

Metodología

PARA LA ESTIMACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y CONTAMINANTES CRITERIO EN EL TRANSPORTE DE CARGA EN MÉXICO

APLICACIÓN A DOS CORREDORES DE TRANSPORTE
CDMX - LA PAZ, BAJA CALIFORNIA Y CDMX - MEXICALI



Usuarios ANTP
del transporte de carga



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Metodología

PARA LA ESTIMACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y CONTAMINANTES CRITERIO EN EL TRANSPORTE DE CARGA EN MÉXICO

APLICACIÓN A DOS CORREDORES DE TRANSPORTE
CDMX - LA PAZ, BAJA CALIFORNIA Y CDMX - MEXICALI

Esta publicación fue financiada en el marco del proyecto de cooperación bilateral *Programa Transporte Sustentable* (PTS) entre el Gobierno estatal de Jalisco y el Gobierno de Alemania, a través de la Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable (GIZ), que trabaja por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Primera edición 2022

Elaborado en México

Publicada por:

Deutsche Gesellschaft für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn/Alemania
T + 49 61 96 79-0
F + 49 61 96 79-11 15
E info@giz.de
I www.giz.de

Agencia de la GIZ en México

Torre Hemisor, PH,
Av. Insurgentes Sur 826,
Col. del Valle, Juárez, 03100,
Ciudad de México
T + 52 55 55 36 23 44
F + 52 55 55 36 23 44
E giz-mexiko@giz.de
I <https://www.giz.de/en/worldwide/33041.html>

Proyecto

Programa Transporte Sustentable
D.R. ©2022 Deutsche Gesellschaft für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Coordinación

Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable (GIZ) en México

Martínez López, Karen
Asesora técnica, Programa Transporte Sustentable (PTS)
Hartmann, Stephanie
Directora Programa Transporte Sustentable (PTS)

Asociación Nacional de Transporte Privado (ANTP)

Kim, Francisco
Logística y operaciones internacionales de la Fábrica de Jabones la Corona
Montañez, Daniel
Gerente de logística y distribución de la ANTP
Reyes, Ingrid

Consultores de GSD Plus

Ariza, Katherine
Blanco, Karen
Gordo, Daniel

Diseño editorial y revisión

Instituto Contenidos Digitales S. A. S.

Derechos de autor

Se permite la reproducción, total o parcial, por razones educativas o sin ánimo de lucro de esta publicación, sin la autorización especial del portador de los derechos de autor, siempre y cuando la fuente sea citada.

Forma de citar

GIZ-ANTP. *Metodología para la estimación de gases efecto invernadero y contaminantes criterio en transporte de carga en México*. Aplicada a dos corredores de transporte Ciudad de México a La Paz Baja California y de Ciudad de México a Mexicali. 2022.

Deslinde de responsabilidad

Los hallazgos, interpretaciones y conclusiones expresadas en este documento están basados en la metodología y recopilación de insumos facilitadores por la GIZ México y sus consultores. No obstante, GIZ México no puede ser responsable del contenido de este documento ni garantiza la precisión o integridad de la información por errores, omisiones o pérdidas que surjan de su uso.

Por encargo del Ministerio de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

.Contenido

6	Abreviaturas y acrónimos
8	Definiciones
12	Introducción
14	CAPÍTULO 1
	OBJETIVOS Y MARCO CONCEPTUAL
16	Marco conceptual
25	Referencias locales
27	CAPÍTULO 2
	METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE GEI
29	Alcance
33	Límites del sistema
36	Método de estimación
38	Aproximación metodológica
	Método general
68	CAPÍTULO 3
	METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO
69	Límites del sistema, alcance y método de estimación
74	Aproximación metodológica
	Método general

94 CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES Y CONTAMINANTES CRITERIO PARA CORREDORES DE CARGA DEL PACÍFICO

97	Diagnóstico
	Referencias locales
	Caracterización general de los corredores
	Topología
	Oferta de transporte
	Parámetros logísticos
126	Resultados de estimación de emisiones de GEI y contaminantes criterio
	Gases de Efecto Invernadero
	Contaminantes criterio
142	Resumen de indicadores
	Caracterización general de corredores
	Comparación de indicadores entre los corredores de análisis
146	Bibliografía
148	Índice de ecuaciones
148	Índice de figuras
149	Índice de gráficas
151	Índice de mapas
151	Índice de tablas
	Anexos
148	Anexo 1 - Gráficos complementarios metodología de estimación GEI
156	Anexo 2 - Gráficos complementarios metodología de estimación Contaminantes criterio
172	Anexo 3 - Información complementaria del ejercicio diagnóstico
174	Anexo 4 - Relación producto - categoría de producto

.Agradecimientos

Agradecemos especialmente a las siguientes instituciones locales y federales, SICT, ARTF, IMT, SEMARNAT, SEMADET y SEDECO. Así como a las empresas privadas usuarias de transporte de carga y miembros de la ANTP. Gracias a su apoyo, se logró el desarrollo de este valioso trabajo para el sector transporte de carga.

INSTITUCIONES PÚBLICAS

Secretaría de Infraestructura,
Comunicaciones y Transportes (SICT)

Dirección General de Autotransporte
Federal (DGAF)

Dirección General de Servicios Técnicos

Agencia Reguladora de Transporte
Ferroviario (ARTF)

Instituto Mexicano del Transporte (IMT)

Coordinación de Seguridad
y Operación del Transporte

Secretaría de Medio Ambiente
y Recursos Naturales (SEMARNAT)

Secretaría de Medio Ambiente
y Desarrollo Territorial de Jalisco (SEMADET)

Secretaría de Desarrollo Económico
de Jalisco (SEDECO)

ENTES PRIVADOS

Baja Ferries

Fábrica de Jabón La Corona
Logística y Operaciones Internacionales

Grupo Bimbo
Logística Cadena de Suministro

Sigma Alimentos
Grupo de Inteligencia de Transporte

V MODAL
Logística Intermodal

Abreviaturas y acrónimos

AEMA	Agencia Europea de Medio Ambiente
ANTP	Asociación Nacional de Transporte Privado
ARTF	Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario
BC	Carbono Negro
BMZ	Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo
CC	Contaminante Criterio
CCET	Consumo de Combustible Específico Teórico
CDMX	Ciudad de México
CEN	Comité Europeo para la Estandarización (CEN, por sus siglas en francés - Comité Européen de Normalisation)
CEPE	Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa
CH₄	Metano
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
CO₂e	Equivalente de dióxido de carbono
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés - <i>United States Environmental Protection Agency</i>)
ET	Viajes en vacío (ET, por sus siglas en inglés - <i>Empty Travel</i>)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIZ	Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable de México
HC	Hidrocarburos
HFC	Hidrofluorocarbonos
HFO	<i>Fuel Oil</i> Pesado (HFO, por sus siglas en inglés <i>High Fuel Oil</i>)
IKI	Iniciativa Internacional Climática (IKI, por sus siglas en alemán - <i>Internationale Klimaschutz Initiative</i>)
IMO	Organización Marítima Internacional
IMT	Instituto Mexicano de Transporte
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés - <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
LF	Factores ocupación (LF, por sus siglas en inglés - <i>Load Factors</i>)
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio

MDO	Diésel Marino (MDO, por sus siglas en inglés - <i>Marine Diesel Oil</i>)
NO_x	Óxidos de nitrógeno
PBV	Peso Bruto Vehicular
PIB	Producto Interno Bruto
PM	Material Particulado
PTS	Programa Transporte Sustentable
SF₆	Hexafluoruro de azufre
SICT	Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SO₂	Dióxido de azufre
TON	Toneladas
UNFCC	Convención de las Naciones Unidas para el Cambio Climático

.Definiciones

Carrocería. Es la categoría vehicular que otorga una similitud en las características ofrecidas por los vehículos de carga en función del empaque a ser transportado. Las carrocerías existentes en México dentro del sector de transporte de carga son: caballete, caja (abierta, cerrada y refrigerador), cama B, chasis, portacontenedor especializado, estaca, góndola, grúa, jaula, media redila, *pallet*, plataforma, revolvedora, semicaja, tanque, tolva, tractor y volteo (normal y desmontable).

Carga útil / peso útil. Hace referencia al peso máximo de la carga que un vehículo puede transportar, en cumplimiento de condiciones de seguridad y para el cual fue manufacturado, acorde con las especificaciones del fabricante. [1]

Clase. Clasificación de vehículos que pueden transportar carga. Las categorías estipuladas según la normativa actual segmentan los vehículos por tipo: camión unitario, tractocamión, convertidor, camión remolque, tractocamión articulado y tractocamión doblemente articulado, con su respectiva nomenclatura: C, T, D, C-R, T-S, y T-S-R Y T-S-S. [2]

Contaminantes atmosféricos. Sustancias que se acumulan en el aire en un grado que es dañino para los organismos vivos o para los materiales expuestos al aire. Estos incluyen humo, esmog y gases, como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, y vapores de hidrocarburos. [3]

Demanda anual o demanda nominal de transporte de carga. Es un indicador que mide el total anual de carga que se mueve por carretera entre los distintos municipios del país y está expresado en toneladas.

Demanda efectiva de carga. Es un indicador que contabiliza las toneladas de carga que deben transportarse, así como el tiempo necesario para hacerlo, una vez definido un origen y un destino de la carga. Este indicador resulta del producto de la cantidad de carga transportada entre cada par O-D (medido en TON), y la agregación del tiempo de viaje entre el origen y destino, además de los tiempos logísticos asociados al cargue, descargue y espera para cargue y descargue (medido en horas). Por ello, es un indicador que está expresado en dimensiones de toneladas-hora (ton-h).

Empaque. Hace referencia al embalaje o la forma en que se transporta un producto de acuerdo con los requerimientos óptimos para garantizar que llegue en perfectas condiciones a su destino final.

Energético. Fuente de energía que se relaciona con las diferentes clases de combustibles o a la energía eléctrica.

Estándar de emisión. Son límites promulgados por el gobierno sobre la emisión de un contaminante de un proceso. Existen límites en la emisión de gases, vapores y partículas contaminantes específicos de cualquier proceso y en la emisión de procesos específicos. [3] Existen diferentes estándares de emisión vehiculares, los más comunes en el Centro y Sur de América corresponden al estándar europeo: euro, y al estándar de Estados Unidos: EPA. [4]

Factor de utilización de carga (*Capacity Utilisation - CU*). Medida que relaciona la carga transportada en términos de toneladas con la capacidad de transporte de carga (capacidad de tonelaje). Este se utiliza de manera frecuente como medida de aprovechamiento para vehículos terrestres y embarcaciones. [5]

Factores pozo a rueda (*Well to Wheel*). Emisión de un contaminante por unidad de distancia o energía, que considera las emisiones de la operación del vehículo y los procesos aguas arriba, como las emisiones de suministro, producción y generación del energético utilizado.

Factores tanque a rueda (*Tank to Wheel*). Emisión de un contaminante por unidad de distancia o energía, que considera únicamente las emisiones de la operación del vehículo.

Gases de Efecto Invernadero (GEI). Son aquellos elementos de tipo gaseoso de procedencia natural o generados por actividades humanas, que tienen la capacidad de emitir y absorber radiación, y que, por cuenta de dicha propiedad, atrapan el calor en la atmósfera. El GEI más generado es el CO₂, pero existen otros de mayor potencial de calentamiento global, como el metano y el óxido nitroso.

Grado de ocupación. Se refiere a la relación entre la carga presente en un vehículo y aquella máxima autorizada por los reglamentos mexicanos.

Peso Bruto Vehicular (PBV). Suma del peso vehicular y el peso de la carga para el caso de los vehículos de transporte de carga. [2]

Roll on - Roll off. Para el caso del transporte marítimo, hace referencia a una embarcación de transporte de mercancías y pasajeros que se vale de rampas para rodar bienes desde y hacia ella. Dentro de dicha tipología, hay tres categorías: los *car-carriers* que se especializan en el transporte de vehículos; los *ro-pax*, que transportan tanto carga como pasajeros, y los *ro-lo*, que movilizan vehículos y carga en plataformas diferenciadas.

Tiempos logísticos de carga. Tiempos derivados de las operaciones de carga terrestre asociadas a actividades requeridas tanto antes como después de realizar un viaje.

Tiempo de cargue. Periodo asociado a la actividad de cargar el elemento / producto a transportar dentro del vehículo de carga, justo antes de realizar el recorrido planificado.

Tiempo de descargue. Periodo asociado a la actividad de descargar el elemento / producto transportado dentro del vehículo de carga, justo después de realizar el recorrido planificado.

Tiempo de viaje. Hace referencia a la duración de los viajes por carretera entre un par origen - destino específico, incluyendo posibles descansos y cambios de turno de los conductores.

Tiempo muerto. Hace referencia al tiempo en que un vehículo de carga no puede prestar un servicio debido a que es sometido a mantenimiento; cuando no puede transitar por restricciones vehiculares rurales / urbanas, ya sea por eventos de siniestralidad o festivales nacionales, o cuando no exista una demanda del servicio de transporte.

Viajes con carga. Hace referencia a viajes de transporte de carga donde el vehículo se encuentra transportando mercancía durante su recorrido.

Viajes en vacío. Se refiere a viajes en los que el vehículo va sin carga. Se asocian principalmente con el retorno al lugar de origen o cuando no es posible conseguir un flete para el viaje de vuelta.

Emisiones del transporte en México



De las casi **496** millones de **Gg** de **CO₂eq** emitidas, el **29%** corresponden a procesos asociados al transporte, incluyendo de carga, pasajeros y particulares.

INTRODUCCIÓN

El transporte es una de las actividades de mayor intensidad energética en el mundo, lo cual le otorga una participación considerable en la dinámica global de emisiones de gases contaminantes. Dentro del sector, por el tipo de vehículos utilizados y los largos trayectos recorridos, el transporte de carga es una de las principales fuentes de contaminación.

En México, según cifras del último inventario de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), de cerca de 496 millones de Gg de CO_2 emitidas por el país (emisiones brutas), alrededor de 29% le corresponde a la energía consumida por procesos asociados al transporte, incluyendo autotransporte, aviación, navegación, transporte ferroviario y otros. [8]



Por su parte, a nivel de emisiones de contaminantes criterio, para el caso de fuentes móviles, el transporte de carga representa cerca de 60% de dichas emisiones para contaminantes como el material particulado ($\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10}) y alrededor de 25% para otros, como el SO_2 y NO_x . [9]

Sin embargo, debido a su estructura organizacional y a la institucionalidad que lo rodea, es uno de los sectores que busca constantemente avanzar hacia la eficiencia energética, en favor de una menor huella ambiental.

En este sentido, poder contar con herramientas estandarizadas para el análisis de emisiones a nivel de viaje y configuración modal es un paso hacia fortalecer el entendimiento de los actores del transporte para una toma de decisiones informada.

Teniendo en cuenta los retos a los que se enfrenta el sector en materia ambiental y el valor que representa el desarrollo de herramientas para la mejor toma de decisiones, en el marco del Programa Transporte Sustentable (PTS) que implementa la Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable de México (GIZ), por encargo del Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ), en colaboración con la Asociación Nacional de Transporte Privado (ANTP), se placen en presentar esta Metodología de estimación de emisiones GEI y contaminantes criterio en el transporte de carga en México. Aplicado a dos corredores logísticos: CDMX a la La Paz, BC y de CDMX a Mexicali.

Esto, con el ánimo de establecer un marco común, alineado con estándares y buenas prácticas nacionales e internacionales, que permitan desarrollar ejercicios diagnósticos y comparativos de emisiones de GEI y contaminantes criterio para el transporte de carga en México.

Lo anterior, mediante un enfoque que se acerque al usuario del transporte de carga, empresas generadoras y operadoras, y que les permita realizar un análisis a nivel de tipo de viaje y configuración modal. Esto, a través de una herramienta práctica a su disposición.

El documento está organizando de la siguiente manera:

CAPÍTULO 1

Presenta los objetivos detrás de la concepción y diseño de la metodología, al igual que el marco conceptual de referencia.

CAPÍTULOS 2 Y 3

Cada uno detalla la metodología de estimación de emisiones de gases contaminantes tanto para GEI como para contaminantes criterio, respectivamente, indicando el alcance, método de estimación y aproximación metodológica.

CAPÍTULO 4

Presenta la aplicación de la metodología para el caso de dos corredores de transporte de carga en México.

CAPÍTULO

1

OBJETIVOS Y MARCO CONCEPTUAL





El desarrollo de la metodología de estimación de emisiones de GEI y de contaminantes criterio para el transporte de carga en México se concibió a partir de un proceso analítico con el cual se definieron sus objetivos, el alcance y las referencias teóricas y conceptuales de soporte.

Los objetivos planteados para el desarrollo de este estudio fueron:

ESTIMAR las emisiones de GEI y de contaminantes criterio para servicios de transporte individual, basado en un marco común y en cumplimiento con los estándares y mejores prácticas internacionales y nacionales.

COMPARAR las emisiones de GEI y de contaminantes criterio para servicios de transporte de carga en autotransporte frente al transporte intermodal (autotransporte, férreo y/o marítimo).

DISEÑAR Y CREAR una herramienta que permita la estimación de emisiones GEI y contaminantes criterio para viajes de transporte individual en México, así como para corredores logísticos completos.

EVALUAR las implicaciones en términos de emisiones del planteamiento de escenarios hipotéticos bajo los cuales se busca mejorar la eficiencia del transporte, a partir de cambios tecnológicos de la flota y la combinación de otros modos de transporte.

En términos generales, los objetivos planteados se centran primeramente en el desarrollo de una metodología robusta ajustada a los parámetros y dinámicas del transporte de carga en México, para luego avanzar hacia la consolidación de una herramienta que permita generar estimaciones reales para usuarios del transporte de carga, ya sea transportistas o empresas de carga interesadas en conocer las emisiones generadas en viajes bajo diferentes modalidades de transporte.

El marco conceptual y referencias bibliográficas que se tuvieron en cuenta para la preparación de este documento se presentan a continuación.

MARCO CONCEPTUAL

La definición de la metodología de estimación de emisiones para GEI y contaminantes criterio contempló el análisis de múltiples fuentes de información, al igual que el de referencias relevantes en la materia, con la idea de construir un marco conceptual.

Esto, para crear una metodología que ponderara los últimos avances en la estimación de emisiones para el transporte, al tiempo que se adaptara adecuadamente al contexto de su aplicación.

La elección de estas fuentes se basa en la adaptación y aplicación de sus conceptos y aproximaciones metodológicas a mediciones en países y ciudades, o en políticas enfocadas específicamente al sector transporte.

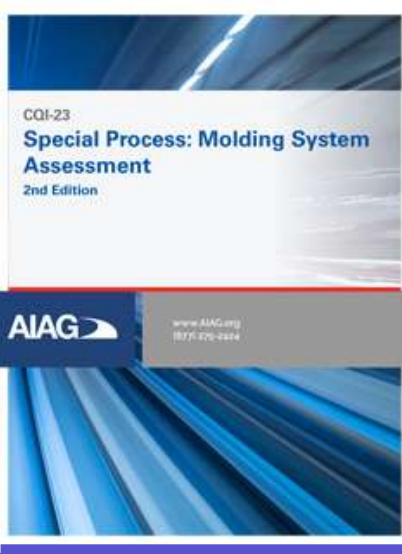
A continuación, se listan las principales referencias revisadas con un breve resumen de cada una, además de sus aportes más relevantes de cara a la construcción de la metodología.





- Product 1
- Product 2
- Product 3
- Product 4
- Product 5
- Product 6
- Product 7

REFERENCIAS INTERNACIONALES



En 16258 y Guía de cálculo de las emisiones de GEI para los servicios de transporte de carga y logística de CLECAT+C3

Descripción

Estándar desarrollado en 2013 por el Comité Europeo para la Estandarización. Presenta la Metodología para el cálculo y la declaración del consumo de energía y de las emisiones de GEI en los servicios de transporte de mercancías y pasajeros.

Especifica cómo transportistas o empresas de la cadena logística pueden calcular su consumo de energía y emisiones de GEI.

Parámetros ambientales

GEI (CO₂ equivalente) y consumo de energía

Institución y ámbito

CEN para ciudades y actores del transporte de carga

Atributos relevantes

- Propone una metodología para los modos: autotransporte, férreo y marítimo / fluvial.
- Define parámetros de ajuste para transporte de carga y pasajeros en áreas urbanas.
- Desarrolla una metodología de estimación por pérdida de refrigerante.
- Presenta valores de factores de emisión para diferentes tipos de combustible con enfoque TTW y WTW: Factores Pozo a Rueda (*Well to Wheel* - WTW): Emisión de un contaminante por unidad de distancia o energía, que considera las emisiones de la operación del vehículo y los procesos aguas arriba como las emisiones de suministro, producción y generación del energético utilizado. Factores Tanque a Rueda (*Tank to Wheel* - TTW): Emisión de un contaminante por unidad de distancia o energía, que considera únicamente las emisiones de la operación del vehículo.
- Describe diferentes alternativas de estimación de emisiones y consumos de combustible, dependiendo de la información disponible.
- Integra correcciones para consumos específicos de combustible, tomando en cuenta las características topográficas de la ruta (plano y montañoso).
- Considera la incorporación de los viajes en vacío de forma proporcional en la estimación de GEI y consumo de combustible.
- Presenta correcciones por porcentaje de biodiésel presente en el combustible.

Soporte conceptual

- Toma valores de referencia de fuentes como IPC, Ecoinvent, EcoTransIT y Contargo.
- La guía también presenta valores provenientes de modelos europeos como HBEFA, TREMOD, TREMOVE y GEMIS 4.8.

2019 REFINEMENT TO THE 2006
IPCC GUIDELINES FOR
NATIONAL GREENHOUSE GAS
INVENTORIES

OVERVIEW

IPCC - 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse
Gas Inventories and 2019 Refinement Document

Descripción

Los lineamientos de 2006 y su actualización del año 2019 del IPCC presentan una guía y un manual metodológico para aproximarse a la estimación, reporte y verificación de GEI.

Así mismo, detalla conceptualmente cada uno de los términos relevantes a la hora de realizar una estimación, desde los tipos de emisiones y alcances hasta precursores y emisiones indirectas.

Parámetros ambientales

GEI (CO₂ equivalente) cobijando CO₂, CH₄, N₂O, gases flourados y precursores (SO₂, NO_x, CO, NMVOC)

Institución y ámbito

IPCC para su aplicación en diferentes tipos de contextos y alcances

Atributos relevantes

- Presenta una guía metodológica para la recolección de información, estimación y reporte de emisiones de GEI.
- Segmenta el análisis para diferentes sectores, subsectores y actividades.
- Establece pasos a seguir para garantizar la consistencia temporal de las mediciones, al igual que para lidiar con incertidumbres en los datos, en la modelación y en la estimación.
- Establece un marco conceptual para aproximarse a precursores y emisiones indirectas.
- Para el transporte, los lineamientos sectoriales se centran en describir el contexto del sector en lo que se refiere a emisiones, al igual que a presentar tendencias, patrones, estrategias y buenas prácticas para la mitigación y reducción de emisiones.

Soporte conceptual

Marco conceptual propio del IPCC



ICLEI EcoLogistics Self-Monitoring Tool

Descripción

La herramienta fue desarrollada en el marco del proyecto para la descarbonización del transporte de carga del Ministerio de Ambiente Alemán, amparado por la IKI y otros actores internacionales.

EcoLogistics está disponible para su uso por ciudades para la estimación de emisiones de GEI derivadas del transporte de carga, mediante el uso de métricas en términos de CO₂ equivalente.

Parámetros ambientales

GEI (CO₂ equivalente) y consumo de energía

Institución y ámbito

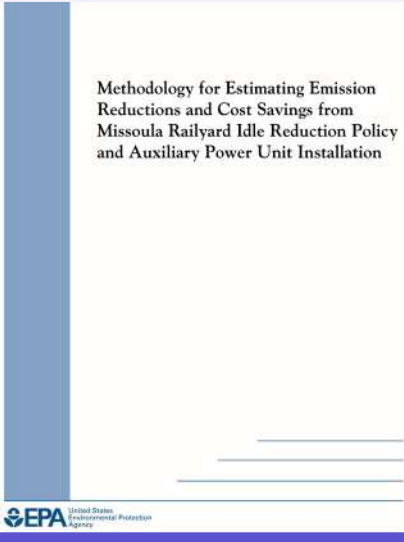
Proyecto *ICLEI's EcoLogistics* para su aplicación en todo tipo de ciudades

Atributos relevantes

- Calcula emisiones de GEI para la operación del transporte de carga urbano y transporte de mercancías.
- Permite la modelación de escenarios de emisión en el transporte de carga, mediante la evaluación de medidas y objetivos hipotéticos.
- Permite el monitoreo continuo en el tiempo de las mediciones y la comparación con otras ciudades.

Soporte conceptual

Marco conceptual del Consejo Global de Emisiones del sector Logística versión 2.0.



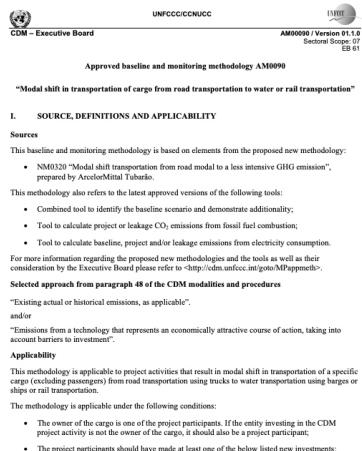
Environmental Protection Agency (EPA) - revisión enfocada en transporte férreo

Descripción

La EPA, dentro de sus múltiples análisis y lineamientos para la estimación de emisiones, ha establecido estándares de emisión de NO_x, HC, CO, PM y humo para locomotoras de nueva fabricación y refabricadas.

Estos estándares incluyen conjuntos cuya aplicabilidad depende de la fecha de fabricación de la locomotora. Así, lo reportado por la EPA describe las estimaciones de las tasas típicas de emisión en uso para las locomotoras, así como los factores de emisión para estos contaminantes criterio como propuesta de alternativas para la estimación de otros contaminantes.

Parámetros ambientales
Contaminantes criterio (PM, CO, NO _x y HC), así como ecuaciones alternativas para SO ₂ y CO ₂
Institución y ámbito
La EPA
Atributos relevantes
- Define factores de emisión para locomotoras, dependiendo del tipo de ciclo y su estándar de emisión.
Soporte conceptual
Estándares propios de la organización contruidos para Estados Unidos, asociados a motores y emisiones de exosto.



Methodology AM0090 - Modal shift transportation from road modal to a less intensive GHG emission

Descripción

Utiliza las metodologías establecidas por el MDL, que surgen de la necesidad de establecer una línea base para (y hacer seguimiento a) la cantidad de emisiones reducidas por los proyectos financiados por el MDL en diferentes países.

Esta metodología en específico se direcciona a la evaluación de GEI para proyectos que resultan del cambio modal del transporte de carga por carretera a transporte fluvial / marítimo o ferroviario.

Parámetros ambientales

GEI limitado a CO₂

Institución y ámbito

Naciones Unidas - Convenio marco sobre el Cambio Climático - MDL

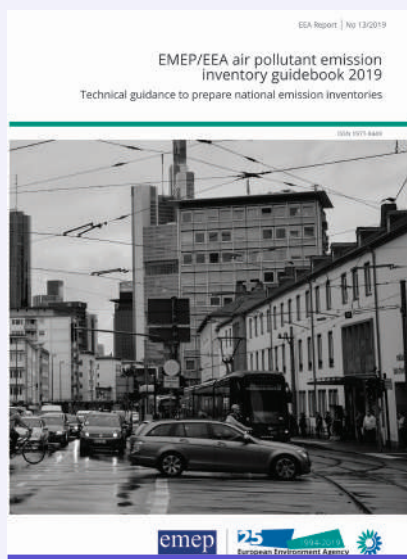
Atributos relevantes

- Presenta diferentes metodologías de estimación de GEI basadas en la medición de valores de consumos de combustible y sus respectivas proyecciones. En el enfoque de estimación de la línea base, se proponen factores de emisión predeterminados para camiones a diésel y gasolina, por tipo de carga transportada.

Soporte conceptual

Los valores predeterminados presentados en la línea base provienen de diferentes estudios realizados en Francia.

EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019



Descripción

También llamada EMPE CORIAIR *emission inventory guidebook*, es la guía de estimación de emisiones de contaminantes atmosféricos de la Agencia Europea de Medio Ambiente. Está diseñada para facilitar la notificación de inventarios de emisiones por parte de países al Convenio de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) sobre contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia y a la Directiva de techos nacionales de emisión de la Unión Europea.

Esta guía adopta el mismo enfoque utilizado en las directrices del IPCC, expresando los métodos en tres niveles de complejidad creciente: Tier 1, Tier 2 y Tier 3. Además de una aproximación metodológica, detalla una base de datos de factores de emisión para diferentes fuentes de emisión medidos en Europa.

Parámetros ambientales

Contaminantes criterio (PM, CO, NO_x y VOC), consumos de combustible y GEI (N₂O y CH₄)

Institución y ámbito

Agencia Europea de Medio Ambiente.

Atributos relevantes

- Presenta metodologías de estimación de emisiones para vehículos de autotransporte, transporte férreo y fluvial / marítimo.
- Propone metodologías de cálculo basadas en valores de actividad (principalmente asociados a la distancia), consumos de combustible específicos y factores de emisión de bases de datos europeas.
- Para autotransporte, presenta como principales fuentes de información el modelo COPERT, que permite hacer correcciones de los factores de emisión por porcentaje de carga, velocidad y pendiente del terreno.

Soporte conceptual

Maneja diferentes fuentes de información para factores de emisión y consumos de combustible. Dentro de ellas, se destaca la base de datos de factores de emisión del modelo COPERT VI, que cubre diferentes categorías vehiculares por velocidad promedio, porcentaje de carga y pendiente de la vía.



EcoTransIT World

Environmental Methodology and Data Update 2020

commissioned by
EcoTransIT World Initiative (EWI)

EcoTransIT World - Environmental methodology and data update 2020

Descripción

Es la base conceptual de la iniciativa EcoTransIT, una plataforma independiente impulsada por la industria para transportistas, proveedores de servicios logísticos y cargadores, dedicada a desarrollar y mantener una herramienta y metodología reconocidas mundialmente, para la medición de huella de carbono y evaluación de impacto ambiental del sector del transporte de carga.

Se basa en las directrices de la norma EN 16258 e integra las últimas investigaciones disponibles sobre los contaminantes del aire.

Parámetros ambientales

GEI y contaminantes criterio

Institución y ámbito

Iniciativa *EcoTransIT World*

Atributos relevantes

- Presenta una definición clara de parámetros logísticos como capacidad de carga, utilización de capacidad y factor de viajes en vacío.
- Provee una metodología para estimación de emisiones de diferentes modos de transporte, como automotor, férreo, fluvial y aéreo, reportando valores estándar de las variables requeridas para el análisis.

Soporte conceptual

Considera diferentes fuentes de información asociadas a investigaciones recientes.

Adicionalmente, abarca fuentes oficiales como: HBEFA, INFRAS 2019, MOVES2014, y EPA. En total, cuenta con más de 70 referencias de información.

REFERENCIAS LOCALES



SEMARNAT - *Elaboración del Inventario Nacional de Emisiones de Fuentes Móviles para México 2013 y proyección 2030 mediante el uso del modelo Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) y Elementos para el inventario de emisiones de fuentes móviles*

Descripción

En estos documentos se presenta la actualización del inventario de emisiones de México con base en los años 2013 y 2016, donde se utilizó el modelo MOVES para la determinación de factores de emisión para las diferentes categorías vehiculares.

Parámetros ambientales

GEI y contaminantes criterio

Institución y ámbito

SEMARNAT - INECC

Atributos relevantes

- Presenta los valores por estado y municipio de México de las emisiones para diferentes contaminantes criterio y GEI.
- Provee una metodología para el uso y adaptación del modelo MOVES a nivel local.

Soporte conceptual

Utiliza como base la información proporcionada por MOVES, ajustando los valores para México.



SEMARNAT - Impacto ambiental de contenido de azufre en el diésel vehicular comercializado en México

Descripción

En este documento, se muestra la situación actual y el pronóstico de la mejora de la calidad del diésel en términos de contenido de azufre, para el combustible distribuido en México.

Parámetros ambientales
Contenido de azufre en el diésel en México
Institución y ámbito
SEMARNAT - INECC
Atributos relevantes
- Caracterización del diésel utilizado en México
Soporte conceptual
Valores medidos de forma local

CAPÍTULO

2

METODOLOGÍA

PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE GEI





El presente capítulo introduce el enfoque metodológico definido para la estimación de gases de GEI para el transporte de carga en México, el cual sigue un enfoque dirigido al usuario generador o al transportista de carga, de tal manera que pueda utilizarse esta metodología para estimar las emisiones que se desprendan de sus viajes.

Adicionalmente, la metodología permite realizar comparaciones entre diferentes escenarios de emisiones para la combinación de uno o más modos de transporte en un viaje.

Así, es posible comparar viajes similares en distancia, realizados en diferentes modos, para identificar la combinación que genera más o menos emisiones.

El enfoque metodológico se aborda a través de los siguientes criterios:

1

Como parte del alcance, se incluye la estimación de CO_2 , N_2O y CH_4 . En términos de límites del sistema, se plantea cubrir las emisiones directas e indirectas asociadas a los procesos que se llevan a cabo durante el transporte de mercancías, lo cual significa que tiene un alcance tipo *well-to-wheel*. En las secciones posteriores *Alcance* y *Límites del sistema*, se presentan los límites y el alcance del tipo de emisiones cubiertas por la metodología.

2

El método de métodos de estimación define un cálculo basado en la actividad, donde los insumos de mayor relevancia para la estimación provienen de las características del viaje realizado. Estos y otros aspectos específicos de la aproximación metodológica se detallan a lo largo de este apartado del documento. En la sección *Método de estimación* se presenta el método y el enfoque de aproximación al cálculo, ya sea utilizando el consumo de combustible o las características de la actividad del transporte de carga como insumo principal.

3

Finalmente, la sección *Aproximación metodológica*, ubicada más adelante, presenta el grueso del desarrollo metodológico del capítulo, en ella se expone la metodología para estimación de GEI para autotransporte, transporte férreo y marítimo / fluvial, los supuestos considerados, los componentes y variables del cálculo, al igual que todas aquellas consideraciones especiales que deben tener en cuenta los usuarios de la metodología al momento de su aplicación.

ALCANCE

El alcance corresponde a acotar el tipo de gases y contaminantes que se tendrán en cuenta en la estimación, los cuales serán analizados y reportados por los usuarios mediante la calculadora.

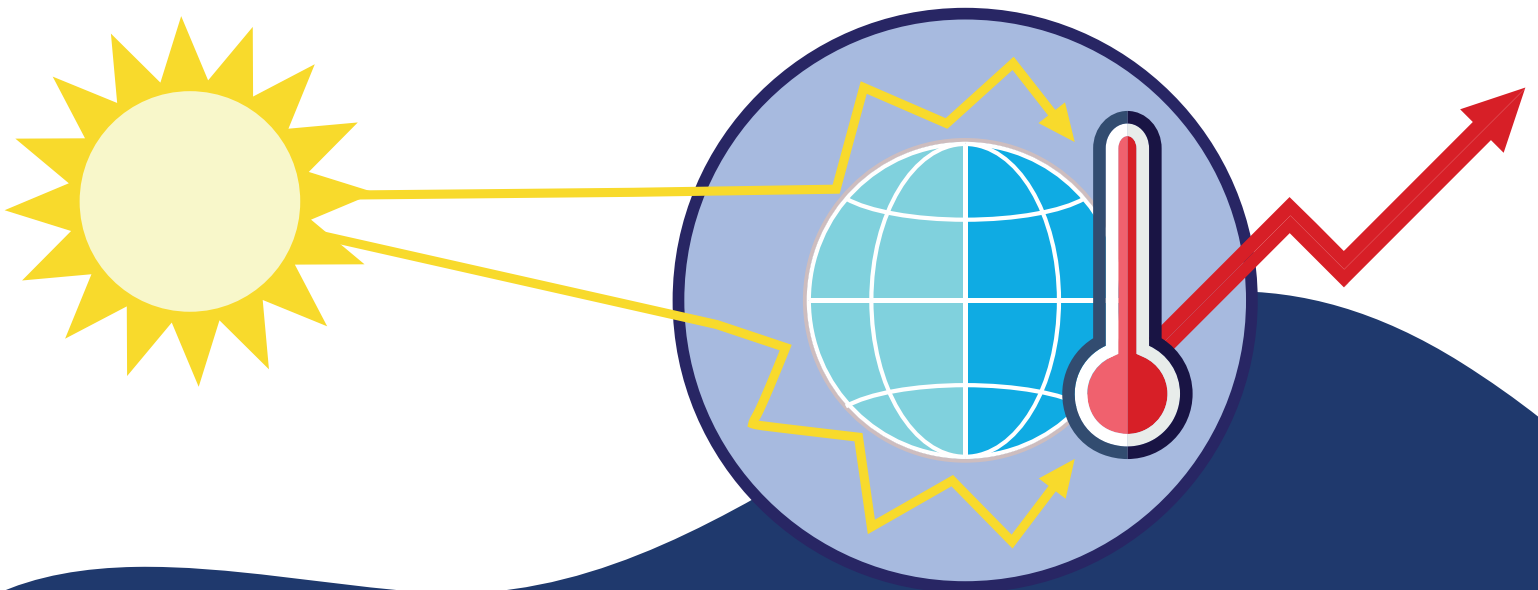
La metodología contempla la estimación de emisiones tanto de GEI como de contaminantes criterio, considerando que la evaluación de escenarios (base vs. hipotético) en materia de emisiones debe lograr identificar beneficios adicionales, como resultado de cambios en tecnologías de propulsión de vehículos o en modalidades de transporte, proporcionando así una perspectiva amplia sobre el impacto que este tipo de medidas puede tener sobre aspectos relacionados con la calidad de vida, como la salud.

Con respecto a los GEI, el enfoque propuesto considera un alcance superior al tradicional dióxido de carbono y busca llegar a mediciones de mayor nivel de especificidad, como el óxido nitroso, los hidrofluorcarbonos, entre otros.

Lo anterior, apoyado en el hecho de que, para estándares y protocolos internacionales, las estimaciones de las emisiones de GEI generadas en las diferentes actividades evaluadas requieren, no solo considerar las emisiones de CO₂, sino incluir las emisiones de otros gases de alto potencial de calentamiento.

Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Estas emisiones corresponden en parte a GEI, que tienen la capacidad de **emitir y absorber radiación** y, por ello, atrapan el calor en la atmósfera.



Para el presente proyecto, los GEI considerados se listan y describen a continuación. Cabe señalar que la incorporación de cada uno de ellos relativo a otros existentes en la literatura responde a la revisión de otras metodologías y aplicativos (calculadoras) en el ámbito internacional, al igual que al estudio de múltiples fuentes conceptuales en materia de medición de emisiones para el transporte de especial relevancia. Aquellas de mayor importancia se presentan al final del presente capítulo.

La definición de los GEI considerados en este estudio se presenta a continuación:

- **CO₂:** El **dióxido de carbono** es un gas incoloro, inodoro y no venenoso, es el principal contaminante de GEI que se genera por procesos antropogénicos. Este contaminante ingresa a la atmósfera a través de la quema de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), residuos sólidos, árboles y otros biológicos. [10] [11]
- **CH₄:** El **metano** es un gas traza, principal componente del gas natural, también se trata de un GEI de importante potencial de calentamiento. Este se emite de fuentes antropogénicas, como rellenos sanitarios, sistemas de petróleo y gas natural, actividades agrícolas, minería de carbón, combustión estacionaria y móvil, tratamiento de aguas residuales y ciertos procesos industriales.
- **N₂O:** El **óxido nitroso** es un importante GEI de larga duración que se emite predominantemente por fuentes biológicas en el suelo y el agua, así como en actividades agrícolas e industriales, y en la combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos. Tiene un alto potencial de calentamiento global. También es la fuente primaria en la estratosfera de óxidos de nitrógeno que juegan un papel fundamental en el control de la abundancia y distribución de ozono estratosférico.
- **HFC y SF₆:** Los **hidrofluorocarbonos** y el **hexafluoruro de azufre** son GEI sintéticos potentes que se emiten en diversos procesos industriales, en especial en procesos de refrigeración. En ocasiones, se utilizan como sustitutos de sustancias que destruyen el ozono de la estratosfera, en especial diferentes refrigerantes. Estos gases habitualmente se emiten en pequeñas cantidades, pero como son GEI potentes. En ocasiones se les conoce como gases de Alto Potencial de Calentamiento Global.



En paralelo, y como parte de la delimitación del alcance, es importante puntualizar el contaminante que no se incorporó en el diseño de la metodología de medición de emisiones y, por ende, no estará incluido en la calculadora.

CONTAMINANTE EXCLUIDO

El único excluido, entre aquellos de mayor relevancia para las mediciones estandarizadas existentes, es el ozono. Este no se incorpora considerando que es un contaminante secundario generado en la atmosfera a partir de reacciones fotoquímicas, lo cual imposibilita llegar a una cuantificación precisa en la estimación de emisiones generadas directamente en el exosto de los vehículos.

Por otro lado, uno de los aspectos clave dentro de la definición del alcance de la calculadora se refiere a la unidad de análisis.

Para efectos del ejercicio diagnóstico, del diseño y construcción de la metodología, y de la herramienta para su aplicación (la calculadora), se trabajará utilizando el CO₂e. Esta es una unidad que describe el impacto de diferentes GEI bajo una sola medida relacionada con el potencial de calentamiento de cada contaminante. Esta medida se utiliza para unificar la cuantificación de emisiones evitadas al comparar escenarios.

Para poder llegar a ella se recurre a un proceso de cálculo en el cual se realiza una sumatoria del producto entre la emisión del contaminante en cuestión y su potencial de calentamiento respectivo, expresado en la siguiente ecuación.

Mientras que el primer componente de la ecuación hace referencia a la magnitud de cada contaminante, el segundo hace alusión al potencial de calentamiento global, un factor que mide el efecto relativo de diferentes contaminantes sobre el calentamiento de la atmosfera, bajo una única métrica que permite agregar dicho efecto generado por cada contaminante en unidades equiparables.

Ecuación 1 | Fórmula del equivalente de dióxido de carbono

$$ECO_2e = \sum_i E_i \times PCG_i$$

Donde:

E_i hace referencia a las emisiones

PCG_i corresponde al potencial de calentamiento global ya explicado

El subíndice i refiere a cada uno de los contaminantes presentes en la estimación

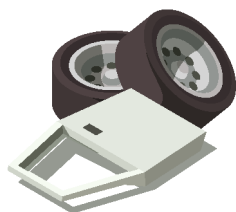
LÍMITES DEL SISTEMA

Las **emisiones de GEI** pueden categorizarse entre directas, indirectas y de ciclo de vida.

Las **directas** son aquellas que se desprenden de la actividad de análisis misma. Es decir, para el caso del transporte de carga, las emisiones directas son aquellas que se generan a partir de la actividad de transporte de mercancías, de los desplazamientos que realizan los vehículos utilizados para dicha labor entre el punto de fabricación / consolidación y los centros de distribución. En la literatura se denominan como *tank to wheel*, dado que cubren los procesos que se dan en el vehículo mismo.

Por su parte, las emisiones **indirectas** amplían el campo de análisis y cubren los procesos de generación de la energía utilizada por las unidades de análisis. Para el caso del transporte de carga, estas emisiones hacen alusión a los tres procesos requeridos para la producción de la energía utilizada para propulsar los vehículos: extracción de materias primas para generación de energía, refinación o conversión de energía, y transporte y distribución. Estas se conocen como *well to tank*, dado que abarcan todos los procesos de consumo de energía anteriores a la actividad de análisis.





Finalmente, las emisiones de **ciclo de vida** cubren todos aquellos procesos complementarios al funcionamiento de las unidades de análisis (operación y mantenimiento de su infraestructura, al igual que las instalaciones y desinstalaciones asociadas a dichos procesos) y su ciclo de vida (producción, mantenimiento y fin de ciclo de estos mismos materializado en la eliminación y disposición).

