000075	0,047	0,93
7,5 – 16 ton inc.	Previo	0,029	0,02	2,13	8,92
	Euro I	0,008	0,02	1,02	5,31
	Euro II	0,008	0,02	0,90	5,50
	Euro III	0,004	0,02	0,97	4,30
	Euro IV	0,012	0,02	0,071	2,65
	Euro V	0,034	0,07	0,071	1,51
16 – 32 ton inc.	Previo	0,029	0,07	1,93	10,7
	Euro I	0,008	0,07	1,55	7,52
	Euro II	0,007	0,07	1,38	7,91
	Euro III	0,004	0,07	1,49	6,27
	Euro IV	0,012	0,07	0,11	3,83
	Euro V	0,034	0,07	0,11	2,18
> 32 ton	Previo	0,029	0,07	2,25	12,8
	Euro I	0,012	0,07	1,90	9,04
	Euro II	0,012	0,07	1,69	9,36
	Euro III	0,007	0,07	1,79	7,43
	Euro IV	0,018	0,07	1,12	4,61
	Euro V	0,053	0,07	1,12	2,63

3.4 Cálculo de CO₂ equivalente

El dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq) es un término que se utiliza para contabilizar los distintos gases de efecto invernadero en una unidad en común. Para una determinada cantidad de GEI, el CO₂-eq se refiere a la cantidad de CO₂ que tendría un impacto de calentamiento global equivalente [52]. Para hallar el CO₂-eq de un gas se utiliza su índice de “potencial de calentamiento global” (GWP: Global Warming Potential), el cual indica la cantidad de calentamiento global que causa en un determinado período de tiempo en comparación con el CO₂ [52]. En la

Ecuación 6 se muestra el cálculo del CO₂-eq contemplando distintos GEI y la Tabla 4 muestra los GWP de los gases en cuestión.

Ecuación 6: Cálculo de dióxido de carbono equivalente

$$\text{CO}_2 - \text{eq} = \sum_i M_i * \text{GWP}_i$$

Donde:

- $\text{CO}_2\text{-eq}$ = Dióxido de carbono equivalente
- M_i = masa de gas de efecto invernadero i
- GWP_i = potencial de calentamiento global de gas de efecto invernadero i

Tabla 4: Potencial de calentamiento global de gases de efecto invernadero

Gas de efecto invernadero	Potencial de calentamiento global (GWP)
CO₂	1
N₂O	298
CH₄	25

4. Cálculo de emisiones

Utilizando los criterios y procedimientos explicados anteriormente, en la Tabla 5 se observa el cálculo del inventario de GEI para los años 2014, 2016, 2018 y 2021, utilizando los datos de la flota nacional correspondientes a cada año [53]. Además, la tabla muestra el aumento promedio anual considerando el período 2014-2021.

Tabla 5: Emisiones de GEI para los años 2014, 2016, 2018 y 2021 y variación promedio anual

GHG	2014	2016	2018	2021	Aumento promedio anual
CO ₂ (ton)	1.671.515	1.834.206	1.894.477	2.327.322	4,84%
CH ₄ (ton)	127	136	139	158	3,17%
N ₂ O (ton)	27	30	32	35	3,78%
CO ₂ -eq (ton)	1.682.736	1.846.546	1.907.488	2.341.702	4,83%

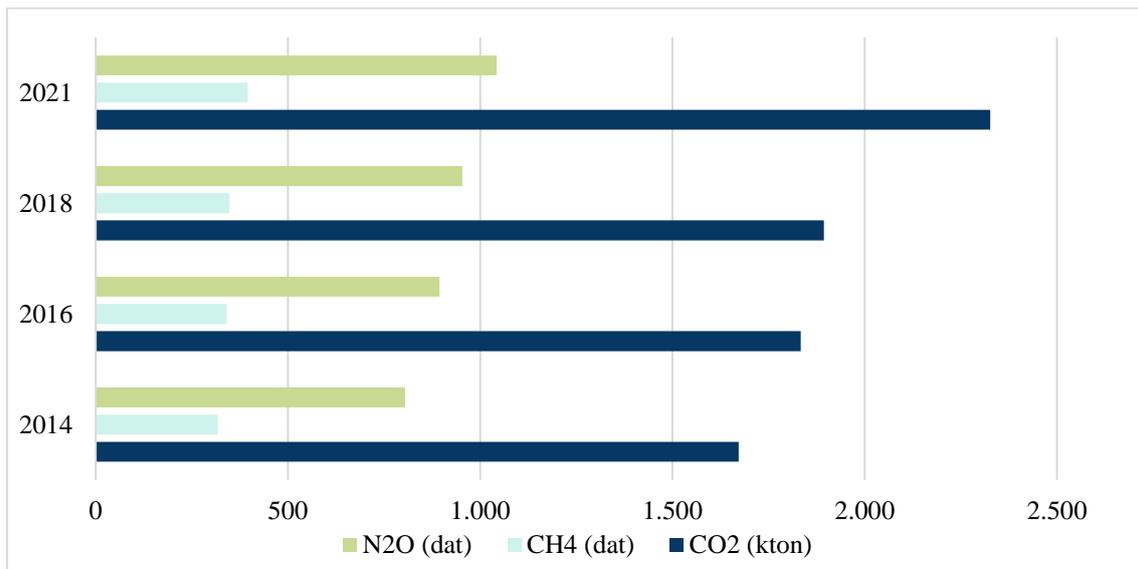
En cuanto a la evolución de estas emisiones, en el caso de las emisiones de CO₂ se puede observar un aumento promedio anual de 4,84%. En el período de 2014 a 2016 el aumento anual fue de 4,75%, seguido de un aumento del 1,63% anual en el intervalo del 2016 al 2018. Finalmente, el intervalo del 2018 al 2021 muestra un aumento anual del 7,1% en las emisiones. El aumento significativo en el último período puede deberse a que entre 2021 y 2018 ingresaron al país 5106 unidades de camiones mientras que, en los períodos anteriores, esta cifra fue de 2699 entre 2014 y 2016 y tan solo 763 entre 2016 y 2018.