Para el caso del transporte de carga, este grupo de emisiones comprende la manufactura, ensamblaje, mantenimiento y chatarrización de los vehículos utilizados para el transporte de carga, los procesos de operación y mantenimiento de la infraestructura del transporte (bodegas, centros de distribución), y todos aquellos procesos de cargue / descargue. Lo anterior, cubre a todos los modos de transporte estudiados, desde el autotransporte, pasando por el transporte ferroviario, hasta el marítimo / fluvial.

A partir del entendimiento del tipo de emisiones existentes y de la revisión de buenas prácticas de estimación de emisiones, se definen los límites del esquema propuesto. Para el caso de las emisiones de GEI, las emisiones cubiertas serán las directas y las indirectas (*tank to wheel* y *well to tank*, respectivamente).

En conjunto, el alcance se denomina como *well to wheel*, pues abarcan todos los procesos que se gestan desde la fuente de energía hasta su uso directo en el movimiento de los vehículos.

Esta delimitación del alcance del sistema se apoya en lineamientos y normativa internacional en la materia. Esta información se simplifica en la figura de la siguiente página.

La más reciente versión del estándar europeo recomienda que tanto las emisiones *tank to wheel* como las *well to tank* se consideren a la hora de realizar estimaciones para el sector.

Por su parte, referentes internacionales como la Convención de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC) instan a que se excluya del alcance de las estimaciones a la operación y mantenimiento de las instalaciones de producción de fabricación de las mercancías o aquellas utilizadas para el almacenamiento.

Figura 1 | Alcance del tipo de emisiones para GEI cubierto por la metodología



MÉTODO DE ESTIMACIÓN

A la hora de realizar estimaciones de emisiones de GEI para el caso del transporte, hay dos posibles aproximaciones metodológicas que pueden aplicarse.

1

La primera forma consiste en llegar a la estimación de emisiones por medio de valores de consumo de combustible. Así, bajo esta aproximación, se convierte el consumo de combustible y / o energía de los vehículos transportadores en emisiones a partir de su relación directa con factores de emisión propios del contexto y naturaleza de la estimación misma.

2

La segunda, se trata de llegar a la estimación de emisiones por medio de la actividad realizada; en este caso, el transporte de carga y las diferentes variables que caracterizan a este proceso. Bajo este enfoque, se llega al consumo de combustible y / o energía del vehículo y, luego, al cálculo de sus emisiones por medio de factores de emisión, a partir de variables asociadas a sus características físicas y de actividad, como masa transportada, distancia, tipo de recorrido, entre otros.



Lo anterior puede apreciarse de manera esquemática a continuación:

Figura 2 | Aproximaciones existentes para el cálculo de emisiones de transporte de carga



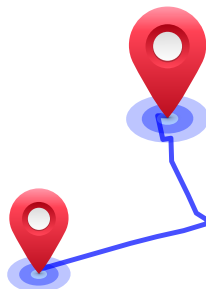
Fuente: Ecologist Self-Monitoring Tool, User Guide, ICLEI - Sustainable Mobility, 2022

La decisión de escoger un enfoque u otro se debe a la disponibilidad de información; en este caso, la disponibilidad de información asociada al consumo de combustible para cada viaje o recorrido que quiera estudiarse.

Para el caso que refiere esta metodología y pensando en los diferentes niveles de desagregación de información interna que puedan tener los usuarios de la metodología, se optó por utilizar un enfoque basado en actividad, considerando que los usuarios prospectivos de la metodología (empresas generadoras de carga u operadores de carga) pueden tener una mayor precisión, a nivel de viaje, en lo que se refiere a:



**CARGA
TRANSPORTADA**



**DISTANCIAS RECORRIDAS ENTRE PUNTOS
DE FABRICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN**



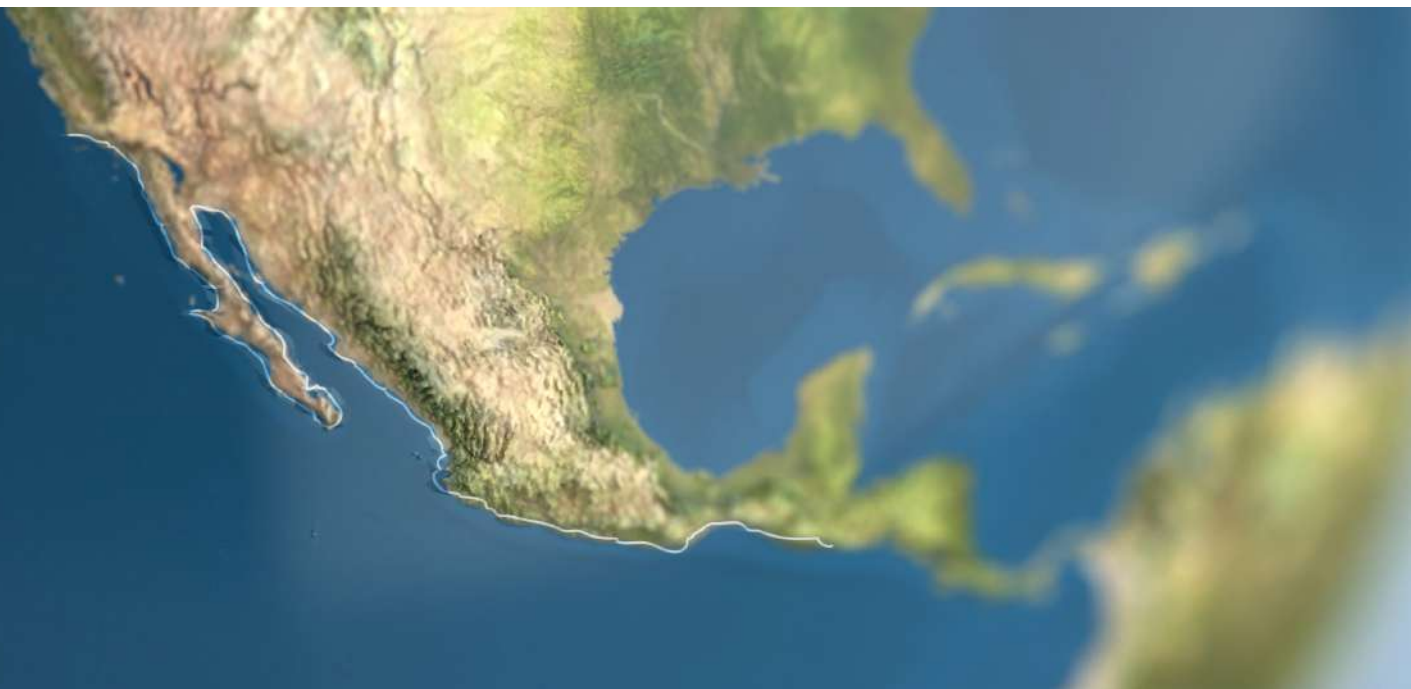
**TIPOS DE VEHÍCULOS UTILIZADOS
PARA DICHA LABOR**

Un enfoque basado en actividad permite la parametrización del cálculo en beneficio de un análisis segmentado por características del viaje. Así, los usuarios pueden comparar sus emisiones de viajes por tipo de variable de actividad, permitiendo tener un mejor entendimiento de la dinámica de emisión en el transporte de mercancías por cuenta de los modos de transporte empleados, la configuración de la carga transportada, la ruta escogida, entre otros aspectos.

APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

Método general

La aproximación para estimar las emisiones del transporte de carga en México busca plantear cálculos a nivel de etapa de viaje, con el fin de realizar una discriminación a nivel de modo a través del viaje analizado. Así, un viaje entre un punto A hacia un punto B puede estar desagregado en etapas, donde pueden interactuar diferentes modos, o bien, donde puede haber un mismo modo, pero en el cual se llevan a cabo procesos de cargue / descargue preliminares entre vehículos de distinto tamaño.



El método general de estimación se basa en una ecuación de tres componentes principales: la carga movilizada, la distancia recorrida y el factor de emisión, el cual depende de características vehiculares como tipología y tecnología, así como de parámetros logísticos, características de la ruta y tipología de mercancía transportada.

En forma general, el cálculo de la estimación de GEI se presenta en la siguiente la ecuación.

Ecuación 2 | Estimación de emisiones GEI - fórmula base



Tal como lo indica la ecuación anterior, el proceso de estimación tiene como fin último el cálculo de emisiones a nivel de etapa de viaje para cada gas contaminante, cubierto bajo el alcance (ver sección *Límites del sistema*, página 30) en términos la unidad estándar: CO₂ equivalente. Esto, con el propósito de poder equiparar y hacer comparables los cálculos de cada uno de los gases analizados bajo una única métrica.

Respecto a los componentes de la ecuación, a continuación, se detalla a profundidad su significado, unidades y particularidades para tener en cuenta a la hora de aplicar la metodología.

Masa de productos transportados

Expresado en toneladas, hace referencia al producto transportado durante la etapa *n* del viaje en cuestión. Este componente debe ser diligenciado directamente por quien vaya a hacer uso de la metodología y acompaña al tipo de producto transportado. En la herramienta de aplicación, su incorporación se realiza de manera directa indicando la masa del producto transportado en toneladas.



A partir de las categorías arancelarias existentes en el sistema armonizado mexicano, al igual que basados en su estructura de secciones, capítulos, partidas y subpartidas, se define una clasificación para el tipo de productos que podrán seleccionarse y al cual se podrá asociar una masa transportada a nivel de viaje por los usuarios de la metodología. A su vez, estos productos están asociados a un tipo de carga: carga granel, volumen y carga general, que permite manejar diferentes factores de ocupación y viajes en vacío de cara a la estimación de emisiones.

Estas categorías, las principales a un mayor nivel de agregación, se presentan en la siguiente tabla. La lista completa de productos detallada se incluye en el Anexo 5 (página 160) de este documento.

Tabla 1 | Categorías de productos

	Clasificación de productos	Modalidad de transporte	Tipo de carga asociada
	Productos alimenticios secos, forrajes, granos, semillas y derivados	Contenedores y carga general	Carga general
	Frutas y verduras	Carga general y refrigerado	Carga general
	Animales y derivados	Carga general y refrigerado	Productos de volumen y carga general
	Alimenticios procesados	Contenedores y carga general	Carga general
	Productos minerales	Granel sólido y carga general	Carga general
	Maquinaria y equipo eléctrico	Contenedores y carga general	Productos de volumen y carga general
	Metales y sus derivados	Contenedores y extra dimensionada	Productos a granel
	Madera y derivados	Contenedores y carga general	Productos de volumen y carga general
	Combustibles y productos de la industria química	Peligrosos y granel líquido	Carga general
	Plásticos, cauchos, papel y derivados	Contenedores y carga general	Carga general
	Yeso, cemento, vidrio y similares	Granel líquido, contenedores y carga general	Carga general
	Productos manufacturados terminados	Contenedores y carga general	Carga general
	Productos manufacturados de gran tamaño	Automóviles	Productos de volumen

Fuente: Elaboración propia

Distancia recorrida por etapa de viaje



Hace referencia a la distancia en kilómetros de cada una de las etapas de viaje según el modo de transporte y diferenciando la etapa del recorrido que se realiza en un entorno urbano frente al interurbano. Al igual que el componente anterior, este debe integrarse directamente por el usuario, ya sea seleccionado un punto de inicio y destino dentro de la red incorporada en la calculadora, o bien, indicando el valor de la distancia recorrida para aquellos viajes entre puntos diferentes a los considerados inicialmente en la herramienta.

Factor de emisión

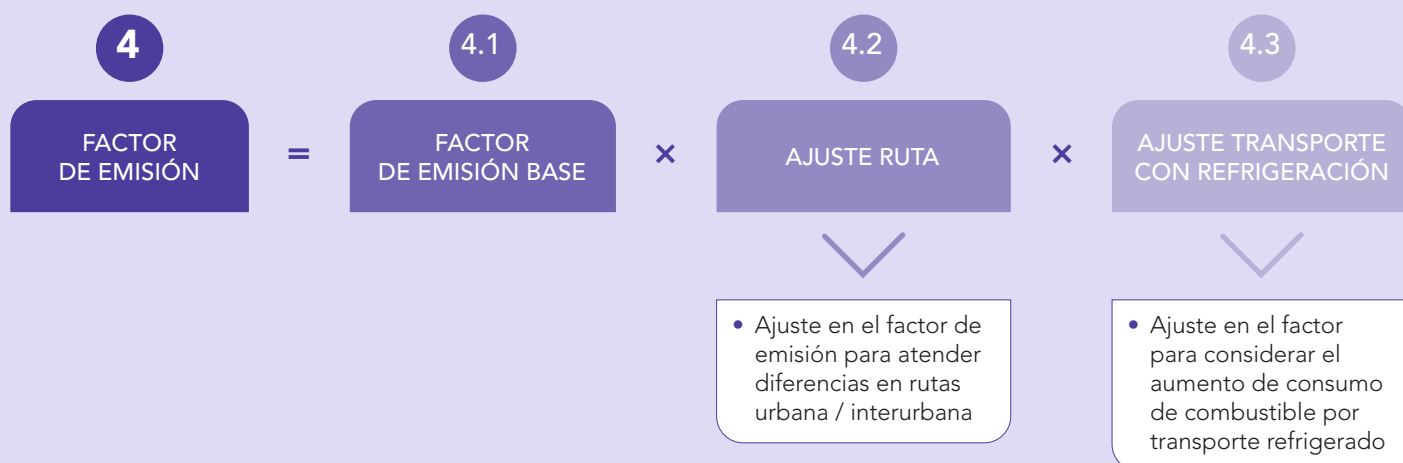


El factor de emisión representa la cantidad de contaminante producido por unidad de distancia y masa de carga transportada. Este factor depende de diferentes variables, entre ellas, las características del vehículo estudiado, los parámetros logísticos, las características del terreno, el tipo de carga transportada, entre otras particularidades del modo evaluado.

Su cálculo se concibe como el producto de un factor de emisión base por un par de parámetros de ajuste que representan correcciones por el tipo de ruta y requerimientos de consumo energético en términos de la necesidad de refrigeración de la carga transportada. Estos factores de ajuste se incorporan en función del modo de transporte analizado.

A continuación, de manera generalizada, se presenta la ecuación para el cálculo del factor de emisión:

Ecuación 3 | Factor de emisión

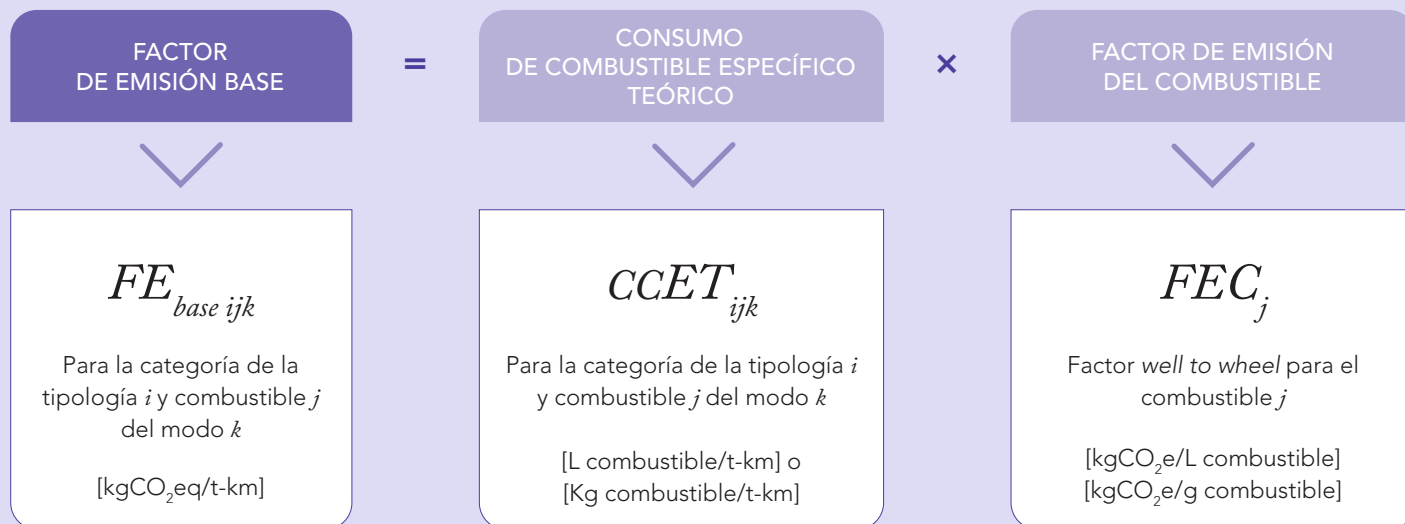


Donde:

Factor de emisión base se define como la interrelación entre el nivel de consumo de combustible específico teórico de un vehículo acorde a su tipología con su capacidad de emisión de gases contaminante, sin considerar factores externos asociados al viaje realizado.

La aproximación metodológica para su cálculo se presenta a continuación:

Ecuación 4 | Factor de emisión base



Donde:

El consumo de combustible específico teórico se calcula de forma particular para cada modo evaluado.

Fuente: Elaboración propia

NOTA

En las siguientes secciones se describe de forma detallada la estimación de este consumo, así como el detalle de la estimación del factor base para cada modo de transporte evaluado.

Por otra parte, el factor de emisión del combustible hace referencia a las emisiones generadas –en términos de CO₂eq– por cada litro de combustible consumido vía combustión.

Este factor adiciona el componente *well to wheel* a la ecuación, ya que contempla no solo emisiones generadas por la combustión del combustible de los vehículos, sino también su ciclo de vida acorde con los límites del sistema descritos anteriormente. Estos factores de emisión se obtienen de las diferentes fuentes bibliográficas acordes con la EN 16258.

El resumen de los factores utilizados en los cálculos de los diferentes modos se presenta en la tabla 2.

Tabla 2 Factores de emisión de combustible

Combustible	Factor de emisión <i>well to wheel</i>	
	kg CO ₂ eq/L combustible	kg CO ₂ e/kg combustible
Diésel	3.24	3.9
Fuel Oil Pesado - HFO	3.31	3.41
Diésel Marítimo - MDO	3.53	3.92
Gas Natural Licuado - LNG	3.49	3.62

Fuente: *Environmental Methodology and Data Update*, EcoTransit World, 2020

Como se mencionó anteriormente, la delimitación del factor de emisión base depende, en gran medida, de las particularidades del modo de transporte analizado.

A continuación, se detalla el desglose de dicho factor para cada uno de los modos de transporte contemplados en la metodología en función de las variables:



AUTOTRANSPORTE



TRANSPORTE FÉRREO



MARÍTIMO / FLUVIAL

Para cada uno de ellos, habrá particularidades asociadas a los dos factores que componen el cálculo del factor de emisión base (consumo de combustible específico y factor de emisión del combustible) o sólo para alguno de ellos, dependiendo de la aproximación descrita para cada modo.

a) Autotransporte

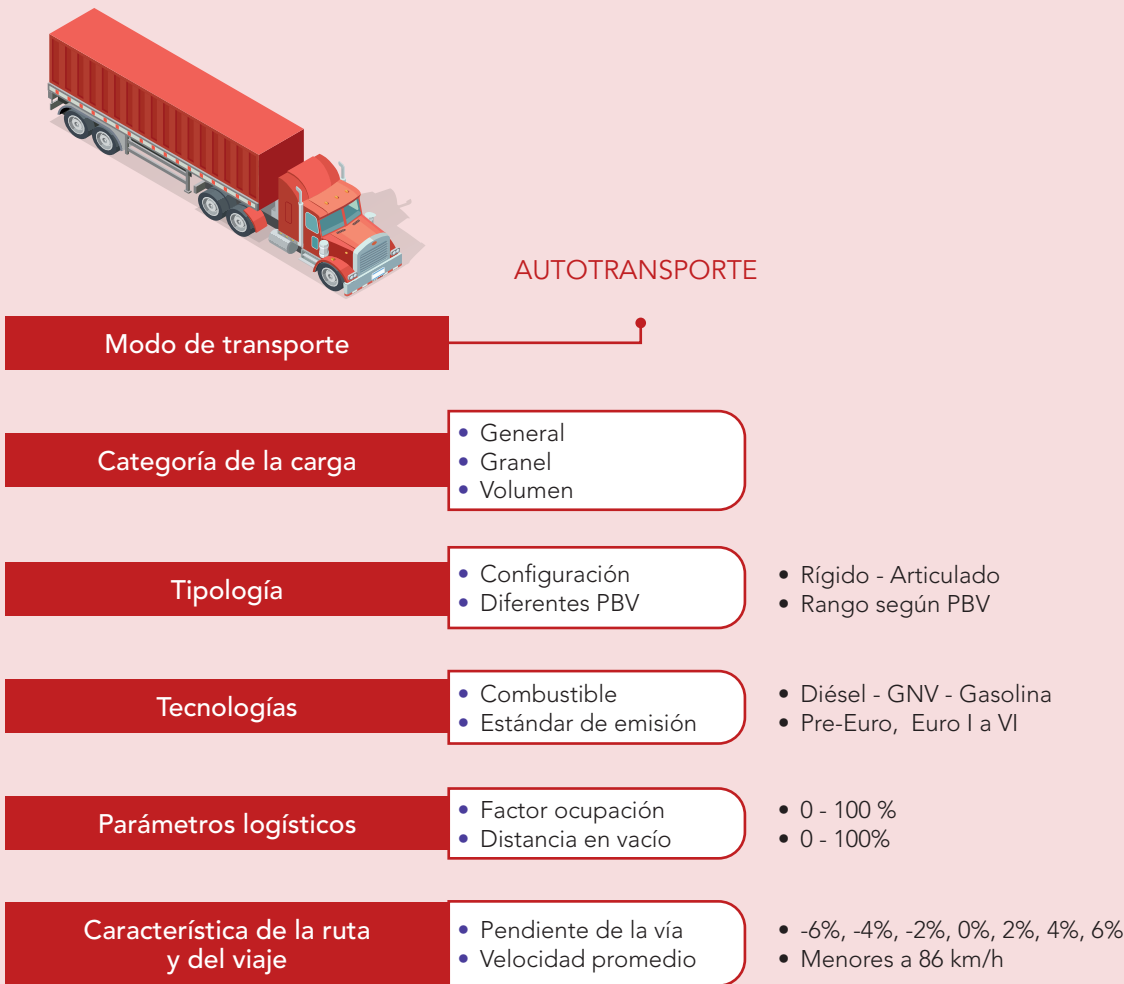
La desagregación del factor de emisión del combustible utilizado para el autotransporte contempla una clasificación por diferentes componentes asociados con atributos del vehículo, del viaje mismo y de la carga transportada. Entre ellos:

- La tipología vehicular establecida a través de la configuración de vehículos y el PBV.
- La tecnología vehicular dependiente del tipo de combustible y estándar de emisión que, a su vez, es delimitado por el año modelo del vehículo.
- Parámetros logísticos como los LF y de ET.
- Las características de la ruta y del viaje aproximadas a partir de la pendiente del tramo recorrido y de la velocidad promedio del viaje.



Esta desagregación se sintetiza en la figura 3.

Figura 3 Componentes de clasificación del factor de emisión base para autotransporte



Fuente: Elaboración propia

Para el caso del autotransporte, el segundo componente del cálculo del factor de emisión base (ver Ecuación 4, página 39), el consumo de combustible específico teórico se calcula a partir de parámetros logísticos (factor de ocupación y factor de viajes en vacío) y de consumo de combustible específicos en condiciones de factor de ocupación del vehículo (0% para el caso de un vehículo vacío y 100% para uno con carga completa).

Para el análisis del autotransporte, estos valores fueron calculados a partir de las ecuaciones predeterminadas del modelo europeo COPERT.

En particular, el cálculo de este componente se detalla a continuación, junto con la descripción respectiva de las variables utilizadas:

Ecuación 5 | Consumo de combustible específico teórico para autotransporte

$$CCET_{ijAUTOT} = \left[\frac{CCE_{vacío}}{CP \times \frac{LF}{1 + ET}} + \frac{CCE_{100\%} - CCE_{vacío}}{CP} \right]$$

Donde:

Notación	Variable	Descripción	Unidad	Fuente
$CCET_{ijAUTOT}$	Consumo de combustible específico teórico	Consumo de combustible i de la tipología j para el modo autotransporte	L/t-km	Ecuación propia basada en definiciones de <i>EcoTransit World</i> , 2020
ET	Factor de viajes en vacío	Relación entre los kilómetros recorridos en vacío y los kilómetros recorridos con carga	Factor	Específica del caso de estudio
LF	Factor de ocupación	Relación entre el peso neto de la carga transportada (M) y la carga útil (CP)		Calculado
M	Peso de la carga transportada	Peso neto de la carga transportada	Toneladas	Específica del caso de estudio
CP	Carga útil	Capacidad máxima de peso que puede llevar el vehículo	Toneladas	Valor predeterminado según peso bruto vehicular basado en lo reportado en la normativa actual
$CCE_{0\%}$	Consumo de combustible específico del vehículo en vacío	Consumo de combustible bajo un factor de ocupación de 0% dependiente de la velocidad promedio, pendiente de la vía, clase y tecnología del vehículo	Litros/km	COPERT versión 5.5
$CCE_{100\%}$	Consumo de combustible específico del vehículo con 100% de carga	Consumo de combustible bajo un factor de ocupación de 100% dependiente de la velocidad promedio, pendiente de la vía, clase y tecnología del vehículo	Litros/km	COPERT versión 5.5

Como parte del análisis, se identifican los factores de emisión para algunas tipologías de autotransporte a partir de las variables mencionadas en la tabla anterior. En particular, y en concordancia con las tipologías más conocidas en México, se identifican los factores para los camiones rígidos (unitarios) y para los articulados.

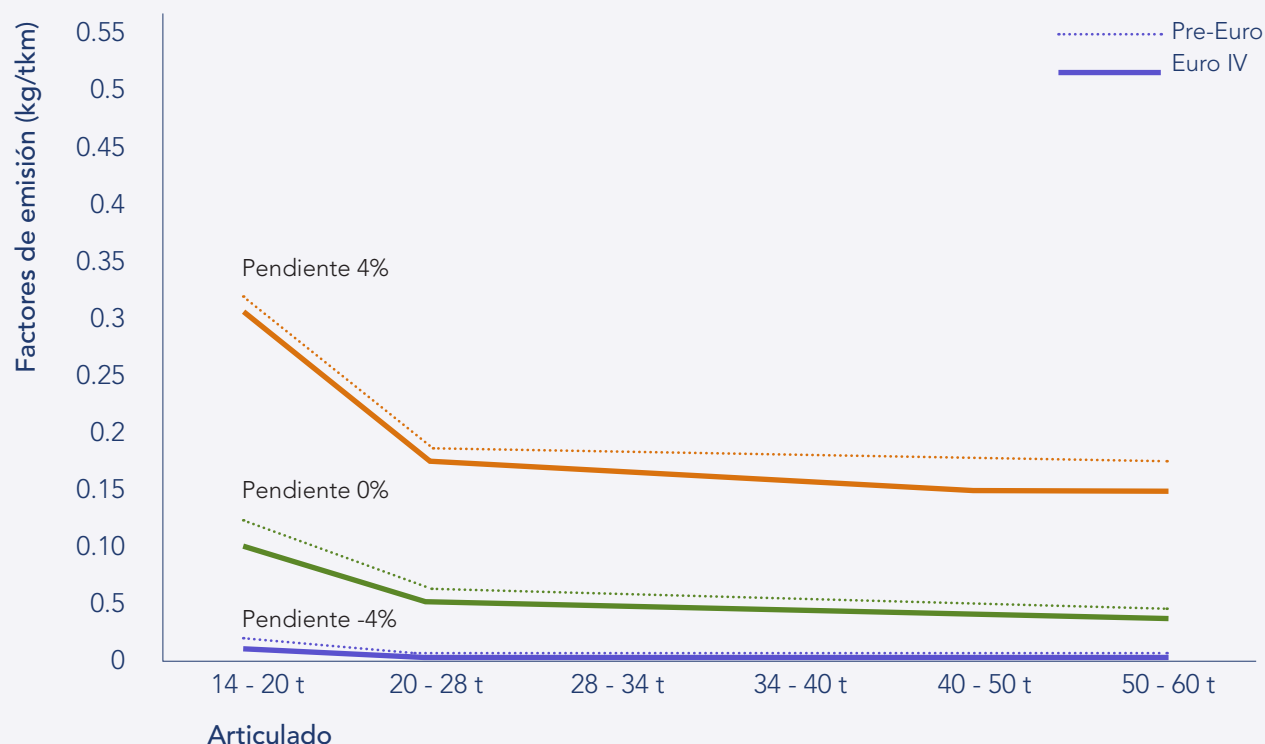
Lo anterior, para diferentes niveles de pendiente de vía (-4% para el caso de un tramo en descenso, 0% para un tramo plano y 4% para un tramo en ascenso) y para diferentes niveles de ocupación (LF) y de viajes en vacío (ET) para una velocidad promedio de 60 km/h.

A continuación, como ejemplo, se presenta el factor de emisión para el caso de diferentes tipos de camiones articulados entre 14 y 60 toneladas para un tipo de carga general, bajo los diferentes niveles de pendientes definidos.

Las gráficas de factor emisión para otros tipos de carga y parámetros logísticos se presentan en el Anexo 1 | Gráficos complementarios metodología de estimación GEI (página 137).

Gráfica 1

Factor de emisión CO₂eq autotransporte para camiones articulados con carga general



Fuente: Elaboración propia a partir de factores de COPERT

A partir de esta identificación, puede evidenciarse cómo el factor de emisión es sensible a la tecnología (estándar de emisión), donde el factor será menor en caso de que el estándar sea mayor (Pre-euro vs. Euro IV).

De igual manera, el valor del factor tiene una relación directa con la pendiente del segmento, de tal modo que para segmentos viales de menor pendiente el factor es correspondientemente menor. Lo mismo ocurre con el factor de ocupación.

Para evidenciar con mayor detalle las diferencias y relaciones entre el factor con las diferentes variables que componen su cálculo, véase el Anexo 1 (página 137), donde puede apreciarse gráficamente el factor de emisión dependiente al tipo de vehículo, a los parámetros logísticos y al tipo de recorrido para el resto de las tipologías de carga (carga a granel y a volumen).



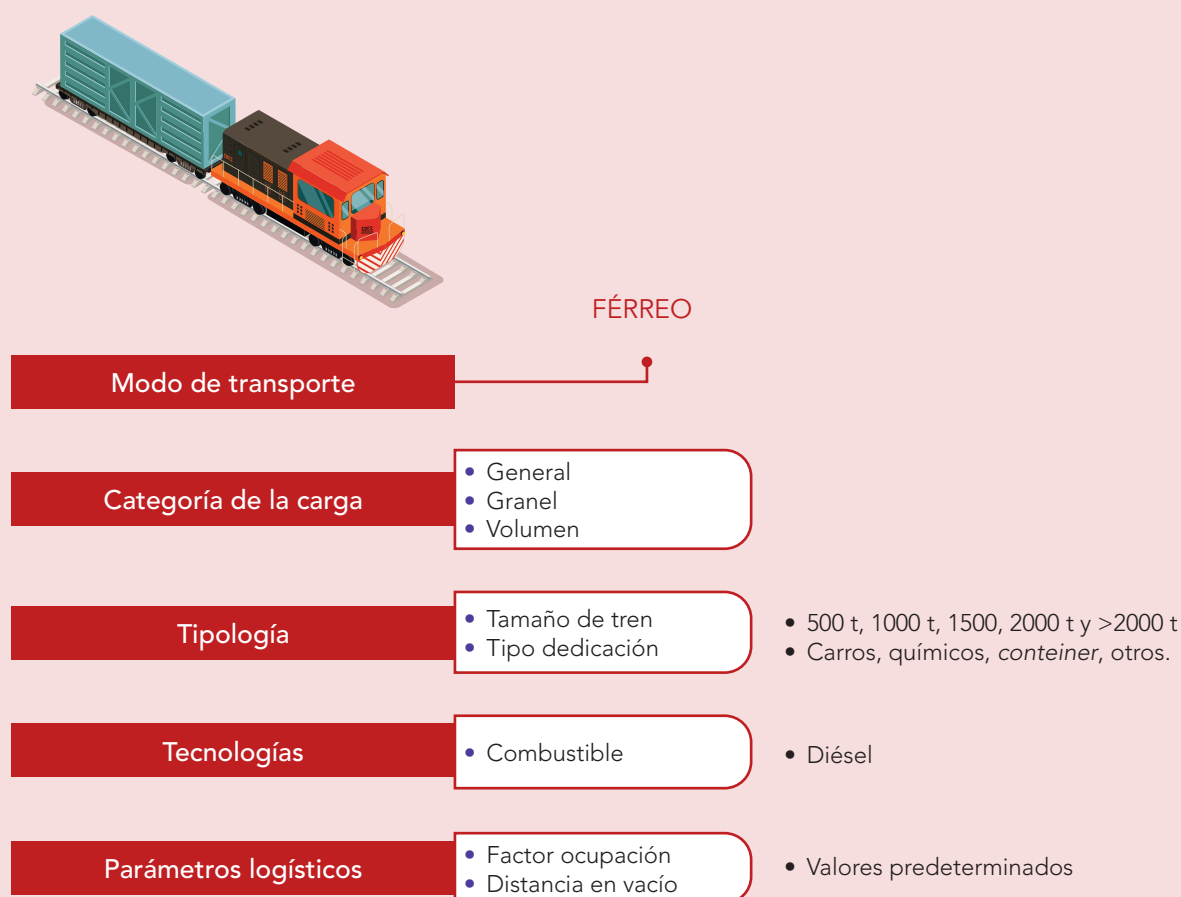


b) Transporte férreo

La desagregación del factor de emisión del combustible utilizado para el transporte férreo contempla una clasificación por los diferentes componentes asociados a los atributos del vehículo, en el caso de la locomotora (tipo y tecnología) y de la carga transportada (categoría y su relación con la capacidad del vehículo representada en los parámetros logísticos). Esta desagregación para el caso de GEI se presenta en la figura 4, donde es posible identificar un nivel distinto de desagregación (menor especificidad) relativo al caso del auto-transporte presentado anteriormente.



Figura 4 Componentes de clasificación de los factores de emisión de GEI para el modo férreo



Fuente: Elaboración propia

En este caso, los factores de emisión base no tendrán una estimación por diferentes características de la ruta y de viaje, debido a la escasa información topográfica detallada de las rutas de las vías de ferrocarriles y al hecho de que, en términos generales, las vías tienden a ser planas debido a la configuración locomotora - vehículo de arrastre de larga longitud.

1

El combustible solo tendrá una clasificación en diésel, dado que es el único combustible usado en trenes hoy en día en México para transporte de carga.

2

La desagregación por tipología estará asociada al tamaño del tren expresada en toneladas de peso bruto¹ o términos del tipo de dedicación del tren.

3

En cuanto a los parámetros logísticos, se utilizan valores predeterminados por tipo de carga transportada y dedicación a partir de fuentes secundarias.

¹ Tonelada de carga incluido el peso del vagón en vacío.

El segundo componente del cálculo, el consumo de combustibles teóricos tendrá un nivel de desagregación y segmentación por tipo de mercancía transportada (general, granel y volumen), y otro, por tipo de tren utilizado caracterizado (generales y dedicados, al igual que por peso).

Los consumos tomados como referencia principal provienen de *EcoTransIT World* y se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 3 | Consumos de combustible específicos teóricos para transporte férreo

Tipo de tren	Tipo de mercancía		
	Granel	General	Volumen
	Consumo de energía		
Trenes generales	g Diésel/tkm		
Ligero (500t)	3.4	3.9	5.1
Promedio (1000t)	2.2	2.6	3.3
Grande (1500t)	1.7	2.0	2.6
Extragrande (2000t)	1.4	1.7	2.1
Pesado (>2000t)	1.3	1.5	2.0
Trenes dedicados	g Diésel/tkm		
Carro	5.50		
Químicos	2.20		
Container	2.38		
Doble container	1.29		
Rolling road - Camión	2.38		
Rolling road - Semi Trailer	2.20		
Rolling road - Cuerpo intercambiable	2.41		
Carbón y acero	1.71		
Materiales de construcción	2.13		
Productos manufactureros	2.24		

Fuente: Cálculos propios a partir de insumos de *EcoTransit World*, 2022

Partiendo de los insumos presentados anteriormente, factores y consumos específicos, se presentan los factores de emisión base para el caso específico del transporte férreo, siguiendo la estructura de la Ecuación 4 (página 39).

1

En primer lugar, en la tabla 4 se muestran los factores para los trenes generales (que llevan todo tipo de carga y se segmentan por su tonelaje).

2

En segundo lugar, en la tabla 5, se detallan los factores de emisión base para trenes con dedicación específica por tipo de carga transportada. Cada uno, bajo diferentes rangos de ocupación de carga y de viajes en vacío.

Tabla 4 Factores de emisión para modo férreo para trenes generales

Tipo de tren		Tipo de mercancía		
		Granel	General	Volumen
		Factor de emisión		
Trenes generales	Toneladas de peso bruto	g CO ₂ eq/tkm		
Ligero	500	35.7	41.4	53.5
Promedio	1000	23.3	26.9	34.7
Grande	1500	18.1	20.9	27.0
Extragrande	2000	15.1	17.5	22.6
Pesado	>2000	14.1	16.2	21.0
Parámetros logísticos				
Factor de ocupación (LF)		100%	60%	30%
Factor de viajes en vacío (ET)		80%	50%	20%

Fuente: Cálculos propios a partir de insumos de EcoTransit World, 2022



Tabla 5 Factores de emisión para modo férreo para trenes dedicados

Tipo de tren		Factor de emisión	Parámetros logísticos	
Trenes dedicados	Toneladas de peso bruto	g CO ₂ eq/tkm	Factor de ocupación (LF)	Factor de viajes en vacío (ET)
Carro	700	57.99	85%	50%
Químicos	1200	23.18	100%	100%
Container	1000	25.10	48%	20%
Doble container	2500	13.64	48%	20%
Rolling road - Camión	1200	25.10	42%	20%
Rolling road - Semi Tráiler	1200	23.18	47%	20%
Rolling road - Cuerpo intercambiable	1200	25.35	39%	20%
Carbón y acero	1700	17.99	100%	100%
Materiales de construcción	1200	22.42	100%	100%
Productos manufactureros	1200	23.60	75%	60%
Cereales	1300	17.74	100%	60%

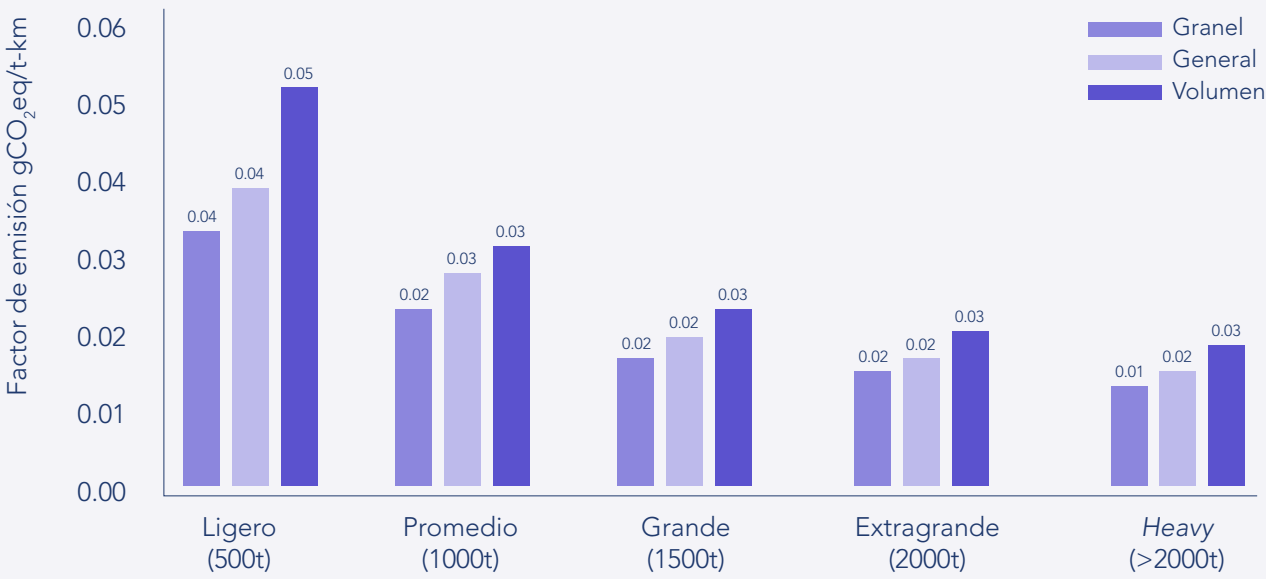
Fuente: Cálculos propios a partir de insumos de EcoTransit World, 2022

El comportamiento de los factores de emisión en gCO₂eq/tkm (gramo de CO₂ equivalente por tonelada kilómetro) estimados para el modo férreo, según tipología del tren y tipo de carga que transporta se presenta en la gráfica a continuación.

En general, estos tienen un comportamiento esperado donde este factor de emisión por unidad de masa se reduce para mayores niveles de peso bruto del tren.