Con respecto al CH₄ y N₂O, estos tuvieron incrementos promedios anuales similares, de 3,17% y 3,78%, respectivamente. En el intervalo del 2014 al 2016 los aumentos fueron del 3,48% y 5,4%, mientras que, en el segundo intervalo, los incrementos fueron de 1,1% y 3,3% respectivamente. Por último, las emisiones de CH₄ y N₂O presentaron un incremento anual del 4,36% y 3,03% en el tercer intervalo estudiado. Estos incrementos pueden verse afectados por la implementación de nuevas tecnologías de control de emisiones en las nuevas incorporaciones de vehículos desde 2008, que comienzan a adquirir relevancia al tiempo que los vehículos anteriores pasan a quedar en desuso. La normativa actual en Uruguay es la 111/008 [50], la cual prohíbe el ingreso al país de cualquier tipo de vehículo con tecnología de emisiones inferior a Euro III. Esta norma será sustituida por el decreto 135/021 [54], donde se indica que a partir de 2023 solo se permitirá el ingreso de vehículos con tecnología de emisiones Euro V o superior. Tal como fue mencionado en la sección anterior, a medida que los vehículos adoptan

normativas Euro más exigentes, mayores son las restricciones de emisiones de contaminantes precursores de ozono. Al oxidar estos contaminantes en los convertidores catalíticos, aumentan las emisiones de las emisiones de N₂O producto de las reacciones químicas que tienen lugar en la superficie del instrumento. Es por este motivo que es de esperarse que aumenten las emisiones de estos gases y se vuelve necesario considerar en el análisis las emisiones de NO_x y CO.

Por otro lado, el inventario de CO₂-eq para los períodos analizados muestra la baja influencia de las emisiones de N₂O y CH₄ frente a las emisiones de CO₂. Esto se puede ver de manera gráfica en la Figura 4, que muestra la evolución de las emisiones para los años estudiados. Cabe destacar que, con la finalidad de poder comparar las emisiones, se muestran las emisiones de CO₂ en kilotoneladas mientras que las emisiones de N₂O y CH₄ se muestran en decatoneladas (dat).

Figura 4: Evolución de las emisiones para los años 2014, 2016, 2018 y 2021



Finalmente, como se menciona anteriormente, los cálculos de las emisiones de CO₂ pueden ser validados al observar el consumo de energía debido al transporte de carga en los años correspondientes. El consumo de energía es presentado de forma anual en el informe del Balance Energético Nacional [55], donde además se especifica el porcentaje de gasoil consumido dedicado al transporte carretero. La Tabla 6 contiene la variación de los cálculos de emisión transformados a energía frente a los valores de consumo registrados. La variación correspondiente al año 2021 no fue hallado debido a que aún no se encuentra disponible en Balance Energético Nacional de este año.

Tabla 6: Variación en las emisiones calculadas frente al consumo registrado en el BEN

	2014	2016	2018	2021
Variación	-8,9%	0.83%	3,2%	-

Como se puede apreciar, los valores comparados varían de forma muy pequeña, considerando los distintos orígenes de los valores calculados.

5. Escenarios futuros

Anteriormente se mostró la evolución y la situación actual de las emisiones del sector de transporte de carga, la cual sirve como punto de partida para realizar proyecciones futuras. Actualmente, se encuentra vigente la Estrategia de Largo Plazo para un Desarrollo Bajo en Emisiones y Resiliente al Clima, en la cual Uruguay se comprometió a la neutralidad de CO₂ en 2050. Esto supone esfuerzos tanto de mitigación como de eliminación de emisiones de este tipo en todos los sectores productivos. Particularmente, en el sector de transporte la estrategia establecida apuesta fuertemente en las tecnologías verdes de cero emisiones.

Con el objetivo de evaluar bajo qué escenarios se podrá cumplir con lo establecido, se han considerado tres escenarios que muestran la evolución del transporte de carga en Uruguay bajo distintos criterios de adopción de tecnologías y normativas, tomando en cuenta las proyecciones económicas integrales y las políticas futuras que serán implementadas en el país. Se considera para cada escenario la misma tasa de aumento de flota anual. Dadas las premisas normales establecidas por el MIEM para el crecimiento socioeconómico [56] se considera un crecimiento promedio anual del 1,5% en la cantidad de camiones en circulación.

El primer escenario considerado corresponde al Escenario de Referencia (ER), el cual describe un futuro en el que la actividad de transporte y el desarrollo tecnológico siguen las tendencias históricas. Tal como fue mencionado en la sección de segmentación vehicular y flota nacional, la normativa Euro III es la mayormente adoptada por el sector. De esta forma, se considera que el transporte pesado no se convierte en tecnologías alternativas de tren motriz, sino que las incorporaciones de vehículos cumplen con la normativa Euro III.

Se consideraron dos escenarios alternativos que presentan distintas posturas frente a las políticas a desarrollar en el futuro. A continuación, se detalla cada uno de ellos.

- Escenario de Políticas Establecidas (EPE): este escenario es central en los informes del organismo Energy Technology Perspectives [57], donde se ilustran los efectos de las medidas vigentes y anunciadas. Se toman en cuenta las regulaciones a aplicarse en el futuro, así como los distintos niveles de incentivos programados desde los gobiernos. Además, se incluyen los planes de expansión

proyectados por los fabricantes con respecto a los modelos disponibles de vehículos eléctricos.

- Escenario de Desarrollo Sostenible (EDS): este escenario sitúa las perspectivas del IEA en base a sus publicaciones [57]. Hay tres pilares en el Escenario de Desarrollo Sostenible. Estos son: garantizar el acceso universal a la energía para todos para 2030; lograr fuertes reducciones en las emisiones de contaminantes atmosféricos; y cumplir con los objetivos climáticos globales en línea con el Acuerdo de París. El Escenario de Desarrollo Sostenible se basa en limitar el aumento de la temperatura global por debajo de 1,7-1,8 grados centígrados con un 66% de probabilidad.

En estos escenarios se tienen, por un lado, el incremento de la flota vehicular y, por otro lado, la sustitución de la flota por vehículos eléctricos. A diferencia del Escenario de Referencia, tanto el EPE como EDS considera la incorporación de vehículos a combustión interna con normativa Euro V, lo cual está alineado con la legislación uruguaya, que no permitirá el ingreso de camiones con estándares menores en 2023. Para la sustitución por vehículos eléctricos, se toman en cuenta proyecciones mundiales de stock de estos vehículos [58]. La Tabla 7 muestra el porcentaje de stock en vehículos con tecnología alternativa para cada período de cinco años hasta 2050. Estos porcentajes de stock son promedios entre todas las regiones que considera el estudio (Europa, Estados Unidos, China, Japón, India y Otras regiones) y están segmentados en dos categorías: vehículos eléctricos ligeros (LDV) con un PBTC menor o igual a 7,5 toneladas y vehículos eléctricos de servicio mediano-pesado (MHDV), que están por encima de 7,5 toneladas PBTC. De esta forma, los porcentajes presentados en la tabla muestran el porcentaje de stock de cada segmento para cada escenario y año. Para contemplar estos niveles de stock de vehículos eléctricos, se supone que la sustitución se realiza mediante la eliminación de los camiones más antiguos y con normativa Euro menor presentes en la flota vehicular. Adicionalmente, cuando se realiza la sustitución de ICEV por BEV o FCEV, se considera que estos últimos no emiten CO₂, lo cual es una aproximación acertada debido a que Uruguay tiene un matriz energética 95% renovable (en promedio desde 2016 a 2021) [59].

Tabla 7: Proyecciones para stock de camiones con tecnologías alternativas en las próximas décadas para los escenarios EPE y EDS

Escenarios		2025	2030	2035	2040	2045	2050
EPE	LDV	3%	8%	16%	24%	32%	40%
	MHDV	0.5%	1%	3%	7%	18%	35%
EDS	LDV	5%	14%	19%	30%	40%	50%
	MHDV	1.5%	3%	6%	12%	24%	45%

El segmento de vehículos livianos presenta un 3% de stock para 2025 en el escenario EPE, mientras que para el 2030, este número se eleva a un 8%. Para el mismo año, el escenario EDS proyecta un stock del 14%, incrementando a un 19% en 2035, a un 30% en 2040 y finalmente a un 50% del stock total en 2050 [57].

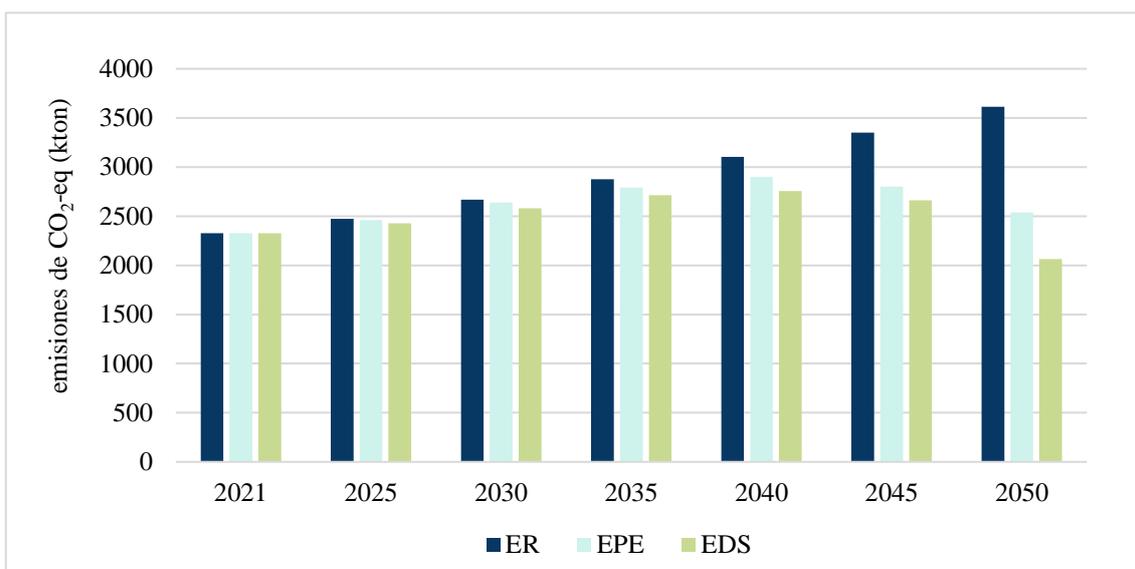
En cuanto a los vehículos pesados, la electrificación progresiva del sector del transporte por carretera para 2030, en ambos escenarios, viene acompañada del surgimiento y consolidación de otras tecnologías de propulsión apoyadas por los gobiernos [57]. Para 2030, el stock de camiones eléctricos cubre el 1% y el 3% del stock total para cada escenario. Los vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEV) comienzan a abrirse camino, con autos FCEV disponibles comercialmente y ventas crecientes en segmentos de largo alcance, y se están anunciando más modelos de camiones FCEV [60]. Sin embargo, su cuota de mercado sigue siendo baja durante la década de 2030, alcanzando el 1% de las ventas mundiales de automóviles para 2030 en la EDS. Se espera que, con el aprendizaje tecnológico, las ventas de FCEV se aceleren después de 2030. Para 2040, el EPE muestra una participación del 7% en camiones eléctricos, mientras que el EDS alcanza una participación del 12% en este segmento. Finalmente, en 2050 se muestran grandes avances en este segmento de carga, alcanzando una representación del 35% de la flota vehicular nacional en el escenario más pesimista (EPE) y un 45% en el escenario más optimista (EDS). La Tabla 8 muestra, a modo de ejemplo, el stock de camiones convencionales en el escenario de EDS. Se observa que este escenario supone que la totalidad de camiones entre 7,5 y 32 toneladas sean eléctricos. En la Tabla A 1 y Tabla A 2 de los Anexos se muestran los escenarios de referencia y de políticas actuales.

Tabla 8: Proyecciones de flota nacional en escenario de desarrollo sostenible (EDS)

Categoría	Normativa	2021	2025	2030	2035	2040	2045	2050
≤7,5 ton	Previo	240	0	0	0	0	0	0
	Euro I	15	0	0	0	0	0	0
	Euro II	1.112	1.098	552	173	0	0	1.112
	Euro III	3.235	3.235	3.235	3.235	2.565	1.669	387
	Euro IV	466	466	466	466	466	466	466
	Euro V	2	321	752	1.218	1.721	2.264	2.851
7,5 – 16 ton inc.	Previo	177	18	0	0	0	0	0
	Euro I	24	24	0	0	0	0	0
	Euro II	661	661	458	119	0	0	0
	Euro III	3.747	3.747	3.747	3.747	3.004	1.143	0
	Euro IV	69	69	69	69	69	69	0
	Euro V	172	478	890	1.335	1.816	2.336	0
16 – 32 ton inc.	Previo	2.767	2.608	2.423	2.024	1.162	0	0
	Euro I	787	787	787	787	787	88	0
	Euro II	259	259	259	259	259	259	0
	Euro III	1.277	1.277	1.277	1.277	1.277	1.277	0
	Euro IV	0	0	0	0	0	0	0
	Euro V	342	684	1.146	1.645	2.184	2.766	0
> 32 ton	Previo	2.593	2.434	2.249	1.850	988	0	0
	Euro I	1.566	1.566	1.566	1.566	1.566	693	0
	Euro II	1.802	1.802	1.802	1.802	1.802	1.802	0
	Euro III	12.526	12.526	12.526	12.526	12.526	12.526	10.764
	Euro IV	133	133	133	133	133	133	133
	Euro V	1.058	2.298	3.971	5.778	7.730	9.838	12.115