Gráfica 2 Factores de emisión base (gCO₂eq/t-km) por tipo de tren, según tamaño y tipo de carga transportada

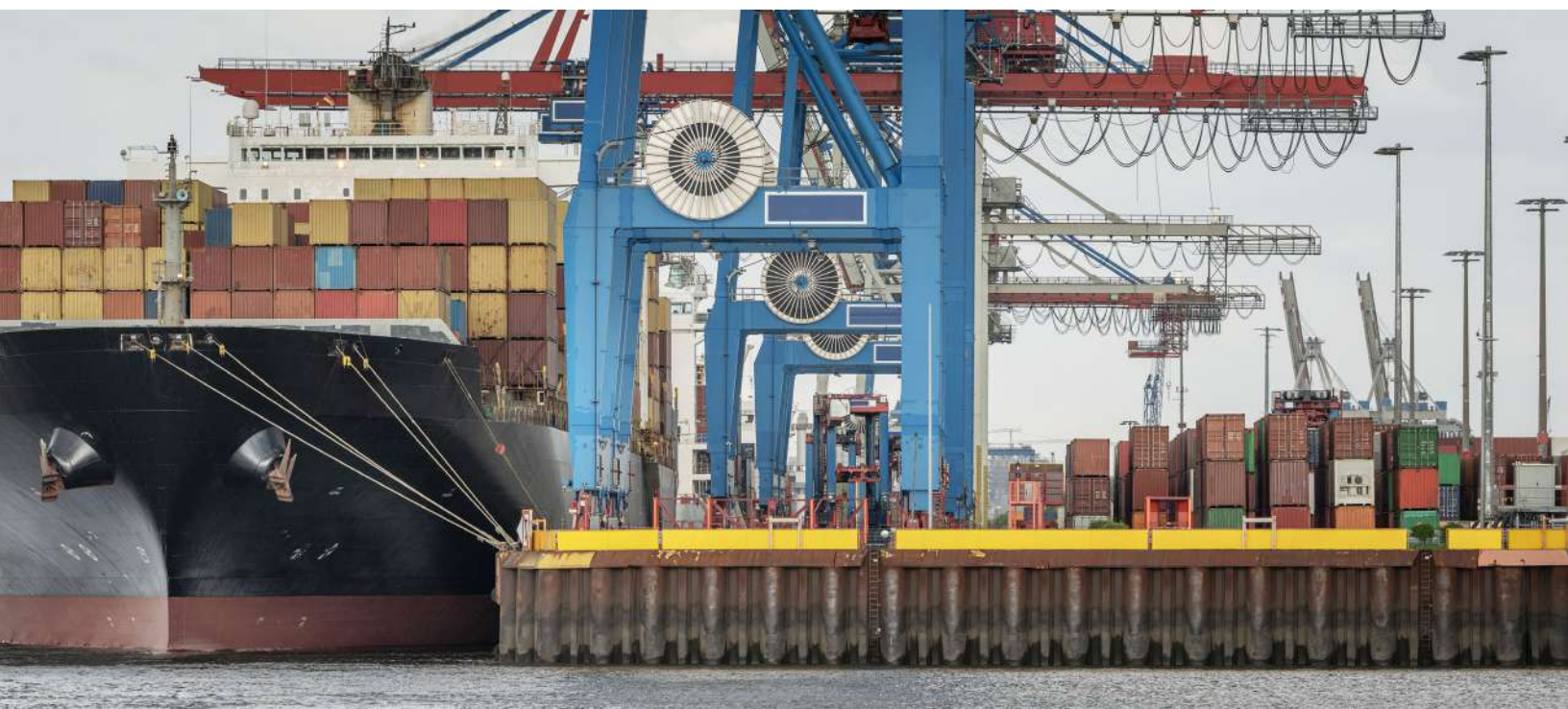


Fuente: Elaboración propia



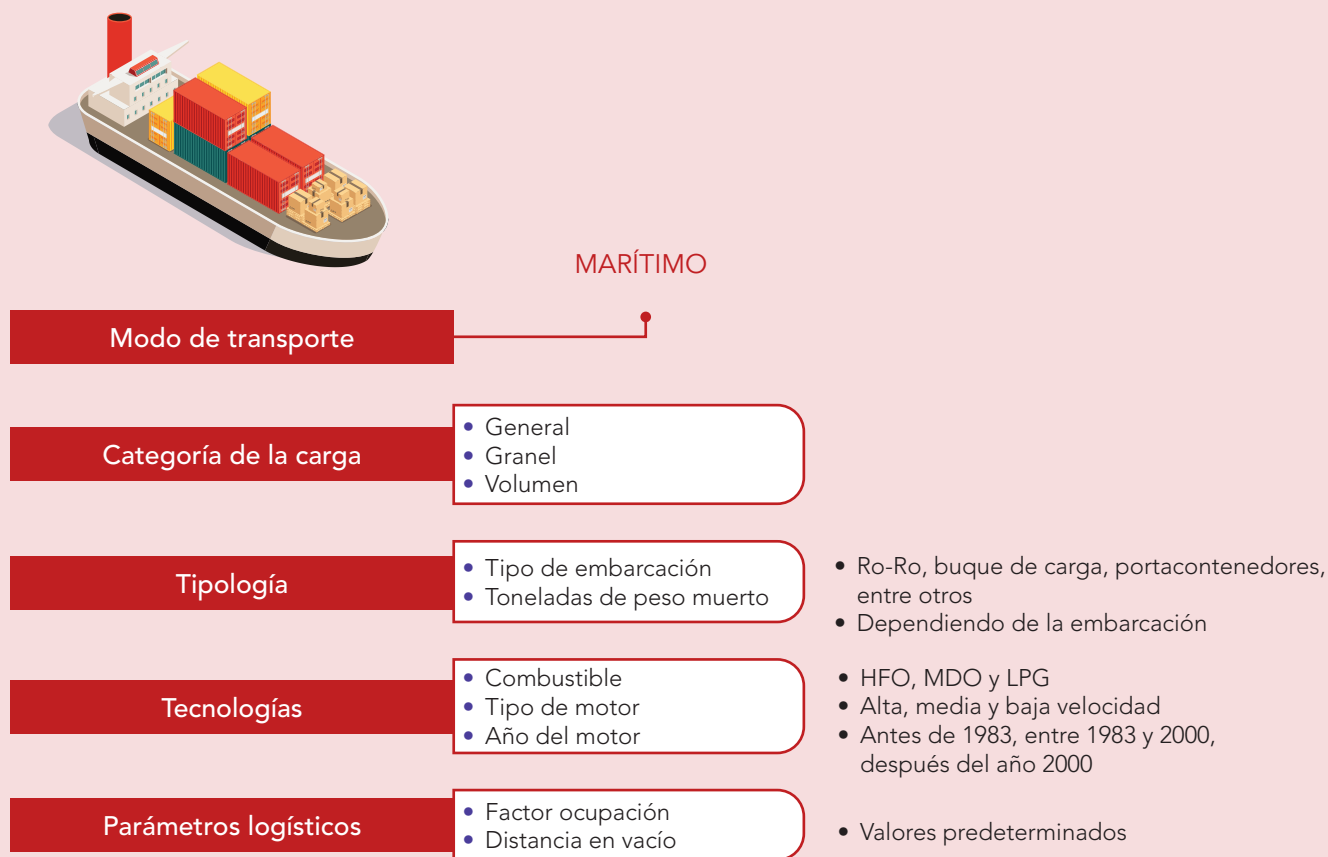
c) Transporte marítimo

Para el transporte marítimo, la desagregación del factor de emisión se da a cuatro grandes niveles: tipo de carga transportada, tipo de embarcación utilizada para el viaje, la tecnología de la embarcación que abarca aspectos como el modelo y tipo de motor, y los parámetros logísticos.



Esta clasificación se detalla en la figura a continuación:

Figura 5 | Componentes de clasificación de los factores de emisión para el modo marítimo



Fuente: Elaboración propia

2
Acrónimo para
roll-on/roll-off

Como puede apreciarse, la clasificación depende del tipo embarcación, en donde se consideran barcos tipo Ro-Ro², buque de carga, barco a granel, portacontenedores, entre otras tipologías de las cuales se reporta información de las variables requeridas para el cálculo del factor de emisión en los informes la Organización Marítima Internacional.

La tipología se encuentra clasificada por rangos de peso muerto que dependen del tipo de barco. Por otra parte, el tipo de mercancía (granel, volumen, general) se encuentra normalmente asociado con el tipo de barco, por lo que su selección depende de esta variable.

En cuanto al componente tecnológico, la clasificación depende de parámetros como el tipo de combustible, tipo, año y modelo del motor. Los combustibles disponibles para estimar su factor de emisión base corresponden al *Fuel Oil* Pesado - HFO, Diésel Marítimo - MDO y el Gas Licuado de Petróleo - GLP.

Por su parte, el tipo, año y modelo del motor determinan el consumo específico de energía, variable que se utiliza en el factor de emisión. La clasificación del tipo de motor en este estudio varía para diferentes rangos de velocidades: bajas (<300 rpm), medias (entre 300 - 900 rpm) y altas (>900 rpm).

Finalmente, los parámetros logísticos, para el caso de embarcaciones operativas en el entorno marítimo o fluvial, se resumen en términos del factor de utilización de carga (*Capacity Utilisation* - CU). Este, obtenido de los reportes de la Organización Marítima Internacional como valores predeterminados, calculados según bases estadísticas mundiales. Los valores del factor de utilización se presentan en la tabla 5 (página 50).

Por su parte, para el transporte marítimo del CCET, requerido para el cálculo de factor base (ecuación 4, página 39), se estima como un valor dependiente de variables técnicas del diseño de la embarcación, así como de parámetros logísticos como el factor de utilización de carga mencionado anteriormente.

En la ecuación 6 se presenta la fórmula del cálculo del CCET, la explicación de sus componentes y las fuentes de información utilizadas para su estimación.

Ecuación 6 | Consumo de combustible específico teórico para transporte marítimo

$$CCET_{ij \text{ Marítimo}} = \frac{CCEE \times \frac{NP \times LF_{DS}}{DS}}{DWT \times CU}$$

Donde:

Símbolo	Variable	Descripción	Unidad	Fuente
$CCET_{ij \text{ Marítimo}}$	Consumo de combustible	Consumo de combustible para el energético i de la tipología j para el modo marítimo	g/t-km	Ecuación de <i>EcoTransIT World</i> , 2020
$CCEE$	Consumo específico de energía	Consumo específico de energía	g/kWh	
LF_{DS}	Factor de carga en la velocidad de diseño	Este valor toma el valor de 90% según fuente bibliográfica	factor	
NP	Promedio de la potencia nominal	Este valor se obtiene por tipo y tamaño del barco	kWh	Organización Marítima Internacional (IMO)
DS	Velocidad de diseño	Este valor se obtiene por tipo y tamaño del barco	Km/h	
DWT	Promedio de la carga útil	Máxima carga que puede llevar el barco. Valor obtenido por tipo de arco y tamaño. Su unidad de medición es toneladas de peso muerto o dwt	dwt	
CU	Factor de utilización de carga	También llamado factor combinado de ocupación y viajes en vacío	Factor	



Los factores de emisión base en términos de CO₂eq estimados para algunos tipos de barco y combustibles se presentan en la tabla a continuación. Como puede apreciarse, su nivel de desagregación se da a nivel del tipo de embarcación, factor de utilización de carga (*proxy* de ocupación), tamaño y tipo de combustible utilizado.

En términos de los estimativos, es posible evidenciar cómo los factores para el caso de diésel marítimo son mayores, relativos al *fuel oil*; lo mismo ocurre para motores de media velocidad y aquellos de baja.

Asimismo, el factor decrece conforme el tamaño del vehículo lo hace. Lo anterior, ocurre dentro de cada categoría vehicular.

Tabla 6 Factores de emisión del modo marítimo y factor de utilización de carga

Tipo de barco	Promedio anual de factor de utilización de carga - CU	Tamaño	Unidades	Factor de emisión base (CO ₂ e g/t-km)			
				Tipo de combustible			
				Fuel Oil Pesado - HFO	Diésel Marítimo - MDO		
				Tipo de motor según velocidad			
				Baja	Media	Baja	Media
Barco a granel	60%	0–9,999	dwt	20.7	21.9	23.8	25.2
	55%	10,000–34,999	dwt	8.6	9.0	9.8	10.4
	55%	35,000–59,999	dwt	6.0	6.4	6.9	7.3
	55%	60,000–99,999	dwt	4.7	4.9	5.3	5.7
	50%	100,000–199,999	dwt	3.8	4.0	4.3	4.6
	50%	200,000–+	dwt	3.1	3.2	3.5	3.7
Tanquero químico	64%	0–4,999	dwt	24.8	26.2	28.5	30.1
	64%	5,000–9,999	dwt	15.0	15.9	17.3	18.3
	64%	10,000–19,999	dwt	11.2	11.8	12.9	13.6
	64%	20,000–+	dwt	6.7	7.1	7.7	8.1
Portacontenedores	70%	0–999	TEU	17.6	18.6	20.2	21.4
	70%	1,000–1,999	TEU	13.2	14.0	15.2	16.1
	70%	2,000–2,999	TEU	11.4	12.1	13.2	13.9
	70%	3,000–4,999	TEU	11.7	12.4	13.5	14.3
	70%	5,000–7,999	TEU	12.2	12.9	14.0	14.8
	70%	8,000–11,999	TEU	10.2	10.8	11.8	12.4
	70%	12,000–14,500	TEU	6.9	7.3	7.9	8.3
	70%	14,500–+	TEU	8.6	9.1	9.8	10.4

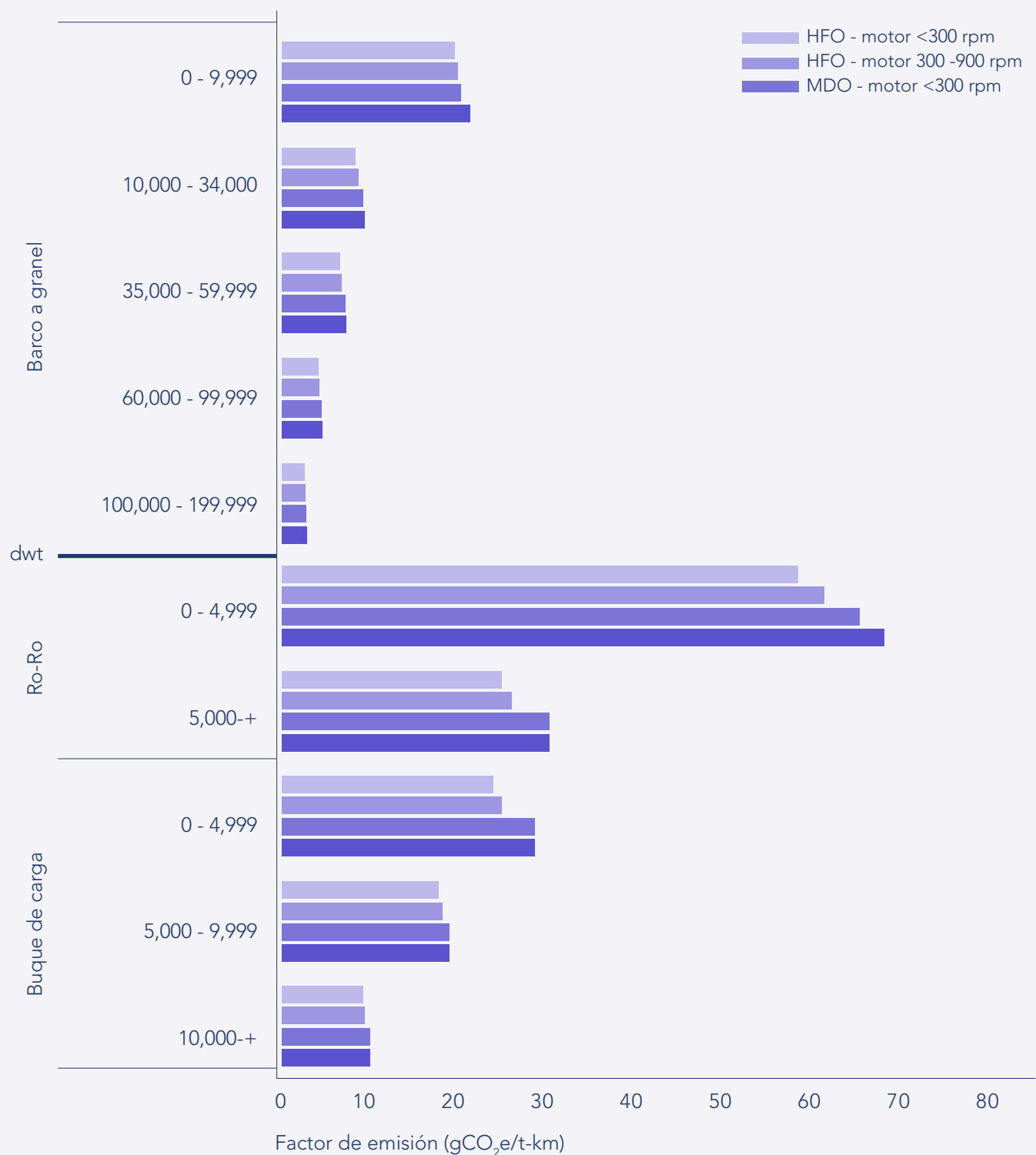
Tipo de barco	Promedio anual de factor de utilización de carga - CU	Tamaño	Unidades	Factor de emisión base (CO ₂ e g/t-km)			
				Tipo de combustible			
				Fuel Oil Pesado - HFO		Diésel Marítimo - MDO	
				Tipo de motor según velocidad			
				Baja	Media	Baja	Media
Buque de carga	60%	0–4,999	dwt	24.5	25.9	28.2	29.8
	60%	5,000–9,999	dwt	16.3	17.2	18.7	19.8
	60%	10,000–+	dwt	10.2	10.8	11.7	12.4
Buque transporte de gas	48%	0–49,999	cbm	24.6	26.0	28.3	29.9
	48%	50,000–199,999	cbm	10.9	11.5	12.5	13.3
	48%	200,000–+	cbm	9.8	10.3	11.2	11.9
Buque petróleo	48%	0–4,999	dwt	34.1	36.1	39.2	41.5
	48%	5,000–9,999	dwt	20.4	21.5	23.4	24.8
	48%	10,000–19,999	dwt	14.0	14.8	16.1	17.0
	48%	20,000–59,999	dwt	8.1	8.6	9.4	9.9
	48%	60,000–79,999	dwt	6.7	7.1	7.7	8.2
	48%	80,000–119,999	dwt	5.1	5.3	5.8	6.1
	48%	120,000–199,999	dwt	4.4	4.7	5.1	5.4
	48%	200,000–+	dwt	3.4	3.6	3.9	4.1
Buque cisterna	48%	0–+	dwt	52.0	54.9	59.7	63.1
Barco a granel refrigerado	50%	0–1,999	dwt	30.9	32.6	35.5	37.5
Ro-Ro	70%	0–4,999	dwt	56.3	59.5	64.7	68.4
	70%	5,000–+	dwt	24.5	25.9	28.2	29.8
Vehículos	70%	0–3,999	vehículo	23.0	24.3	26.4	27.9
	70%	4,000–+	vehículo	15.0	15.9	17.3	18.3

Nota: dwt= toneladas de peso muerto (*deadweight tonnage*), cbm=metro cúbico, TEU= Unidad de equivalencia para un contenedor de 20 pies (*Twenty-foot Equivalent Unit*)

La comparación de los factores de emisión de barco a granel, barco de carga y Ro-Ro, se presenta en la gráfica 3, en donde los factores de mayor magnitud por unidad de tonelada corresponden a las embarcaciones tipo Ro-Ro.

Asimismo, el HFO presenta valores menores en comparación con el MDO, encontrándose una diferencia promedio entre los factores base de 16%.

Gráfica 3 Comparación entre factores de emisión (gCO₂eq/t-km) de diferentes tipologías de barco



Fuente: Elaboración propia

Parámetros de ajustes del factor de emisión base

Como parte de la adaptación del factor de emisión base a condiciones específicas del viaje, se incorporan en la aproximación metodológica dos parámetros de ajuste asociados a la ruta recorrida y al requerimiento de refrigeración de la carga transportada. Esto, en línea con la especificación definida para el factor de emisión en la ecuación 3 (página 38). Estos se describen a continuación:

a) Ajuste de ruta

Esta corrección se aplica exclusivamente al modo autotransporte y permite corregir los factores de emisión base para adaptarlos a condiciones de vías urbanas.

Este ajuste se aplica dada la variación en los patrones de conducción (velocidades promedio, aceleraciones, frecuencia de freno y características de las vías) de un vehículo entre zonas urbanas y zonas interurbanas (en carretera entre municipios), debido a las diferencias en el tráfico, tiempos de desplazamiento y otras condiciones de movilidad.

Este factor de corrección se toma de normativas internacionales (la normativa europea vigente EN 16258) y se presenta en la tabla 7, por tipo de vehículo según su peso bruto medido en toneladas.

Tabla 7 | Factor de corrección para zonas urbanas

Peso Bruto Vehicular (t)	Factor de corrección
< 7.5	0.9
< 7.5 – 12	1
< 12 – 24	1.3
< 24 - 40	1.4

Fuente: Normativa Europea (EN 16258), 2013

b) Ajuste para transporte con carga refrigerada

El segundo parámetro de ajuste del factor de emisión se relaciona con el tipo de carga transportada. En múltiples ocasiones, los productos transportados requieren de un nivel de temperatura específico, pues sus características, propiedades físicas y de conservación así lo requieren.

En función de ello, y de manera específica para el transporte de mercancía que requiere refrigeración, pueden generarse emisiones de GEI adicionales al transporte mismo, por cuenta de dos tipos de mecanismos.



El primero hace alusión al aumento de consumo de combustible por la generación de energía adicional para llevar a cabo el proceso de refrigeración. Estas emisiones solo se cuantifican cuando la energía adicional se produce del mismo motor de vehículo. En este caso, los factores de corrección para diferentes pesos brutos vehiculares se presentan en la tabla 8.

Cuando la energía adicional para refrigeración proviene de generadores externos al funcionamiento del vehículo, las emisiones de CO₂e se asocian a procesos logísticos del transporte de la carga que no son incluidos en los límites del sistema (figura 1, página 32) y por lo tanto no son cuantificadas.

Tabla 8 | Factor de corrección por carga refrigerada

PBV (t)	Factor de corrección
< 3,5	1.15
> 3.5	1.12

Fuente: EN 16258 - *Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers)*, Comisión Europea, 2012 [16]

El segundo tipo de mecanismo se refiere a la fuga de refrigerantes que tienen un alto potencial de calentamiento global, como los hidrofluorocarbonos y el hexafluoruro de azufre.

Sin embargo, la cantidad de refrigerante perdido para el transporte de carga no suele ser reportada y, por lo tanto, estándares internacionales como la normativa europea vigente (EN 16254) no ven necesaria su estimación como reporte de impacto en GEI.

De este modo, para la presente metodología se considerará, únicamente, un parámetro de ajuste para carga refrigerada por cuenta de la necesidad adicional de energía.



CAPÍTULO

3

METODOLOGÍA

PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES
DE CONTAMINANTES CRITERIO





En este capítulo presentaremos la metodología para la estimación de emisiones de contaminantes criterio, considerando: límites del sistema, alcance, método de estimación, aproximación metodológica y método general de estimación de emisiones de contaminantes criterio, que es semejante al presentado para la estimación de GEI, expuesto en el capítulo 2.

LÍMITES DEL SISTEMA, ALCANCE Y MÉTODO DE ESTIMACIÓN

De manera complementaria al análisis de GEI, la calculadora contempla la estimación de emisiones provenientes de contaminantes criterio.

Para este grupo de compuestos químicos, el enfoque propuesto se basa en la inclusión del tradicional material particulado, entre otros relevantes por su impacto en la salud humana y en las condiciones medioambientales de los lugares donde se emiten. Su incorporación al análisis se realiza de manera similar al caso de los GEI con una excepción.

EXCEPCIÓN

Los límites del sistema de estimación están dados por las emisiones directas.

A diferencia de GEI donde se consideraban las emisiones indirectas, para contaminantes criterio las emisiones cubiertas abarcan los procesos que se dan durante la operación de la actividad misma, limitando la estimación a las emisiones derivadas de los vehículos durante el proceso de transporte de mercancías. Así, los linderos de la metodología se enmarcan en las emisiones tipo *tank to wheel*.

Lo anterior, se define en concordancia con la literatura internacional especializada revisada.

El enfoque puede apreciarse esquemáticamente en la siguiente figura:

Figura 6 | Alcance del tipo de emisiones para contaminantes criterio cubierto por la metodología



En cuanto al alcance de las estimaciones, se consideran contaminantes como el dióxido de nitrógeno debido a su estrecha relación con procesos de combustión en vehículos, el monóxido de carbono, entre otros. Estos se listan y se describen a continuación:

NOTA

Vale la pena destacar que, así como en el caso de GEI, la inclusión de un contaminante criterio se soporta en la revisión de múltiples marcos teóricos y prácticos de estimación de emisiones, al igual que del estudio del contexto mexicano.

- **Material Particulado (PM):** Este se entiende como una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire. Algunas partículas, como el polvo, la suciedad, el hollín o el humo, son lo suficientemente grandes y oscuras como para verlas a simple vista. Otras, son tan pequeñas que solo pueden detectarse mediante el uso de un microscopio electrónico.

La emisión de PM se caracteriza por su diferencia en el tamaño de las partículas, y para calidad del aire suele dividirse en:

PM_{2.5}

aquellas partículas inhalables que tienen diámetros cercanos o menores a los 2.5 micrómetros.

PM₁₀

aquellas partículas inhalables que tienen diámetros cercanos a los 10 micrómetros - y algunos ligeramente menores.

Por su irregularidad, estas partículas se encuentran en varios tamaños y formas, pueden estar conformadas por diferentes especies químicas, dada la variedad de fuentes que las generan.

Algunas se emiten directamente desde una fuente como obras en construcción, chimeneas, incendios, combustión interna en vehículos, entre otras.

Otras, llamadas secundarias, se forman en la atmósfera como resultado de reacciones complejas de químicos, como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno.

Estas partículas suelen ser tan pequeñas que pueden inhalarse y provocar graves problemas de salud, debido a que logran alcanzar las cavidades más profundas de las vías respiratorias humanas y algunas, el torrente sanguíneo.

- **Dióxido de azufre (SO_2):** Es un gas incoloro, irritante, con un olor penetrante. Los óxidos de azufre guardan una estrecha relación con las emisiones vehiculares y con la calidad del combustible.

Durante su proceso de oxidación en la atmósfera, varios de ellos se convierten del material particulado. Respecto a su relevancia en el análisis, el SO_2 tiene efectos adversos sobre la salud y ecosistemas, representados en la acidificación de las lluvias.

- **Óxidos de nitrógeno (NO_x):** Es una familia de gases venenosos altamente reactivos. Estos gases se forman cuando el combustible se quema a altas temperaturas. Principalmente los emiten vehículos que utilizan combustibles como el diésel.

Respecto a su relevancia en el análisis, estos óxidos traen consigo afectaciones a la salud humana y también sobre ecosistemas, representadas en la acidificación de las lluvias.

También, es un fuerte agente oxidante y juega un papel importante en las reacciones atmosféricas con compuestos orgánicos volátiles (COV) que producen ozono (*smog*) en los calurosos días de verano.

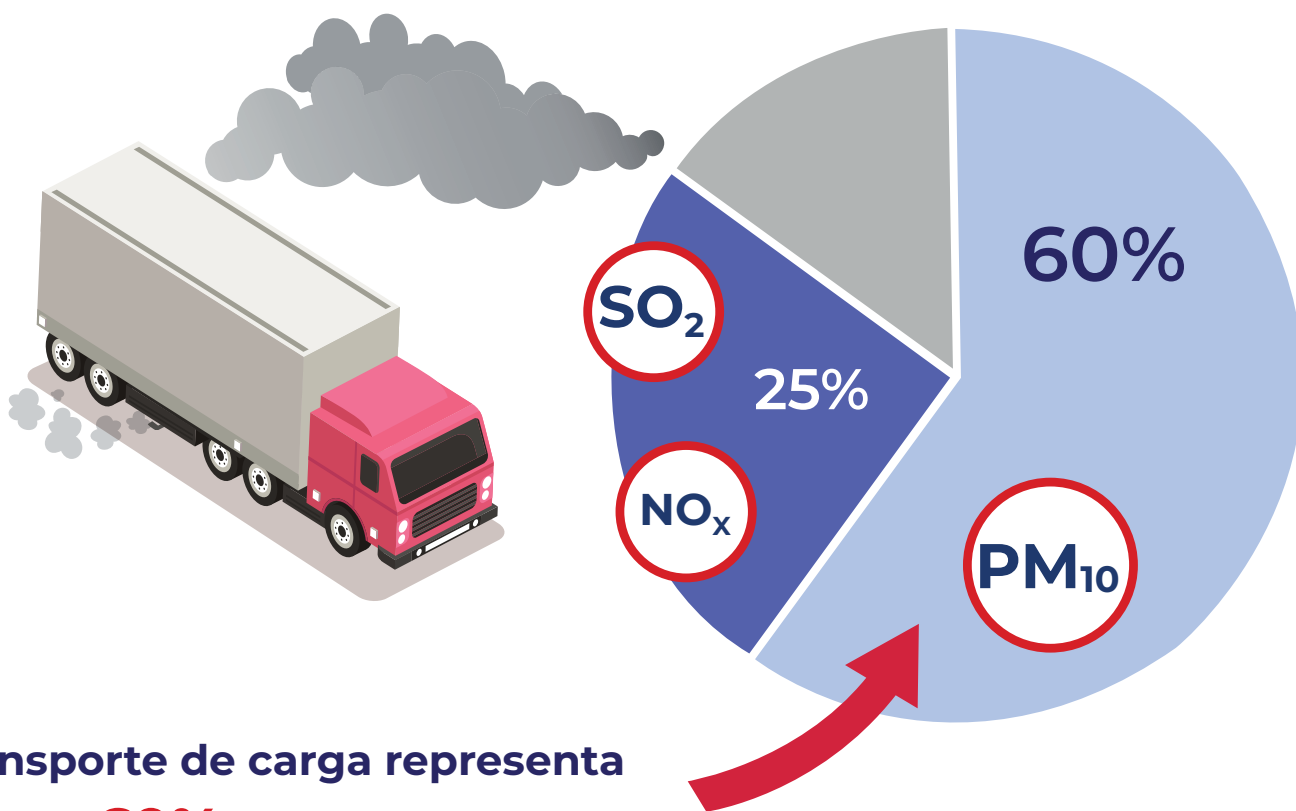
- **Monóxido de carbono (CO):** Es un gas o líquido incoloro, prácticamente inodoro e insípido. Es el resultado de la oxidación incompleta del carbono en la combustión de combustibles fósiles.

Su emisión trae consigo graves afectaciones sobre la salud de personas y frecuentemente se relaciona con enfermedades cardíacas, debido a que la exposición de una persona al CO puede reducir la capacidad de la sangre de transportar oxígeno.

- **Carbono negro:** El carbono negro es un aerosol con componentes carbonáceos que forma parte del material particulado. Es producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles, biodiésel y biomasa.

Por sus capacidades de absorción de luz y su bajo tiempo de permanencia en la atmósfera, es considerado un contaminante climático de vida corta. Y como forma parte del PM, puede tener implicaciones similares sobre la salud de las personas.

Contaminantes criterio



El transporte de carga representa cerca del **60%** de emisiones de partículas **PM_{2.5}**, **PM₁₀** y alrededor del **25%** para otros como el **SO₂** y **NO_x**.

APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

Método general

El método de estimación de emisiones de contaminantes criterio es semejante al presentado para la estimación de GEI en el capítulo 2.

Así, el enfoque propuesto es uno basado en actividad (ver página 33), donde el proceso de estimación tiene como fin último el cálculo de emisiones a nivel de etapa de viaje para cada contaminante criterio cubierto, bajo el alcance definido en la sección anterior inmediata.

Como referencia inicial, en la siguiente ecuación se presenta la fórmula base para la estimación de emisiones para el caso de contaminante criterio.

NOTA

A lo largo de las siguientes secciones, se detalla a profundidad el significado, unidades y particularidades de cada uno de sus componentes, para así llegar a un entendimiento integral de la aproximación propuesta.

Ecuación 7 | Estimación de emisiones contaminantes criterio - fórmula base

$$\text{Emisiones Totales de contaminante criterio} = \sum_{\text{etapa} = 1}^n \text{Masa de productos transportados} * \text{Distancia recorrida por etapa de viaje} * \text{Factor de Emisión}$$

Masa de productos transportados

Expresado en toneladas, hace referencia al producto transportado durante la etapa n del viaje en cuestión. Este componente debe ser diligenciado directamente por quien haga uso de la metodología y acompaña al tipo de producto transportado.

En la herramienta de aplicación, su incorporación se realiza de manera directa, indicando la masa del producto transportado en toneladas.

Al igual que para GEI, a partir de las categorías arancelarias existentes en el Sistema Armonizado Mexicano, así como basados en su estructura de secciones, capítulos, partidas y subpartidas, se define una clasificación para el tipo de productos que podrán ser

seleccionados y a los cuales se podrá asociar una masa transportada a nivel de viaje, por los usuarios de la metodología.

A su vez, estos productos están asociados a un tipo de carga: granel, volumen y general, que permite manejar diferentes factores de ocupación y viajes en vacío, de cara a la estimación de emisiones.

Estas categorías, las principales a un mayor nivel de agregación, se presentan en la tabla 1 (página 37).

NOTA

La lista detallada de productos se incluye en el Anexo 4 del documento (ver Anexo 4 – Relación producto – categoría de producto, página 160).

Distancia recorrida por etapa de viaje

Hace referencia a la distancia en kilómetros de cada una de las etapas de viaje, según modo de transporte y entorno urbano / interurbano.

Al igual que el componente anterior, este debe ser incorporado directamente por el usuario, ya sea seleccionando un punto de inicio y destino dentro de la red incorporada en la calculadora, o bien indicando el valor de la distancia recorrida para aquellos viajes entre puntos diferentes a los considerados inicialmente en la herramienta.

Factor de emisión

Los factores de emisión de contaminantes criterio, como en el caso para GEI, dependen de diferentes variables como:



**CARACTERÍSTICAS
DE LOS VEHÍCULOS**



**PARÁMETROS
LOGÍSTICOS**



**CARACTERÍSTICAS
DEL TERRENO**



**TIPO DE CARGA
TRANSPORTADA***

* Con especial énfasis en la tecnología vehicular y la calidad del combustible.

En particular, un mayor estándar de emisión del vehículo y menor contenido de azufre del combustible pueden traducirse en menos emisiones de contaminantes.

Dado que esta última variable es central e indispensable para la estimación del factor de emisión de contaminantes criterio, como el SO₂ y en algunos casos de PM, se realizó una revisión del contenido de azufre para diferentes tipos de combustibles, lo cual puede observarse en la siguiente tabla:

Tabla 9 | Contenido de azufre de diferentes combustibles en México

1
Equivalente
a 500 ppm

Combustible	Contenido de azufre	Unidad
Diésel	0.05 ¹	% masa
Fuel Oil Pesado - HFO	2.51	% masa
Diésel Marítimo - MDO	0.15	% masa

Fuente: Norma Oficial Mexicana NOM 044, SEMARNAT 2017 [22]

Como se mencionó anteriormente, los factores de contaminantes criterio se calculan para todos los modos de transporte partiendo de un enfoque *Tank to Wheel*. Es decir, solo el proceso de combustión interna vehicular es tenido en cuenta.

NOTA

En este caso, no se cuenta con una ecuación general de estimación de los factores de emisión dado que para cada modo de transporte se presentan particularidades metodológicas que se detallan a continuación.

a) Autotransporte

Los factores de emisión para el modo autotransporte se desagregan por los mismos componentes presentados para GEI en la figura 3 (página 42), y su estimación para todos los contaminantes criterio, con excepción del SO₂, se realiza a partir de la ecuación 4 (página 39), la cual indica que depende de:

- Parámetros logísticos (factor de ocupación y factor de viajes)
- Factores de emisión en condiciones de 0% de ocupación (vehículos vacío) y 100% de ocupación (vehículo con carga completa)

Estos últimos valores fueron calculados a partir de las ecuaciones predeterminadas del modelo europeo COPERT.

Ecuación 8 | Estimación de factores de emisión de autotransporte para contaminantes criterio (exceptuando al SO₂)

$$FE_{ijm \text{ autotransporte}} = \left[\frac{FE_{vacío}}{CP \times \frac{LF}{1 + ET}} + \frac{(FCE_{100\%} - FCE_{vacío})}{CP} \right]$$

Donde:

Símbolo	Variable	Descripción	Unidad	Fuente
FE_{ijm}	Factor de emisión	Factor de emisiones TTW del contaminante m con excepción de SO ₂ para el combustible i de la tipología j	g/t-km	Ecuación propia basada en definiciones de EcoTransIT World, 2020
ET	Factor de viajes en vacío	Relación entre los kilómetros recorridos en vacío y los kilómetros recorridos con carga	Factor	Específica del caso de estudio
LF	Factor de ocupación	Relación entre el peso neto de la carga transportada (M) y la carga útil (CP)	Factor	Calculado
C	Peso de la carga transportada	Peso neto de la carga transportada	Toneladas	Específica del caso de estudio
CP	Carga útil	Capacidad máxima de peso que puede llevar el vehículo	Toneladas	Valor predeterminado según peso bruto vehicular
$FE_{0\%}$	Factor de emisión en vacío	Factor de emisión bajo un factor de ocupación de 0% dependiente de la velocidad promedio, pendiente de la vía, clase y tecnología del vehículo	g/km	COPERT 5.5
$FE_{100\%}$	Factor de emisión con 100% de carga	Factor de emisión bajo un factor de ocupación de 100% dependiente de la velocidad promedio, pendiente de la vía, clase y tecnología del vehículo	g/km	COPERT 5.5

Como parte del análisis, a continuación, se presentan los factores de emisión calculados para el material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), al igual que para NO_x y CO:

EJEMPLO

Estos factores se analizan con un ejemplo de referencia de un vehículo articulado transportador de carga general a una velocidad promedio de 60 km/h.

ESPACIO

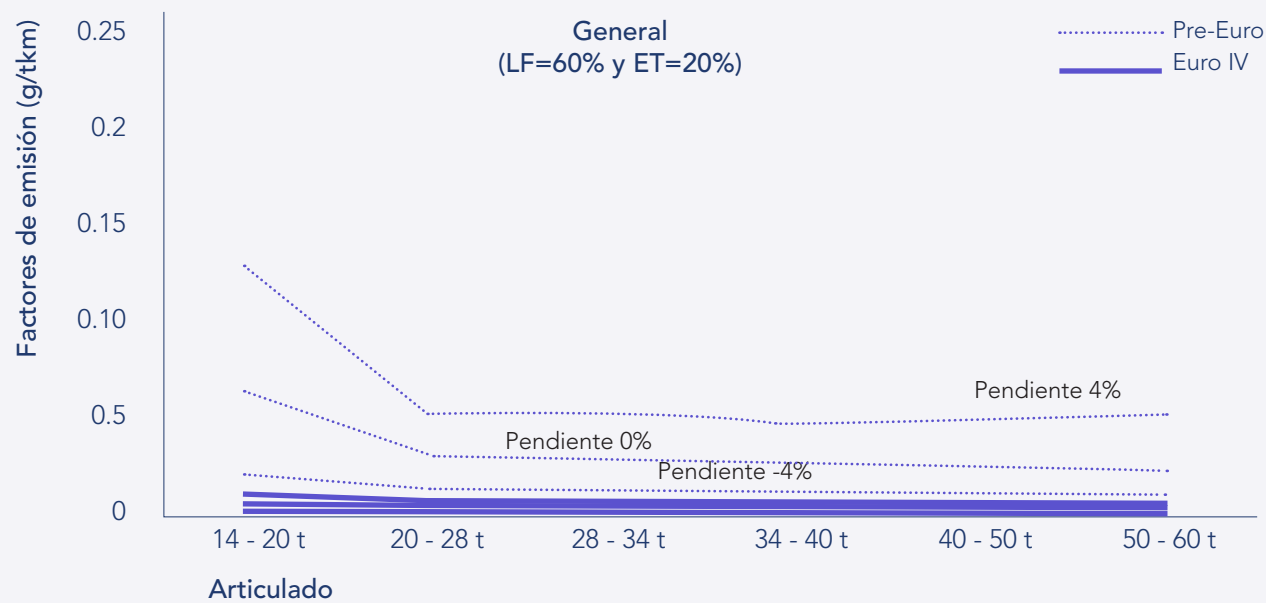
Su espacio de análisis, en concordancia con la aproximación metodológica descrita en la fórmula anterior, se da a nivel del grado de inclinación (pendiente) de la vía y por tipo de tecnología del vehículo en cuestión, para un nivel de ocupación (LF) y de viajes en vacío (ET) definidos.

OTRAS CONFIGURACIONES

Los factores para otro tipo de configuraciones vehiculares (vehículos rígidos) pueden apreciarse gráficamente en el Anexo 2 (página 140). Como se puede apreciar, el factor presenta un alto nivel de sensibilidad entre categorías de vehículos –en particular al pasar de articulados del rango de 14-20 toneladas al rango de 20-28 y en adelante–, al igual que al tipo de tecnología.

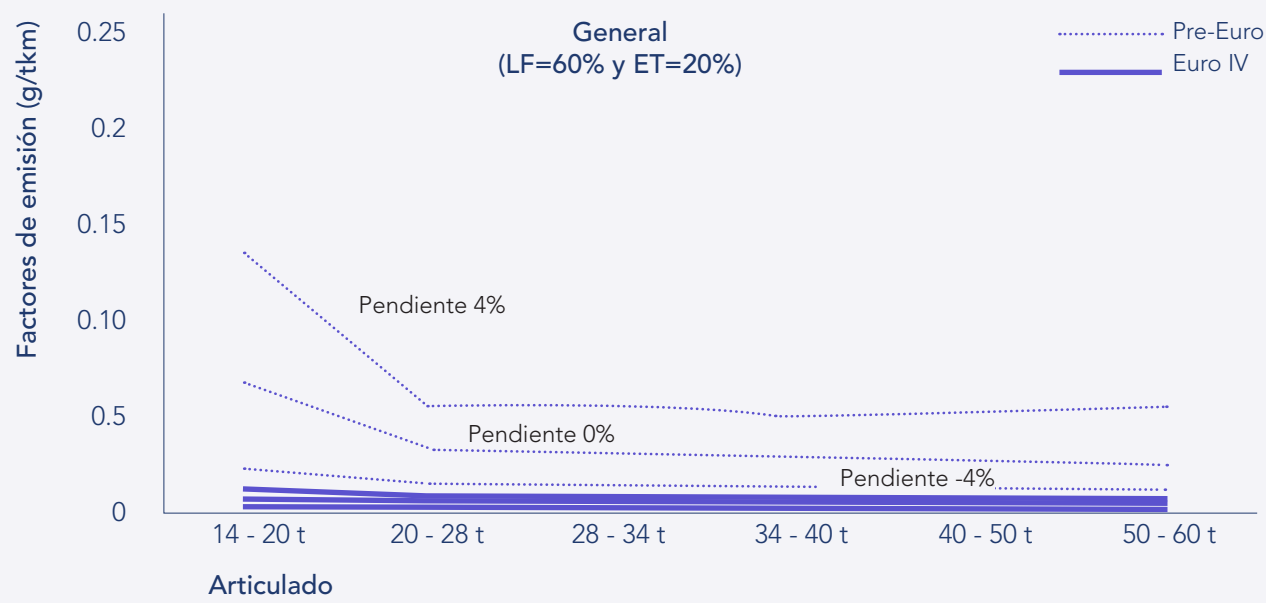
Asimismo, en términos de magnitudes, puede apreciarse cómo la emisión a nivel de gramos por tipo de contaminante es mayor para el caso de NO_x y el mayor grado de variabilidad entre tecnologías (líneas punteadas y continuas) se evidencia en el $PM_{2.5}$.