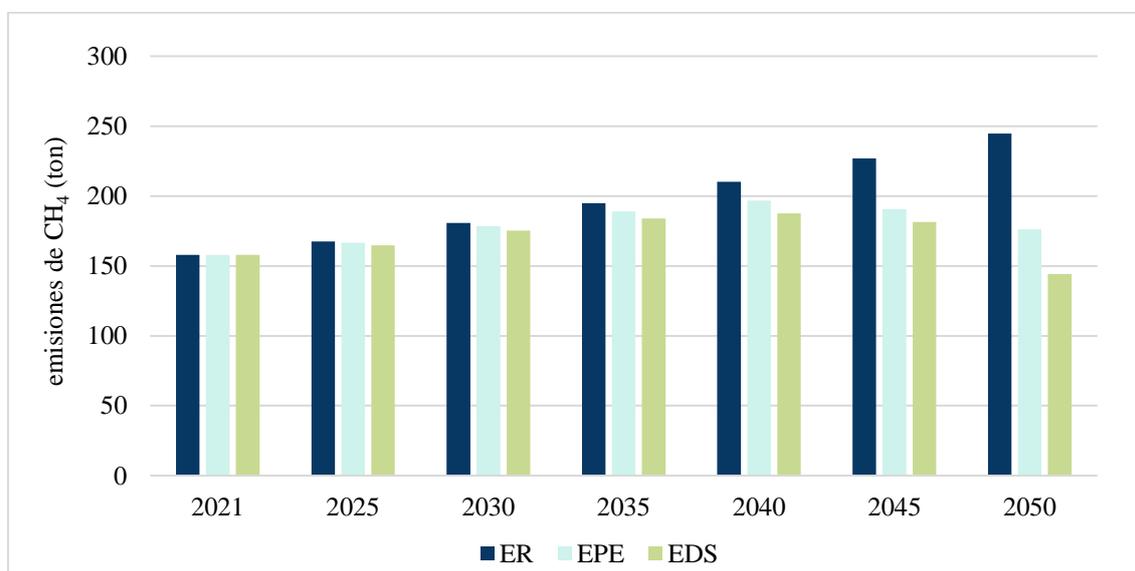
A continuación, se analizan las tendencias de las emisiones de CO₂-eq, N₂O y CH₄ en función de los escenarios mencionados anteriormente. El escenario de referencia de la Figura 5 muestra que de 2021 a 2050, las emisiones de CO₂-eq podrían aumentar un 55,3% mientras que en el escenario de políticas actuales el aumento sería mucho más bajo (9,1%). El caso más favorable se da en el escenario de desarrollo sostenible, cuando la incorporación de camiones eléctricos es mayor, dado que en 2050 las emisiones se encontrarían un 11,3% por debajo de las emisiones de hoy en día. Adicionalmente se observa que 2040 es el año de quiebre de las emisiones, debido a que comienzan a disminuir en los dos escenarios analizados, a pesar de que la flota vehicular nacional aumente.

Figura 5: Proyecciones de emisiones de CO₂-eq



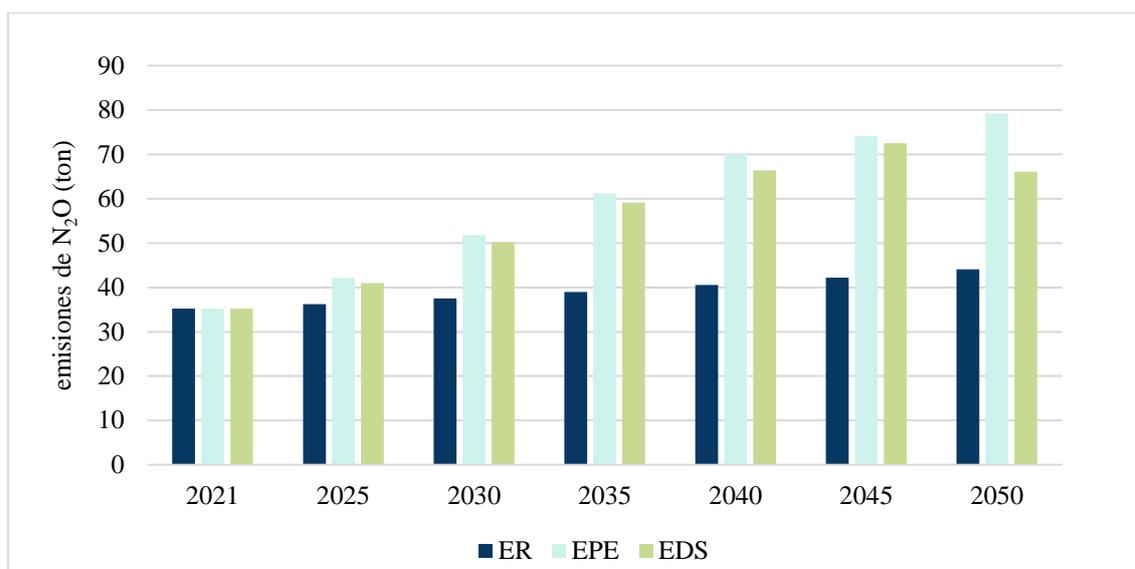
Si bien el CO₂-eq contempla las emisiones de N₂O y CH₄, los cálculos de los inventarios actuales calculados anteriormente demuestran que estas tienen una influencia mínima. Con el objetivo de observar cómo se comportan estas emisiones a través de los años analizados y los escenarios presentados, se muestran las Figura 6 y Figura 7.

Figura 6: Proyecciones de emisiones de CH₄



Por un lado, las emisiones de CH₄ se comportan similares a las emisiones de CO₂-eq, aumentando un 55,1% en el ER, un 11,6% en el EPE y disminuyendo un 8,6% en el EDS desde 2021 a 2050. Al igual que el CO₂-eq, el año de quiebre de las emisiones de CH₄ se da en 2040.

Figura 7: Proyecciones de emisiones de N₂O



Las emisiones de N₂O muestran un comportamiento contrario a las emisiones de los dos gases anteriores. Con el escenario de referencia se obtienen aumentos del 25,1% desde 2021 hasta 2050, lo cual es bajo comparado con el escenario de políticas establecidas, donde el aumento es del 125% en ese período de tiempo, aproximadamente. El escenario con mayor inserción de vehículos eléctricos presenta un aumento de emisiones de N₂O del 87,6% para 2050. Este escenario presenta mayores emisiones de N₂O que el ER, pero resulta mejor que el EPE. El hecho de que el escenario EPE sea peor en términos de emisiones de NO₂ en comparación con el EDS se debe a que presenta menor porcentaje de vehículos eléctricos y, por ende, mayor porcentaje de vehículos con normativa Euro V. A pesar de presentar aumentos, el efecto global de calentamiento global producto de las emisiones de CO₂-eq del sector disminuyen en ambos escenarios analizados.

Con respecto a los contaminantes NO_x y CO, estos se ven disminuidos por la incorporación de vehículos con normativas Euro V, tal como muestra la Figura 8 y Figura 9. Para 2050, el EPE supondría un inventario de NO_x y CO un 35,7% y 43,9% menor que en 2021, respectivamente. El escenario más optimista, EDS, reflejaría en 2050 una disminución del 46,8% y 53,4% del inventario de NO_x y CO en comparación con 2021. Cuando se toman en cuenta los tres escenarios en 2050, se observa que no hay diferencias muy significativas entre el EPE y el EDS. El EPE supondría inventarios de NO_x y CO un 56,8% y 63,9% menores que el ER, respectivamente, mientras que con el EDS estos valores serían un 64,2% y 69,9% menores que el ER, respectivamente.

Figura 8: Proyecciones de emisiones de NO_x

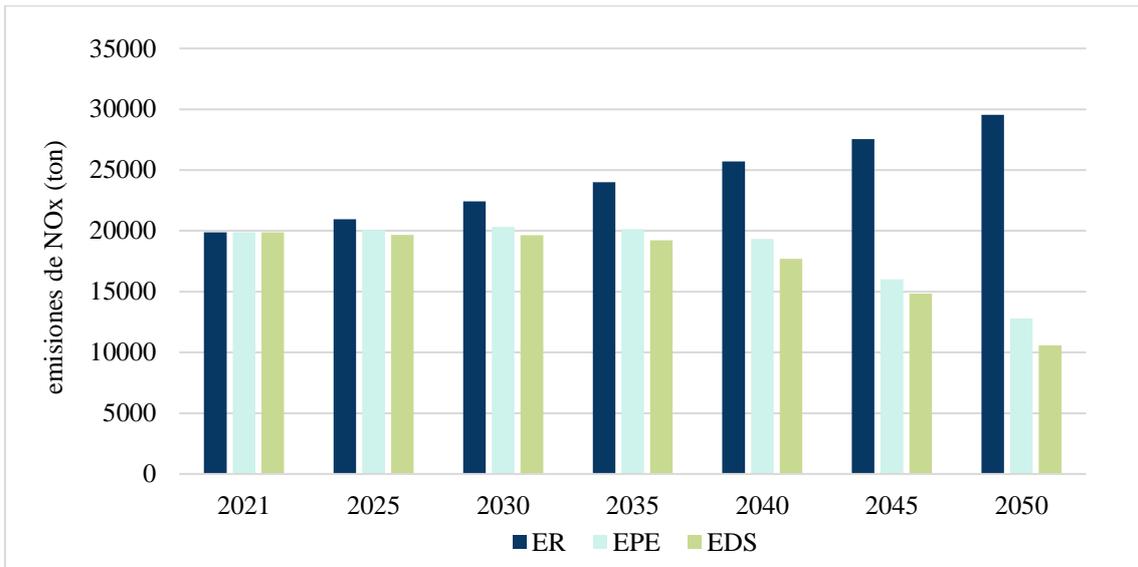
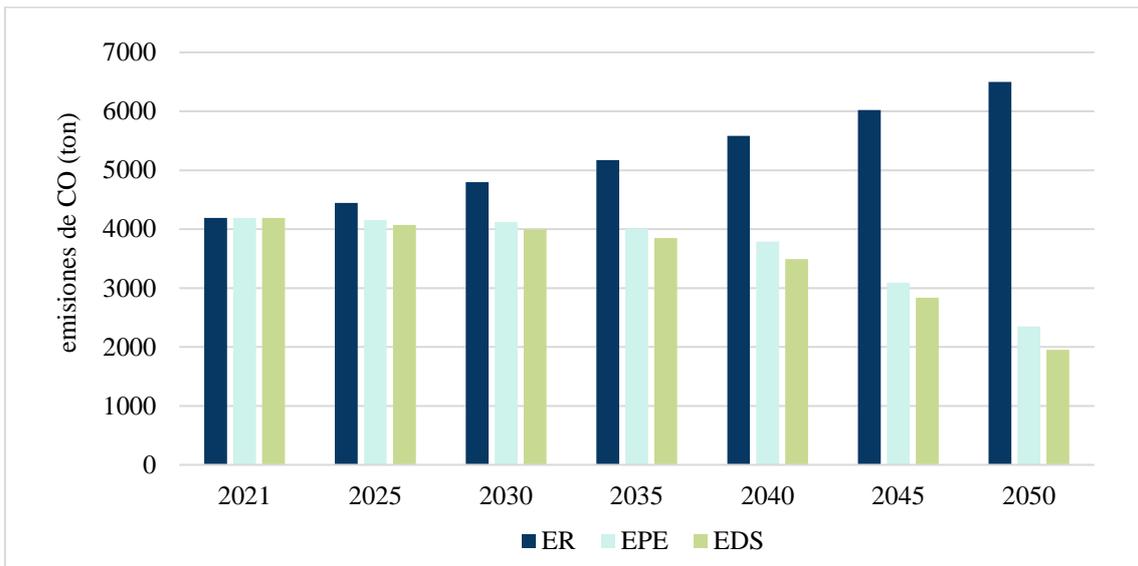


Figura 9: Proyecciones de emisiones de CO



6. Discusión y conclusiones

Como primer objeto del estudio, se obtuvo la caracterización de la flota vehicular del sector de transporte de carga. Los datos obtenidos de los entes competentes permitieron cuantificar los camiones en circulación según su peso bruto total combinado (PBTC), su normativa Euro y los kilómetros anuales recorridos en promedio. Esta primera caracterización permitió calcular los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero desde 2014 hasta 2021 de forma rigurosa. Dentro de los resultados obtenidos en el período analizado, se destaca el aumento del CO₂, el cual fue de un 4,84% anual en promedio, resultando en aproximadamente 2327 kilotoneladas en 2021. Además, las emisiones de CH₄ y N₂O en 2021 demostraron la baja influencia de estos gases en el cálculo del CO₂-eq.

El estudio posterior de escenarios futuros evidenció las posibles disminuciones de emisiones de tanto gases de efecto invernadero como gases precursores de ozono mediante la aplicación de políticas y normativas que las restrinjan. Los escenarios presentados contemplan estándares de mejora de normativas Euro a nivel nacional y estándares mundiales de incorporación de camiones eléctricos. Estos últimos estándares fueron propuestos por la International Energy Agency (IEA) [57] y suponen que, en 2050, en el escenario de políticas actuales el 40% de la flota de camiones livianos mundiales y el 35% de los camiones medianos y pesados sean eléctricos (a batería o con celda de combustible). El escenario de desarrollo sostenible proyecta mayor inserción de estas tecnologías, previendo que el 50% del inventario de camiones livianos y el 45% de los camiones medianos y pesados en el mundo sean eléctricos. Para este estudio se reflejaron estos porcentajes mundiales para la flota nacional, sin embargo, en la Estrategia Climática de Largo Plazo [46] se aspira a lograr la neutralidad de CO₂ en 2050, lo cual supone metas más ambiciosas para el sector de transporte de carga. En esta estrategia nacional se plantean tres hitos principales en lo que respecta a este sector. Se pretende que en 2035 todos los vehículos nuevos de pasajeros sean cero-emisiones, que en 2040 todos los vehículos nuevos de carga liviana sean cero-emisiones y, por último, que en 2045 todos los vehículos nuevos de carga sean cero-emisiones. Estos hitos supondrían que en 2050 el 52,1% de toda la flota nacional de vehículos de carga, tanto liviana como mediana y pesada, sean a batería o con celda de combustible de hidrógeno verde [46]. Esto demuestra que Uruguay se proyectó con mayores niveles de inserción de camiones

eléctricos que el promedio mundial. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los porcentajes mundiales contemplan tanto regiones muy desarrolladas en lo que respecta a la movilidad eléctrica como regiones en las cuales el avance es mínimo. Existen además, escenarios aún más exigentes que el previsto por Uruguay, como el propuesto por Yang (2009), quien supone que un 79% de la flota vehicular en California sea eléctrica con el objetivo de disminuir un 80% de las emisiones de CO₂ con respecto a los inventarios de 1990 [61].