Gráfica 4 Factor de emisión estimado para PM_{2.5} para autotransporte articulado - tipo de carga general



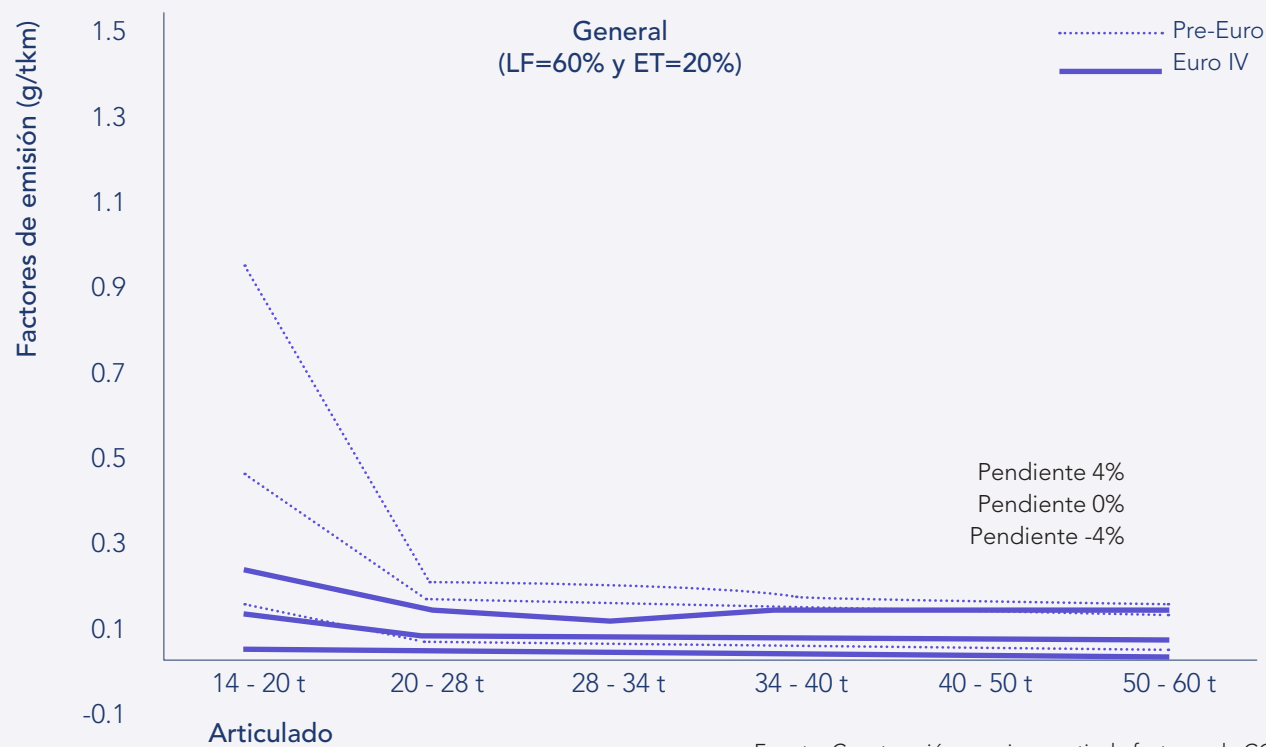
Fuente: Construcción propia a partir de factores de COPERT

Gráfica 5 Factor de emisión estimado para PM₁₀ para autotransporte articulado - tipo de carga general



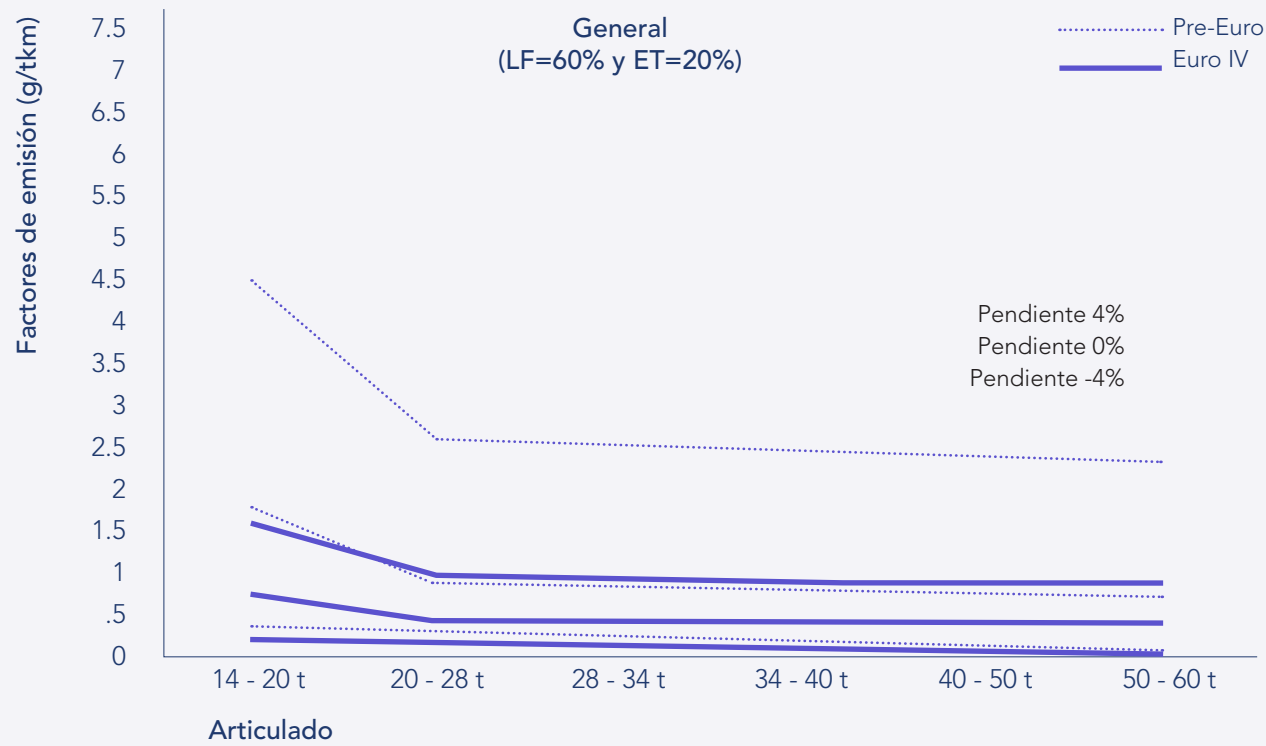
Fuente: Construcción propia a partir de factores de COPERT

Gráfica 6 Factor de emisión estimado para CO para autotransporte articulado - tipo de carga general



Fuente: Construcción propia a partir de factores de COPERT

Gráfica 7 Factor de emisión estimado para NO_x para autotransporte articulado - tipo de carga general



Fuente: Construcción propia a partir de factores de COPERT

Para el caso particular de los SO₂, su estimación depende del consumo de combustible específico teórico (CCET estimado en el capítulo 2, página 43, y el contenido de azufre del combustible).

NOTA

Cabe aclarar que este factor de emisión tiene asociados los parámetros a los que el CCET utilizado fue estimado.

En la siguiente ecuación se presenta la estimación del factor de emisión de este contaminante, la cual también aplica para la estimación del modo férreo.

Ecuación 9 Estimación de factores de emisión SO₂ para autotransporte

$$FE_{ijSO_2 Autotransporte} = 2 \times CCET_{ij} \times k_i$$

Donde:

Símbolo	Variable	Descripción	Unidad	Fuente
$FE_{ijSO_2 Autotransporte}$	Factor de emisión de SO ₂	Factor de emisión de SO ₂ para el combustible <i>i</i> de la tipología <i>j</i> para el modo autotransporte	g/t-km	Ecuación de la guía de inventario de emisiones de la Agencia Ambiental Europea
$CCET_{ij}$	Consumo de combustible específico teórico	Consumo de combustible <i>i</i> de la tipología <i>j</i> para el modo autotransporte	g/t-km	Se calcula a partir de la ecuación 5 del capítulo 2.
k_i	Contenido de azufre	Fracción de azufre en el combustible en términos de masa	% masa	Tabla 8

Como parte del análisis y los ejemplos de las estimaciones, en la siguiente figura se presentan los factores de emisión estimados para el caso específico del SO₂, para vehículos articulados (aquellos de mayor uso en el transporte de larga distancia) como referencia inicial.

EJEMPLO

Se detallan en este ejemplo de referencia las diferencias a nivel de tipo de recorrido (tipo de pendiente), al igual que para el tipo de tecnología (Pre-euro y Euro IV) para aquellos vehículos que transportan carga general.

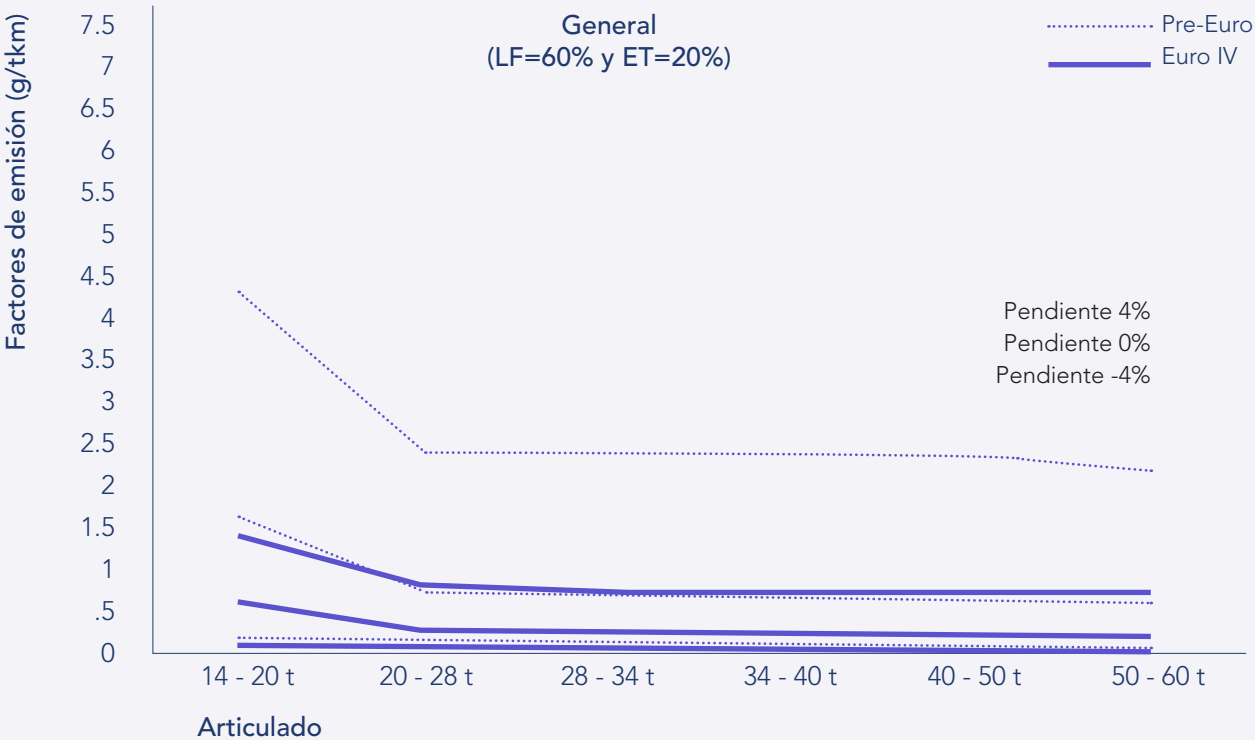
VALORES

Se toman valores dados de ocupación y viajes en vacío para evidenciar la sensibilidad del factor ante cambios propios del tipo de vehículo y del recorrido.

OTROS FACTORES

Los factores para los demás tipos de carga (carga a granel y a volumen) se encuentran en el Anexo 2.

Gráfica 8 | Factor de emisión de SO₂ para autotransporte para carga general



Fuente: Construcción propia a partir de factores de COPERT

b) Transporte férreo

La desagregación de los factores de emisión de contaminantes criterio para el transporte férreo es similar al presentado para GEI, con un factor adicional de análisis referente al componente tecnológico relacionado específicamente al estándar de emisión de la locomotora.

Esta se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 7

Componentes de clasificación de los factores de emisión de contaminantes criterio para el modo férreo



Fuente: Elaboración propia



El factor de emisión para el modo férreo tiene diferencias para su estimación con respecto a autotransporte.

DIFERENCIAS

Estas radican en que su cálculo se lleva a cabo a partir de la relación de los consumos específicos teóricos obtenidos (mencionados en el capítulo 2), y el factor de emisión para el combustible diésel dependiente del estándar de emisión.

Esto obedeciendo a la información disponible y las metodologías de estimación consultadas. La fórmula utilizada para el cálculo los contaminantes criterio NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y CO se presenta en la ecuación siguiente.

Ecuación 10 Estimación de factores de emisión para contaminantes criterio NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y CO para transporte férreo

$$FE_{ij\text{ Férreo}} = CCET_{ij} \times FED_{jt\text{ Férreo}}$$

Donde:

Símbolo	Variable	Descripción	Unidad	Fuente
$FE_{ij\text{ Férreo}}$	Factor de emisión para NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y CO	Factor de emisión contaminante m para el combustible i de la tipología j para el modo férreo	g/t-km	Ecuación de la guía de inventario de emisiones de la Agencia Ambiental Europea
$CCET_{ij}$	Consumo de combustible específico teórico	Consumo de combustible i de la tipología j para el modo autotransporte	kg/t-km	Tabla 3
$FED_{jt\text{ Férreo}}$	Factor de emisión para diésel para el modo férreo	Factor de emisión de los contaminantes NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y CO para el combustible diésel para trenes de diferentes estándares de emisión	g/kg	Tabla 9

A partir de la aproximación metodológica se llevó a cabo la estimación de los factores de emisión, expresados en gramos por kilogramo de combustible, para el caso del material particulado, CO y NO_x, segmentado por estándar de emisión de la locomotora aproximado, a partir del modelo de esta.

Estos estimativos se detallan para PM_{2.5} en la tabla 24 en el Anexo 2 para diferentes tipos de trenes (página 154).

Tabla 10 Factores de emisión de contaminantes criterio NO_x, PM₁₀, PM_{2.5} y CO para combustible diésel

Estándar de emisión con Normativa EPA	Año modelo	Factor de emisión g/kg combustible			
		NO _x *	PM10*	PM _{2.5}	CO
No regulado	<1973	73.9	1.53	1.48	18
Tier 0	1973-1992	44	0.97	0.94	18
Tier 1	1993-2004	41	0.97	0.94	18
Tier 2	2005-2011	30.2	0.48	0.47	18
Tier 3	2012-2014	18.6	0.37	0.36	18
Tier 4	>2015	4.8	0.11	0.11	18

Nota: Se estima el PM_{2.5} como 97% del PM₁₀
Fuente: EcoTransit World y Agencia Europea Ambiental

Como se mencionó anteriormente, el cálculo del factor de emisión para el caso particular del SO₂ se realiza utilizando la misma aproximación que para autotransporte. Así, la aproximación al cálculo utilizada se presenta en la ecuación siguiente.

Ecuación 11 Estimación de factores de emisión SO₂ para transporte férreo

$$FE_{ijSO_2 \text{ Férreo}} = 2 \times CCET_{ij} \times k_i$$

Donde:

Símbolo	Variable	Descripción	Unidad	Fuente
$FE_{ij \text{ Férreo}}$	Factor de emisión de SO ₂	Factor de emisión de SO ₂ para el combustible i de la tipología j para el modo autotransporte	g/t-km	Ecuación de la guía de inventario de emisiones de la Agencia Ambiental Europea
$CCET_{ij}$	Consumo de combustible específico teórico	Consumo de combustible i de la tipología j para el modo autotransporte	kg/t-km	Tabla 3
k_i	Contenido de azufre	Fracción de azufre en el combustible en términos de masa	% masa	Tabla 8

A partir de la metodología descrita, se presentan los factores de emisión, para el caso particular del SO₂ segmentados por tipo de locomotora y tipo de carga (carga a granel, general y volumen), en términos de gramos del contaminante por toneladas-kilómetros.

NOTA

Puede apreciarse cómo el factor decrece conforme el tamaño del vehículo aumenta y presenta su mayor valor para el caso de los trenes dedicados para carros.

Tabla 11 | Factor de emisión para SO₂ para transporte férreo por tipo de vehículo y carga

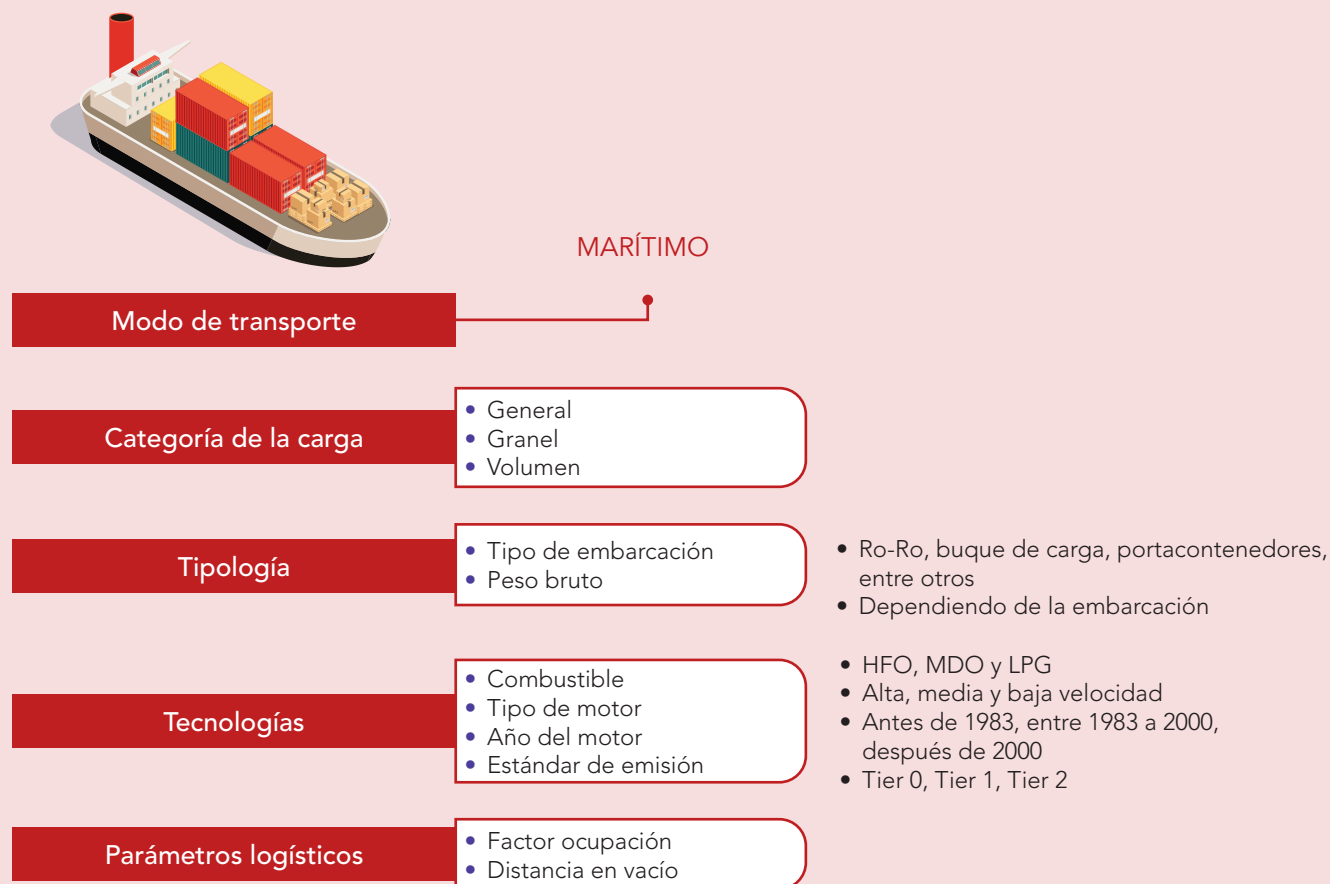
Tipo de tren	Tipo de mercancía		
	Granel	General	Volumen
Factor de emisión			
Trenes generales		g SO ₂ /tkm	
Ligero (500t)	0.0017	0.0020	0.0025
Promedio (1000t)	0.0011	0.0013	0.0016
Grande (1500t)	0.0009	0.0010	0.0013
Extragrande (2000t)	0.0007	0.0008	0.0011
Pesado (>2000t)	0.0007	0.0008	0.0010
Trenes dedicados		g SO ₂ /tkm	
Carro		0.0028	
Químicos		0.0011	
Container		0.0012	
Doble container		0.0006	
Rolling road - Camión		0.0012	
Rolling road - Semi Tráiler		0.0011	
Rolling road - Cuerpo intercambiable		0.0012	
Carbón y acero		0.0009	
Materiales de construcción		0.0011	
Productos manufactureros		0.0011	
Cereales		0.0008	

Fuente: Agencia Ambiental Europea

c) Transporte marítimo

La desagregación de los factores de emisión de contaminantes criterio para el transporte marítimo es similar al presentado en el capítulo 2 para GEI, con un factor adicional asociado a las características tecnológicas de las embarcaciones, relacionado con el estándar de emisión para el caso de estimación NO_x. Esta clasificación se presenta en la siguiente figura.

Figura 8 Componentes de clasificación de los factores de emisión de contaminantes criterio para el modo marítimo



Fuente: Elaboración propia

Al igual que para los otros modos, el factor de emisión para el modo marítimo es calculado a partir de consumos específicos teóricos obtenidos (detallados en el capítulo 2), y el factor de emisión para el tipo de combustible (tabla 5, página 50), como en el caso del modo férreo. Lo anterior, obedeciendo a la información disponible y las metodologías de estimación consultadas.

La fórmula utilizada para el cálculo los contaminantes criterio SO_2 , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y CO se presenta en la ecuación a continuación:

NOTA

En este caso, no se utiliza una ecuación distinta para el cálculo de dióxido de azufre, ya que el factor de emisión de combustible utilizado para este contaminante ya se encuentra calculado para el combustible con contenido de azufre, especificado en la tabla 8 (página 61).

Ecuación 12 | Estimación de factores de emisión para contaminantes criterio para el modo marítimo

$$FE_{ij\text{ Marítimo}} = CCET_{ij} \times FED_{j\text{ Marítimo}}$$

Donde:

Símbolo	Variable	Descripción	Unidad	Fuente
$FE_{ij\text{ Marítimo}}$	Factor de emisión para SO ₂ , NO _x , PM ₁₀ , PM _{2.5} y CO	Factor de emisión contaminante <i>m</i> para el combustible <i>i</i> de la tipología <i>j</i> para el modo férreo	g/t-km	Guía de inventario de emisiones - Agencia Ambiental Europea
$CCET_{ij}$	Consumo de combustible específico teórico	Consumo de combustible <i>i</i> de la tipología <i>j</i> para el modo autotransporte	kg/t-km	A partir de Ecuación 6 (página 55)
$FED_{j\text{ Marítimo}}$	Factor de emisión para diésel para el modo marítimo	Factor de emisión de los contaminantes NO _x , PM ₁₀ , PM2.5 y CO para el combustible diésel para trenes de diferentes estándares de emisión	g/kg	Organización Marítima Internacional, (ver tabla 11)

Tabla 12 | Factores de emisión de contaminantes criterio por tipo de combustible utilizado para el cálculo del factor de emisión final

Contaminante	Tipo de motor	Factor de emisión por tipo de combustible (g/g combustible)		
		Fuel Oil Pesado HFO	Diésel Marino MDO	Gas Licuado LNG
NO _x Tier 0 SSD*	Velocidad baja (<300 rpm)	0.093	0.087	0.00783
NO _x Tier 1 SSD*		0.087	0.082	0.00783
NO _x Tier 2 SSD*		0.078	0.074	0.00783
NO _x Tier 0 MSD*	Velocidad media (300-900 rpm)	0.065	0.061	0.00783
NO _x Tier 1 MSD*		0.060	0.057	0.00783
NO _x Tier 2 MSD*		0.052	0.049	0.00783
CO*	Sin discriminación	0.003	0.003	0.00783
SO _x EF (g/g fuel)	Sin discriminación	0.049	0.003	0.00002
PM ₁₀ EF (g/g fuel)	Sin discriminación	0.007	0.001	0.00018
PM _{2.5} EF (g/g fuel)	Sin discriminación	0.007	0.00099	0.00017

Nota: Se basa estimando el PM_{2.5} como 97% del PM₁₀
Fuente: Maritime IHS, 2022

A partir de la metodología descrita anteriormente, se definen los factores de emisiones para contaminantes criterio para el caso particular del transporte marítimo. Estos tienen niveles de desagregación de acuerdo con el tipo de motor de la embarcación, con su estándar de emisión medido en el tipo de *tier* y con el nivel de tipo de combustible utilizado por cada embarcación.

En detalle, para el caso de uno de los contaminantes criterio de mayor relevancia como lo es el material particulado de 2.5 micras ($PM_{2.5}$), los factores de emisión por tipo de motor (baja y media velocidad), al igual que al nivel de tamaño y categoría (barco para mercancía a granel, tanquero para químicos, portacontenedores, entre otros) se presentan a continuación:

NOTA

Como ayuda gráfica se presenta la gráfica 38 - incluida en el Anexo 2 (página 160).

OTROS FACTORES

El resto de los factores de emisión (para los demás contaminantes y con el mismo nivel de desagregación del $PM_{2.5}$ presentado) se incluyen como anexo a este documento (ver Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23 en Anexo 2, páginas 151-153).

Tabla 13 Factores de emisión de $PM_{2.5}$ para el modo marítimo

Tipo de barco			PM _{2.5} (g/t-km)			
			Tipo de combustible			
			Fuel Oil Pesado - HFO		Diésel Marítimo - MDO	
			Tipo de motor según velocidad			
			Baja	Media	Baja	Media
Barco a granel	0–9,999	dwt	0.04116	0.04351	0.00601	0.00635
	10,000–34,999	dwt	0.01700	0.01798	0.00248	0.00262
	35,000–59,999	dwt	0.01198	0.01267	0.00175	0.00185
	60,000–99,999	dwt	0.00925	0.00977	0.00135	0.00143
	100,000–199,999	dwt	0.00749	0.00792	0.00109	0.00116
	200,000–+	dwt	0.00607	0.00642	0.00089	0.00094
Tanquero químico	0–4,999	dwt	0.04925	0.05206	0.00719	0.00760
	5,000–9,999	dwt	0.02988	0.03159	0.00436	0.00461
	10,000–19,999	dwt	0.02226	0.02354	0.00325	0.00343
	20,000–+	dwt	0.01326	0.01402	0.00194	0.00205

Nota: dwt= toneladas de peso muerto (*deadweight tonnage*), cbm=metro cúbico, TEU= Unidad de equivalencia para un contenedor de 20 pies (*Twenty-foot Equivalent Unit*)

Tipo de barco	Tamaño	Unidades	PM _{2.5} (g/t-km)			
			Tipo de combustible			
			Fuel Oil Pesado - HFO		Diésel Marítimo - MDO	
			Tipo de motor según velocidad			
			Baja	Media	Baja	Media
Portacontenedores	0–999	TEU	0.03498	0.03698	0.00510	0.00540
	1,000–1,999	TEU	0.02631	0.02782	0.00384	0.00406
	2,000–2,999	TEU	0.02275	0.02405	0.00332	0.00351
	3,000–4,999	TEU	0.02334	0.02468	0.00341	0.00360
	5,000–7,999	TEU	0.02427	0.02566	0.00354	0.00374
	8,000–11,999	TEU	0.02036	0.02153	0.00297	0.00314
	12,000–14,500	TEU	0.01364	0.01442	0.00199	0.00210
	14,500–+	TEU	0.01703	0.01800	0.00248	0.00263
Buque de carga	0–4,999	dwt	0.04874	0.05152	0.00711	0.00752
	5,000–9,999	dwt	0.03235	0.03420	0.00472	0.00499
	10,000–+	dwt	0.02032	0.02148	0.00297	0.00313
Buque transporte de gas	0–49,999	cbm	0.04892	0.05172	0.00714	0.00755
	50,000–199,999	cbm	0.02169	0.02293	0.00317	0.00335
	200,000–+	cbm	0.01940	0.02051	0.00283	0.00299
Buque petróleo	0–4,999	dwt	0.06785	0.07173	0.00990	0.01047
	5,000–9,999	dwt	0.04052	0.04283	0.00591	0.00625
	10,000–19,999	dwt	0.02777	0.02936	0.00405	0.00428
	20,000–59,999	dwt	0.01619	0.01711	0.00236	0.00250
	60,000–79,999	dwt	0.01337	0.01413	0.00195	0.00206
	80,000–119,999	dwt	0.01005	0.01062	0.00147	0.00155
	120,000–199,999	dwt	0.00880	0.00930	0.00128	0.00136
	200,000–+	dwt	0.00671	0.00710	0.00098	0.00104
Buque cisterna	0–+	dwt	0.10332	0.10922	0.01508	0.01594
Barco a granel refrigerado	0–1,999	dwt	0.06135	0.06485	0.00895	0.00946
Ro-Ro	0–4,999	dwt	0.11199	0.11839	0.01634	0.01728
	5,000–+	dwt	0.04879	0.05158	0.00712	0.00753
Vehículos	0–3,999	vehicle	0.04572	0.04833	0.00667	0.00705
	4,000–+	vehicle	0.02990	0.03161	0.00436	0.00461

Nota: dwt= toneladas de peso muerto (*deadweight tonnage*), cbm=metro cúbico, TEU= Unidad de equivalencia para un contenedor de 20 pies (*Twenty-foot Equivalent Unit*)

Fuente: Maritime IHS, 2022

d) Factor de emisión - *Black Carbon* (Carbono negro)

Los factores de emisión del *Black Carbon* (BC) para cada modo de transporte se calculan como una fracción de los factores de emisión de material particulado.

En concreto, su cálculo sigue la formulación propuesta en la siguiente ecuación.

Ecuación 13 | Estimación de factores de emisión para *Black Carbon*

$$FE_{ijk\ BC} = FE_{ijk\ PM} \times FBC_k$$

Donde:

Símbolo	Variable	Descripción	Unidad	Fuente
$FE_{ijk\ BC}$	Factor de emisión para BC	Factor de emisión BC para el vehículo del modo k	g/t-km	Metodología propuesta en el presente documento
$FE_{ijk\ PM}$	Factor de emisión de PM	Factor de emisión de <i>PM</i> para el vehículo del modo k	g/t-km	Estimado según lo expuesto en el presente documento
FBC_k	Fracción de BC en el material particulado	Fracción de <i>BC</i> en el material particulado para el tipo de combustible y estándar del vehículo del modo k	factor	Tabla 13

A propósito, las fracciones *black carbon* (FBC_k) para cada modo de transporte k , según combustible y estándar de emisión, se presentan en la tabla 13.

Tabla 14 | Fracción BC en el material particulado

Modo	Tipo de combustible	Tecnología	BC/PM _{2.5}
Marítimo	HFO	-	2.0%
	MDO	-	5.3%
	LNG	-	2.4%
Férreo	Diésel	-	65%
Autotransporte	Gasolina	-	15.0%
	Diésel	Pre-euro	50.0%
	Diésel	Euro I	65.0%
	Diésel	Euro II	65.0%
	Diésel	Euro III	70.0%
	Diésel	Euro IV	75.0%
	Diésel	Euro V	75.0%
	Diésel	Euro VI	15.0%

Fuente: Agencia Europea para el Medio Ambiente



CAPÍTULO 4

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES Y CONTAMINANTES CRITERIO PARA CORREDORES DE CARGA DEL PACÍFICO





El presente capítulo tiene como objetivo presentar la aplicación de las metodologías de estimación de emisiones, tanto de GEI como de contaminantes criterio, introducidas en los dos capítulos anteriores.

Este ejercicio se lleva a cabo para un par de corredores logísticos en México: Ciudad de México - Topolobampo - La Paz, y Ciudad de México - Mexicali.

Ambos, parten de la región central del país, desde la capital político-administrativa, y se extienden por el eje Pacífico hacia el noroccidente.

El ejercicio de análisis se nutre de múltiples fuentes de información dentro de las cuales destacan las siguientes:

- Registros de viajes de empresas generadoras y transportadoras de carga en el país.
- Información pública y suministrada directamente por entidades estatales como la ARTF, SCT, SEMARNAT e INECC.
- Documentos y estudios secundarios en lo que refiere a transporte de carga y su dinámica de emisiones en México.

En función de la dinámica de transporte que suele ocurrir en ambos corredores, la metodología propuesta y el diagnóstico, el análisis de estimaciones se segmenta en diferentes configuraciones modales de tal manera que se comparan las emisiones de gases contaminantes para diferentes maneras de recorrer ambos corredores: autotransporte y transporte intermodal.

Aplicación de la metodología

La Guía, además, presenta la aplicación de la metodología para el caso de **dos corredores** de transporte de carga en México.



El capítulo está estructurado en tres grandes secciones:

1

La primera, presenta un diagnóstico completo de los corredores analizados, cubriendo aspectos relevantes para la estimación en diferentes modos, como la topología de las rutas y la oferta de transporte.

2

La segunda, presenta las estimaciones realizadas siguiendo las metodologías de los capítulos 2 y 3 para el caso particular de ambos corredores.

3

La tercera, describe una serie de conclusiones y consideraciones del ejercicio, al igual que de cara a la réplica del ejercicio para otros corredores del transporte de carga en México.

DIAGNÓSTICO

Referencias locales

Adicional a las referencias metodológicas y conceptuales a nivel internacional descritas en el capítulo 1, gran parte del trabajo contenido en esta guía se soporta y es fruto de la revisión de información local para México. Esto, con el fin de ajustar el componente diagnóstico y las estimaciones de emisiones de GEI y contaminantes criterio al contexto del transporte de carga en México.

La información asociada a la caracterización general de corredores (distancias, ubicación geoespacial, dinámica de viaje, topología y configuraciones modales existentes para el transporte de carga) se obtuvo de diversas fuentes:



DISTANCIAS Y CARACTERÍSTICAS GENERALES

- Reportes oficiales de la SCT, y bases de datos georreferenciadas para autotransporte y transporte marítimo (red nacional de caminos del INEGI) y para el modo férreo (infraestructura ferroviaria en México de la ARTF).



TOPOLOGÍA

- Registro de segmentos viales con índice de Rugosidad Internacional generado por el IMT, al igual que de plataformas especializadas para la caracterización de tramos específicos como *Google Earth Pro*.



TIEMPOS, VELOCIDADES PROMEDIO Y DINÁMICA DE VIAJE

- Información a nivel de viaje proveniente de empresas generadoras u operadoras de carga participantes voluntarias del proyecto.

Por otra parte, la información utilizada para caracterizar la oferta de transporte, dentro de la cual se encuentran las especificaciones técnicas de los vehículos por modo utilizados para cubrir ambos trayectos, provino de distintas fuentes:



OFERTA DE AUTOTRANSPORTE

- Estadística Básica del Autotransporte Federal (SCT) y registros de flota de empresas generadoras u operadoras de carga, participantes voluntarias del proyecto.



OFERTA DE TRANSPORTE FERROVIARIO

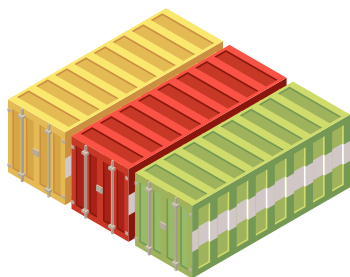
- Reportes y bases de datos oficiales de la ARTF e información secundaria recogida de portales especializados en locomotoras.



OFERTA DE TRANSPORTE MARÍTIMO / FLUVIAL

- Información oficial de operadores de transporte, al igual que reportes y fichas técnicas de portales especializados en materia marítima provistos por la ANTP.

Finalmente, la información utilizada para caracterizar el movimiento de carga a nivel de tipo de mercancía movilizada, al igual que lo referente a parámetros logísticos de interés, provino de las siguientes fuentes:



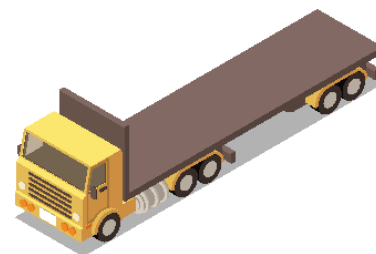
DEMANDA Y MOVIMIENTO DE CARGA

- Estadísticas de referencia de movimiento de carga por el modo ferroviario a nivel de estación y entidad proveniente de la ARTF.



FACTORES DE OCUPACIÓN

- Información a nivel de viaje –y etapa– proveniente de empresas generadoras u operadoras de carga participantes voluntarias del proyecto, para el caso particular de autotransporte y transporte marítimo. Para el caso del transporte férreo se recurrió a reportes oficiales de indicadores de carga de la ARTF, al igual que a fichas técnicas del equipo tractivo provenientes de portales web especializados.



VIAJES EN VACÍO

- Documentos oficiales del IMT sobre Matrices O-D multiproducto para el transporte de carga nacional (principales corredores).

Caracterización general de los corredores

México, al ser una de las principales economías del continente, genera un flujo de mercancías dinámico y relevante por cuenta de actividades de alto valor dentro de su Producto Interno Bruto (PIB), como la agricultura; la industria manufacturera representada en la industria química, de alimentos y de fabricación de equipo de transporte; la minería y la construcción, entre otras.

A su vez, su posición geográfica, con salida a ambos océanos y facilidad de acceso a otros países productores / receptores de mercancías, lo pone en una posición estratégica en el ámbito comercial y económico en general. Para suplir las necesidades comerciales y económicas de estos sectores y actividades productivas, el transporte se ha consolidado como una de las labores transversales de mayor relevancia de cara a la productividad y competitividad del país.

Así, al cierre del 2021, esta actividad llegó a tener una participación cercana a 6% dentro del PIB nacional. Su papel e importancia al servicio de la actividad productiva y comercial del país se hace evidente en la infraestructura de transporte existente (tanto para cada modo como en términos de transporte intermodal), en la multiplicidad de alternativas para el movimiento de mercancías de un punto a otro, al igual que en la oferta y demanda de servicios para el transporte de carga.

Fruto de esfuerzos desde lo gubernamental (al mantener operativa una red de infraestructura para el autotransporte, transporte férreo, y marítimo / fluvial) al igual que desde

el sector privado (al consolidar rutas y estructuras logísticas para el movimiento de carga entre los centros productivos del país y aquellos destinados a la distribución para el comercio internacional o el consumo local), se han consolidado corredores estratégicos para el transporte de carga.

Estos se utilizan de manera recurrente, de tal modo que, en el marco de un análisis de emisiones de gases contaminantes para el sector, se considera importante partir de aquellos ya consolidados, de tal modo que los resultados arrojados por las estimaciones y estudio de la dinámica de emisiones de vehículos a lo largo de ellos sea de utilidad para múltiples actores dentro de la cadena logística.

Entre ellos, se encuentran los corredores Ciudad de México - La Paz, y Ciudad de México - Mexicali.

Ciudad de México - La Paz (Baja California Sur)

ESCALAS

Este primer corredor parte de Ciudad de México, la capital político-administrativa del país y *hub* de producción de mercancías, el cual se extiende por todo el corredor carretero troncal México - Nogales por la costa del Pacífico hacia el norte, hasta llegar a Topolobampo, en el estado de Sinaloa, punto en el cual la carga realiza un transbordo en ferri en el puerto de Topolobampo hacia el puerto de Pichilingue, ubicado en La Paz, Baja California Sur.

Gráficamente, este puede apreciarse en el siguiente mapa.

Mapa 1 | Representación gráfica Ciudad de México - Topolobampo - La Paz



Fuente: Elaboración propia

EXTENSIÓN

Su extensión es de cerca de 1,650 kilómetros, incluyendo tramos de primera y última milla en Ciudad de México y La Paz, estimados entre 10 y 15 km, respectivamente, al igual que el paso marítimo entre puertos de alrededor de 204 km. Lo anterior, indica que el restante, cerca de 1,420 km, agrega el recorrido grueso a lo largo del corredor.

VARIANTES

No obstante, es preciso aclarar que esta distancia gruesa puede llegar a variar en caso de que se realice en transporte férreo, ya que esta sería de 1,716 km. En términos de tiempo de recorrido, en condiciones normales y promedio, el recorrido puede realizarse entre 32 y 90 horas dependiendo de si se realiza en autotransporte y ferri, o involucrando el transporte férreo.

ETAPAS

En términos de etapas de viaje, el corredor puede segmentarse en cuatro (ver segmentos numerados en el mapa 1). La primera, hace referencia a la salida de Ciudad de México hacia las vías interurbanas; la segunda, comprende el grueso del recorrido pasando por estados como Michoacán, Jalisco, Nayarit, y Sinaloa; la tercera, corresponde al paso en ferri entre el Puerto de Topolobampo y el Puerto de Pichilingue (La Paz - Baja California Sur), y la cuarta, hace alusión al tramo de última milla entre el puerto y un centro de distribución en dicho municipio.

CONFIGURACIONES

En términos de configuración modal, el corredor puede recorrerse utilizando dos tipos de combinaciones:

1. Integrando el autotransporte y el transporte marítimo / fluvial en puerto
2. Involucrando los tres tipos de modos

A continuación, se describe cada una de las posibles configuraciones por etapa de viaje:

PRIMERA CONFIGURACIÓN MODAL

Autotransporte



CIUDAD DE MÉXICO -
TOPOLOBAMPO

Ferri



PUERTO
DE TOPOLOBAMPO -
PUERTO DE PICHILINGUE
(LA PAZ)

Autotransporte



PUERTO DE PICHILINGUE
(LA PAZ) - CENTRO DE
DISTRIBUCIÓN (LA PAZ)

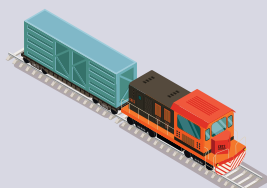
SEGUNDA CONFIGURACIÓN MODAL

Autotransporte



CENTRO DE
PRODUCCIÓN
- ESTACIÓN
PANTACO (CIUDAD
DE MÉXICO)

Férreo



ESTACIÓN DE
PANTACO (CIUDAD
DE MÉXICO) -
ESTACIÓN PUERTO
DE TOPOLOBAMPO

Ferri



PUERTO DE
TOPOLOBAMPO
- PUERTO DE
PICHILINGUE
(LA PAZ)

Autotransporte



PUERTO DE
PICHILINGUE
(LA PAZ) - CENTRO
DE DISTRIBUCIÓN
(LA PAZ)

Ciudad de México - Mexicali (Baja California)

ESCALAS

Al igual que el anterior, el segundo corredor parte de Ciudad de México, la capital político-administrativa del país, y se extiende por todo el corredor carretero troncal México - Nogales por la costa del Pacífico hacia el norte, hasta llegar cerca al borde limítrofe entre México con los Estados Unidos de Norteamérica, en la ciudad de Mexicali.

Gráficamente, este puede apreciarse en el siguiente mapa.

Mapa 2 | Representación gráfica corredor Ciudad de México - Mexicali



Fuente: Elaboración propia

EXTENSIÓN

Su extensión se encuentra entre 2,595 - 2,822 km, dependiendo de si el grueso del trayecto se realiza en autotransporte o en transporte férreo, en cuyo caso la distancia sería más larga.

A su vez, esta distancia incluye tramos de primera y última milla en Ciudad de México y Mexicali estimadas en 15 y 10 km cada una correspondientemente para el caso intermodal, mientras que para la configuración exclusiva de autotransporte estos tramos son de 5 y 10 km, respectivamente.

VARIANTES

En concordancia con lo anterior, el grueso del corredor tendría una distancia de 2,580 km en caso de ser recorrido en autotransporte y de 2,796 km, en caso de ser recorrido en transporte férreo. En términos de tiempo de recorrido, en condiciones normales y promedio, el recorrido puede realizarse entre 44 - 122 horas dependiendo de si se realiza en autotransporte o bien involucrando el transporte férreo, correspondientemente.

ETAPAS

En términos de etapas de viaje, el corredor puede segmentarse en tres (ver segmentos numerados en el mapa 2).

1. La primera, hace referencia a la salida de Ciudad de México hacia las vías interurbanas.
2. La segunda, comprende el grueso del recorrido pasando por estados como Michoacán, Jalisco, Nayarit, Sinaloa y Sonora, hasta llegar a Mexicali, en Baja California.
3. La tercera, hace alusión al tramo de última milla dentro del territorio del municipio al dirigirse a un centro de distribución.

CONFIGURACIONES

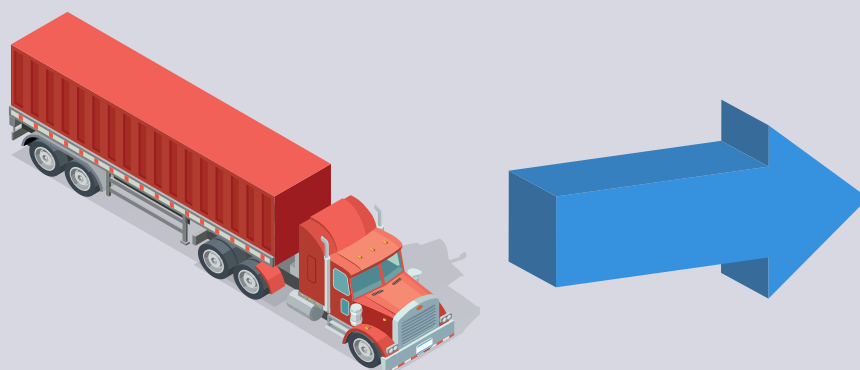
En términos de configuración modal, el corredor puede recorrerse utilizando dos tipos de combinaciones:

1. Autotransporte, únicamente a lo largo del corredor
2. O incluyendo al transporte férreo en el grueso del trayecto.

A continuación, se describe cada una de las posibles configuraciones por etapa de viaje:

PRIMERA CONFIGURACIÓN MODAL

Autotransporte



SEGUNDA CONFIGURACIÓN MODAL

Autotransporte

Transporte Férreo

Autotransporte





Topología

Como se señala a lo largo de la presentación de la metodología de estimación de emisiones de GEI y de contaminantes criterio, la pendiente de inclinación del terreno por donde transita un vehículo es un factor de alta incidencia sobre la dinámica de emisiones para un viaje específico.

En particular, se estima que la variabilidad en emisiones bajo diferentes gradientes de inclinación puede llegar a variar entre 5% y 10%. Por ello, un componente importante del análisis se refiere a la topología del terreno recorrido por los vehículos de transporte de carga durante sus viajes.