En cuanto a los resultados obtenidos del análisis de escenarios, se destaca que las disminuciones de las emisiones con respecto a 2021 comienzan a ocurrir a partir de 2040, producto de la sustitución de vehículos antiguos y con normativas de emisiones bajas por vehículos eléctricos o con normativas Euro V. En la estrategia nacional mencionada anteriormente este punto de quiebre en donde las emisiones comienzan a disminuir tiene lugar en 2027 [46]. Estas cifras suponen otro indicador de que los escenarios propuestos por Uruguay son más exigentes que los que se consideran a nivel mundial. Por otro lado, en este estudio, el escenario más favorable corresponde al escenario de desarrollo sostenible y supone en 2050 un inventario de CO₂-eq de 2065 kilotoneladas, un 42,9% menor que el escenario de referencia. Por su parte, el escenario de políticas actuales supone, en el mismo año, un inventario de CO₂-eq de 2540 kilotoneladas, un 29,8% menor al escenario de referencia. Uruguay proyecta, dentro de la estrategia nacional, que, debido a la existencia de fuentes que absorben CO₂, todo el sector de transporte debería contar con tan solo 1100 kilotoneladas de CO₂-eq en 2050 para alcanzar la neutralidad. Estos valores demuestran que si Uruguay sigue las tendencias mundiales que se proyectan en 2021, aún con el escenario más optimista no lograría los objetivos de neutralidad en 2050. La principal causa de este resultado es que aún en 2050 habría incorporaciones de vehículos con combustibles fósiles. Logan y Nelson [62] argumentan que, si se quisiera alcanzar las metas de emisiones en el Reino Unido, se debería prohibir la venta de vehículos de combustión interna a partir de 2035. Esta posición es respaldada por Guzel [63], que plantea un escenario de prohibición de vehículos diésel a partir del 2030, reduciendo las emisiones en un 17%.

Por otro lado, además de las emisiones de CO₂-eq, un indicador del aporte de Uruguay a la mitigación del cambio climático es la disminución de gases precursores de ozono. Por este motivo, se analizaron en los escenarios mencionados anteriormente, la evolución de las emisiones de NO_x y CO. Ambos gases disminuyen significativamente en los dos

escenarios principalmente debido al doble efecto que se considera al sustituir camiones convencionales por eléctricos o por camiones con normativa Euro V. El punto de quiebre en el cual las emisiones empiezan a disminuir se da para ambos gases en 2030, diez años antes del punto de quiebre del CO₂-eq. Esta diferencia es debida a la influencia que tienen las normativas Euro en las emisiones de estos gases.

Si se considera el punto de vista de los fabricantes y proveedores, la aplicación de normas les proporciona una posibilidad de planificar a largo plazo y con ciertas certezas en cuanto a sus inversiones [64], pero atrasa los escenarios de inserción de mercado deseados [65]. La fabricación de BEV y FCEV se ve con muchos desafíos en cuanto a costos y avances tecnológicos, por lo que todavía no pueden verse beneficiados por la economía de escala. Se podría considerar un segmento óptimo de mercado por el cual la inserción de estos vehículos sea más eficiente, considerando los menores costos de vehículos con poca capacidad de carga y con rangos más cortos. Por otro lado, los FCEV, al presentar mayores costos y capacidades de carga, pueden ser enfocados hacia grandes empresas u organizaciones con necesidades más exigentes [65].

Otro desafío por considerar que puede disminuir la inserción de estas tecnologías es la preparación que pueden presentar los países frente a esta ola de vehículos eléctricos a través de la infraestructura instalada. Las medidas gubernamentales deben acompañar estos factores complementarios a las tecnologías alternativas, ya sea mediante la instalación de cargadores en distintos puntos del país o el establecimiento de una fuente sostenible de hidrógeno [65]. Además de la estabilidad de la fuente de hidrógeno, los consumidores pueden presentar inquietudes frente a las emisiones asociadas a estas fuentes.

Los plazos necesarios para cambiar el sistema de transporte son prolongados. Un enfoque importante a corto plazo es identificar estrategias de mitigación en subsectores clave, incluidos los intentos de llevar vehículos de combustible alternativo altamente eficientes al mercado. Algunas alternativas de mejora de eficiencia en el sector son presentadas por Tanco (2019) [66]. Se destacan, dentro las opciones presentadas, aquellas que disminuyen el consumo de combustible y, por ende, las emisiones de GEI y gases precursores de ozono como la incorporación de elementos que mejoren la aerodinámica del vehículo, el uso de aditivos y lubricantes y el manejo eficiente, entre otros. También puede ser beneficioso a corto plazo aumentar la financiación y el apoyo de políticas para

la investigación del transporte, considerando las tecnologías y combustibles de los vehículos, la planificación urbana y la estrategia de gestión de demanda de transporte.

Referencias

1. Welch D, Façanha C, Kroon R, Bruil D, Jousma F, Weken H. Moving Zero-Emission Freight Toward Commercialization [Internet]. 2020 Aug [cited 2021 Mar 19]. Available from: www.globaldrivetozero.org
2. Shell, Deloitte. Decarbonising Road Freight : GETTING INTO GEAR. 2021;
3. IEA International Energy Agency. The Future of Trucks – Implications for Energy and the Environment. Int Energy Agency. 2017;
4. IEA International Energy Agency. Data & Statistics - IEA - CO2 emissions from heavy-duty vehicles in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030 [Internet]. 2020 [cited 2021 Apr 28]. Available from: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-from-heavy-duty-vehicles-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>
5. IEA International Energy Agency. Data & Statistics - IEA - Energy Data - CO2 Emissions - Central & South America [Internet]. 2019 [cited 2021 Mar 19]. Available from: [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WEOCSAM&fuel=CO2 emissions&indicator=CO2BySector](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WEOCSAM&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySector)
6. MIEM. Balance Energético 2020. 2020;
7. Uruguay Presidencia. Lacalle Pou participó en presentación de Estrategia Climática de Largo Plazo en Uruguay [Internet]. 2021 [cited 2022 Feb 6]. Available from: <https://www.gub.uy/presidencia/comunicacion/noticias/lacalle-pou-participo-presentacion-estrategia-climatica-largo-plazo-uruguay>
8. UNFCCC. Communication of long-term strategies [Internet]. [cited 2021 Mar 22]. Available from: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies>
9. European Commission. Estrategia a largo plazo para 2050 | Acción por el Clima [Internet]. [cited 2021 Mar 22]. Available from: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_es
10. Mojtaba Lajevardi S, Axsen J, Crawford C. Comparing alternative heavy-duty drivetrains based on GHG emissions, ownership and abatement costs: Simulations