En México, el terreno en su mayoría es llano, comparado con otros países donde existen múltiples cuerpos montañosos dentro del territorio que representan una alta porción del área. No obstante, existen algunos cuerpos montañosos ubicados a lo largo del eje oeste del país, desde la zona central y hacia el norte.

Lo mismo ocurre en el centro del país, en la región donde se ubican algunos centros económicos como Ciudad de México y Guadalajara. Esto repercute sobre los viajes que se realizan desde y hacia estas ciudades pues, en muchos casos, serán viajes cuyas pendientes promedio son negativas o cercanas a cero (en el caso de ser viajes de salida de estas ciudades) y positivas en el caso contrario (viajes de entrada a estas ciudades).

Lo anterior puede apreciarse gráficamente en el mapa a continuación, en el que se muestran las pendientes del país en valor absoluto para el conjunto de vías terrestres principales. Pueden apreciarse cambios de color (pendientes variadas) en varios puntos a lo largo del eje del Pacífico, al igual que hacia la región centro sur del territorio mexicano.

Por el contrario, hacia el norte del país las pendientes, en su mayoría, se encuentran en el rango de 0% y 3% (colores azul y verde) y varían poco.

En cifras, más de 60% de las vías principales del país manejan una pendiente de inclinación inferior a 3%, lo cual da cuenta del perfil general topográfico (ver Anexo 2 - Gráfica 39, página 159).

Mapa 3 | Pendiente por tramo vial - principales vías de México



Fuente: Elaboración propia

Al enfocarse en los corredores priorizados, nos encontramos ante un escenario similar al descrito anteriormente.

Por otra parte, al analizar ambos corredores en un único recorrido a lo largo del eje del Pacífico de México, se observa un recorrido que parte de una altitud mayor en Ciudad de México (alrededor de los 2.240 msnm en promedio) y desciende progresivamente conforme el recorrido avanza al norte, llegando a Toluca a una altura promedio de 10 msnm.

Finalmente, el trayecto entre Toluca y Mexicali (el tramo final del corredor CDMX - Mexicali) cuenta con algunas variaciones en términos de elevación, pero de menor escala, relativa a la del primer segmento del corredor.

Lo anterior puede apreciarse gráficamente en el siguiente mapa donde se presenta el perfil de elevaciones para los dos corredores, CDMX - Toluca y CDMX - Mexicali, de manera conjunta.

NOTA

A partir de esta caracterización del perfil de elevaciones resulta relevante indicar que el sentido de cada viaje será clave a la hora de realizar estimaciones por corredor.

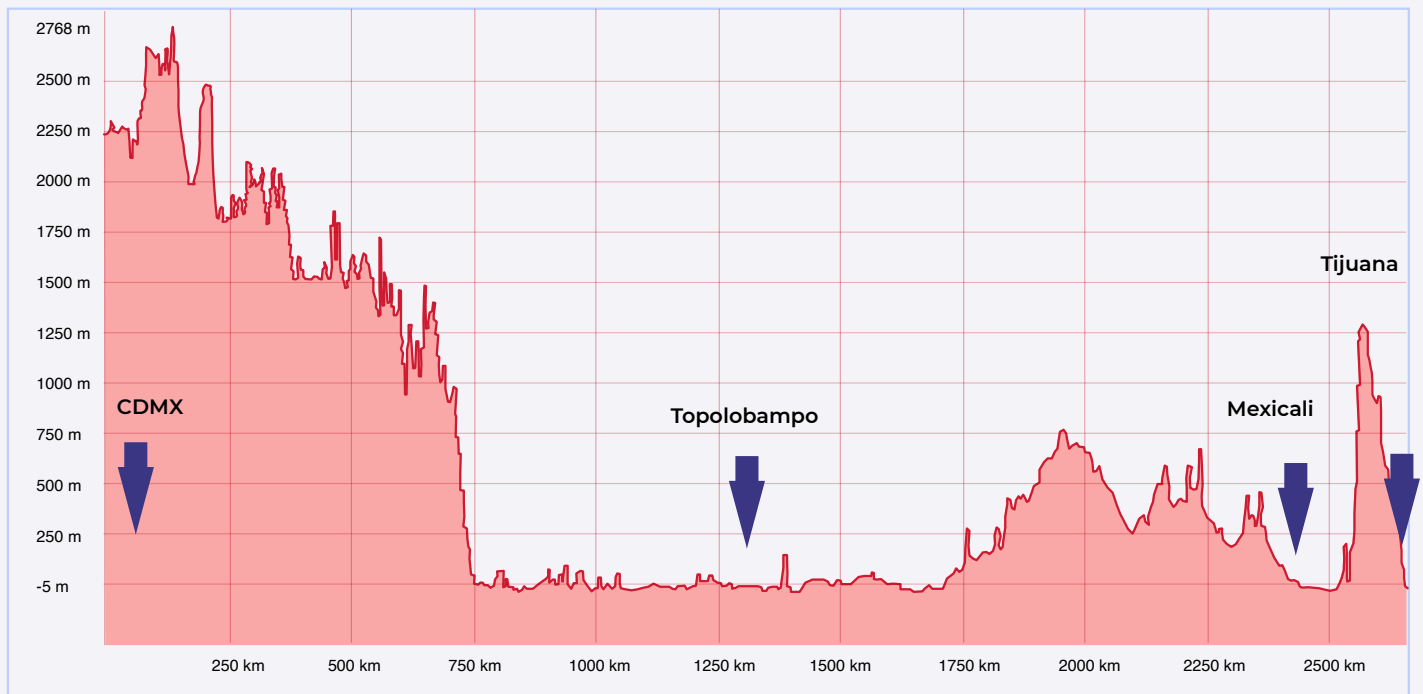
El trayecto CDMX - Topolobampo será en su mayoría en bajada (pendientes menores a cero en varios segmentos) y plano, caso contrario al trayecto Topolobampo - CDMX, lo cual tendrá repercusiones sobre la dinámica de emisiones de cada vehículo asociada al transporte de mercancías.

NOTA

Vale la pena mencionar que se deja por fuera del análisis al segmento Topolobampo - La Paz del primer corredor en vista de su naturaleza marítima, razón por la cual se analizan ambos corredores bajo una misma perspectiva topográfica.

Gráfica 9

Perfil de elevaciones corredores CDMX - Topolobampo y CDMX - Mexicali



Fuente: Elaboración propia con base en información georreferenciada de Google Earth Pro

De cara a la aplicación de la metodología de estimación de emisiones, el análisis topográfico se realiza a nivel de pendientes por cada corredor, esto con el fin de identificar tramos donde la inclinación del terreno incide sobre la mecánica de emisión de los vehículos.

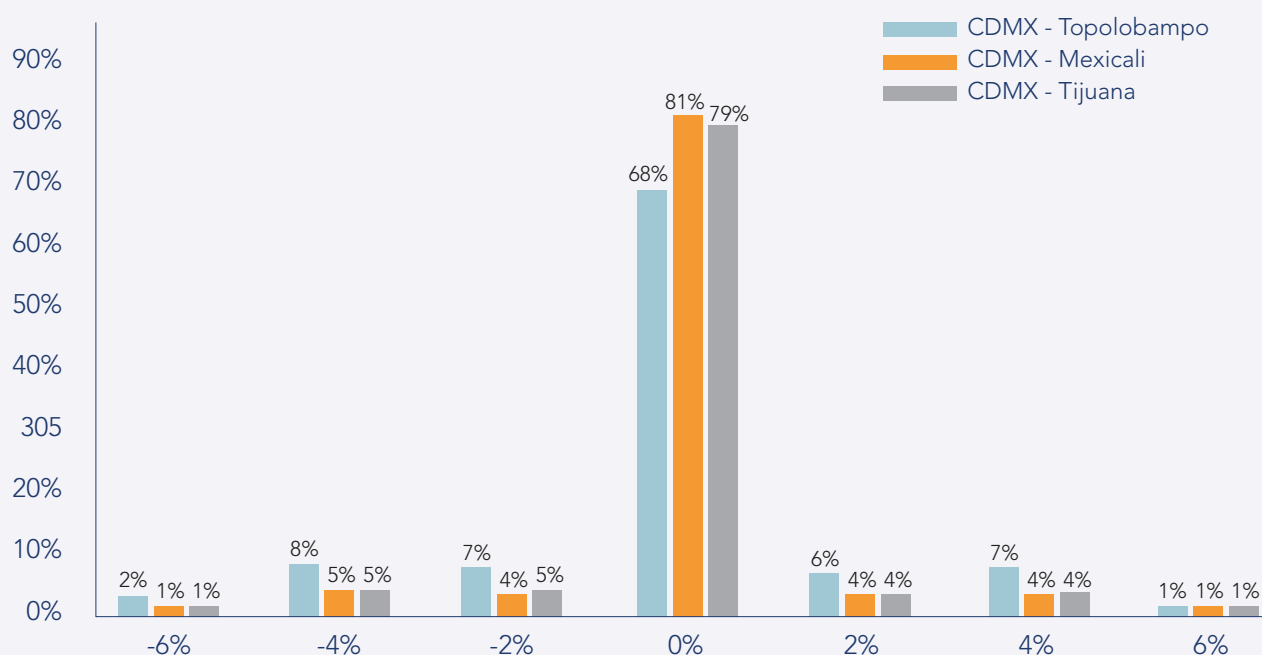
En la siguiente gráfica puede apreciarse el perfil de pendientes para cada corredor: CDMX - Topolobampo - La Paz marcado con azul, y CDMX - Mexicali, con naranja.

De acuerdo con la figura 21, los perfiles de ambos corredores son similares, con algunas leves diferencias en la participación de cada rango de pendientes dentro de la distribución porcentual agregada, explicadas a partir de algunos repechos existentes llegando a Mexicali.

Los datos indican una preponderancia de las pendientes cercanas a 0%, es decir, una ausencia de cambio en elevación entre segmentos viales contiguos. Su participación dentro de la distancia por corredor es cercana a 70% y 80% para los corredores CDMX - Topolobampo - La Paz y CDMX - Mexicali, correspondientemente.

Para la distancia restante del recorrido, se evidencia una relativa paridad entre pendientes superiores o inferiores a 0%, con una participación promedio entre 4% y 7% para niveles de inclinación como -2%, 2% y 4%, mientras que los segmentos viales con pendientes de mayor inclinación (tanto positiva como negativa) cuentan con participaciones cercanas a 1% o 2%, por lo mucho, dentro de la distancia de cada corredor.

Gráfica 10 Distribución porcentual de tipo de pendiente por corredor



Fuente: Elaboración propia a partir de información de la malla vial de México del INEGI, 2022

Oferta de transporte

La oferta de transporte se manifiesta a partir de tres componentes principales:

1. La capacidad, representada en la infraestructura disponible para el transporte.
2. Los servicios ofrecidos a lo largo de dicha infraestructura, representados en los vehículos y su dinámica de movimiento (frecuencias, horarios y esquemas operativos).
3. La red de cobertura, tanto de la infraestructura como de los servicios.

Para el presente caso, al referirnos a la oferta de transporte de carga haremos alusión a la infraestructura por modo (autotransporte, férreo y marítimo), al igual que a los vehículos utilizados para cubrir los trayectos a lo largo de esta infraestructura para cumplir con las demandas de transporte de mercancías.

Todo lo anterior, enmarcado dentro de los corredores priorizados para el análisis y aplicación de la metodología. Para explicarlo, el diagnóstico se segmenta entre autotransporte, donde se revisará lo asociado con infraestructura carretera y los vehículos que operan en el país, y transporte férreo y marítimo / fluvial, donde se hace lo correspondiente para estos modos particulares.

Autotransporte

En términos de capacidad, México cuenta con una red de carreteras al servicio del autotransporte de 397,938 km, distribuidos en una proporción 80/20 entre vías libres y con cuota. Asimismo, con base en información del Anuario Estadístico de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes se identifica que, de la red total, 51,198 km corresponden a los corredores troncales. [31]

Estos últimos se consideran la columna vertebral del sistema de carreteras, pues atraviesan el país y conectan a los centros socioeconómicos de mayor relevancia.

En los siguientes mapas se detallan ambos alcances a nivel de infraestructura para el autotransporte; la del mapa a la izquierda, ilustra la red completa de carreteras, mientras que el mapa de la derecha representa los corredores troncales.

Mapa 4

Red de carreteras México: Red completa (izquierda) y corredores carreteros troncales (derecha)



Fuente: Izquierda: Elaboración propia, Derecha: Tomado directamente del Anuario Estadístico Sector Comunicaciones y Transporte 2020

Respecto a los corredores priorizados, el trazado de cada uno de ellos concuerda con el corredor troncal México - Nogales con ramal a Tijuana, hacia el oeste del país a lo largo de la costa. Este tiene una extensión total de 3,075 km, y vincula el centro del país con el noroeste, lindando con estados como California y Arizona en los Estados Unidos de Norteamérica.

En términos de los tipos de vehículos utilizados, la aproximación para el presente diagnóstico se limita a estudiar las configuraciones de unidades motrices y de arrastre actualmente registradas en el territorio mexicano por dos razones:

1

No hay limitaciones al movimiento de vehículos por categorías, por lo que cualquiera podría transitar el corredor sin problema.

2

En función de la primera, la información recogida de operadores puede no llegar a ser estadísticamente significativa para caracterizar a la flota completa.

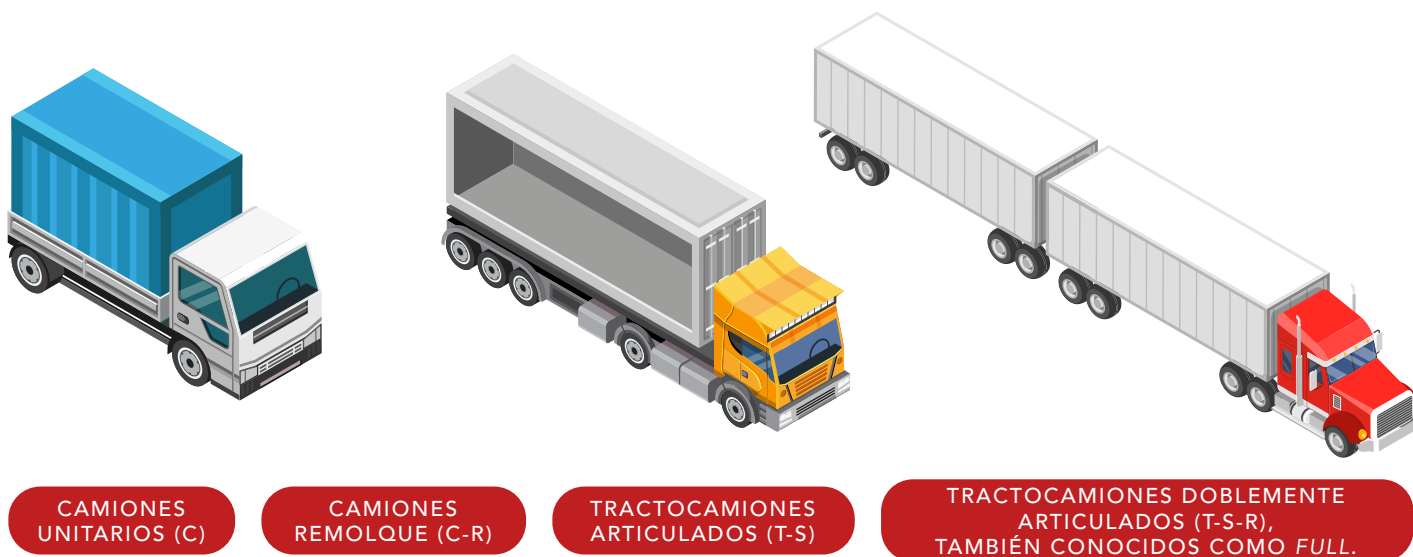
Por ello, se recurre a las estadísticas de la flota registrada de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la cual se ciñe a las categorías de vehículos definidas por la Norma Oficial Mexicana (NOM-012-SCT-2-2017) en función de su peso, dimensiones y categoría (funcionalidad).

En México, hasta el año 2020, se registró cerca de un millón de unidades vehiculares, divididas de la siguiente manera:

Unidades motrices: tipo de camión, ya sea unitario (C) o tractocamión (T), segmentado por número de ejes. Para el caso de las unidades motrices, el número de ejes normado está entre dos y tres.

Unidades de arrastre: remolques (R) y semirremolques (S) por número de ejes. Para el caso de las unidades de arrastre el rango de ejes normados se encuentra entre uno y seis.

En conjunto, la combinación de unidades motrices con las de arrastre generan cuatro grandes categorías:



En cifras, las unidades vehiculares que rondan el millón, como se mencionó anteriormente, se reparten casi paritariamente entre unidades vehiculares y de arrastre, donde las vehiculares representan cerca de 51% del total y las de arrastre, 49%.

Entre las unidades vehiculares (tipos de camiones) la mayor cantidad de unidades se ubican en la categoría de tractocamión de tres ejes (T-3), con una participación superior a 60%, mientras que otras categorías como el camión unitario de dos y tres ejes cuentan con una participación de 20% y 16%, respectivamente.

Así, el resto de las configuraciones tiene una participación mínima conjunta de 4% dentro del total.

Entre las unidades de arrastre, los semirremolques agregan cerca de 99% de las unidades totales. Dentro de dicha categoría, los semirremolques de dos ejes cuentan con la mayor participación con un 80%, seguido de los semirremolques de tres ejes con 18%.

Así, los demás tipos de semirremolques, de uno, cuatro, cinco y seis ejes, cuentan en conjunto con una participación de 1% dentro del número total de unidades.

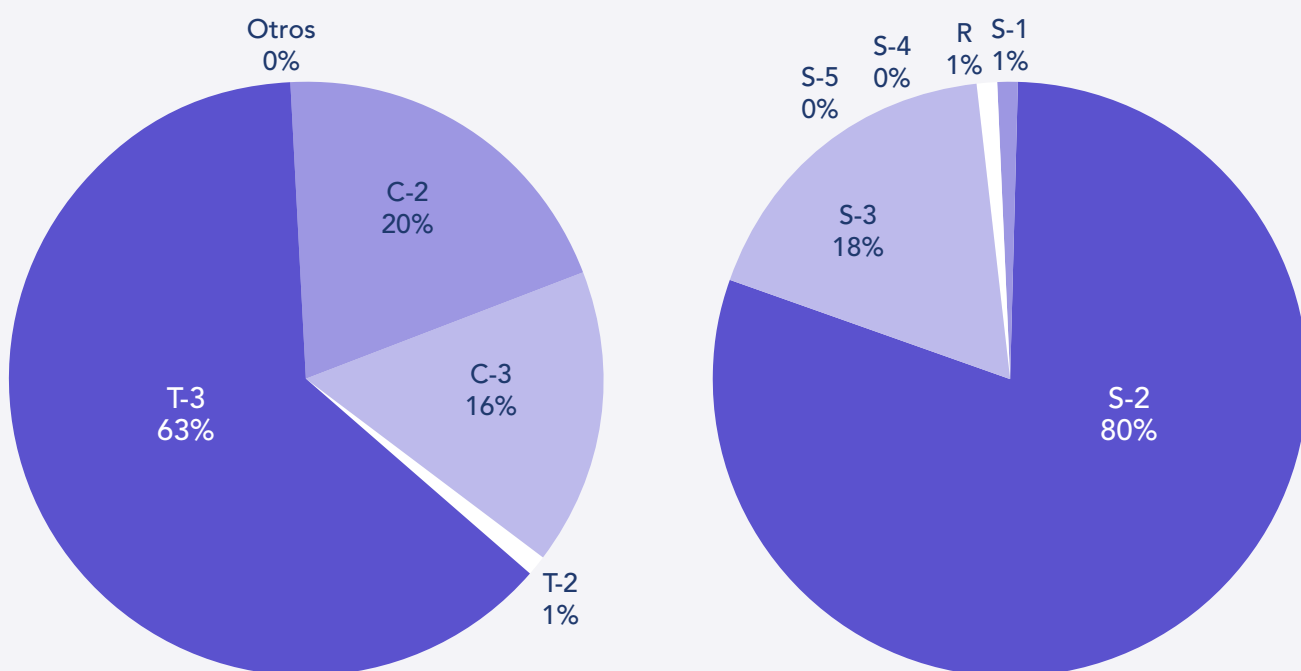
Las distribuciones mencionadas anteriormente, tanto de unidades motrices como de unidades de arrastre, se presentan gráficamente a continuación.

NOTA

Esta información hace parte de los insumos principales para la delimitación y definición del factor de emisión para el transporte ferroviario.

Gráfica 11

Distribución porcentual de Unidades Motrices (izquierda) y de Unidades de Arrastre en México (derecha)



Transporte férreo

En el campo del transporte férreo, México cuenta con un sistema ferroviario compuesto por 17,360 km de vías principales y secundarias puestas en concesión a siete concesionarios, 4,474 km auxiliares dedicados a espacios como patios y laderos, y 1,555 km particulares.

Para la red, según estimaciones recientes realizadas por la ARTF, se estima que la velocidad media de recorrido para el sistema total es de 28.7 km/h, valor que puede variar dependiendo del concesionario entre los 20 y 45 km/h, como máximo. A su vez, esta red extensa se acompaña por 293 estaciones ubicadas a lo largo y ancho del territorio cubierto, con espacios de concentración hacia el centro del país, al igual que a la Península de Yucatán y el Pacífico.

Lo anterior, se representa gráficamente en el mapa a continuación donde los círculos verdes indican la presencia de una estación y las líneas, la red ferroviaria.

Mapa 5 | Red férrea de México



Fuente: Red pública de la ARTF e información de puntos origen-destino de carga férrea de la SCT

Para el caso que le compete al presente diagnóstico, el alcance de la red es suficiente para cubrir ambos corredores (Ciudad de México - Topolobampo - La Paz, y Ciudad de México - Mexicali) bajo la vía Pacífico - Norte. Además, dicha red cuenta con estaciones en Ciudad de México, como es el caso de Pantaco y otras en el estado de México, como Cuautitlán, Ecatepec, entre otras, y cuenta con cobertura a lo largo del eje del Pacífico y estaciones en puntos estratégicos dentro de los estados de Jalisco, Sonora, Sinaloa y Baja California.

Específicamente, para el corredor de Ciudad de México - Topolobampo - La Paz, la red férrea cuenta con una extensión de 1,716 km desde su punto de inicio en Ciudad de México hasta el puerto de Topolobampo, mientras que para el corredor Ciudad de México - Mexicali, la distancia de la red es de 2,796 km.

Referente a los vehículos utilizados, hasta el año 2020, el sistema ferroviario concesionado contaba con 1,196 locomotoras con una edad promedio de 30 años y con 31,646 carros distribuidos entre góndolas, tolvas, furgones, *autoracks*, tanques, entre otros.



Entre estos, las categorías de mayor representación son las góndolas y las tolvas con una participación de 30% y 27%, respectivamente.

En lo que respecta a los corredores priorizados para el diagnóstico, se identifica que la operación de esta línea se encuentra en cabeza de un único concesionario: Ferrocarril Mexicano, S.A. de C.V. (Ferromex). Este, agrega cerca de 47% de las locomotoras en todo el sistema, con una edad promedio de 16 años para el equipo tractivo, donde más de 80% de sus locomotoras se fabricaron después o durante el año 2006.

1 Información basada en datos recogidos de las especificaciones técnicas en portales comerciales y en instructivos de cada casa fabricante.

A su vez, estas se dividen entre dos referencias principales: GE ES44AC y EMD SD70AC con capacidad de tracción promedio entre 4,300 y 4,400 caballos de fuerza¹, y con un peso bruto máximo permitido cercano a las 195 toneladas.

A manera de resumen, a continuación, se presenta una ficha técnica para los dos tipos de unidades motrices que podrían estar operando a lo largo de los corredores Ciudad de México - Topolobampo - La Paz, y Ciudad de México - Mexicali. Esta información forma parte de los insumos principales para la delimitación y definición del factor de emisión para el transporte ferroviario.

Figura 9 | Ficha técnica resumen para las locomotoras operantes en los corredores



Férreo

Referencia (s)	GE - ES44AC	EMD - SD7 0AC
Tipología	Locomotora	
Tipo de combustible	Diésel	Diésel
Modelo	2006 - 2007 - 2016	2006 - 2011 - 2015
Capacidad	2.000 + toneladas Fuerza de tracción: 75T	
Otros	Velocidad máxima: 120 km/h	Velocidad máxima: 118 km/h

Fuente: Elaboración propia a partir de información suministrada por la SCT y búsquedas en portales especializados

Transporte marítimo y fluvial

En el plano marítimo / fluvial, el país cuenta con tres pasos de transbordo marítimo: Topolobampo - Pichilingue (La Paz), Mazatlán - Pichilingue (La Paz) y Santa Rosalía - Guaymas. Estos pasos de transbordo se ubican en el eje Pacífico del país y sus recorridos son de 204 km, 450.1 km y 170.5 km respectivamente.

Estos se representan gráficamente en el siguiente mapa:

Mapa 6 | Pasos de transbordo marítimo en México



1: Santa Rosalía - Guaymas, 2: Topolobampo - Pichilingue, 3: Mazatlán - Pichilingue

Fuente: Elaboración propia a partir de la red nacional de caminos - INEGI

Para el corredor que le compete al presente diagnóstico, el paso de transbordo de interés es el que se ubica entre Topolobampo y el Puerto de Pichilingue en La Paz, Baja California Sur. Este cuenta con una extensión aproximada de 204 km, que se recorre en un promedio de ocho horas.

Con respecto a los vehículos utilizados, la información recabada indica que el barco que opera activamente en este paso es un buque de carga tipo *roll on - roll off*, ya que se caracteriza por transportar material rodado a partir de rampas especializadas para llevar a cabo el cargue (*roll on*) y el descargue (*roll off*) en el puerto directamente.

En cuanto a sus dimensiones, factor decisivo a la hora de determinar su factor de emisión de cara al ejercicio de estimación, este buque cuenta con un peso muerto de 12,350 toneladas y un calado de 7.420 m.

Esta y otra información complementaria se presenta en la siguiente ficha resumen. La información forma parte de los insumos principales para la delimitación y definición del factor de emisión para el transporte marítimo / fluvial para el corredor Ciudad de México - Topolobampo - La Paz.

Figura 10 | Ficha descriptiva embarcación paso Topolobampo - La Paz



Transporte Marítimo

Referencia (s)	Buque México Star
Tipología	Roll On - Roll Of (Ro-Ro) cargo ship
Tipo de combustible	Distillate fuel y residual fuel
Modelo	2004
Capacidad	DWT: 12,350 T TEU: 800
Otros	Longitud: 182.8 m Calado: 7,420 m Velocidad de servicio: 38 km/h / 20.5 kts

Fuente: Elaboración propia a partir de información suministrada por ANTP y búsquedas en portales especializados

Parámetros logísticos

En concordancia con la metodología, la cual señala que los dos parámetros logísticos que juegan un papel importante en la definición del factor de emisión a nivel de viaje son el factor de ocupación y de viajes en vacío, esta sección presenta un diagnóstico de ambos factores para los dos corredores analizados.

Las fuentes de información son los registros de viaje entregados por empresas generadoras de carga u operadores logísticos para el caso de los factores de ocupación, además de información secundaria (estudios especializados en México), para el caso de los viajes en vacío.

Factores de ocupación

El factor de ocupación se define como la relación entre el peso neto de la carga transportada y la carga útil. Su importancia a la hora de estimar las emisiones de gases contaminantes provenientes de un viaje de transporte de carga yace en la idea de aprovechamiento de la capacidad de cada vehículo utilizado para el transporte con relación a la carga transportada, como medida de eficiencia.

De este modo, mayores niveles de ocupación (como se evidencia en vehículos que transportan carga a granel) se traducen en menores factores de emisión y, por ende, menores niveles de emisiones de gases contaminantes, al haber un incremento en el aprovechamiento de la capacidad del vehículo durante el viaje.

Para el diagnóstico, el análisis de la ocupación se realiza a nivel de corredor y dentro de cada uno a nivel de modo de transporte: autotransporte, transporte férreo, y fluvial / marítimo.

Ciudad de México – Mexicali

Autotransporte

El uso del autotransporte en el corredor Ciudad de México - Mexicali puede darse en dos tipos de configuraciones.

1

Se refiere a su uso como transporte de primera milla o de inicio de recorrido, caso en el que su uso se articula con el del transporte férreo para llevar a cabo el recorrido principal.

2

Se refiere al uso del autotransporte como principal y único medio de transporte para cubrir la totalidad de la distancia entre punto de origen y destino.

Debido a que para cada tipo de configuración de viaje mencionada los vehículos utilizados son diferentes, para el caso del transporte de primera / última milla se asociaría a vehículos de menor envergadura, mientras que para el segundo el vehículo utilizado se podría referir a uno de alta capacidad probablemente articulado o biarticulado, los análisis de factor de ocupación se presentan de manera separada. Esto se detalla en la tabla a continuación:

Tabla 15 Diagnóstico de ocupación para autotransporte para el corredor Ciudad de México - Mexicali

Trayecto	Recorrido en autotransporte	Factor de ocupación promedio - masa	Factor de ocupación promedio - volumen
Ciudad de México - Mexicali	Primera milla – esquema intermodal	150%	260%
	Principal medio de transporte - autotransporte	45%	78%
Mexicali - Ciudad de México	Primera milla - esquema intermodal	150%	260%
	Principal medio de transporte - autotransporte	45%	78%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de viajes recibidos

Transporte férreo

El transporte férreo en este corredor se utiliza como uno de los modos en el que puede recorrerse el grueso del trayecto entre Ciudad de México y Mexicali o viceversa, bajo un esquema intermodal, en el cual este modo interactúa y se articula con el autotransporte para que este último actúe como transporte de primera / última milla.

Para el análisis de corredores se tomó un valor de referencia de 60% proveniente de referencias internacionales para viajes realizados en transporte férreo con carga general. [5]

Ciudad de México - Topolobampo - La Paz

Autotransporte

Para el caso del presente corredor, el uso de autotransporte se da en dos dimensiones.

1

Se refiere a su uso como transporte de primera y última milla, realizando recorridos en cada punto de inicio / destino desde y hacia centros de distribución. Esto, obligado por el hecho de utilizar el transbordo marítimo en ferri para llegar a La Paz, en Baja California Sur, o bien para salir de ella con destino a la Ciudad de México.

2

Se refiere al uso como principal medio de transporte para cubrir la totalidad del recorrido hasta el Puerto de Topolobampo desde la Ciudad de México, o viceversa.

Para ambos casos, el análisis de factor de ocupación se detalla en la tabla a continuación.

Tabla 16 Diagnóstico de ocupación para autotransporte para el corredor Ciudad de México - La Paz

Trayecto	Etapas de viaje	Factor de ocupación promedio - masa	Factor de ocupación promedio - volumen
Ciudad de México - Topolobampo - La Paz	Inicio de viaje (Primera milla)	180%	312%
	Recorrido principal	45%	78%
	Fin de viaje (Última milla)	150%	260%
La Paz - Topolobampo - Ciudad de México	Inicio de viaje (Primera milla)	150%	260%
	Recorrido principal	45%	78%
	Fin de viaje (Última milla)	180%	312%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de viajes recibidos

Transbordo marítimo Puerto de Topolobampo a Puerto de Pichilingue (La Paz)

Para el presente corredor, el uso del paso de transbordo marítimo se utiliza como un paso obligado para quien lleve carga en cualquier dirección, ya sea utilizando un esquema de transporte intermodal (autotransporte y transporte férreo), o bien, utilizando el autotransporte como principal y único medio de transporte entre punto de origen y destino.

De este modo, su análisis se lleva a cabo de manera sencilla revisando el factor de ocupación (relación entre capacidad de transporte y carga efectivamente transportada), a partir de registros de viaje provistos por el operador del paso de transbordo entre el Puerto de Topolobampo y el Puerto de Pichilingue, en La Paz. La información se detalla en la tabla a continuación.

Tabla 17 Factores de ocupación para el transporte marítimo Corredor CDMX - La Paz

Trayecto	Carga transportada (Ton)	Capacidad (Ton)	Factor de ocupación (Ton)
Topolobampo - Puerto de Pichilingue (La Paz)	3,952	6,351	62%
Puerto de Pichilingue (La Paz) - Topolobampo	1,704	6,351	27%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de viajes recibidos

Transbordo férreo - Recorrido principal de viaje

El transporte férreo en este corredor se utiliza como uno de los modos en los cuales puede recorrerse el grueso del trayecto entre la Ciudad de México y Mexicali o viceversa, bajo un esquema intermodal, en el cual este modo interactúa y se articula con el autotransporte para que este último actúe como transporte de primera / última milla.

Para el análisis de corredores se tomó un valor de referencia de 60% proveniente de referencias internacionales para viajes realizados en transporte férreo con carga general. [5]

Viajes en vacío

La información recabada de transporte de mercancías a nivel de viaje y etapa a lo largo de los dos corredores priorizados detalla los viajes efectivos realizados por vehículos al servicio de múltiples generadores y operadores de carga en el país.

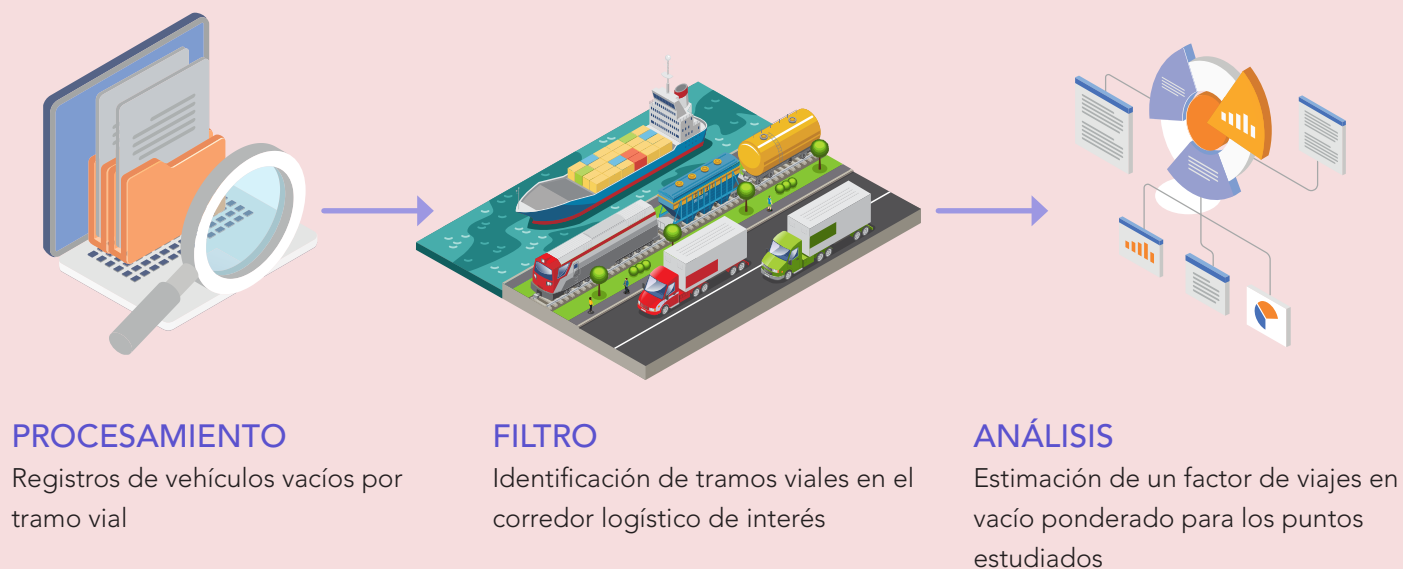
En concordancia con lo anterior, los viajes en vacío (sin carga de compensación) de regreso al punto de inicio que un vehículo debió realizar originalmente no se evidencian en la muestra, dado que las compañías generadoras buscan el costo / efectividad y la eficiencia en el gasto, por lo que contratan o llevan a cabo sólo aquellos servicios de transporte justificados en los que puedan ubicar carga.

Como respuesta ante la limitación presentada anteriormente, el análisis de viajes en vacío (importante de cara a la estimación de emisiones, pues la metodología indica que dichas emisiones de viajes sin carga de compensación deben asignarse al de ida) se llevó a cabo a partir de información secundaria.

Así, se recurrió al estudio de Matriz Origen Destino Multiproducto para México de 2014, para recabar indicadores que pudieran dar claridad de la dinámica de viajes en vacío a lo largo de los corredores, o en general del corredor troncal México - Nogales, con ramal a Tijuana.

Metodológicamente, el enfoque se describe en el esquema presentado a continuación:

Figura 11 | Metodología de aproximación al cálculo de viajes en vacío



En total, la caracterización de la matriz Origen Destino utilizada como insumo cuenta con información de 101 segmentos viales en todos los estados del país. A partir de un análisis de puntos de origen y destino por entidad federal y tramo, se identificó un grupo que se asoció a la ubicación de los corredores analizados. Este grupo de puntos de análisis se presenta en el mapa a continuación.

A partir de ellos se estimó un factor de viajes en vacío de 25%, considerando un análisis ponderado por distancia.

Mapa 7 | Puntos de análisis matriz O - D para estimación de factor de viajes en vacío



Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de la matriz O - D multiproducto

RESULTADOS ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE GEI Y CONTAMINANTES CRITERIO

A partir de la aproximación metodológica presentada a lo largo del capítulo 2 para GEI y en el capítulo 3 para contaminantes criterio, y con base en el diagnóstico desarrollado a lo largo del capítulo 4 del presente documento, en esta sección se presenta un ejercicio de estimación de emisiones para ambos tipos de contaminantes.

Lo anterior, desagregado para cada corredor priorizado para el análisis: Ciudad de México - La Paz (Baja California Sur) y Ciudad de México - Mexicali.

Gases de Efecto Invernadero (GEI)

Como se indicó en el segundo capítulo del documento, el alcance de las estimaciones para GEI comprende a los gases CO_2 , CH_4 , NO_2 , HF_6 y SF_6 . Todos bajo la medida estandarizada de CO_2 equivalente que permite la agregación de emisiones bajo una misma métrica comparable.

Asimismo, las emisiones incluidas comprenden a las emisiones directas, asociadas a la operación de vehículos de distinta índole para transporte de mercancías, y a las emisiones indirectas, que se asocian al ciclo de vida del combustible utilizado para propulsar el vehículo en cuestión.

De acuerdo con la metodología presentada en el capítulo 2 y con las particularidades para la delimitación del factor de emisión para cada modo de transporte, se utilizó la caracterización de vehículos, la topología de ruta y los parámetros logísticos asociados a cada corredor para definir un factor de emisión que se ajustara de la mejor manera a cada corredor y a su dinámica de transporte de mercancías.

Aunque a lo largo del capítulo 4 se mencionó la existencia de dos configuraciones: modal e intermodal, involucrando autotransporte y transporte férreo, y autotransporte únicamente, se estimaron las emisiones de GEI para tres.

La tercera, se refiere al autotransporte que utiliza un vehículo doblemente articulado (también conocido como *full*), con el ánimo de poner en evidencia diferencias marcadas en las emisiones generadas a nivel de tipo de vehículo. Asimismo, se pusieron en perspectiva dos escenarios:

1

Un escenario en el cual la carga se encuentra compensada de tal manera que el factor de viajes en vacío no afecta las estimaciones, en vista que hay carga transportada en ambos sentidos del corredor, permitiendo que los vehículos vayan y vuelvan cargados.

2

La carga no se encuentra compensada, por lo que se asume un factor de viajes en vacío de 25%, lo que indica que los movimientos de carga en ambas direcciones del corredor no son equiparables y deben ponderarse contemplando los vehículos que no van totalmente cargados en un sentido u otro.

Ciudad de México - Mexicali

Las estimaciones de GEI para este primer corredor se presentan en la gráfica a continuación. Inicialmente, puede notarse una diferencia sustancial entre las tres estimaciones.

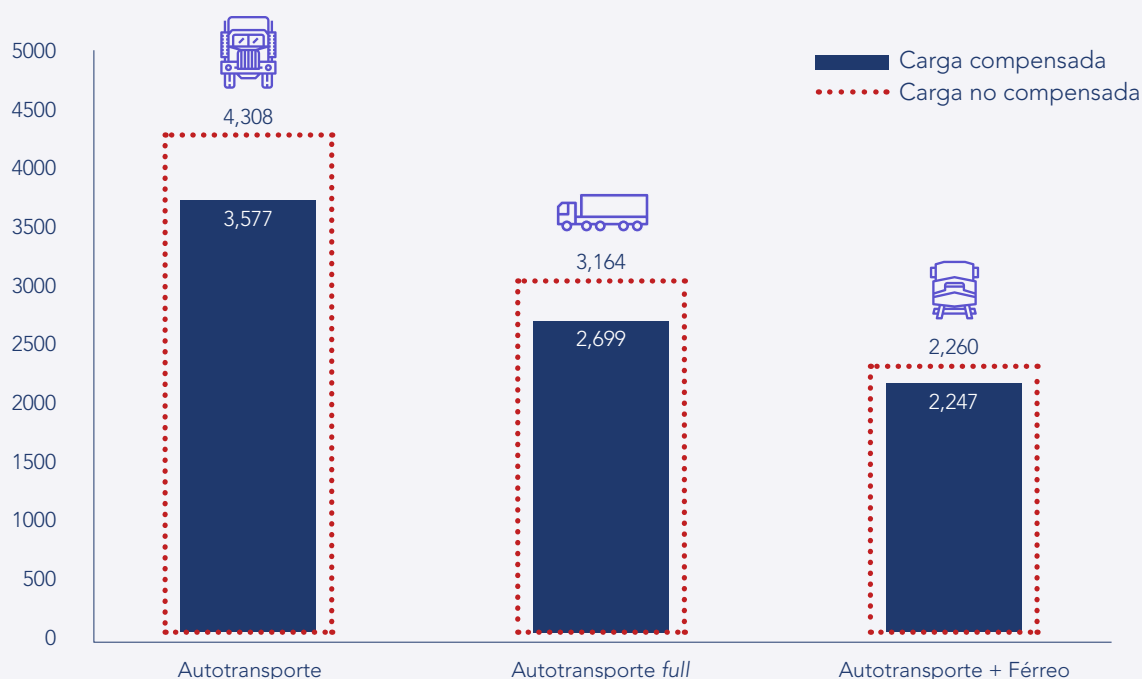
Si se toma el escenario más conservador, en el cual la carga no se encuentra compensada totalmente (líneas punteadas), las emisiones al utilizar transporte intermodal representan 49% de las emisiones que se generan, si el trayecto se cubre utilizando autotransporte tradicional (tomando como referencia un vehículo rígido de 20 toneladas de peso bruto vehicular).

Por otro lado, al comparar el autotransporte, dentro de sus dos posibles configuraciones vehiculares, puede apreciarse cómo las emisiones derivadas del recorrido en el que se utiliza un vehículo doblemente articulado representan cerca de 73% de las emisiones que se generan en un esquema de autotransporte rígido tradicional. De este modo, es posible indicar que existe una diferencia en términos de emisiones de GEI entre las tres configuraciones.

Asimismo, puede observarse la existencia de una diferencia marcada entre escenarios (con y sin carga compensada), donde para estimaciones como la del autotransporte tradicional (utilizando como referencia un vehículo rígido de 20 toneladas de peso bruto vehicular) las emisiones en un escenario con carga compensada representan 83% de las emisiones en un escenario de carga, donde el factor de viajes en vacío es de 25%.

No obstante, para el resto de las configuraciones vehiculares esta brecha es mucho menor. Esto indica que el factor de emisión y la generación de emisiones se comportan diferente para cada configuración modal, así que el encadenamiento de modos puede llegar a generar ahorros, incluso en escenarios donde existen viajes en vacío.

Gráfica 12 | Estimación emisiones GEI para el corredor Ciudad de México - Mexicali (CO₂eq)



Nota: Para el caso del transporte férreo, en ausencia de información de ocupación, se utilizaron factores genéricos de la literatura para aproximarse a la caracterización del viaje en dicho modo.