- of freight routes in British Columbia. *Transp Res Part D Transp Environ* [Internet]. 2019;76:19–55. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.031>
11. Sen B, Ercan T, Tatari O. Does a battery-electric truck make a difference? e Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States. 2016 [cited 2021 May 26]; Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.046>
 12. Zhou T, Roorda MJ, MacLean HL, Luk J. Life cycle GHG emissions and lifetime costs of medium-duty diesel and battery electric trucks in Toronto, Canada. *Transp Res Part D Transp Environ*. 2017 Aug 1;55:91–8.
 13. Breuer JL, Can Samsun R, Stolten D, Peters R. How to reduce the greenhouse gas emissions and air pollution caused by light and heavy duty vehicles with battery-electric, fuel cell-electric and catenary trucks. *Environ Int J* [Internet]. 2021 [cited 2021 Jul 8]; Available from: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
 14. Smart Freight Centre. Low Emission Fuels and Vehicles for Road Freight. 2020;(October).
 15. Tanco M, Cat L, Garat S. A break-even analysis for battery electric trucks in Latin America. *J Clean Prod* [Internet]. 2019;228:1354–67. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.168>
 16. Proyecto MOVÉS. El proyecto [Internet]. 2021 [cited 2021 Sep 15]. Available from: <https://moves.gub.uy/el-proyecto/>
 17. ANCAP. Lanzamiento H2U [Internet]. 2021 [cited 2021 Dec 10]. Available from: <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/650-participantes-asistieron-lanzamiento-h2u-proyecto-uruguay-para-producir>
 18. Alonso MF, Longo KM, Freitas SR, Mello da Fonseca R, Marécal V, Pirre M, et al. An urban emissions inventory for South America and its application in numerical modeling of atmospheric chemical composition at local and regional scales. *Atmos Environ* [Internet]. 2010;44(39):5072–83. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.013>
 19. Ramachandra T V., Shwetmala. Emissions from India’s transport sector: Statewise

- synthesis. *Atmos Environ* [Internet]. 2009;43(34):5510–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.015>
20. Policarpo NA, Silva C, Lopes TFA, Araújo R dos S, Cavalcante FSÁ, Pitombo CS, et al. Road vehicle emission inventory of a Brazilian metropolitan area and insights for other emerging economies. *Transp Res Part D Transp Environ* [Internet]. 2018;58(December 2017):172–85. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.004>
 21. Bebkiewicz K, Chłopek Z, Sar H, Szczepański K, Zimakowska-Laskowska M. Assessment of impact of vehicle traffic conditions: urban, rural and highway, on the results of pollutant emissions inventory. *Arch Transp*. 2021;60(4):57–69.
 22. Rodrigue J-P. *The Geography of Transport Systems. The Geography of Transport Systems*. Routledge; 2020.
 23. EEA. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 – Update July 2017 1. Dk. 2015;53(9):1689–99.
 24. Automobile Association. Euro emissions standards | AA [Internet]. 2017 [cited 2022 Jan 29]. Available from: <https://www.theaa.com/driving-advice/fuels-environment/euro-emissions-standards>
 25. Transport & Environment. Euro 7 - Campaigning for cleaner transport in Europe [Internet]. 2021 [cited 2022 Feb 4]. Available from: <https://www.transportenvironment.org/challenges/air-quality/the-euro-7/>
 26. Zhang S, Wu Y, Liu H, Wu X, Zhou Y, Yao Z, et al. Historical evaluation of vehicle emission control in Guangzhou based on a multi-year emission inventory. *Atmos Environ*. 2013;76:32–42.
 27. Singh N, Mishra T, Banerjee R. Emission inventory for road transport in India in 2020: framework and post facto policy impact assessment. *Environ Sci Pollut Res* [Internet]. 2021;(1). Available from: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17238-3>
 28. Singh R, Sharma C, Agrawal M. Emission inventory of trace gases from road transport in India. *Transp Res Part D Transp Environ* [Internet]. 2017;52:64–72. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.011>
 29. Cifuentes F, González CM, Trejos EM, López LD, Sandoval FJ, Cuellar OA, et al.

- Comparison of top-down and bottom-up road transport emissions through high-resolution air quality modeling in a city of complex orography. *Atmosphere (Basel)*. 2021;12(11).
30. Lv W, Hu Y, Li E, Liu H, Pan H, Ji S, et al. Evaluation of vehicle emission in Yunnan province from 2003 to 2015. *J Clean Prod* [Internet]. 2019;207:814–25. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.227>
 31. Mukherjee R, Rollend D, Christie G, Hadzic A, Matson S, Saksena A, et al. Towards indirect top-down road transport emissions estimation. *IEEE Comput Soc Conf Comput Vis Pattern Recognit Work*. 2021;1092–101.
 32. Das B, Bhawe P V., Puppala SP, Adhikari S, Sainju S, Mool E, et al. Emission factors and emission inventory of diesel vehicles in Nepal. *Sci Total Environ* [Internet]. 2021;812:152539. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152539>
 33. Fu M, Kelly JA, Clinch JP. Estimating annual average daily traffic and transport emissions for a national road network: A bottom-up methodology for both nationally-aggregated and spatially-disaggregated results. *J Transp Geogr* [Internet]. 2017;58:186–95. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.12.002>
 34. Zhang H, Yin X, Chen W. A bottom-up model analysis of transport sector: A study of China and USA. *Energy Procedia* [Internet]. 2014;61:895–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.990>
 35. Gu X, Yin S, Lu X, Zhang H, Wang L, Bai L, et al. Recent development of a refined multiple air pollutant emission inventory of vehicles in the Central Plains of China. *J Environ Sci (China)* [Internet]. 2019;84:80–96. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.04.010>
 36. Bastida-Molina P, Hurtado-Pérez E, Peñalvo-López E, Cristina Moros-Gómez M. Assessing transport emissions reduction while increasing electric vehicles and renewable generation levels. *Transp Res Part D Transp Environ*. 2020;88(September).
 37. Pallavidino L, Prandi R, Bertello A, Bracco E, Pavone F. Compilation of a road transport emission inventory for the Province of Turin: Advantages and key factors