Fuente: Elaboración propia

Ciudad de México - Topolobampo - La Paz

Las estimaciones de GEI para el segundo corredor se presentan en la gráfica a continuación. Inicialmente, puede apreciarse una diferencia sustancial entre las tres estimaciones.

Si se toma el escenario más conservador, en el cual la carga no se encuentra compensada totalmente (líneas punteadas), las emisiones al utilizar transporte intermodal representan 46% de las emisiones, las cuales se generan si el trayecto se cubre utilizando autotransporte tradicional (tomando como referencia un vehículo rígido de 20 toneladas de peso bruto vehicular).

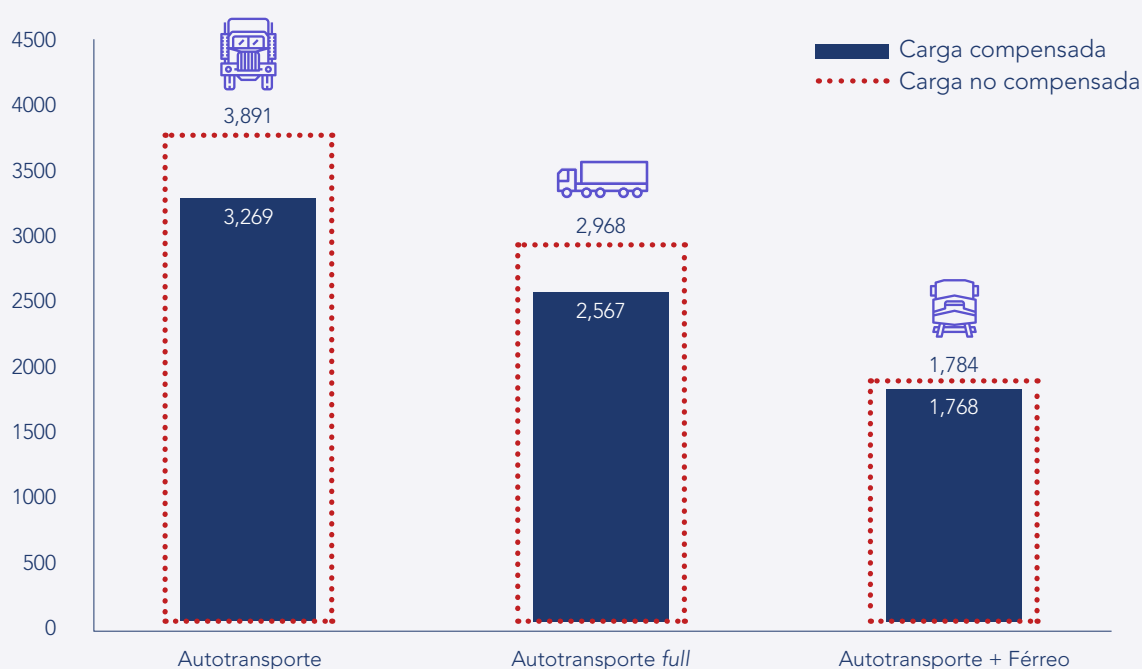
Por otro lado, al comparar el autotransporte, dentro de sus dos posibles configuraciones vehiculares, puede observarse cómo las emisiones derivadas del recorrido, haciendo uso

de un vehículo doblemente articulado, representan cerca de 76% de las emisiones que se generan en un esquema de autotransporte rígido tradicional. De este modo, es posible indicar que existe una diferencia en términos de emisiones de GEI entre las tres configuraciones.

Asimismo, puede apreciarse la existencia de una diferencia marcada entre escenarios (con y sin carga compensada), donde para estimaciones como la del autotransporte tradicional (utilizando como referencia un vehículo rígido de 20 toneladas de peso bruto vehicular) las emisiones en un escenario con carga compensada representan 84% de las emisiones en un escenario de carga donde el factor de viajes en vacío es de 25%.

No obstante, para el resto de las configuraciones vehiculares esta brecha es mucho menor. Para este corredor se evidencia la misma dinámica en la cual el factor de emisión y la generación de emisiones mismas se comportan diferente para cada configuración modal, así que el encadenamiento de modos puede llegar a generar ahorros, incluso en escenarios donde existen viajes en vacío.

Gráfica 13 | Estimación emisiones GEI para el corredor Ciudad de México - La Paz (CO₂eq)



Nota: Para el caso del transporte férreo, en ausencia de información de ocupación, se utilizaron factores genéricos de la literatura para aproximarse a la caracterización del viaje en dicho modo.

Fuente: Elaboración propia

En comparación con el corredor Ciudad de México - Mexicali, las diferencias entre escenarios pueden estar marcadas por la incorporación del transporte marítimo bajo el transporte intermodal, lo cual redundaría en menores emisiones comparadas con el otro escenario intermodal.

Asimismo, en términos de magnitudes, las diferencias entre ambos corredores pueden estar determinadas por diferencias en cuanto a las distancias recorridas antes que por el tipo de terreno, pues las topologías de ruta indican una alta similitud entre recorridos.

En cifras, las emisiones para el caso del autotransporte tradicional y el autotransporte con vehículo biarticulado del corredor Ciudad de México - La Paz representan cerca de 90% a 94% de las emisiones del corredor Ciudad de México - Mexicali, mientras que para el caso del transporte intermodal, las emisiones de este corredor representan cerca de 78% del otro.

Contaminantes criterio

Como se indicó en el segundo capítulo del documento, el alcance de las estimaciones para GEI comprenden al material particulado (PM), SO_2 , NO_x , CO y al carbono negro (BC). Para estos casos, no se maneja una medida estandarizada, sino que se evalúan a nivel de gramos de cada uno de los contaminantes. Asimismo, las emisiones incluidas comprenden a las emisiones directas, asociadas a la operación de vehículos de distinta índole para transporte de mercancías. A diferencia del caso de GEI, las emisiones indirectas no se incluyen en esta estimación.

Acorde con la metodología presentada en el capítulo 3 y con las particularidades para la delimitación del factor de emisión para cada modo de transporte, se utilizó la caracterización de vehículos, la topología de ruta y los parámetros logísticos asociados a cada corredor, para definir un factor de emisión que se ajustara de la mejor manera a cada corredor y a su dinámica de transporte de mercancías.

Asimismo, y en concordancia con las estimaciones de GEI, para contaminantes criterio se manejó la tercera configuración vehicular que hace alusión al autotransporte que utiliza un vehículo doblemente articulado (también conocido como *full*). De igual forma, el análisis de emisiones cubre ambos escenarios de viajes en vacío: un escenario con total compensación de carga en ambos sentidos del corredor, y otro donde hay un desbalance en la carga transportada por sentido y en el cual se maneja un parámetro de ajuste de 25% para reflejar dicha particularidad.

Para la presentación de resultados, se escogió al MP con diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros como referencia, dada su importancia dentro de los contaminantes criterio en términos de salud humana. Así, los gráficos y análisis de resultados presentados a lo largo de esta sección se remiten a este contaminante en particular.

Ciudad de México - Mexicali

Las estimaciones de los contaminantes criterio $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_x y CO y el contaminante BC se presentan desde la gráfica 14 a la 19, en las cuales pueden observarse diferencias sustanciales entre las tres estimaciones.

Si se toma el escenario más conservador, en el cual la carga no se encuentra compensada totalmente (líneas punteadas), las emisiones al utilizar transporte intermodal (autotransporte + férreo) representan cerca de 30% de las emisiones de $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO y BC que se generan si el trayecto se cubre utilizando autotransporte tradicional, tomando como referencia un vehículo rígido de 20 toneladas de peso bruto vehicular (tabla 17).

Asimismo, las emisiones de NO_x y SO_2 utilizando un transporte intermodal representan 21% y 11% de las emisiones con autotransporte. Con respecto a GEI, esta diferencia parece ser casi el doble, lo cual pone en evidencia los beneficios diferenciados, en términos de GEI y contaminantes criterio, del uso del transporte intermodal.

Por otro lado, al comparar el autotransporte dentro de sus dos posibles configuraciones vehiculares, puede observarse cómo las emisiones derivadas del recorrido en el que se utiliza un vehículo doblemente articulado (autotransporte *full*) representan aproximadamente 70% de las emisiones de los contaminantes criterio analizados (tabla 18) que se generan en un esquema de autotransporte rígido tradicional.

Tabla 18 Comparación entre los escenarios de emisiones calculadas para los contaminantes criterio en el corredor Ciudad de México - Mexicali

Comparación	Contaminante					
	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_x	BC
Autotranporte <i>full</i> vs Autotransporte	71%	71%	73%	72%	75%	72%
Autotransporte + férreo vs Autotransporte	30%	30%	11%	33%	28%	28%

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, puede apreciarse una diferencia considerable entre escenarios (con y sin carga compensada), donde para estimaciones como la del autotransporte tradicional (utilizando como referencia un vehículo rígido de 20 toneladas de peso bruto vehicular) las emisiones de $PM_{2.5}$, en un escenario con carga compensada, representan de 82% a 83% de las emisiones en un escenario de carga donde el factor de viajes en vacío es de 25%, el cual es el escenario con carga no compensada (tabla 19).

NOTA

No obstante, para el resto de las configuraciones vehiculares esta brecha es mucho menor, e inclusive nula para el caso del intermodal.

Esto indica que el factor de emisión y la misma generación de emisiones se comportan diferente para cada configuración modal, así que el encadenamiento de modos puede llegar a generar ahorros, incluso en escenarios donde existen viajes en vacío.

De igual manera, se evidencia que relativo a GEI, esta relación es bastante similar lo cual deja ver que el factor de viajes (viajes en vacío) tiene un efecto similar sobre las estimaciones de ambos gases contaminantes.

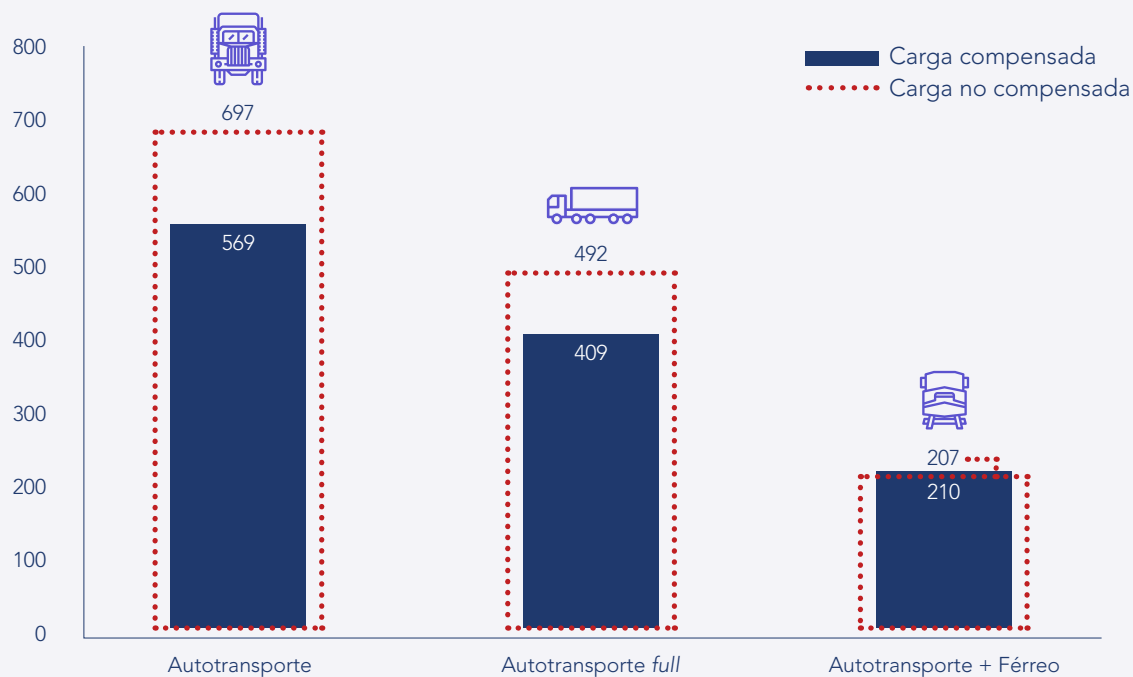
Tabla 19 Comparación entre las emisiones de los contaminantes criterio con carga compensada (factor de viajes en vacío de 0%) y carga no compensada (factor de viajes en vacío de 25%)

Contaminante	Configuración modal		
	Autotransporte	Autotransporte <i>full</i>	Autotransporte + Férreo
PM _{2.5}	82%	83%	99%
PM ₁₀	82%	83%	99%
SO ₂	83%	85%	97%
CO	83%	85%	99%
NO _x	82%	83%	99%
BC	82%	83%	98%

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 14

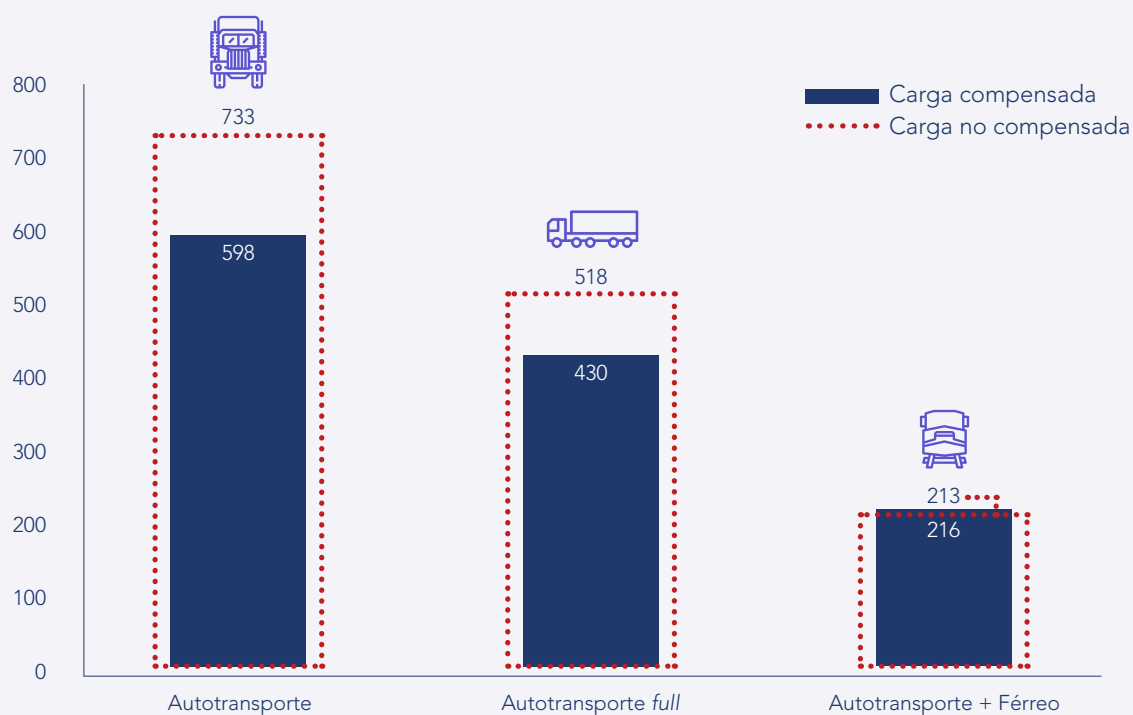
Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio ($PM_{2.5}$) para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 15

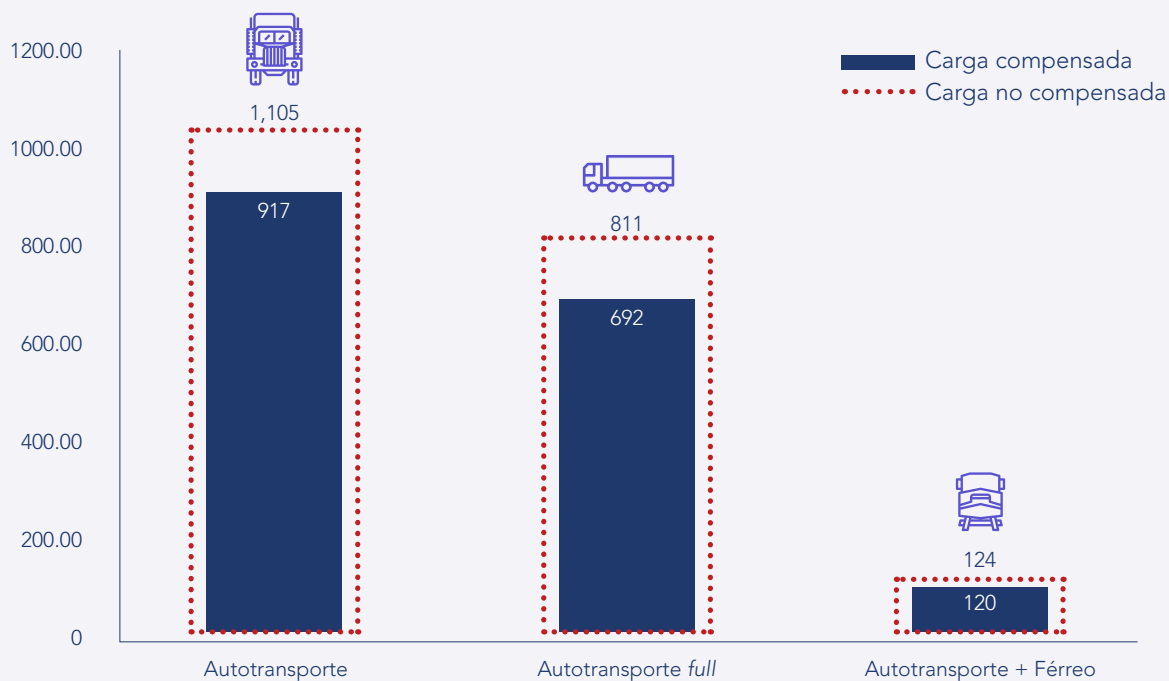
Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (PM_{10}) para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 16

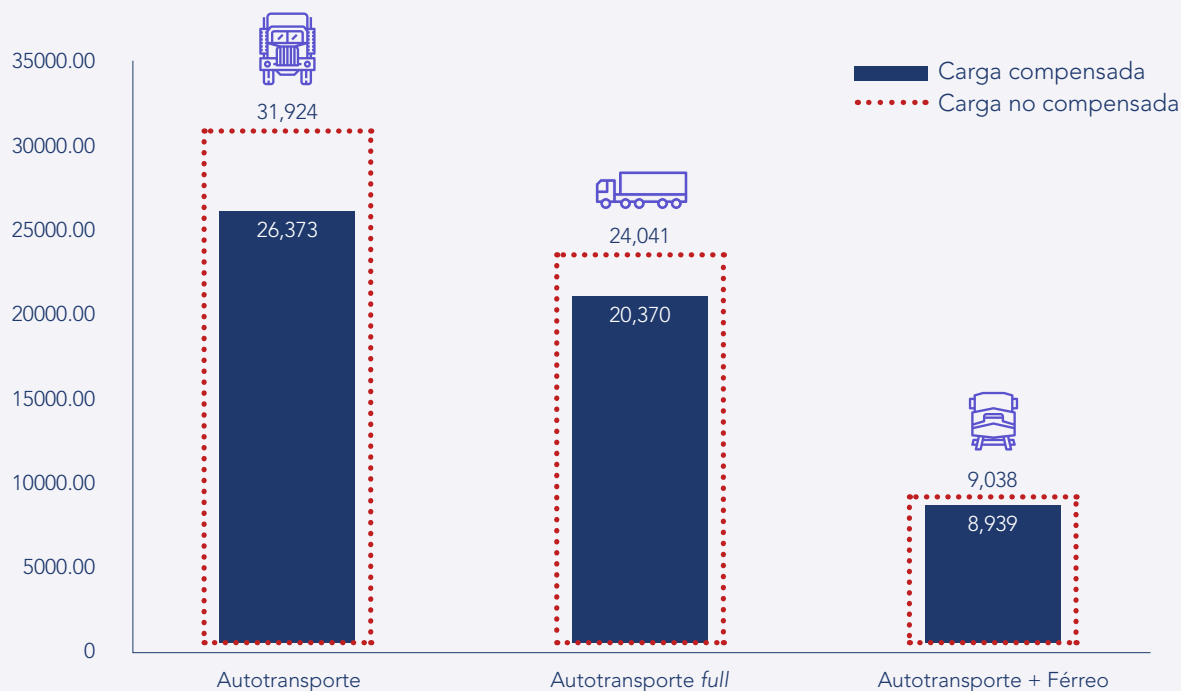
Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (SO_2) para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 17

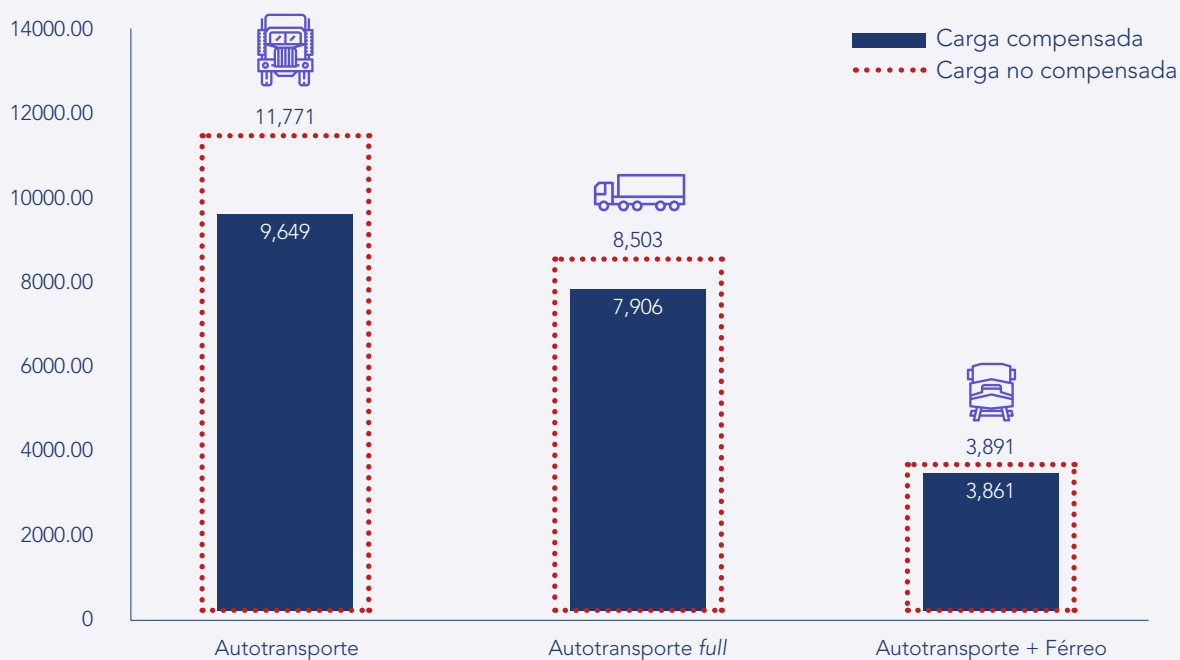
Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (NO_x) para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 18

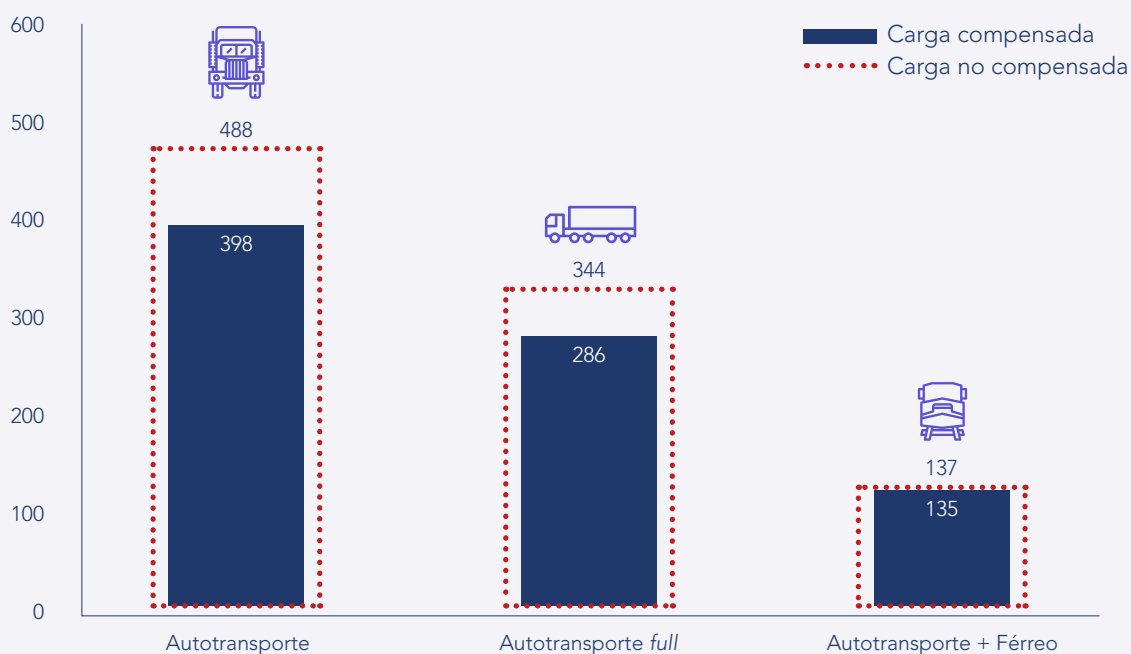
Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (CO) para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 19

Estimación de emisiones de Contaminantes BC para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

Ciudad de México - Topolobampo - La Paz

Las estimaciones de los contaminantes criterio $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_x y CO y el contaminante BC para el corredor Ciudad de México - La Paz se presentan desde la gráfica 20 hasta la 25. Si se toma el escenario más conservador, en el cual la carga no se encuentra compensada totalmente (líneas punteadas), las emisiones al utilizar transporte intermodal (Autotransporte + Férreo) representan cerca de 74% de las emisiones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} que se generan si el trayecto se cubre utilizando autotransporte tradicional, tomando como referencia un vehículo rígido de 20 toneladas de peso bruto vehicular (tabla 19), lo que equivale a mayores emisiones por parte del transporte intermodal que en el corredor Ciudad de México - Mexicali.

Asimismo, las emisiones de CO , NO_x , SO_2 y BC utilizando un transporte intermodal representan entre 22% a 32% de las emisiones con autotransporte. Con respecto a GEI, esta diferencia parece ser casi el doble, lo cual pone en evidencia los beneficios diferenciados, en términos de GEI y contaminantes criterio, del uso del transporte intermodal.

Por otro lado, al comparar el autotransporte dentro de sus dos posibles configuraciones vehiculares, se puede apreciar como las emisiones derivadas del recorrido en el que se utiliza un vehículo doblemente articulado (autotransporte *full*) representan cerca de entre 73% a 79% (Tabla 20) de las emisiones que se generan de contaminantes criterio, en un esquema de autotransporte rígido tradicional.

De este modo, es posible indicar que existe una diferencia considerable en términos de emisiones de contaminantes criterio, y en especial para material particulado, en las tres configuraciones.

Tabla 20 Comparación entre los escenarios de emisiones calculadas para los contaminantes criterio en el corredor Ciudad de México - Topolobampo - La Paz

Comparación	Contaminante					
	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_x	BC
Autotranporte <i>full</i> vs Autotransporte	74%	74%	78%	73%	79%	73%
Autotransporte + férreo vs Autotransporte	32%	31%	22%	29%	31%	25%

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, al comparar los escenarios con y sin carga compensada (tabla 21), se observa que, de las tres configuraciones, las emisiones de autotransporte tienen el menor porcentaje de comparación, mientras que la configuración intermodal tiene poca o nula diferencia entre los escenarios con y sin compensación.

De esta manera, esto indica que el factor de emisión y la generación de emisiones se comportan diferente para cada configuración modal, de tal modo que el encadenamiento de modos puede llegar a generar ahorros, incluso en escenarios donde existen viajes en vacío.

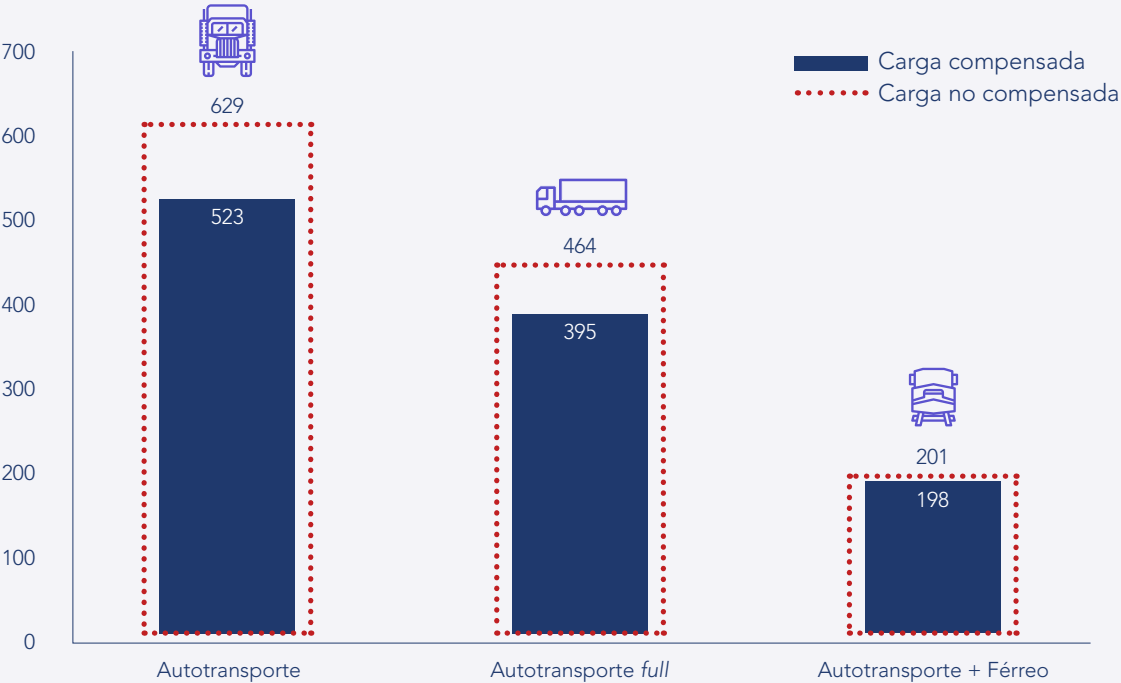
De igual manera, se evidencia que relativo a GEI, esta relación es bastante similar en términos de proporciones y magnitudes, lo cual deja ver que el factor de viajes (viajes en vacío) tiene un efecto similar sobre las estimaciones de ambas clases de contaminantes.

Tabla 21 Comparación entre las emisiones de los contaminantes criterio con carga compensada (factor de viajes en vacío de 0%) y carga no compensada (factor de viajes en vacío de 25%)

Contaminante	Configuración modal		
	Autotransporte	Autotransporte full	Autotransporte + Férreo
PM _{2.5}	83%	85%	98%
PM ₁₀	83%	85%	98%
SO ₂	85%	88%	98%
CO	84%	87%	99%
NO _x	82%	84%	99%
BC	82%	83%	98%

Fuente: Elaboración propia

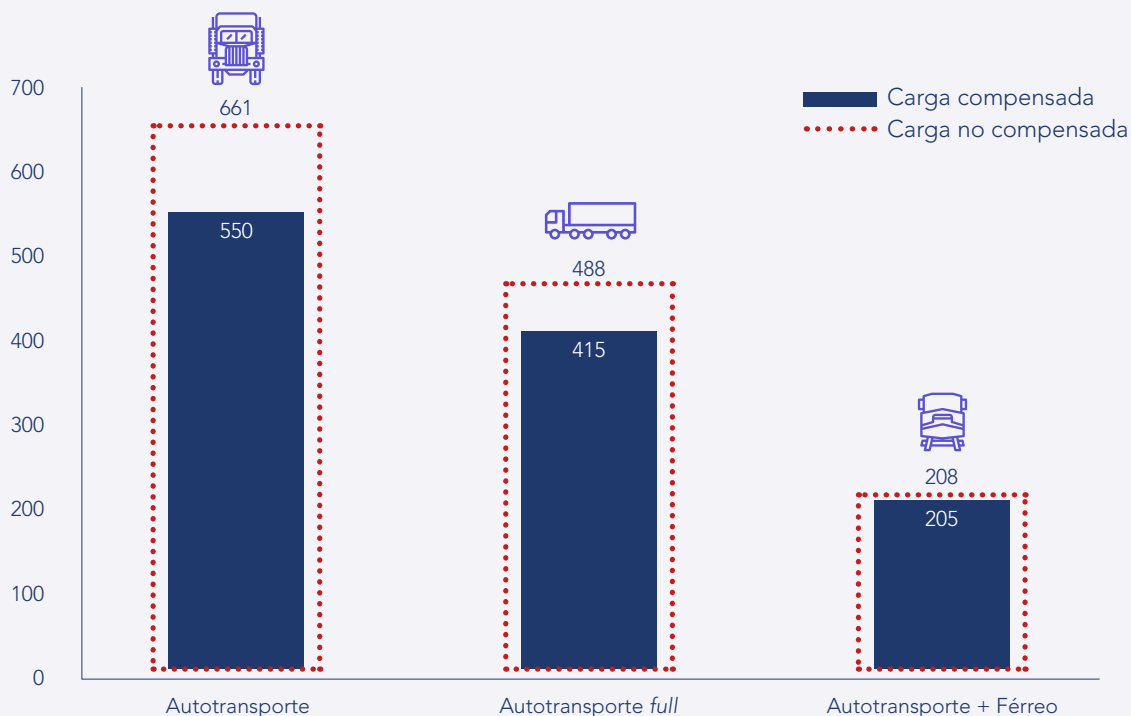
Gráfica 20 Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (PM_{2.5}) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 21

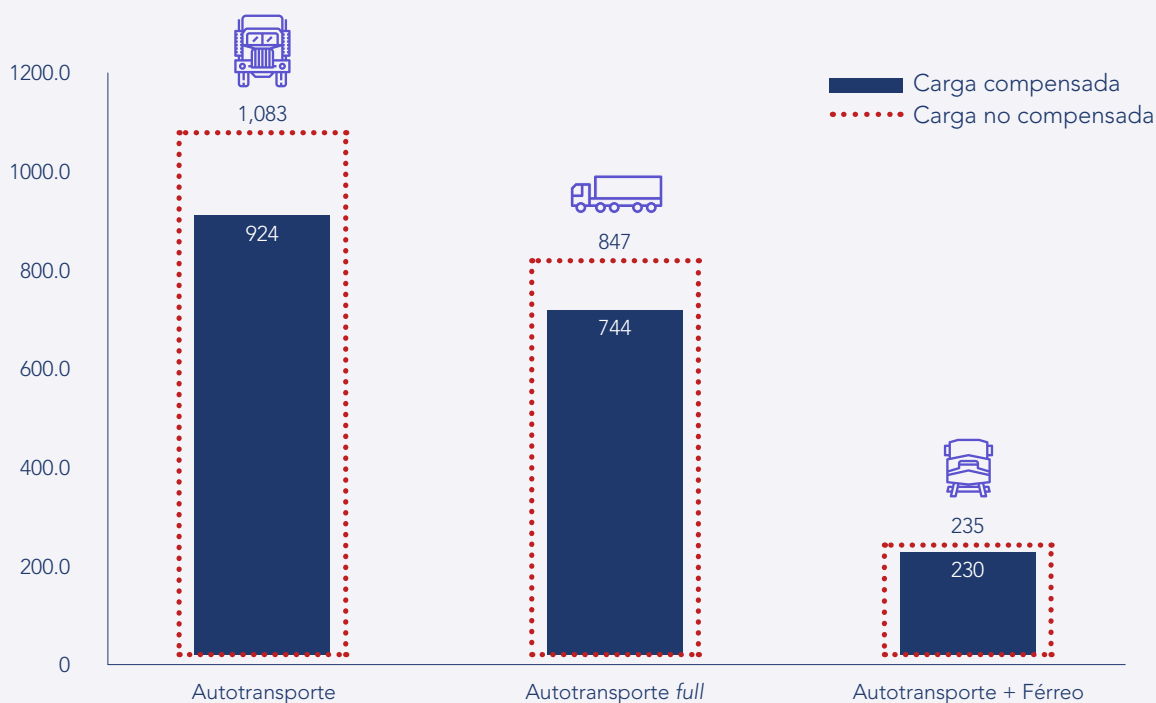
Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (PM_{10}) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 22

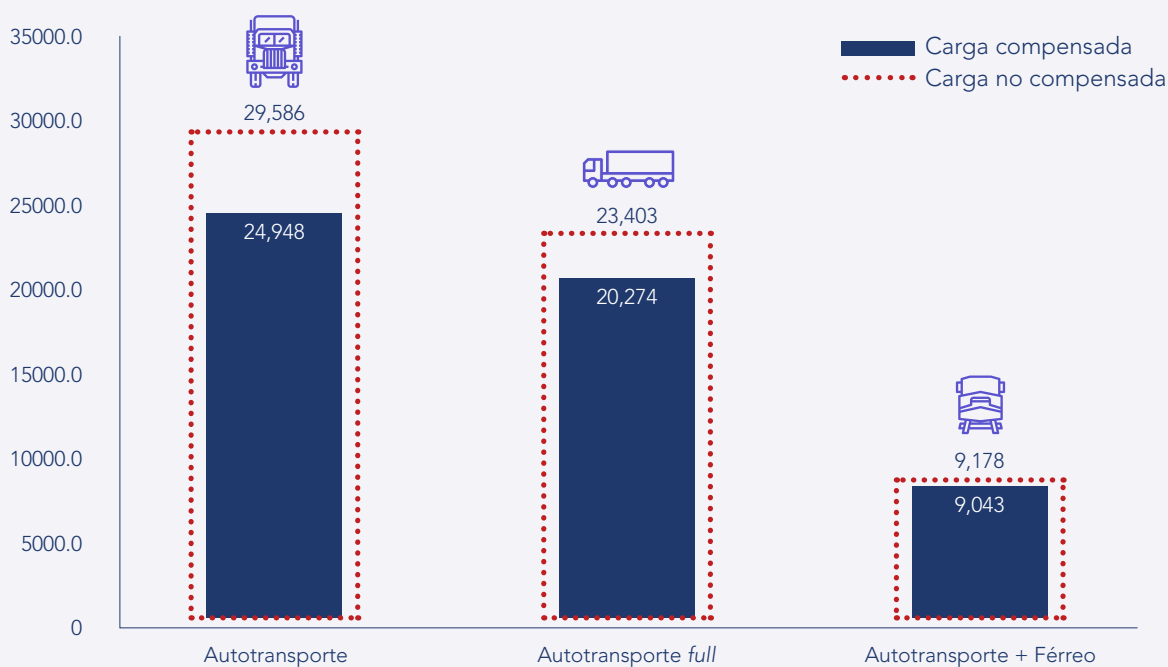
Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (SO_2) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 23

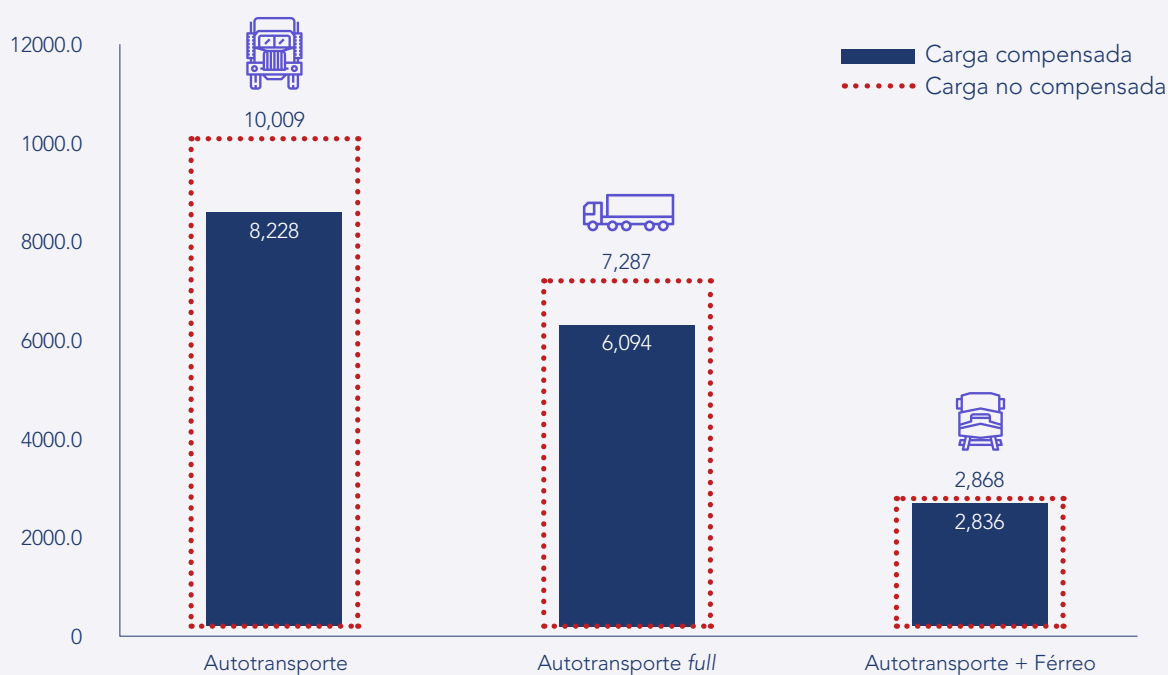
Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (NO_x) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 24

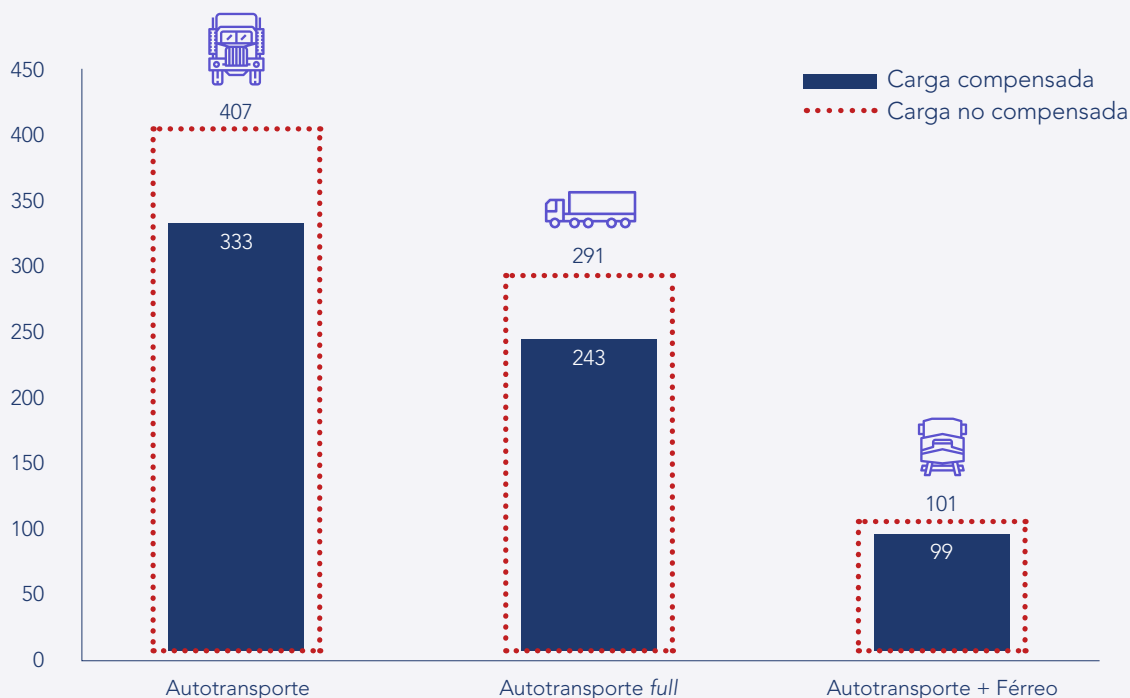
Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (CO) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 25

Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (BC) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)



Fuente: Elaboración propia

En comparación con el corredor Ciudad de México - Mexicali y de manera similar al caso de GEI, las diferencias entre escenarios pueden estar marcadas por la incorporación del transporte marítimo en el transporte intermodal, lo cual redunda en menores emisiones comparadas con el otro escenario intermodal.