- of a bottom-up approach. *Atmos Pollut Res.* 2014;5(4):648–55.
38. Küfeoğlu S, Khah Kok Hong D. Emissions performance of electric vehicles: A case study from the United Kingdom. *Appl Energy.* 2020;260(July 2019).
 39. IPCC. Chapter 2.3: Mobile Combustion. 2006 IPCC Guidel Natl Greenh Gas Invent [Internet]. 2006;1–78. Available from: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
 40. Saija S, Romano D. A methodology for the estimation of road transport air emissions in urban areas of Italy. *Atmos Environ.* 2002;36(34):5377–83.
 41. Zhang S, Chen W. Assessing the energy transition in China towards carbon neutrality with a probabilistic framework. *Nat Commun.* 2022;13(1):1–15.
 42. Abulude FO. A Review on Top-Down and Bottom-Up Approach for Air Pollution Studies. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. 2021.
 43. Aresti M. Eficiencia energética en el transporte de carga: estrategias para la reducción del consumo de combustible y emisiones. 2016.
 44. Ministerio de Ambiente. Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) [Internet]. 2021 [cited 2022 Jan 28]. Available from: <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/inventarios-nacionales-gases-efecto-invernadero-ingei>
 45. CINOI. Reporte nacional de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de carga carretero. 2019.
 46. Uruguay Presidencia. Estrategia Climática de Largo Plazo. 2021;
 47. Ministerio de Ambiente. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2019. 2019.
 48. Dijkstra FA, Prior SA, Runion GB, Torbert HA, Tian H, Lu C, et al. Effects of elevated carbon dioxide and increased temperature on methane and nitrous oxide fluxes: Evidence from field experiments. *Front Ecol Environ.* 2012;10(10):520–7.
 49. Clairotte M, Suarez-Bertoa R, Zardini AA, Giechaskiel B, Pavlovic J, Valverde V, et al. Exhaust emission factors of greenhouse gases (GHGs) from European road vehicles. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00407-5>

50. Vazquez T, Rossi V, Lepra J, Arana M. Decreto N° 111/008 [Internet]. 2008. Available from: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/111-2008>
51. Proyecto MOVÉS. Preguntas frecuentes [Internet]. 2021 [cited 2022 Jan 31]. Available from: <https://moves.gub.uy/preguntas-frecuentes/>
52. Brander M. GHGs-CO2-CO2e-and-Carbon-What-Do-These-Mean-v2.1. *Econometrica*. 2012;(August):2–4.
53. APPLUS. Reporte de flota. Montevideo, Uruguay; 2021.
54. Lacalle Pou L, Peña A, Heber LA, Paganini O, Salinas D. Decreto 135/021 [Internet]. Montevideo, Uruguay: Poder Ejecutivo; 2021. Available from: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/135-2021>
55. Dirección Nacional de Energía. Balance Energético Nacional [Internet]. 2020 [cited 2021 Mar 20]. Available from: <https://ben.miem.gub.uy/index.php>
56. MIEM. Prospectiva de la demanda energética. 2018.
57. IEA International Energy Agency. Global EV Outlook 2021 Accelerating ambitions despite the pandemic [Internet]. Global EV Outlook 2021. Paris; 2021 [cited 2021 May 10]. Available from: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
58. IEA International Energy Agency. Global EV Outlook. 2020;
59. El País. Un año muy particular para el sector eléctrico en Uruguay [Internet]. 2022 [cited 2022 Feb 4]. Available from: <https://www.elpais.com.uy/economia-y-mercado/ano-particular-sector-electrico-uruguay.html>
60. IEA International Energy Agency. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. Int Energy Agency. 2021;224.
61. Yang C, McCollum D, McCarthy R, Leighty W. Meeting an 80% reduction in greenhouse gas emissions from transportation by 2050: A case study in California. *Transp Res Part D Transp Environ* [Internet]. 2009;14(3):147–56. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2008.11.010>
62. Logan KG, Nelson JD, Brand C, Hastings A. Phasing in electric vehicles: Does policy focusing on operating emission achieve net zero emissions reduction

- objectives? *Transp Res Part A Policy Pract* [Internet]. 2021;152(May 2020):100–14. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.08.001>
63. Güzel TD, Alp K. Modeling of greenhouse gas emissions from the transportation sector in Istanbul by 2050. *Atmos Pollut Res* [Internet]. 2020;11(12):2190–201. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.08.034>
64. Earl T, Mathieu L, Cornelis S, Kenny S, Ambel CC, Nix J. Analysis of long haul battery electric trucks in EU Marketplace and technology, economic, environmental, and policy perspectives. European Federation for Transport and Environment (T&E) [Internet]. 2018 [cited 2021 Feb 3]. Available from: <https://ec.europa.eu/inea/en/ten-t/ten-t-projects>
65. Trencher G, Taeihagh A, Yarime M. Overcoming barriers to developing and diffusing fuel-cell vehicles: Governance strategies and experiences in Japan. *Energy Policy* [Internet]. 2020;142(April):111533. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111533>
66. Tanco M, Aresti M, Villalobos J, Moratorio D, Jurburg D, Holguin-Veras J. Assessment of the effectiveness of a fuel additive to reduce fuel consumption of HDVs highlights the importance of verification programs. *Energy* [Internet]. 2019;189(xxxx):116269. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116269>

Tabla A 2: Proyecciones de flota nacional en escenario de políticas establecidas (EPE)

Categoría	Normativa	2021	2025	2030	2035	2040	2045	2050
≤7,5 ton	Previo	240	78	0	0	0	0	0
	Euro I	15	15	0	0	0	0	0
	Euro II	1112	1112	901	361	0	0	0
	Euro III	3235	3235	3235	3235	2973	2256	1434
	Euro IV	466	466	466	466	466	466	0
	Euro V	2	321	752	1218	1721	2264	2851
7,5 – 16 ton inc.	Previo	177	124	62	0	0	0	0
	Euro I	24	24	24	0	0	0	0
	Euro II	661	661	661	491	0	0	0
	Euro III	3747	3747	3747	3747	3673	2009	0
	Euro IV	69	69	69	69	69	69	0
	Euro V	172	478	890	1335	1816	2336	1555
16 – 32 ton	Previo	2767	2714	2652	2396	1831	167	0
	Euro I	787	787	787	787	787	787	0
	Euro II	259	259	259	259	259	259	0
	Euro III	1277	1277	1277	1277	1277	1277	0
	Euro IV	0	0	0	0	0	0	0
	Euro V	342	684	1146	1645	2184	2766	3025
> 32 ton	Previo	2593	2540	2478	2222	1657	0	0
	Euro I	1566	1566	1566	1566	1566	1559	0
	Euro II	1802	1802	1802	1802	1802	1802	502
	Euro III	12526	12526	12526	12526	12526	12526	12526
	Euro IV	133	133	133	133	133	133	133
	Euro V	1058	2298	3971	5778	7730	9838	12115

Centro de Innovación en Organización Industrial (CINOI)

Facultad de Ingeniería, Universidad de Montevideo. Luis P. Ponce
1307, 11300 Montevideo, Uruguay

cinoi@um.edu.uy