Asimismo, en términos de magnitudes, las diferencias entre ambos corredores pueden estar determinadas en cuanto a las distancias recorridas antes que por el tipo de terreno, pues las topologías de ruta indican una alta similitud entre recorridos.

En cifras, las emisiones de material particulado en el caso del autotransporte tradicional y el autotransporte con vehículo biarticulado del corredor Ciudad de México - La Paz representan cerca de 90% a 94% de las emisiones del corredor Ciudad de México - Mexicali, mientras que para el caso del transporte intermodal las emisiones de este corredor representan cerca de 135% del otro.

Esta particularidad está explicada por la incorporación de un tercer vehículo a la estructura intermodal, en este caso el ferri, el cual maneja una participación cercana a 28% de la totalidad del material particulado.



RESUMEN DE INDICADORES

Esta sección presenta el resumen de indicadores a nivel de caracterización de corredores y de la comparación de estimación de emisiones y contaminantes criterio (página 116).

Caracterización general de corredores

A continuación, se presenta un resumen de las características de distancia, tiempo, pendiente y tipo de tramo para cada una de las etapas de viaje de los corredores Ciudad de México a la Paz y Ciudad de México a Mexicali.

Ciudad de México - La Paz (Baja California Sur)

Tabla 22 Configuración autotransporte

Etapas	Modo	Origen	Destino	Distancia (km)	Tiempo viaje (h)	Pendiente promedio	Tipo de tramo
E1		Fábrica, CDMX	Estación Pantaco, CDMX	15.6	0.25	0%	Urbano
E2		Estación Pantaco	Topolobampo	1,420	16.5	-0.02%*	Interurbano
E3		Topolobampo	La Paz (Puerto)	204.0	8	NA	Marítimo
E4		La Paz (Puerto)	Centro de Distribución	10.0	0.5	0%	Interurbano
Corredor CDMX - La Paz				1,649.6	25.25	-	-

NOTA

*Pendiente estimada como un cálculo ponderado entre las diferentes pendientes existentes y su participación porcentual dentro de la totalidad del recorrido. Para ver en detalle la composición de la pendiente remitirse a la página 97.

Tabla 23 Configuración intermodal

Etapa	Modo	Origen	Destino	Distancia (km)	Tiempo viaje (h)	Pendiente promedio	Tipo de tramo
E1		Fábrica, CDMX	Estación Pantaco, CDMX	15.6	0.25	0%	Urbano
E2		Estación Pantaco	Puerto de Topolobampo	1,716	120	%*	Interurbano
E3		Topolobampo	Puerto de Pichilingue, La Paz	204.0	8	NA	Marítimo
E4		Puerto de Pichilingue, La Paz	Centro de Distribución	10.0	0.5	0%	Interurbano
Corredor CDMX - La Paz				1,945.6	128.75	-	-

NOTA *Se asume una pendiente de 0% para los tramos recorridos en el modo ferroviario.

Ciudad de México - Mexicali

Tabla 24 Configuración autotransporte

Etapa	Modo	Origen	Destino	Distancia (km)	Tiempo viaje (h)	Pendiente promedio	Tipo de tramo
E1		Fábrica, CDMX	Salida CDMX	5	0.25	0%	Interurbano
E2		Salida CDMX	Mexicali	2,580	42	-1.4%	Interurbano
E3		Mexicali	Centro de Distribución	10	1	0%	Interurbano
Corredor CDMX - Mexicali				2,595	43.25	-	-

NOTA

Pendiente estimada como un cálculo ponderado entre las diferentes pendientes existentes y su participación porcentual dentro de la totalidad del recorrido. Para ver en detalle la composición de la pendiente remitirse a la página 97.

Tabla 25 Configuración intermodal

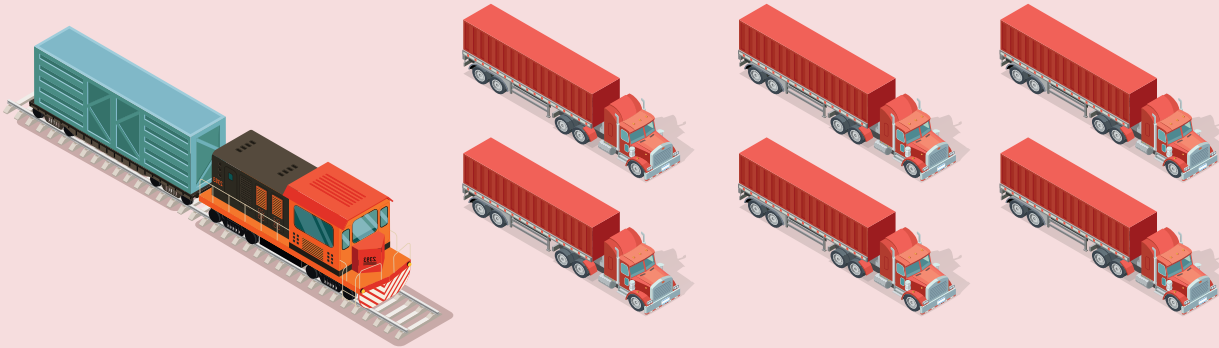
Etapa	Modo	Origen	Destino	Distancia (km)	Tiempo viaje (h)	Pendiente promedio	Tipo de tramo
E1		Fábrica	Pantaco	15.6	0.25	0%	Interurbano
E2		Pantaco	Mexicali	2,796.4	120	NA	Férreo interurbano
E3		Mexicali	CEDI	10	1	0%	Interurbano
Corredor CDMX - Mexicali				2.822	121.25	-	-

NOTA

Se asume una pendiente del 0% para los tramos recorridos en el modo ferroviario.

Comparación de indicadores entre los corredores de análisis

Figura 12 Indicadores asociados al flujo en carretera y su aporte a la congestión



El uso del **modo férreo** para el transporte de carga podría sustituir cerca de **145 camiones unitarios***, generando mejoras en la congestión vehicular

* Vehículos estándares de hasta 20 toneladas.

Tabla 26 | Indicadores asociados al aparte en emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes criterio

Corredor Ciudad de México - La Paz (Baja California Sur)	
El transporte multimodal (autotransporte y férreo) respecto al transporte tradicional (camión de 20 toneladas) representa:	46% de las emisiones de CO₂ equivalente 32% de las emisiones de PM_{2.5} y PM₁₀ 29% de las emisiones CO 31% de las emisiones de NO_x 22% de las emisiones de SO₂ 25% de las emisiones de BC
El uso de camiones biarticulados respecto al uso de auto transporte tradicional (camión de 20 toneladas) representa:	76% de las emisiones de CO₂ equivalente 74% de las emisiones de PM_{2.5} y PM₁₀ 73% de las emisiones CO 79% de las emisiones de NO_x 78% de las emisiones de SO₂ 73% de las emisiones de BC
Corredor Ciudad de México – Mexicali	
El transporte multimodal (autotransporte y férreo) respecto al transporte tradicional (camión de 20 toneladas) representa:	52% de las emisiones de CO₂ equivalente 30% de las emisiones de PM_{2.5} y PM₁₀ 33% de las emisiones CO 28% de las emisiones de NO_x 11% de las emisiones de SO₂ 28% de las emisiones de BC
El uso de camiones biarticulados respecto al uso de auto transporte tradicional (camión de 20 toneladas) representa:	73% de las emisiones de CO₂ equivalente 71% de las emisiones de PM_{2.5} y PM₁₀ 72% de las emisiones CO 75% de las emisiones de NO_x 73% de las emisiones de SO₂ 72% de las emisiones de BC

.Bibliografía

- [1] Presidencia de la República de México. *Reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal*. México, 2006.
- [2] Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México. Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017. *Diario Oficial de la Federación*. México, 2017.
- [3] D. Blanchfield. *Environmental Encyclopedia*. Gale Research Inc, 2012.
- [4] R. Meyers. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Elsevier Science, 2001.
- [5] EcoTransIT World. *Environmental Methodology and Data Update 2020*. 2020.
- [6] IPCC. *Glosario oficial*. IPCC Working Group, 2018.
- [7] Instituto Mexicano del Transporte. *Impacto económico de los movimientos en vacío en el autotransporte de carga*. IMT, Notas no. 34, Artículo 1. México, 1997.
- [8] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. *Datos abiertos México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero* (INEGyCEI). 1 Octubre 2021. Disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei>. [Último acceso: 12 Agosto 2022].
- [9] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. *Documentos del Inventario Nacional de Emisiones - Inventarios Nacionales de Emisiones de Contaminantes Criterio*. 2016. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>.
- [10] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Inventario de emisiones 2016 - Fuentes móviles por tipo a nivel municipal*. SEMARNAT - Gobierno de México. México, 2016.
- [11] Unión Europea, *Eurostat Statistics Explained*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Main_Page
- [12] European Association for Forwarding, Transport, Logistics and Customs Services. *Guía de "cálculo de las emisiones de GEI para los servicios de transporte de carga y logística"*. Cataluña, 2012.
- [13] Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos. *Descripción general de los gases de efecto invernadero*. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- [14] Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos. *Importancia del metano*. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-metano>
- [15] Unión Europea. *Options to Reduce Nitrous Oxide Emissions (Final Report)*. 1998.
- [16] Comisión Europea para la estandarización. *EN 16258 - Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers)*. Comisión Europea, 2012.
- [17] Convención de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. *CDM Methodology Booklet*. Mecanismo de Desarrollo Limpio. Alemania, 2021.
- [18] Local Governments for Sustainability. *EcoLogistics Low Carbon Action Plan for Urban Freight (LCAP-UF)*. ICLEI Sustainable Mobility. Alemania, 2021.

- [19] Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos. *Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés)*, 2022. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>
- [20] Instituto para la salud geoambiental. *El dióxido de azufre SO₂*. Disponible en: <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-azufre-so2/#:~:text=¿Qué es el dióxido de, doble que la del aire.>
- [21] Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos. *Nitrogen Oxides (NO_x) Control Regulations*. Disponible en: <https://www3.epa.gov/region1/airquality/nox.html>
- [22] Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos. *What is carbon monoxide?*, 2022. Disponible en: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-carbon-monoxide#:~:text=Definition,Burns with a violet flame.>
- [23] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. *Primer Inventario indicativo nacional de emisiones de contaminantes criterio y carbono negro 2010-2014*. Bogotá, 2020.
- [24] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NORMA Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017. *Diario Oficial de la Federación*. Secretaría de Gobernación. México, 2017.
- [25] European Environment Agency. *Air pollutant emission inventory guidebook*. Railway. 2019.
- [26] Organización Marítima Ambiental. *Third IMO GHG Study 2014*. 2015.
- [27] European Environment Agency. *Air pollutant emission inventory guidebook 2019 - Update Oct. 2021*. Road Transport. 2021.
- [28] European Environment Agency. *Air pollutant emission inventory guidebook 2019*. Navigation. 2019.
- [29] Banco Mundial. *Cuentas nacionales del Banco Mundial y archivos de datos sobre cuentas nacionales de la OCDE*. Banco Mundial, 2020. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD?locations=ZJ>. [Último acceso: 19 junio 2022]
- [30] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *PIB por actividad económica*. INEGI. México, 2021.
- [31] J. P. Rodríguez y T. Notteboom. *The Geography of Transport Systems*, Nueva York. Hofstra University. Nueva York, 2020.
- [32] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Anuario Estadístico del Sector Comunicaciones y Transporte 2020*. Dirección General de Comunicación Social. México, 2020.
- [33] Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México. *Estadística Básica del Autotransporte Federal*. SCT. México, 2020.
- [34] Agencia Reguladora del Transporte Férreo. *Mapa interactivo del sistema ferroviario Mexicano*. México, 2022. Disponible en: <https://geoweb.centrogeo.org.mx/panoramas/sfm>
- [35] Autoridad Reguladora de Transporte Férreo. *Sistema Nacional de Indicadores Ferroviarios 2021*. ARTF. México, 2021.
- [36] Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario. *Anuario Estadístico Férreo*. ARTF. México, 2020.
- [37] Baja Ferries. *Baja Ferries - Rutas, Tarifas y Horarios*. Baja Ferries, 2022. Disponible en: <https://www.bajafferries.com.mx/rutas-tarifas-y-horarios>
- [38] Maritime IHS. *Ficha técnica Mexico Star*. 2022.
- [39] Instituto Mexicano de Transporte - Secretaría de Comunicaciones y Transportes. *Matrices origen-destino (O-D) multiproducto para el autotransporte nacional de carga*. Publicaciones Técnicas No. 409, México, 2014.
- [40] Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos. *Emission Factors for Locomotives*. 2009.

Índice de ecuaciones

- 30 Ecuación 1. Fórmula del equivalente de dióxido de carbono
- 36 Ecuación 2. Estimación de emisiones GEI - fórmula base
- 38 Ecuación 3. Factor de emisión
- 39 Ecuación 4. Factor de emisión base
- 43 Ecuación 5. Consumo de combustible específico teórico para autotransporte
- 55 Ecuación 6. Consumo de combustible específico teórico para transporte marítimo
- 67 Ecuación 7. Estimación de emisiones contaminantes criterio - fórmula base
- 70 Ecuación 8. Estimación de factores de emisión de autotransporte para contaminantes criterio (exceptuando al SO_2)
- 74 Ecuación 9. Estimación de factores de emisión SO_2 para autotransporte
- 77 Ecuación 10. Estimación de factores de emisión para contaminantes criterio NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y CO para transporte férreo
- 78 Ecuación 11. Estimación de factores de emisión SO_2 para transporte férreo
- 81 Ecuación 12. Estimación de factores de emisión para contaminantes criterio para el modo marítimo
- 84 Ecuación 13. Estimación de factores de emisión para *Black Carbon*

Índice de figuras

- 32 Figura 1. Alcance del tipo de emisiones para GEI cubierto por la metodología
- 34 Figura 2. Aproximaciones existentes para el cálculo de emisiones de transporte de carga
- 42 Figura 3. Componentes de clasificación del factor de emisión base para autotransporte
- 47 Figura 4. Componentes de clasificación de los factores de emisión de GEI para el modo férreo
- 53 Figura 5. Componentes de clasificación de los factores de emisión para el modo marítimo
- 64 Figura 6. Alcance del tipo de emisiones para contaminantes criterio cubierto por la metodología
- 76 Figura 7. Componentes de clasificación de los factores de emisión de contaminantes criterio para el modo férreo
- 80 Figura 8. Componentes de clasificación de los factores de emisión de contaminantes criterio para el modo marítimo
- 107 Figura 9. Ficha técnica resumen para las locomotoras operantes en los corredores
- 109 Figura 10. Ficha descriptiva embarcación paso Topolobampo - La Paz
- 114 Figura 11. Metodología de aproximación al cálculo de viajes en vacío
- 133 Figura 12. Indicadores asociados al flujo en carretera y su aporte a la congestión

Índice de gráficas

- 44 Gráfica 1. Factor de emisión CO₂eq autotransporte para camiones articulados con carga general
- 51 Gráfica 2. Factores de emisión base (gCO₂eq/t-km) por tipo de tren, según tamaño y tipo de carga transportada
- 58 Gráfica 3. Comparación entre factores de emisión (gCO₂eq/t-km) de diferentes tipologías de barco
- 72 Gráfica 4. Factor de emisión estimado para PM_{2.5} para autotransporte articulado - tipo de carga general
- 72 Gráfica 5. Factor de emisión estimado para PM₁₀ para autotransporte articulado - tipo de carga general
- 73 Gráfica 6. Factor de emisión estimado para CO para autotransporte articulado - tipo de carga general
- 73 Gráfica 7. Factor de emisión estimado para NO_x para autotransporte articulado - tipo de carga general
- 75 Gráfica 8. Factor de emisión de SO₂ para autotransporte para carga general
- 99 Gráfica 9. Perfil de elevaciones corredores CDMX – Topolobampo y CDMX - Mexicali
- 100 Gráfica 10. Distribución porcentual de tipo de pendiente por corredor
- 104 Gráfica 11. Distribución porcentual de Unidades Motrices (izquierda) y de Unidades de Arrastre en México derecha)
- Gráfica 12. Estimación emisiones GEI para el corredor Ciudad de México - Mexicali (CO₂eq)
- 119 Gráfica 13. Estimación emisiones GEI para el corredor Ciudad de México - La Paz (CO₂eq)
- 123 Gráfica 14. Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (PM_{2.5}) para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)
- 123 Gráfica 15. Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (PM₁₀) para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)
- 124 Gráfica 16. Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (SO₂) para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)
- 124 Gráfica 17. Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (NO_x) para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)
- 125 Gráfica 18. Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (CO) para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)
- 125 Gráfica 19. Estimación de emisiones de Contaminantes BC para el corredor Ciudad de México - Mexicali (gramos de contaminante)
- 127 Gráfica 20. Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (PM_{2.5}) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)

- 128 Gráfica 21. Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (PM_{10}) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)
- 128 Gráfica 22. Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (SO_2) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)
- 129 Gráfica 23. Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (NO_x) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)
- 129 Gráfica 24. Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (CO) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)
- 130 Gráfica 25. Estimación de emisiones de Contaminantes Criterio (BC) para el corredor Ciudad de México - La Paz (gramos de contaminante)
- 138 Gráfica 26. Factores de emisión ($kg\ CO_2eq/t\text{-}km$) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía (volumen, general y granel)
- 139 Gráfica 27. Factores de emisión ($kgCO_2eq/t\text{-}km$) de camiones rígidos para diferente tipo de mercancía (volumen, general y granel)
- 141 Gráfica 28. Factores de emisión de $PM_{2.5}$ ($g/t\text{-}km$) de camiones rígidos con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)
- 142 Gráfica 29. Factores de emisión de $PM_{2.5}$ ($g/t\text{-}km$) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)
- 143 Gráfica 30. Factores de emisión de PM_{10} ($g/t\text{-}km$) de camiones rígidos con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)
- 144 Gráfica 31. Factores de emisión de PM_{10} ($g/t\text{-}km$) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)
- 145 Gráfica 32. Factores de emisión de NO_x ($g/t\text{-}km$) de camiones rígidos con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)
- 146 Gráfica 33. Factores de emisión de NO_x ($g/t\text{-}km$) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)
- 147 Gráfica 34. Factores de emisión de CO ($g/t\text{-}km$) de camiones rígidos con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)
- 148 Gráfica 35. Factores de emisión de CO ($g/t\text{-}km$) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)
- 149 Gráfica 36. Factores de emisión de SO_2 ($g/t\text{-}km$) de camiones rígidos con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)
- 150 Gráfica 37. Factores de emisión de SO_2 ($g/t\text{-}km$) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)
- 155 Gráfica 38. Análisis de factores de emisión para diferentes clases de barcos y combustibles
- 159 Gráfica 39. Distribución porcentual por tipo de pendiente de las vías principales de México para segmentos libres y con cuota

Índice de mapas

- 91 Mapa 1. Representación gráfica Ciudad de México - Topolobampo - La Paz
- 94 Mapa 2. Representación gráfica corredor Ciudad de México - Mexicali
- 98 Mapa 3. Pendiente por tramo vial - principales vías de México
- 102 Mapa 4. Red de carreteras México: Red completa (izquierda) y corredores carreteros troncales (derecha)
- 105 Mapa 5. Red férrea de México
- 108 Mapa 6. Pasos de transbordo marítimo en México
- 115 Mapa 7. Puntos de análisis matriz O - D para estimación de factor de viajes en vacío

Índice de tablas

- 37 Tabla 1. Categorías de productos
- 40 Tabla 2. Factores de emisión de combustible
- 48 Tabla 3. Consumos de combustible específicos teóricos para transporte férreo
- 49 Tabla 4. Factores de emisión para modo férreo para trenes generales
- 50 Tabla 5. Factores de emisión para modo férreo para trenes dedicados
- 56 Tabla 6. Factores de emisión del modo marítimo y factor de utilización de carga
- 59 Tabla 7. Factor de corrección para zonas urbanas
- 61 Tabla 8. Factor de corrección por carga refrigerada
- 69 Tabla 9. Contenido de azufre de diferentes combustibles en México
- 78 Tabla 10. Factores de emisión de contaminantes criterio NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y CO para combustible diésel
- 79 Tabla 11. Factor de emisión para SO_2 para transporte férreo por tipo de vehículo y carga
- 81 Tabla 12. Factores de emisión de contaminantes criterio por tipo de combustible utilizado para el cálculo del factor de emisión final
- 82 Tabla 13. Factores de emisión de $\text{PM}_{2.5}$ para el modo marítimo
- 85 Tabla 14. Fracción BC en el material articulado
- 111 Tabla 15. Diagnóstico de ocupación para autotransporte para el corredor Ciudad de México - Mexicali
- 112 Tabla 16. Diagnóstico de ocupación para autotransporte para el corredor Ciudad de México - La Paz
- 113 Tabla 17. Factores de ocupación para el transporte marítimo - Corredor CDMX - La Paz

- 121 Tabla 18. Comparación entre los escenarios de emisiones calculadas para los contaminantes criterio en el corredor Ciudad de México - Mexicali
- 122 Tabla 19. Comparación entre las emisiones de los contaminantes criterio con carga compensada (factor de viajes en vacío de 0%) y carga no compensada (factor de viajes en vacío del 25%)
- 126 Tabla 20. Comparación entre los escenarios de emisiones calculadas para los contaminantes criterio en el corredor Ciudad de México - Topolobampo - La Paz
- 127 Tabla 21. Comparación entre las emisiones de los contaminantes criterio con carga compensada (factor de viajes en vacío de 0%) y carga no compensada (factor de viajes en vacío del 25%)
- 131 Tabla 22. Configuración autotransporte
- 132 Tabla 23. Configuración intermodal
- 132 Tabla 24. Configuración autotransporte
- 133 Tabla 25. Configuración intermodal
- 134 Tabla 26. Indicadores asociados al aparte en emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes criterio
- 151 Tabla 27. Factor de emisión para CO para transporte marítimo por tipo de embarcación
- 152 Tabla 28. Factor de emisión para SO_x para transporte marítimo por tipo de embarcación
- 153 Tabla 29. Factor de emisión para NO_x para transporte marítimo por tipo de embarcación
- 154 Tabla 30. Factores de emisión del PM_{2.5} para diferentes clases de trenes

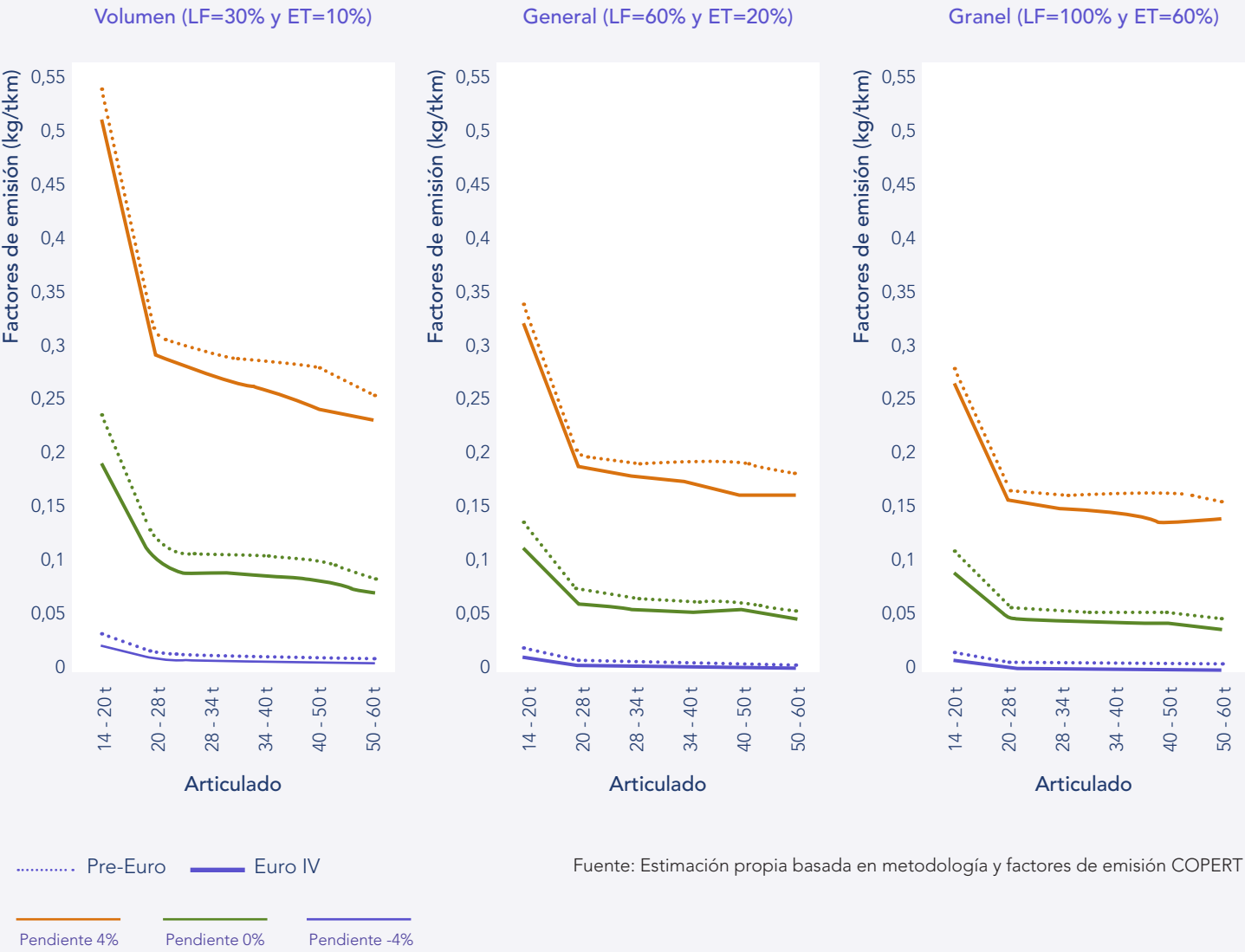
Anexos

ANEXO 1.

**GRÁFICOS COMPLEMENTARIOS
METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN GEI**



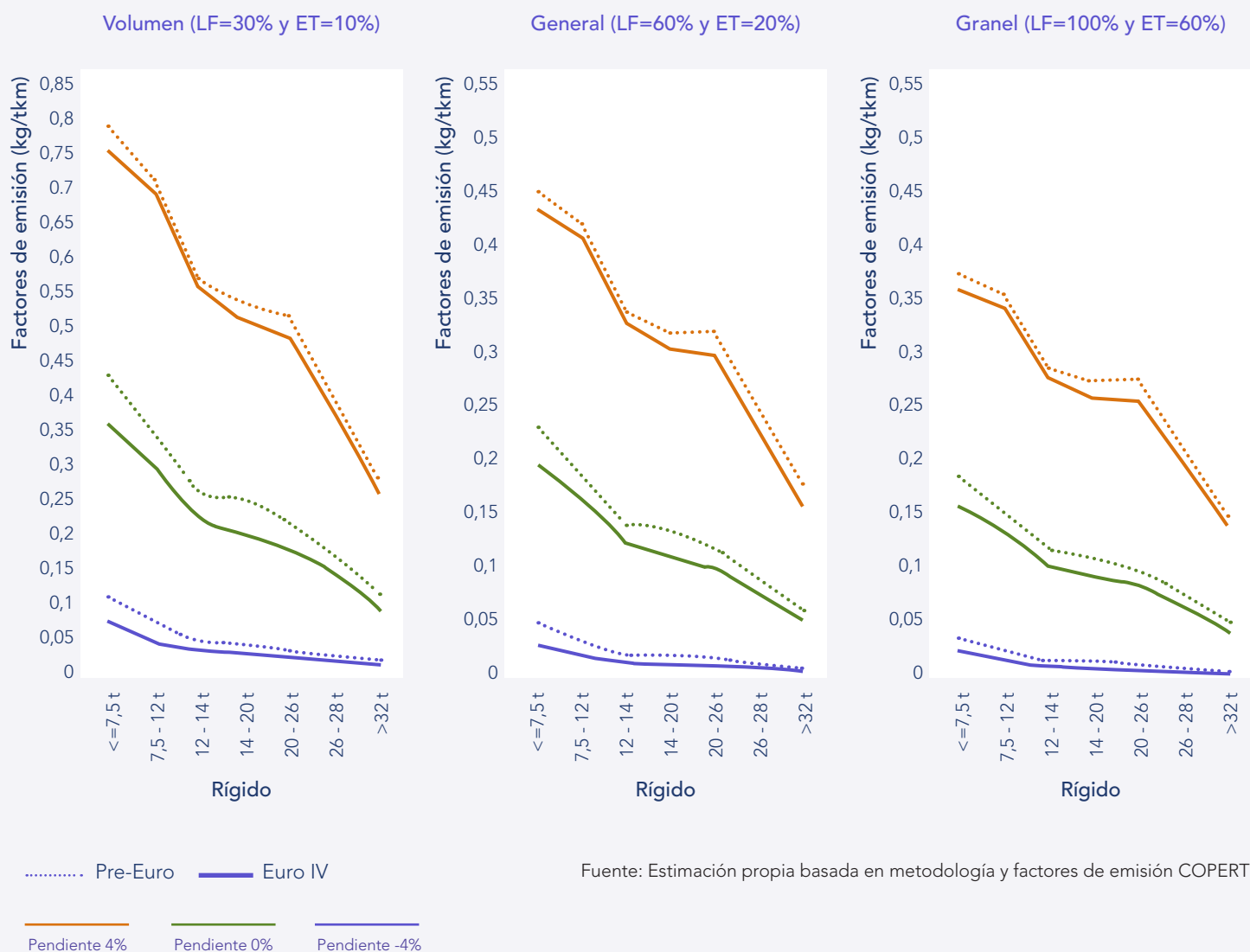
Gráfica 26 Factores de emisión (kg CO₂eq/t-km) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía (volumen, general y granel)



Fuente: Estimación propia basada en metodología y factores de emisión COPERT

Gráfica 27

Factores de emisión (kgCO₂eq/t-km) de camiones rígidos para diferente tipo de mercancía (volumen, general y granel)



Fuente: Estimación propia basada en metodología y factores de emisión COPERT

The background of the entire page is a photograph of several white trucks driving on a multi-lane road towards the viewer. The road has yellow diagonal markings in the foreground. The scene is bathed in a warm, golden light, suggesting either sunrise or sunset. Overlaid on this image are several digital and technical graphics. In the upper left, there are large, semi-transparent blue and red circular shapes. A hand is visible on the left side, holding a transparent circular interface with blue gears and lines. On the right side, there are white lines connecting blue dots, resembling a network or data flow diagram. The text is positioned in the upper right quadrant, within the red circular area.

ANEXO 2.

**GRÁFICOS COMPLEMENTARIOS
METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN
CONTAMINANTES CRITERIO**

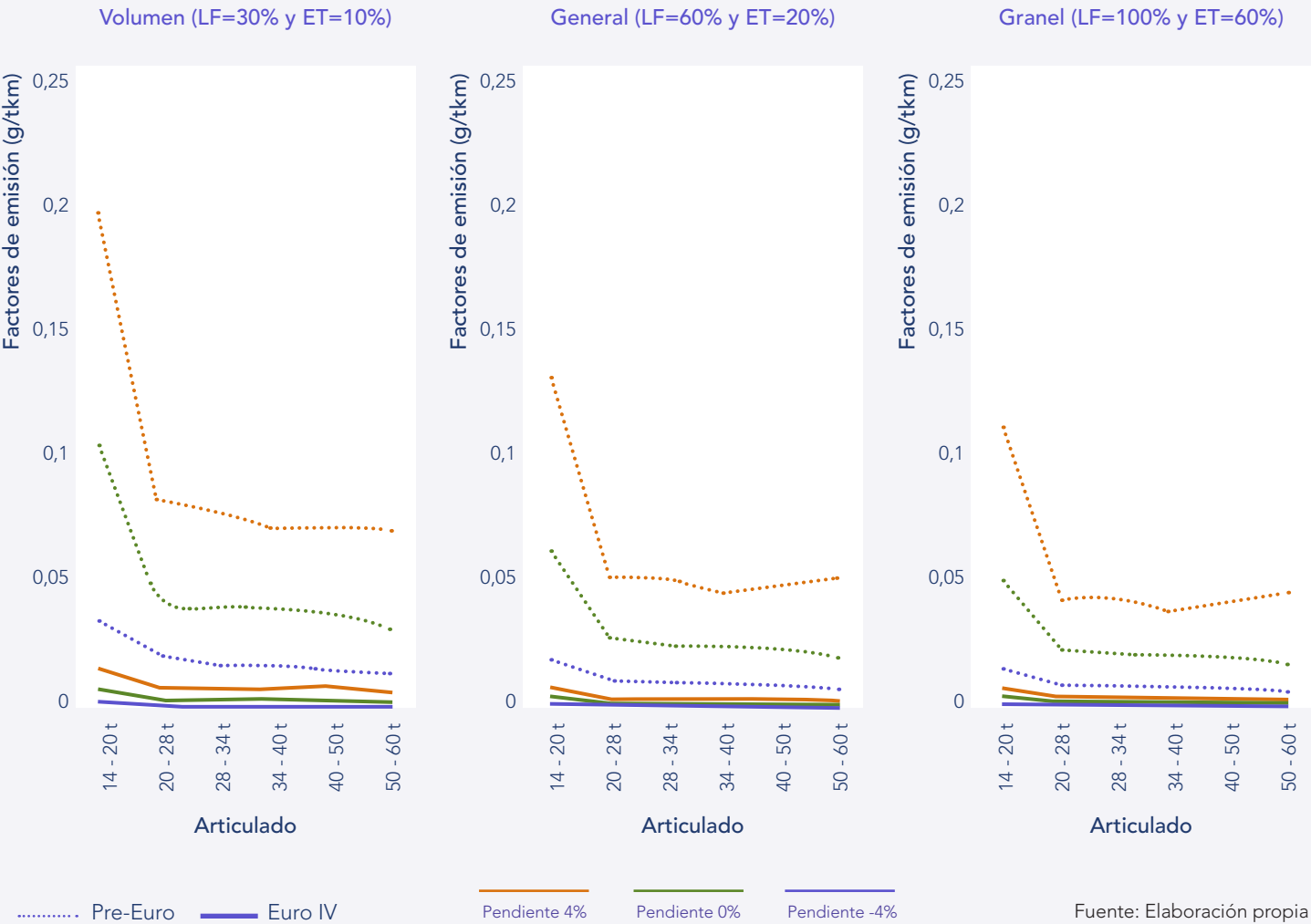
Gráfica 28

Factores de emisión de $PM_{2.5}$ (g/t-km) de camiones rígidos con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)



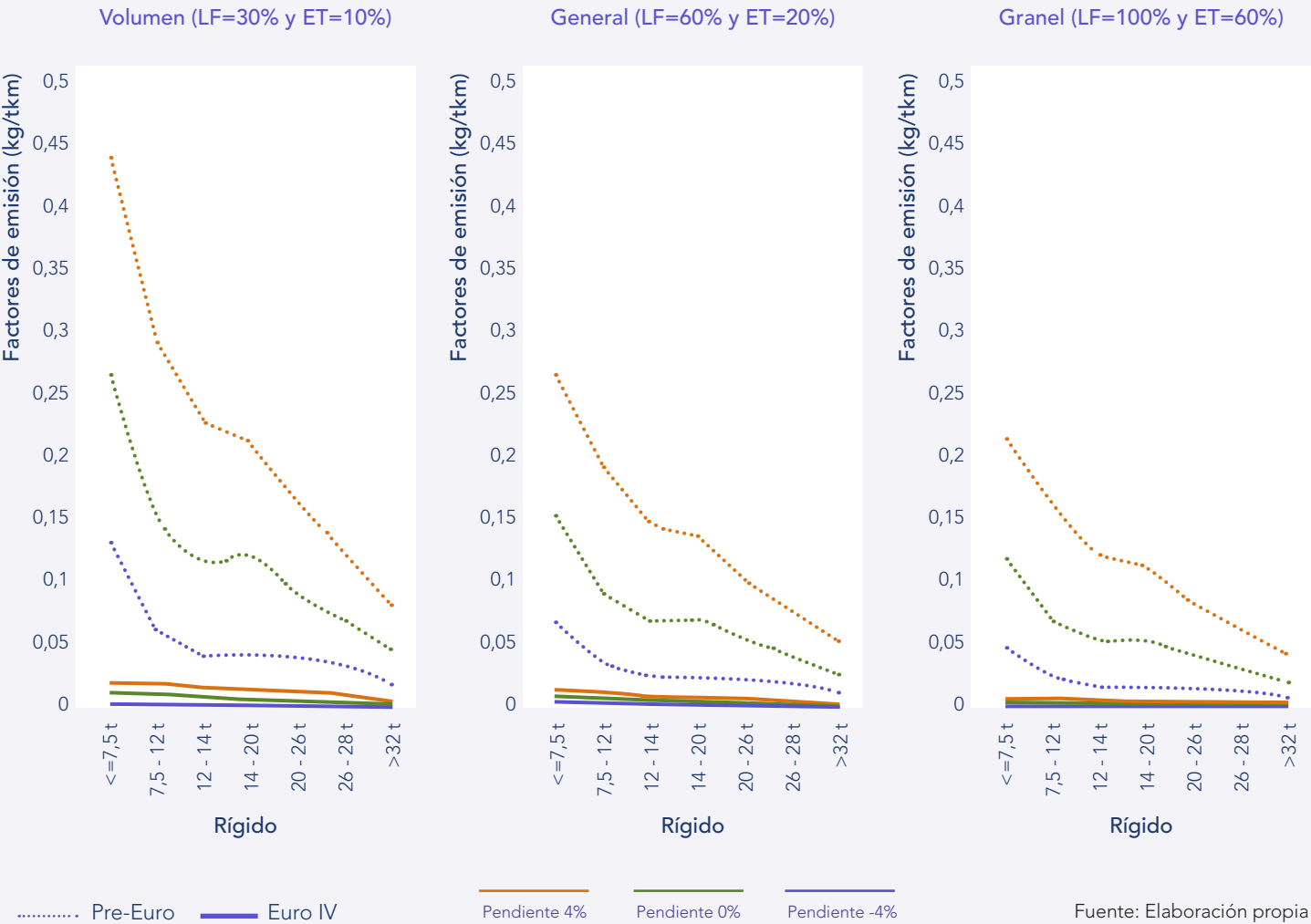
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 29 Factores de emisión de $PM_{2.5}$ (g/t-km) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)



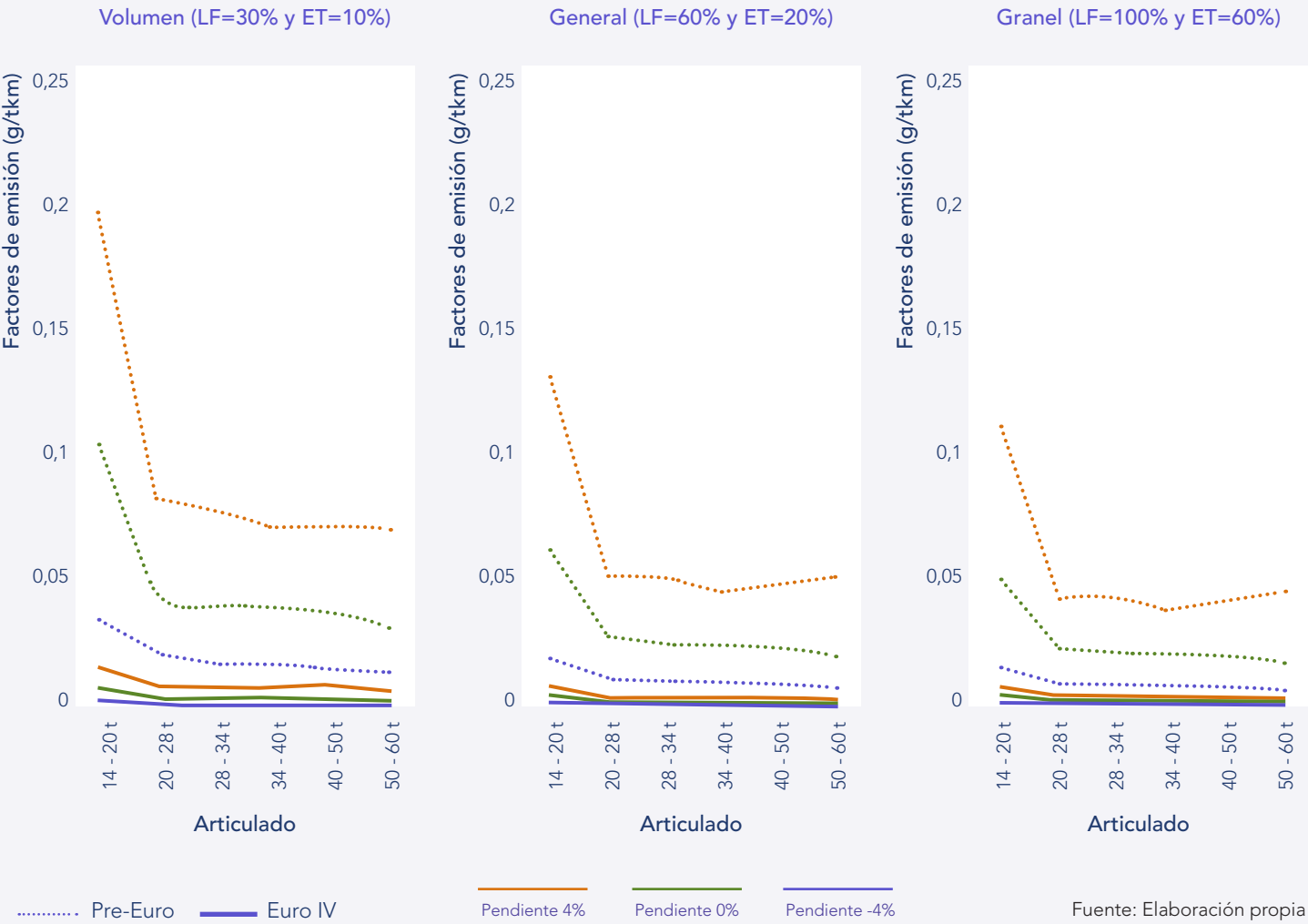
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 30 Factores de emisión de PM_{10} (g/t-km) de camiones rígidos con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 31 Factores de emisión de PM_{10} (g/t-km) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 32

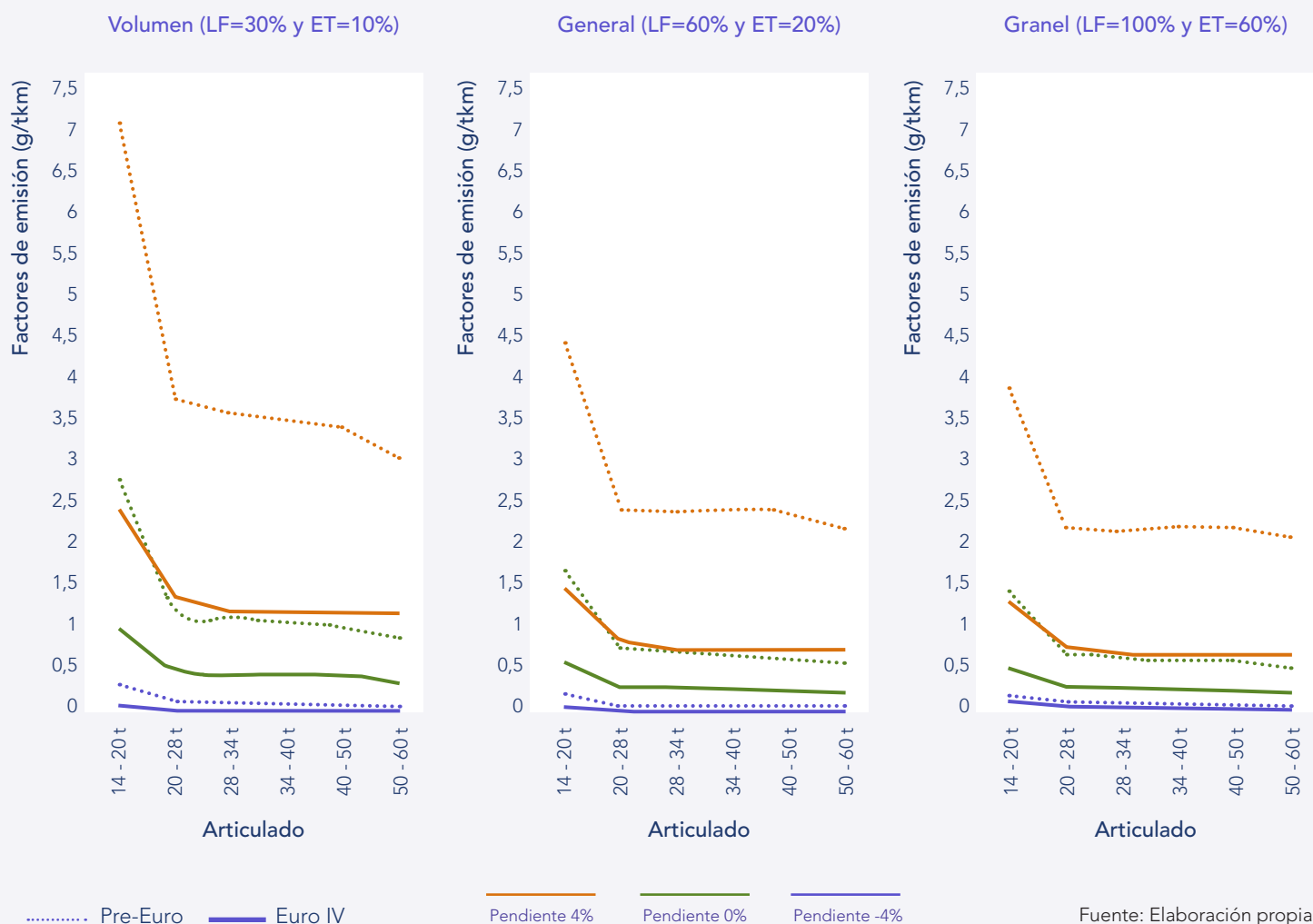
Factores de emisión de NO_x (g/t-km) de camiones rígidos con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 33

Factores de emisión de NO_x (g/t-km) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)



Fuente: Elaboración propia

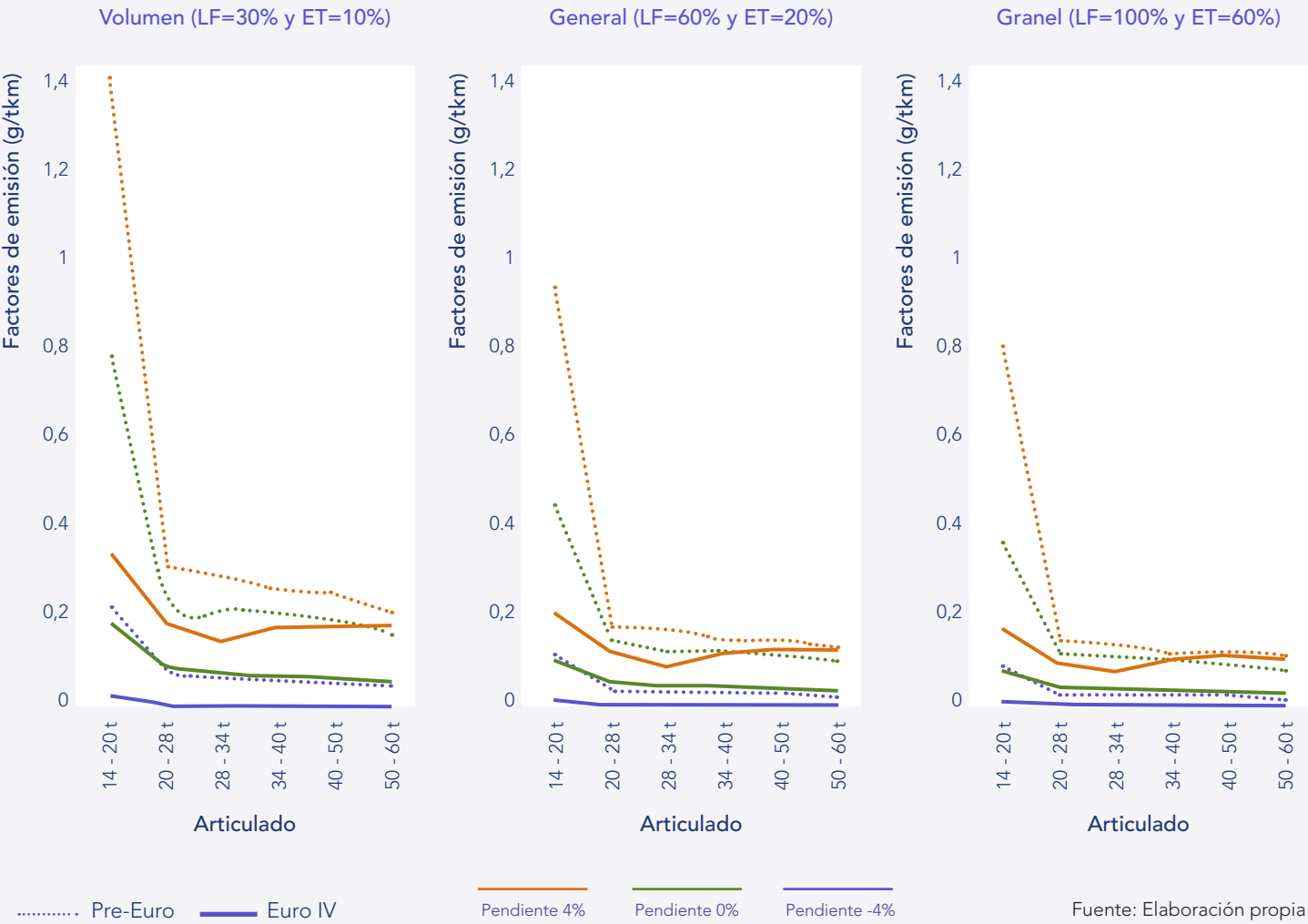
Gráfica 34

Factores de emisión de CO (g/t-km) de camiones rígidos con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 35 Factores de emisión de CO (g/t-km) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)



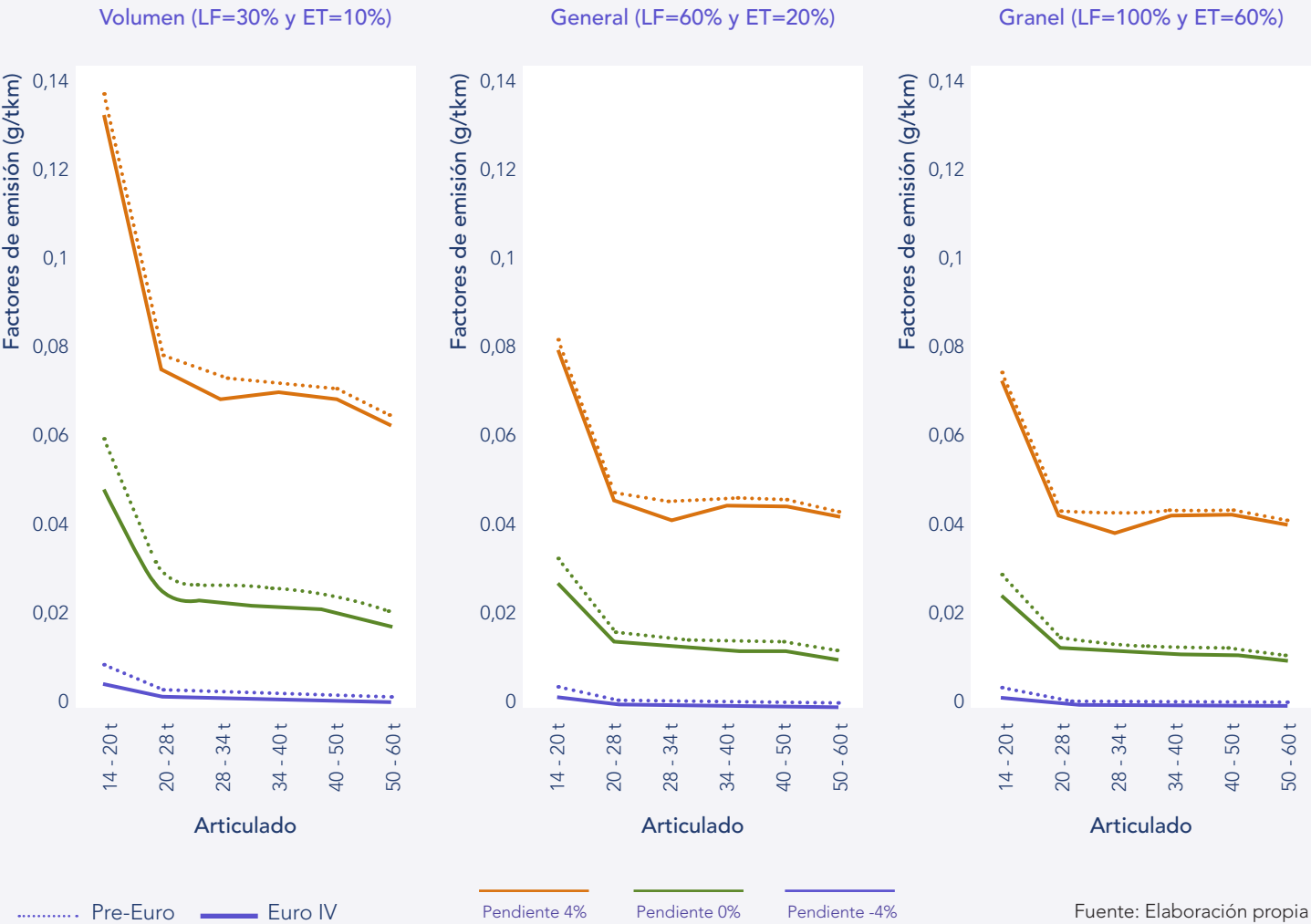
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 36 Factores de emisión de SO₂ (g/t-km) de camiones rígidos con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 37 Factores de emisión de SO₂ (g/t-km) de camiones articulados con diferente tipo de mercancía transportada (volumen, general y granel)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 27 | Factor de emisión para CO para transporte marítimo por tipo de embarcación

Tipo de barco			CO (g/t-km)		
			Tipo de combustible		
			Fuel Oil Pesado - HFO	Diésel Marítimo - MDO	Gas Natural Licuado - LNG
			Tipo de motor según velocidad		
			Todos		
Barco a granel	0–9,999	dwt	0.018	0.018	0.050
	10,000–34,999	dwt	0.007	0.007	0.021
	35,000–59,999	dwt	0.005	0.005	0.015
	60,000–99,999	dwt	0.004	0.004	0.011
	100,000–199,999	dwt	0.003	0.003	0.009
	200,000–+	dwt	0.003	0.003	0.007
Tanquero químico	0–4,999	dwt	0.021	0.021	0.060
	5,000–9,999	dwt	0.013	0.013	0.036
	10,000–19,999	dwt	0.010	0.010	0.027
	20,000–+	dwt	0.006	0.006	0.016
Portacontenedeores	0–999	TEU	0.015	0.015	0.043
	1,000–1,999	TEU	0.011	0.011	0.032
	2,000–2,999	TEU	0.010	0.010	0.028
	3,000–4,999	TEU	0.010	0.010	0.028
	5,000–7,999	TEU	0.010	0.010	0.030
	8,000–11,999	TEU	0.009	0.009	0.025
	12,000–14,500	TEU	0.006	0.006	0.017
	14,500–+	TEU	0.007	0.007	0.021
Buque de carga	0–4,999	dwt	0.021	0.021	0.059
	5,000–9,999	dwt	0.014	0.014	0.039
	10,000–+	dwt	0.009	0.009	0.025
Buque transporte de gas	0–49,999	cbm	0.021	0.021	0.060
	50,000–199,999	cbm	0.009	0.009	0.026
	200,000–+	cbm	0.008	0.008	0.024
Buque petróleo	0–4,999	dwt	0.029	0.029	0.083
	5,000–9,999	dwt	0.017	0.017	0.049
	10,000–19,999	dwt	0.012	0.012	0.034
	20,000–59,999	dwt	0.007	0.007	0.020
	60,000–79,999	dwt	0.006	0.006	0.016
	80,000–119,999	dwt	0.004	0.004	0.012
	120,000–199,999	dwt	0.004	0.004	0.011
	200,000–+	dwt	0.003	0.003	0.008
Buque cisterna	0–+	dwt	0.045	0.045	0.126
Barco a granel refrigerado	0–1,999	dwt	0.026	0.026	0.075
Ro-Ro	0–4,999	dwt	0.048	0.048	0.137
	5,000–+	dwt	0.021	0.021	0.060
Vehículos	0–3,999	vehicle	0.020	0.020	0.056
	4,000–+	vehicle	0.013	0.013	0.036

Tabla 28 | Factor de emisión para SO_x para transporte marítimo por tipo de embarcación

Tipo de barco			SOx (g/t-km)					
			Tipo de combustible					
			Fuel Oil Pesado - HFO		Diésel Marítimo - MDO		Gas Natural Licuado - LNG	
			Tipo de motor según velocidad					
			Baja	Media	Baja	Media	Baja	Media
Barco a granel	0–9,999	dwt	0.298	0.315	0.016	0.017	1.E-04	1.E-04
	10,000–34,999	dwt	0.123	0.130	0.007	0.007	5.E-05	5.E-05
	35,000–59,999	dwt	0.087	0.092	0.005	0.005	4.E-05	4.E-05
	60,000–99,999	dwt	0.067	0.071	0.004	0.004	3.E-05	3.E-05
	100,000–199,999	dwt	0.054	0.057	0.003	0.003	2.E-05	2.E-05
	200,000–+	dwt	0.044	0.046	0.002	0.002	2.E-05	2.E-05
Tanquero químico	0–4,999	dwt	0.356	0.377	0.019	0.020	1.E-04	2.E-04
	5,000–9,999	dwt	0.216	0.229	0.012	0.012	9.E-05	9.E-05
	10,000–19,999	dwt	0.161	0.170	0.009	0.009	7.E-05	7.E-05
	20,000–+	dwt	0.096	0.102	0.005	0.005	4.E-05	4.E-05
Portacontenedeores	0–999	TEU	0.253	0.268	0.014	0.014	1.E-04	1.E-04
	1,000–1,999	TEU	0.190	0.201	0.010	0.011	8.E-05	8.E-05
	2,000–2,999	TEU	0.165	0.174	0.009	0.009	7.E-05	7.E-05
	3,000–4,999	TEU	0.169	0.179	0.009	0.010	7.E-05	7.E-05
	5,000–7,999	TEU	0.176	0.186	0.009	0.010	7.E-05	8.E-05
	8,000–11,999	TEU	0.147	0.156	0.008	0.008	6.E-05	6.E-05
	12,000–14,500	TEU	0.099	0.104	0.005	0.006	4.E-05	4.E-05
	14,500–+	TEU	0.123	0.130	0.007	0.007	5.E-05	5.E-05
Buque de carga	0–4,999	dwt	0.353	0.373	0.019	0.020	1.E-04	2.E-04
	5,000–9,999	dwt	0.234	0.248	0.013	0.013	1.E-04	1.E-04
	10,000–+	dwt	0.147	0.155	0.008	0.008	6.E-05	6.E-05
Buque transporte de gas	0–49,999	cbm	0.354	0.374	0.019	0.020	1.E-04	2.E-04
	50,000–199,999	cbm	0.157	0.166	0.008	0.009	6.E-05	7.E-05
	200,000–+	cbm	0.140	0.148	0.008	0.008	6.E-05	6.E-05
Buque petróleo	0–4,999	dwt	0.491	0.519	0.026	0.028	2.E-04	2.E-04
	5,000–9,999	dwt	0.293	0.310	0.016	0.017	1.E-04	1.E-04
	10,000–19,999	dwt	0.201	0.213	0.011	0.011	8.E-05	9.E-05
	20,000–59,999	dwt	0.117	0.124	0.006	0.007	5.E-05	5.E-05
	60,000–79,999	dwt	0.097	0.102	0.005	0.006	4.E-05	4.E-05
	80,000–119,999	dwt	0.073	0.077	0.004	0.004	3.E-05	3.E-05
	120,000–199,999	dwt	0.064	0.067	0.003	0.004	3.E-05	3.E-05
	200,000–+	dwt	0.049	0.051	0.003	0.003	2.E-05	2.E-05
Buque cisterna	0–+	dwt	0.748	0.791	0.040	0.043	3.E-04	3.E-04
Barco a granel refrigerado	0–1,999	dwt	0.444	0.469	0.024	0.025	2.E-04	2.E-04
Ro-Ro	0–4,999	dwt	0.811	0.857	0.044	0.046	3.E-04	3.E-04
	5,000–+	dwt	0.353	0.373	0.019	0.020	1.E-04	2.E-04
Vehículos	0–3,999	vehicle	0.331	0.350	0.018	0.019	1.E-04	1.E-04
	4,000–+	vehicle	0.216	0.229	0.012	0.012	9.E-05	9.E-05

Tabla 29 | Factor de emisión para NO_x para transporte marítimo por tipo de embarcación

Tipo de barco			NOx (g/t-km) Tier 2					
			Tipo de combustible					
			Fuel Oil Pesado - HFO		Diésel Marítimo - MDO		Gas Natural Licuado - LNG	
			Tipo de motor según velocidad					
			Baja	Media	Baja	Media	Baja	Media
Barco a granel	0–9,999	dwt	0.476	0.334	0.448	0.314	0.048	0.050
	10,000–34,999	dwt	0.197	0.138	0.185	0.130	0.020	0.021
	35,000–59,999	dwt	0.139	0.097	0.130	0.091	0.014	0.015
	60,000–99,999	dwt	0.107	0.075	0.101	0.071	0.011	0.011
	100,000–199,999	dwt	0.087	0.061	0.081	0.057	0.009	0.009
	200,000–+	dwt	0.070	0.049	0.066	0.046	0.007	0.007
Tanquero químico	0–4,999	dwt	0.570	0.400	0.536	0.376	0.057	0.060
	5,000–9,999	dwt	0.346	0.243	0.325	0.228	0.035	0.036
	10,000–19,999	dwt	0.258	0.181	0.242	0.170	0.026	0.027
	20,000–+	dwt	0.153	0.108	0.144	0.101	0.015	0.016
Portacontenedeores	0–999	TEU	0.405	0.284	0.380	0.267	0.040	0.043
	1,000–1,999	TEU	0.304	0.214	0.286	0.201	0.030	0.032
	2,000–2,999	TEU	0.263	0.185	0.247	0.174	0.026	0.028
	3,000–4,999	TEU	0.270	0.190	0.254	0.178	0.027	0.028
	5,000–7,999	TEU	0.281	0.197	0.264	0.185	0.028	0.030
	8,000–11,999	TEU	0.236	0.165	0.221	0.155	0.024	0.025
	12,000–14,500	TEU	0.158	0.111	0.148	0.104	0.016	0.017
	14,500–+	TEU	0.197	0.138	0.185	0.130	0.020	0.021
Buque de carga	0–4,999	dwt	0.564	0.396	0.530	0.372	0.056	0.059
	5,000–9,999	dwt	0.374	0.263	0.352	0.247	0.037	0.039
	10,000–+	dwt	0.235	0.165	0.221	0.155	0.023	0.025
Buque transporte de gas	0–49,999	cbm	0.566	0.397	0.532	0.373	0.056	0.060
	50,000–199,999	cbm	0.251	0.176	0.236	0.166	0.025	0.026
	200,000–+	cbm	0.225	0.158	0.211	0.148	0.022	0.024
Buque petróleo	0–4,999	dwt	0.785	0.551	0.738	0.518	0.078	0.083
	5,000–9,999	dwt	0.469	0.329	0.441	0.309	0.047	0.049
	10,000–19,999	dwt	0.321	0.226	0.302	0.212	0.032	0.034
	20,000–59,999	dwt	0.187	0.131	0.176	0.124	0.019	0.020
	60,000–79,999	dwt	0.155	0.109	0.145	0.102	0.015	0.016
	80,000–119,999	dwt	0.116	0.082	0.109	0.077	0.012	0.012
	120,000–199,999	dwt	0.102	0.071	0.096	0.067	0.010	0.011
	200,000–+	dwt	0.078	0.055	0.073	0.051	0.008	0.008
Buque cisterna	0–+	dwt	1.196	0.839	1.124	0.789	0.119	0.126
Barco a granel refrigerado	0–1,999	dwt	0.710	0.498	0.667	0.468	0.071	0.075
Ro-Ro	0–4,999	dwt	1.296	0.910	1.218	0.855	0.129	0.137
	5,000–+	dwt	0.565	0.396	0.531	0.372	0.056	0.060
Vehículos	0–3,999	vehicle	0.529	0.371	0.497	0.349	0.053	0.056
	4,000–+	vehicle	0.346	0.243	0.325	0.228	0.035	0.036

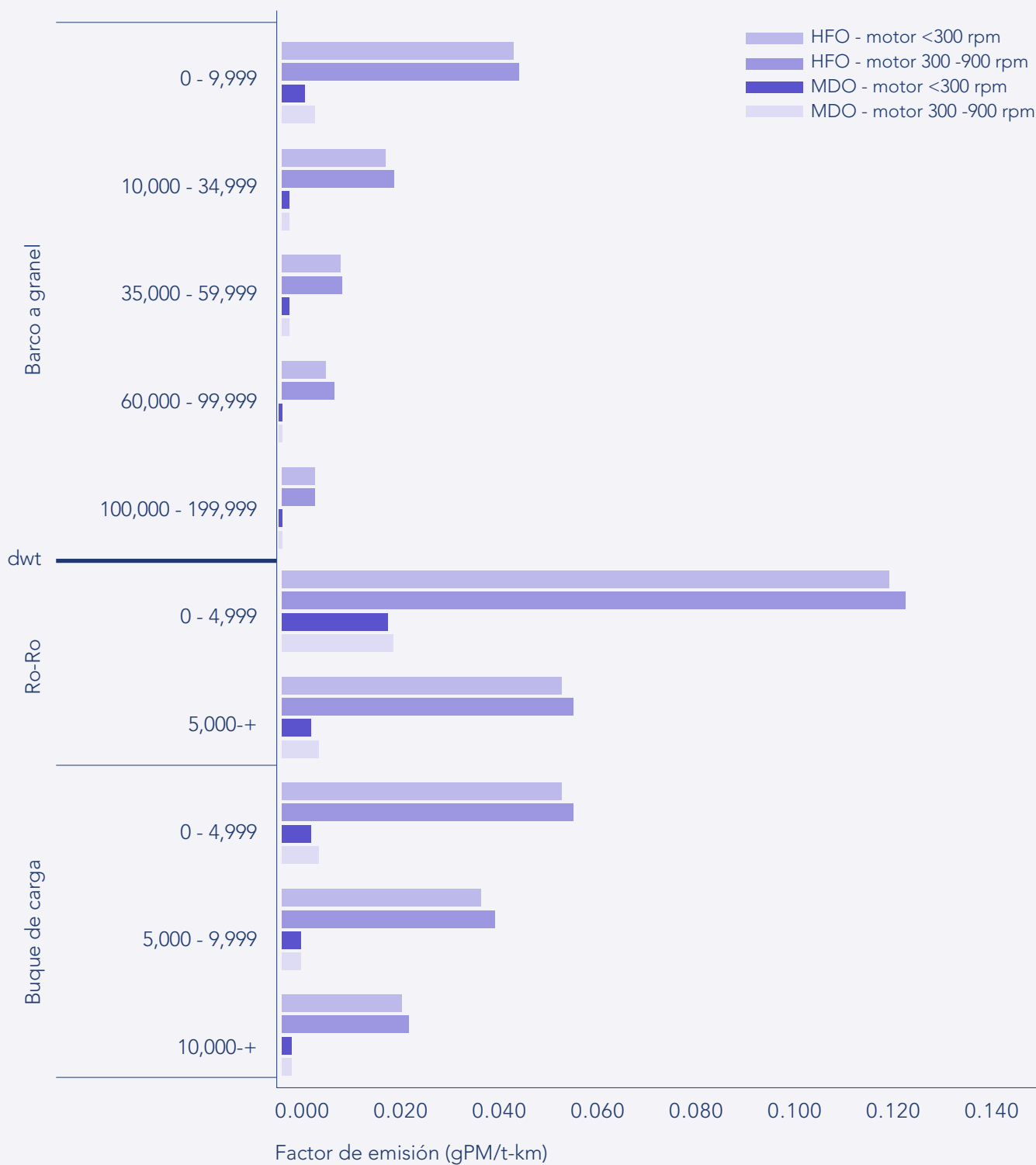
Tabla 30 Factores de emisión del PM_{2.5} para diferentes clases de trenes

Tipo de tren	Tipo de carga			Tipo de carga			Tipo de carga			Tipo de carga		
	Granel	General	Volumen	Granel	General	Volumen	Granel	General	Volumen	Granel	General	Volumen
	Factor de emisión			Factor de emisión			Factor de emisión			Factor de emisión		
Trenes generales	g PM _{2.5} /tkm (Tier 1)			g PM _{2.5} /tkm (Tier 2)			g PM _{2.5} /tkm (Tier 3)			g PM _{2.5} /tkm (Tier 4)		
Ligero (500t)	0.0032	0.0037	0.0048	0.0016	0.0018	0.0024	0.0012	0.0014	0.0018	0.0004	0.0004	0.0005
Promedio (1000t)	0.0021	0.0024	0.0031	0.0010	0.0012	0.0015	0.0008	0.0009	0.0012	0.0002	0.0003	0.0004
Grande (1500t)	0.0016	0.0019	0.0024	0.0008	0.0009	0.0012	0.0006	0.0007	0.0009	0.0002	0.0002	0.0003
Extragrande (2000t)	0.0014	0.0016	0.0020	0.0007	0.0008	0.0010	0.0005	0.0006	0.0008	0.0002	0.0002	0.0002
Pesado (>2000t)	0.0013	0.0014	0.0019	0.0006	0.0007	0.0009	0.0005	0.0006	0.0007	0.0001	0.0002	0.0002
Trenes dedicados	g PM _{2.5} /tkm (Tier 1)			g PM _{2.5} /tkm (Tier 2)			g PM _{2.5} /tkm (Tier 3)			g PM _{2.5} /tkm (Tier 4)		
Carro	0.005			0.003			0.002			0.0006		
Químicos	0.002			0.011			0.001			0.0002		
Container	0.002			0.012			0.001			0.0003		
Doble container	0.001			0.006			0.000			0.0001		
Rolling Road - Camión	0.002			0.012			0.001			0.0003		
Rolling Road - emi Tráiler	0.002			0.011			0.001			0.0002		
Rolling Road - Cuerpo intercambiable	0.002			0.012			0.001			0.0003		
Carbón y acero	0.002			0.008			0.001			0.0002		
Materiales de construcción	0.002			0.010			0.001			0.0002		
Productos manufactureros	0.002			0.011			0.001			0.0002		
Cereales	0.002			0.008			0.001			0.0002		

Fuentes: Estimaciones propias basadas en Ecuación 9

Gráfica 38

Análisis de factores de emisión para diferentes clases de barcos y combustibles



Fuente: Elaboración propia

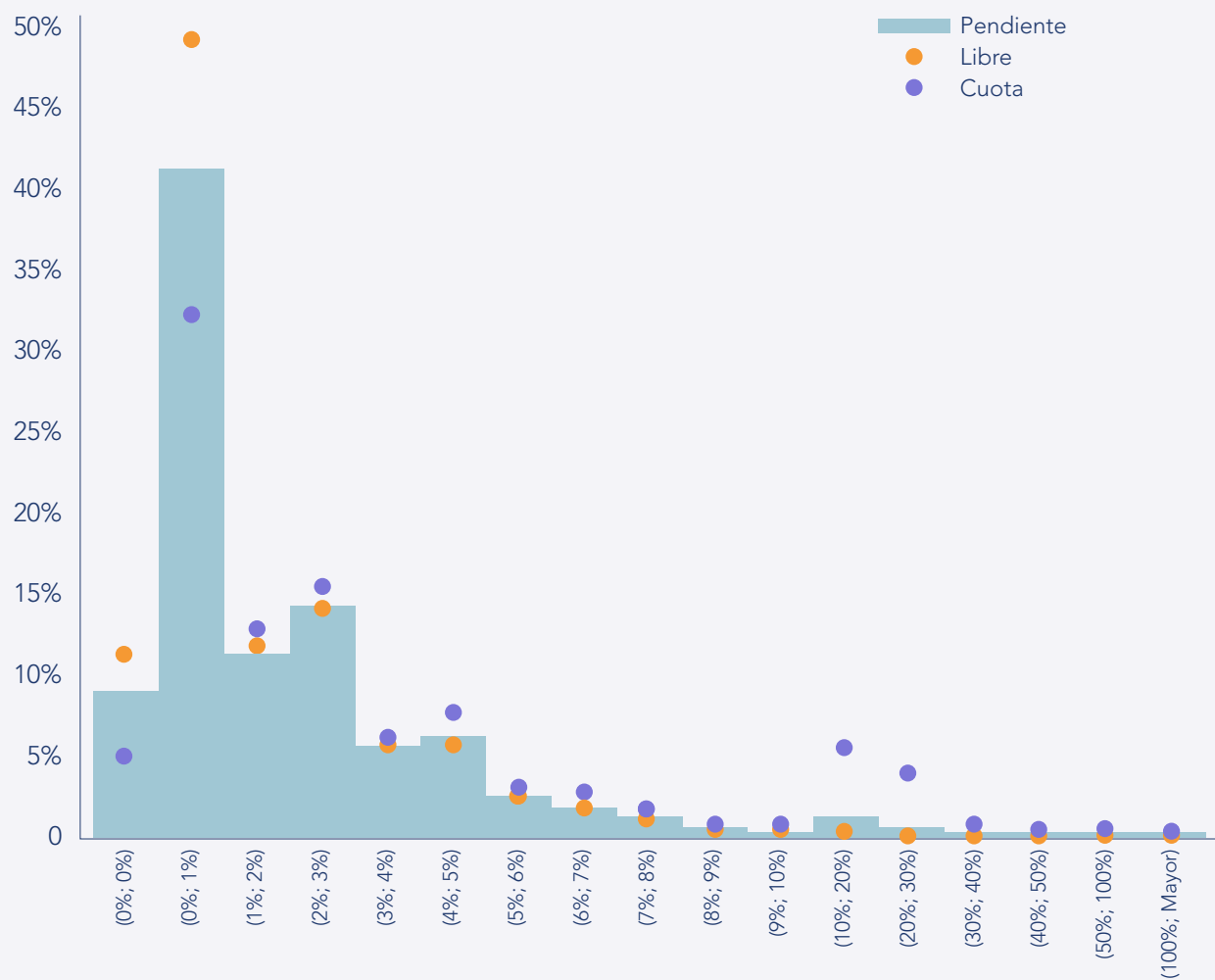
ANEXO 3.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA DEL EJERCICIO DIAGNÓSTICO



Gráfica 39

Distribución porcentual por tipo de pendiente de las vías principales de México para segmentos libres y con cuota



Fuente: Elaboración propia con base en información de la red vial mexicana



ANEXO 4.

**RELACIÓN PRODUCTO -
CATEGORÍA DE PRODUCTO**

Producto	Grupo
ABONOS	Abonos y fertilizantes
ACEITES ESENCIALES Y RESINOIDES; PRODUCTOS PREPARADOS Y PREPARACIONES	Químicos
ALFOMBRAS Y DEMÁS REVESTIMIENTOS PARA EL SUELO, DE MATERIAS TEXTILES	Textiles
ALGODÓN	Textiles
ALUMINIO Y MANUFACTURAS DE ALUMINIO	Manufacturados
ANIMALES VIVOS	Ganado bovino - porcino
ARMAS Y MUNICIONES, Y SUS PARTES Y ACCESORIOS	Manufacturados
ARTÍCULOS DE SOMBRERERÍA Y SUS PARTES	Manufacturados
AZÚCARES Y ARTÍCULOS DE CONFITERÍA	Azúcar
BEBIDAS, LÍQUIDOS ALCOHÓLICOS Y VINAGRE	Bebidas
CACAO Y SUS PREPARACIONES	Alimentos
CAFÉ, TÉ, YERBA MATE Y ESPECIAS	Café
CALZADO, POLAINAS, BOTINES Y ARTÍCULOS ANÁLOGOS; PARTES DE ESTOS ARTÍCULOS	Manufacturados
CARNES Y DESPOJOS COMESTIBLES	Alimentos
CAUCHO Y MANUFACTURAS DE CAUCHO	Caucho y plásticos
CEREALES	Alimentos
CINC Y MANUFACTURAS DE CINC	Minerales no metálicos
COBRE Y MANUFACTURAS DE COBRE	Minerales no metálicos
COMBUSTIBLES MINERALES, ACEITES MINERALES Y PRODUCTOS DE SU DESTILACIÓN	Derivados del petróleo
CORCHO Y SUS MANUFACTURAS	Madera
DISPOSICIONES DE TRATAMIENTO ESPECIAL	Otros
ESTAÑO Y MANUFACTURAS DE ESTAÑO	Minerales no metálicos
EXPLOSIVOS	Químicos
EXTRACTOS CURTIENTES O TINTOREOS; TANINOS Y SUS DERIVADOS; PIGMENTOS	Manufacturados
FIBRAS SINTÉTICAS O ARTIFICIALES DISCONTINUAS	Manufacturados
FILAMENTOS SINTÉTICOS O ARTIFICIALES	Textiles
FRUTOS COMESTIBLES; CORTEZAS DE AGRIOS O DE MELONES	Frutas, excepto banano
FUNDICIÓN, HIERRO Y ACERO	Metalurgia
GASES	Químicos
GOMAS, RESINAS Y DEMÁS JUGOS Y EXTRACTOS VEGETALES	Manufacturados
GRASAS Y ACEITES ANIMALES O VEGETALES; PRODUCTOS DE SU DESDOBLAMIENTO	Aceites y grasas animales
GUATA, FIELTRO Y TELAS SIN TEJER; HILADOS ESPECIALES; CORDELES, CUERDAS	Textiles
HERRAMIENTAS Y ÚTILES, ARTÍCULOS DE CUCHILLERÍA, CUBIERTOS DE MESA	Manufacturados
INSTRUMENTOS DE MÚSICA; PARTES Y ACCESORIOS DE ESTOS INSTRUMENTOS	Manufacturados

Producto	Grupo
INSTRUMENTOS Y APARATOS DE ÓPTICA, FOTOGRAFÍA O CINEMATOGRAFÍA	Manufacturados
JABONES, AGENTES DE SUPERFICIE ORGÁNICOS, PREPARACIONES PARA LAVAR	Aceites y grasas animales
JUGUETES, JUEGOS Y ARTÍCULOS PARA RECREO O PARA DEPORTE; SUS PARTES	Manufacturados
LANA Y PELO FINO U ORDINARIO; HILADOS Y TEJIDOS DE CRIN	Manufacturados
LAS DEMÁS FIBRAS TEXTILES VEGETALES; HILADOS DE PAPEL Y TEJIDOS DE HILADOS	Textiles
LECHE Y PRODUCTOS LÁCTEOS; HUEVOS DE AVE; MIEL NATURAL; PRODUCTOS	Leche
LEGUMBRES Y HORTALIZAS, PLANTAS, RAÍCES Y TUBÉRCULOS ALIMENTICIOS	Papa
LÍQUIDOS INFLAMABLES	Químicos
LOS DEMÁS ARTÍCULOS TEXTILES CONFECCIONADOS; CONJUNTOS O SURTIDOS	Textiles
LOS DEMÁS METALES COMUNES; CERMETS; MANUFACTURAS DE ESTAS	Minerales no metálicos
LOS DEMÁS PRODUCTOS DE ORIGEN ANIMAL NO EXPRESADOS NI COMPRENDIDOS	Productos de origen animal
MADERA, CARBÓN VEGETAL Y MANUFACTURAS DE MADERA	Madera
MANUFACTURA DIVERSAS	Manufacturados
MANUFACTURAS DE CUERO, ARTÍCULOS DE GUARNICIONERÍA O DE TALABARTERÍA	Manufacturados
MANUFACTURAS DE ESPARTERÍA O DE CESTERÍA	Manufacturados
MANUFACTURAS DE FUNDICIÓN, DE HIERRO O DE ACERO	Manufacturados
MANUFACTURAS DE PIEDRA, YESO, CEMENTO, AMIANTO, MICA O MATERIAS	Cemento, cales y yesos
MANUFACTURAS DIVERSAS	Manufacturados
MANUFACTURAS DIVERSAS DE METALES COMUNES	Manufacturados
MÁQUINA, APARATOS Y MATERIAL ELÉCTRICO Y SUS PARTES	Fabricación maquinaria
MATERIAL RADIATIVO	Químicos
MATERIAS ALBUMINOIDEAS; PRODUCTOS A BASE DE ALMIDÓN O DE FÉCULA	Químicos
MATERIAS CORROSIVAS	Químicos
MATERIAS PLÁSTICAS Y MANUFACTURAS DE ESTAS MATERIAS	Caucho y plásticos
MATERIAS TÓXICAS	Químicos
MATERIAS TRENZABLES Y DEMÁS PRODUCTOS DE ORIGEN VEGETAL, NO EXPRESADOS	Textiles
MATERIAS Y OBJETOS QUE PRESENTAN PELIGROS DIVERSOS	Químicos
MINERALES, ESCORIAS Y CENIZAS	Minerales no metálicos
MUEBLES; MOBILIARIO MÉDICO QUIRÚRGICO, ARTÍCULOS DE CAMA Y SIMILARES	Manufacturados
NAVEGACIÓN AÉREA O ESPACIAL	Otros
NAVEGACIÓN MARÍTIMA O FLUVIAL	Otros
NÍQUEL Y MANUFACTURAS DE NÍQUEL	Minerales no metálicos
OBJETOS DE ARTE, DE COLECCIÓN O DE ANTIGÜEDAD	Otros
OTROS	Otros
PAPEL Y CARTÓN; MANUFACTURAS DE PASTA DE CELULOSA; DE PAPEL O DE CARTÓN	Papeles, cartón

Producto	Grupo
PARAGUAS, SOMBRILLAS, QUITASOLES, BASTONES, BASTONES ASIENTO, LÁTIGOS	Manufacturados
PASTA DE MADERA O DE OTRAS MATERIAS FIBROSAS CELULÓSICAS; DESPERDICIOS	Manufacturados
PELETERÍA Y CONFECCIONES DE PELETERÍA; PELETERÍA ARTIFICIAL O FICTICIA	Manufacturados
PELIGROSO	Químicos
PERLAS FINAS O CULTIVADAS, PIEDRAS PRECIOSAS Y SEMIPRECIOSAS O SIMILARES	Minerales no metálicos
PESCADOS Y CRUSTÁCEOS, MOLUSCOS Y OTROS INVERTEBRADOS ACUÁTICOS	Alimentos
PIELES (EXCEPTO LA PELETERÍA) Y CUEROS	Cueros
PLANTAS VIVAS Y PRODUCTOS DE LA FLORICULTURA	Alimentos
PLOMO Y MANUFACTURAS DE PLOMO	Manufacturados
PLUMAS Y PLUMÓN PREPARADOS Y ARTÍCULOS DE PLUMAS O PLUMÓN; FLORES	Flores
PÓLVORAS Y EXPLOSIVOS; ARTÍCULOS DE PIROTECNIA; FÓSFOROS (CERILLAS)	Químicos
PRENDAS Y COMPLEMENTOS DE VESTIR, DE PUNTO	Textiles
PRENDAS Y COMPLEMENTOS DE VESTIR, EXCEPTO LOS DE PUNTO	Textiles
PREPARACIONES A BASE DE CEREALES, HARINA, ALMIDÓN, FÉCULA O LECHE	Otras harinas
PREPARACIONES ALIMENTICIAS DIVERSAS	Alimentos
PREPARACIONES DE CARNE, DE PESCADO O DE CRUSTÁCEOS, DE MOLUSCOS	Alimentos
PREPARACIONES DE LEGUMBRES U HORTALIZAS, DE FRUTOS O DE OTRAS PARTES	Legumbres y hortalizas
PRODUCTOS CERÁMICOS	Cerámicos
PRODUCTOS DE MOLINERÍA; MALTA; ALMIDÓN Y FÉCULA; INULINA; GLUTEN DE TRIGO	Otras harinas
PRODUCTOS DIVERSOS DE LAS INDUSTRIAS QUÍMICAS	Químicos
PRODUCTOS EDITORIALES, DE LA PRENSA O DE OTRAS INDUSTRIAS GRÁFICAS; TEXTOS	Papeles, cartón
PRODUCTOS FARMACÉUTICOS	Químicos
PRODUCTOS FOTOGRÁFICOS O CINEMATOGRAFICOS	Textiles
PRODUCTOS QUÍMICOS INORGÁNICOS; COMPUESTOS INORGÁNICOS U ORGÁNICOS	Químicos
PRODUCTOS QUÍMICOS ORGÁNICOS	Químicos
REACTORES NUCLEARES, CALDERAS, MÁQUINAS, APARATOS Y ARTEFACTOS	Fabricación maquinaria
REACTORES NUCLEARES, CALDERAS, MÁQUINAS, APARATOS Y ARTEFACTOS MECÁNICOS; PARTES DE ESTAS MÁQUINAS O APARATOS	Fabricación maquinaria
RELOJERÍA	Manufacturados
RESIDUOS Y DESPERDICIOS DE LAS INDUSTRIAS ALIMENTARIAS; ALIMENTOS	Residuos
SAL; AZUFRE; TIERRAS Y PIEDRAS; YESOS, CALES Y CEMENTOS	Minerales no metálicos
SEDA	Textiles
SEMILLAS Y FRUTOS OLEAGINOSOS; SEMILLAS Y FRUTOS DIVERSOS; PLANTAS	Frutas excepto banano
SÓLIDOS INFLAMABLES	Químicos

Producto	Grupo
SÓLIDOS INFLAMABLES; SUSTANCIAS QUE PUEDEN EXPERIMENTAR COMBUSTIÓN ESPONTÁNEA, SUSTANCIAS QUE, EN CONTACTO CON EL AGUA, DESPRENDEN GASES INFLAMABLES	Químicos
SUSTANCIAS COMBURENTES	Químicos
SUSTANCIAS COMBURENTES Y PERÓXIDOS ORGÁNICOS	Químicos
SUSTANCIAS CORROSIVAS	Químicos
SUSTANCIAS TÓXICAS Y SUSTANCIAS INFECCIOSAS	Químicos
SUSTANCIAS Y OBJETOS PELIGROSOS VARIOS	Químicos
TABACO Y SUCEDÁNEOS DEL TABACO ELABORADOS	Otros
TEJIDOS DE PUNTO	Textiles
TEJIDOS ESPECIALES; SUPERFICIES TEXTILES CON PELO INSERTADO; ENCAJES	Textiles
TEJIDOS IMPREGNADOS, RECUBIERTOS, REVESTIDOS O ESTRATIFICADOS; ARTÍCULOS	Textiles
VARIOS	Otros
VEHÍCULOS AUTOMÓVILES, TRACTORES, CICLOS Y DEMÁS VEHÍCULOS TERRESTRES	Vehículos
VEHÍCULOS Y MATERIAL PARA VÍAS FÉRREAS O SIMILARES Y SUS PARTES; APARATOS	Otros
VIDRIO Y MANUFACTURAS DE VIDRIO	Manufacturados



Usuarios ANTP
del transporte de carga



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH