Unidad de Planeación
Minero Energética

Estándares de eficiencia energética y

etiquetado para vehículos de carga en Colombia

Estándares de eficiencia energética y etiquetado para vehículos de carga en Colombia

Informe II

Línea base de consumo de combustible de vehículos de carga en Colombia

Contrato # CO-T1663-P006

Estándares de eficiencia energética y etiqueta para vehículos de carga en Colombia

Informe 2: Línea base de consumo de combustible de vehículos de carga en Colombia

Inter-American Development Bank
Oscar Alejandro Páramo — *Energy Division – Colombia*

Unidad de Planeación Minero-Energética UPME
Jessica Arias — *Subdirectora de demanda*
David Andrés Serrato — *Profesionales de la subdirección de demanda*
Ruth Adriana Navas

Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos (RELIEVE)

Dr. José Ignacio Huertas — *Tecnológico de Monterrey, México*
Dra. Jenny Díaz
Dra. Luisa Fernanda Chaparro
MSc. Óscar S. Serrano
Ing. María del Carmen Canchola
Dr. John Ramiro Agudelo — *Universidad de Antioquia, Colombia*
Dr. Andrés Felipe Agudelo
Dr. Ricardo Moreno
Dr. Michael Giraldo — *Universidad EAFIT, Colombia*
Dra. Silvana Arias
Dra. María Luisa Botero
MSc. Gabriel Martínez — *Inway, Chile*
Ing. Matías Rivera
Dr. Luis Felipe Quirama — *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*
Dr. Alberto Ayala — *Consultor Experto Internacional, Sacramento, California, USA*

Feb 2025

Contenido

1 Introducción 7
2 Metodología 10
2.1 Descripción de la región 10
2.2 Caracterización de la flota de vehículos de carga en Colombia 11
2.3 Fuentes de energía utilizadas en los vehículos de carga 14
2.4 Instrumentación de los vehículos 14
2.5 Altitud 15
2.6 Carga transportada 15
2.7 Campaña de monitoreo 18
2.8 Análisis de calidad de los datos 21
2.9 Análisis de datos 21
2.9.1 Vehículos nuevos 21
2.9.2 Vehículos en uso 24
2.9.3 Consumo de combustible en los principales corredores logísticos de Colombia 25
3 Resultados 27
3.1 Eficiencia energética en vehículos nuevos 27
3.2 Vehículos en uso 29
3.3 Consumo energético en los principales corredores logísticos de Colombia 31
3.4 Consumo energético en las principales ciudades de Colombia 34
4 Conclusiones 35
5 Agradecimientos 36
6 Referencias 37

Anexo 2A Selección y adaptación de sensores para monitorear el peso transportado en vehículos terrestres por medio sistemas de telemetría

Anexo 2B Determinación del tamaño de muestra de viajes para determinar la línea base de consumo energético a través de sistemas de telemetría

Línea base de consumo de combustible de vehículos de carga en Colombia

Definiciones

Actividad vehicular: Valor anual de la suma del producto entre la carga transportada y la distancia recorrida en cada viaje logístico (t-km/a).

Año modelo: Año en que un vehículo es considerado parte de una serie o línea específica de producción de acuerdo con las características del diseño y la fabricación. En la mayoría de los casos corresponde al año de venta del vehículo nuevo.

Carga nominal: Es la carga máxima especificada por el fabricante para la que el vehículo de carga está diseñado.

Carga útil: Es la carga total transportada por el vehículo.

Camión rígido: Vehículo automotor que, por su tamaño y destinación, se usa para transportar carga, con peso bruto vehicular superior a 5 toneladas.

Configuración o categoría vehicular: Se refiere a la clasificación de cada vehículo de acuerdo con la Resolución 4100 de MinTransporte.

Corredores logísticos: Carreteras usadas para el transporte de mercancías y el desarrollo del comercio. Estos corredores integran de manera eficiente uno o varios puntos de origen y destino, considerando aspectos clave como la infraestructura de transporte, el flujo de información y comunicación, las prácticas comerciales y otros factores que optimizan la logística y el intercambio comercial.

Factor de emisión: Valor promedio de la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con la cantidad de energía usada (g/L o g/DEL).

Fabricante: Empresa responsable del diseño, producción y comercialización del vehículo.

Índice de emisión: Cantidad promedio de CO_2 o contaminante emitido en el tubo de escape por unidad de distancia recorrida (g/km) o por unidad de actividad (g/t-km).

Litros equivalentes de diésel (DEL): Unidad de medida utilizada para comparar el consumo energético entre diferentes tecnologías que emplean diferentes fuentes de energía a su equivalente en litros de diésel. En América Latina, más del 90% de vehículos de carga operan con diésel, por lo que se define a esta como unidad de referencia.

Modelo: Se refiere al nombre o la designación específica que identifica a un vehículo dentro de la línea de producción de un fabricante, el cual puede diferenciarse de otros vehículos de la misma marca por sus características, diseño o capacidades técnicas. En Colombia, suele conocerse como “línea”.

Peso bruto vehicular: Representa el peso del vehículo vacío más la carga que puede transportar

Peso en vacío: Representa el peso del vehículo con el equipo estándar de fábrica, combustible en el tanque a su nivel nominal y demás consumibles, pero sin incluir pasajeros o carga adicional.

Remolque: Vehículo no motorizado, halado por una unidad tractora a la cual no le transmite peso. Dotado con su sistema de frenos y luces reflectivas.

Semirremolque: Vehículo sin motor, a ser halado por un automotor sobre el cual se apoya y le transmite parte de su peso. Dotado de un sistema de frenos y luces reflectivas.

Tecnología vehicular: Conjunto de combinación: Fabricante – motor – tren motriz – modelo/línea – configuración – año modelo – certificado de emisiones.

Tractocamión: Vehículo automotor destinado a jalar un semirremolque, equipado con acople adecuado para tal fin.

Vehículos en uso: Vehículos que se encuentran en condiciones normales de operación.

Vehículos nuevos: Vehículos con desempeño igual al de un vehículo de cero kilómetros de uso. Para propósitos de este estudio, se consideran vehículos nuevos a aquellos con menos de 5000 km de uso.

Vehículos pesados: Aquellos vehículos utilizados para el transporte de mercancías o pasajeros con una capacidad de carga superior a 3,5 toneladas.

Volqueta: Automotor destinado principalmente al transporte de materiales de construcción, provisto de una caja que se puede vaciar por giro transversal o vertical sobre uno o más ejes.

Nomenclatura

		Unidades
SFC	*Consumo específico de combustible*	DEL/ 100 km
*SFC**	*Consumo específico de combustible con carga transportada*	DEL/ 100 t-km
EI	*Índice de emisiones de CO_2*	gCO_2e/ km
*EI**	*Índice de emisiones de CO_2 por carga*	gCO_2e/ t-km
EF	*Factor de emisión de gases de efecto invernadero*	gCO_2e/ DEL
DEL	*Litros equivalentes de diésel*	-
GEI	*Gases de efecto invernadero*	
GNCV	*Gas Natural Comprimido*	
msnm	*Metros sobre el nivel del mar*	m
WtW	*Análisis del pozo a la rueda*	
WtT	*Análisis del pozo al tanque*	
TtW	*Análisis del tanque a la rueda*	

Línea base de consumo de combustible de vehículos de carga en Colombia

Resumen

El presente documento reporta la línea base de consumo energético de vehículos de carga nuevos y en uso discriminado por configuración, tecnologías, año-modelo y tipo de energético o fuente de energía que consumen. Constituye el reporte No 2 del contrato # CO-T1663-P006 firmado entre el BID-UPME y el Tecnológico de Monterrey (con la colaboración de la Universidad EAFIT, la Universidad de Antioquia, INWAY, a través de la Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos, RELIEVE) con el apoyo del Programa Ambiental de las Naciones Unidas y la oficina del Distrito Metropolitano de Gestión de la Calidad del Aire de Sacramento, California.

Mediante telemetría, se monitorearon las variables de operación (localización y velocidad del vehículo, RPM y consumo energético del motor, y carga transportada) de más de 120 vehículos a una frecuencia cercana a 1 Hz mientras estos operaban normalmente en las principales ciudades de Colombia (Bogotá, Medellín, Barranquilla) y recorrían los principales corredores logísticos del país. Adicionalmente se obtuvo el registro histórico (origen-destino, consumo energético, carga transportada) de los viajes realizados por 1.008 vehículos durante los últimos 5 años. Finalmente, se usaron los datos obtenidos en el proyecto FECOC donde, con el objetivo de determinar los Factores de Emisión de Combustibles Colombianos, se evaluaron 31 vehículos pesados (pasajeros y carga), siguiendo el ciclo de conducción de vehículos de carga para Colombia (UPME, 2020 & UPME, 2023) y se determinó tanto su consumo específico de combustible como los factores de emisión, tanto de dióxido de carbono (CO_2), como de varios contaminantes criterio.

Observando la velocidad y consumo de los vehículos cuando pasan por cada kilómetro de los corredores logísticos de Colombia se obtuvo el promedio de la velocidad (km/h) y el consumo específico de combustible (SFC, expresado en L/100 km). Además, se reportó el consumo promedio de combustible (L/100 km) por cada corredor logístico. Estos resultados permiten estimar el costo asociado al consumo de combustible en el transporte de carga entre un origen y un destino determinado.

Se definió una métrica de eficiencia energética vehicular (η, %) y un método de evaluación de dicha métrica que permitió caracterizar el desempeño energético de los vehículos basado en los datos obtenidos por telemetría. Se encontró que la eficiencia energética (%) de los vehículos nuevos (año modelo >2021) varía entre 24 y 34% para vehículos diésel, mientras que otros estudios reportan ~35% para gas natural comprimido (GNC) y ~73% para eléctricos. Se concluyó que el SFC obtenido mediante pruebas en carretera siguiendo el ciclo de conducción de vehículos de carga es una métrica asociada a la eficiencia energética y, por ende, puede ser usada para comparar tecnologías vehiculares, siempre y cuando el vehículo sea medido con carga nominal y pertenezcan a la misma categoría vehicular.

La eficiencia con la que las empresas de transporte utilizan los vehículos se mide a través del índice de emisión (EI) específico por carga (EI*, gCO_2e/t-km). Se obtuvieron estos índices para nueve empresas, y los resultados mostraron que EI* puede utilizarse para evaluar las reducciones anuales de gases de efecto invernadero (GEI) dentro de una misma empresa. Sin embargo, esta métrica no es adecuada para realizar comparaciones entre empresas.

1 Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo establecer la línea base de eficiencia energética de los vehículos nuevos y en uso, utilizados para el transporte de carga en Colombia, de tal forma que sirva como una herramienta para clasificar las tecnologías y diseñar programas tendientes a reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

Colombia se comprometió a reducir para el año 2030 las emisiones de GEI en 51% (respecto a las proyecciones de emisiones a 2030 del escenario de referencia 2010-2014). Estos compromisos buscan abordar el cambio climático de manera más efectiva y reducir sus impactos (MinEnergía et al., 2020; MinEnergía & UPME, 2020, 2022b, 2022a; UPME et al., 2019). En 2018 la UPME concluyó que el sector transporte es uno de los principales consumidores de energía (40%) y presenta altas ineficiencias debido a que tan solo el 26% de la energía consumida se convierte en energía útil (UPME et al., 2019).

En consecuencia, el gobierno colombiano ha venido realizando esfuerzos para promover el seguimiento para el mejoramiento continuo de la eficiencia energética de los vehículos, iniciando con las motocicletas y vehículos livianos, a través del desarrollo de normativas sobre eficiencia energética y etiquetado vehicular, así como la definición de estándares basados en el consumo de combustible. Se resalta que estos programas:

- Están dirigidos a vehículos nuevos que son usados para servicio particular y por ende están dirigidos exclusivamente a los fabricantes de vehículos.
- La métrica de eficiencia energética usada es el consumo específico de combustible (SFC, L/100 km) o rendimiento (km/L) bajo ciclo de conducción. No se usa el concepto de eficiencia energética (η, %).

Adicionalmente, se resalta que los programas de eficiencia energética son distintos a los programas de inspección y mantenimiento, mejor conocidos como verificación vehicular, los cuales tienen como objetivo asegurar que el usuario brinde el adecuado mantenimiento a sus vehículos y evitar emisiones de contaminantes criterio en exceso.

Condiciones particulares de la operación de vehículos pesados usados para el transporte de carga

La operación de vehículos pesados usados para el transporte de carga presenta diferencias radicales comparados con los vehículos livianos o motocicletas, los cuales se deben tener en cuenta al momento de diseñar un programa de eficiencia energética:

- No son para uso personal. Su operación forma parte de alguna cadena productiva. Generan beneficios económicos para quien usa el vehículo (el transportador).
- No existe una marca específica de fabricante responsable del vehículo. Usualmente el motor, chasis y cabina son fabricados por un reducido número de marcas internacionales, mientras que la carrocería generalmente es fabricada por empresas locales. Esto dificulta identificar a un fabricante responsable por el desempeño del vehículo completo.
- Los vehículos funcionan con motores de inyección electrónica, lo que implica que estos vehículos están equipados con una unidad de control electrónico (ECU) que monitorea y controla las condiciones de operación del motor. Igualmente, estos vehículos poseen un puerto de comunicación OBD o una red de comunicaciones CAN. El artículo 38 de la resolución 0762 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece el OBD como un requisito para estos vehículos (MinAmbiente, 2022). De esta forma el consumo de combustible instantáneo del motor está disponible. Sin embargo, la lectura de estos datos por parte de terceros, para realizar seguimiento tendiente al mejoramiento continuo, aún no está estandarizada.

- Estos vehículos suelen ser monitoreados mediante sistemas de telemetría, que inicialmente se utilizaron para rastrear la ubicación, luego para el mantenimiento preventivo y, más recientemente, para supervisar las condiciones de manejo. Sin embargo, el monitoreo del consumo de combustible aún no es habitual, y muy pocas empresas de telemetría realizan seguimiento de la carga transportada.
- El consumo de combustible de los vehículos en su operación cotidiana está influenciado por tres factores (Figura 2.1):

  Factores externos, como la topografía, el estado de las vías y las condiciones meteorológicas, influyen en el consumo de combustible. Conocer el consumo específico por kilómetro en los principales corredores viales permite identificar zonas de alto consumo. Esta información es crucial para que las autoridades gubernamentales tomen decisiones orientadas a mejorar la infraestructura vial del país.

  La tecnología del vehículo, que incluye el motor, el chasis y la carrocería, es responsabilidad de los fabricantes. La eficiencia energética (η) del vehículo se utiliza como la métrica clave para evaluar su desempeño. Se requiere conocer el promedio de la eficiencia de la tecnología bajo las condiciones normales de uso del propietario del vehículo obtenida durante una operación de por los menos 5.000 km bajo las condiciones locales. Históricamente, en lugar de la eficiencia energética, se han utilizado métricas como el consumo específico de combustible (SFC) en L/100 km o el rendimiento en km/L, medidos siguiendo un ciclo de conducción. Al evaluar el consumo de combustible replicando un ciclo de conducción, se controlan los factores externos y humanos, lo que permite que esta metodología sea equivalente a medir la eficiencia energética del vehículo bajo condiciones de operación de interés específico.

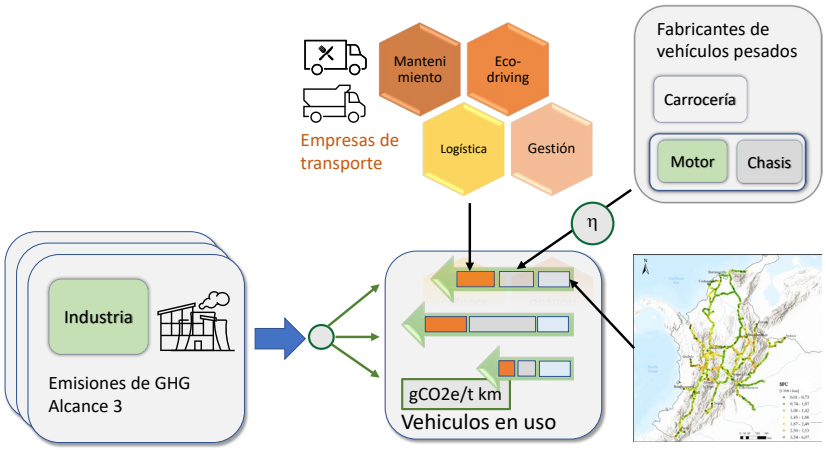


Figura 2.1. Ilustración del ecosistema de las emisiones de GHG de los vehículos de carga en el sistema productivo nacional y de los factores que inciden en el consumo de combustible.

Factores logísticos los cuales están relacionados con la forma en que se usan los vehículos. Incluye la carga transportada, los hábitos de conducción, etc. Todos ellos imputables a las empresas transportadoras. La métrica más apropiada para evaluar la eficiencia en el uso de los vehículos es el consumo específico de combustible por unidad de carga transportada: SFC*(L/100 t-km), donde se incluyen los trayectos donde el vehículo viaja vacío ($P_i = 0$). El valor promedio se obtiene como el consumo total anual de combustible (C) dividido por la sumatoria del producto tonelada transportada (P_i) por kilómetro recorrido (d_i) de cada viaje i (CDM methodology –AMS III S)(UNFCCC, 2012). El valor obtenido permite calcular directamente las emisiones anuales de gases de efecto invernadero (GEI).

Objetivos específicos

En Colombia, el segmento de vehículos de carga aún no ha sido abordado de manera equivalente para el análisis de eficiencia energética, a los vehículos livianos o motocicletas. Para el caso de vehículos pesados usados para el transporte de carga, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), y la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), mediante el contrato # CO-T1663-P006, contrataron al Tecnológico de Monterrey, en colaboración con la Universidad EAFIT, la Universidad de Antioquia, y la empresa INWAY, como parte de la Red Latinoamericana de Investigación en Energía y Vehículos, RELIEVE, para que con el apoyo del Programa Ambiental de las Naciones Unidas y la consultoría de un experto de Sacramento, California, desarrollaran actividades tendientes a:

- Construir la línea base de consumo energético de vehículos de carga nuevos y antiguos considerando la caracterización de la flota en función de subsegmentos, tecnologías, edad, modelos, marcas, así como variables de operación como consumo específico de combustible (L/100 km o L/100 t-km), peso del vehículo (con carga), ruta, velocidad, distancia, gCO_2/km o gCO_2/t-km.
- Proponer la metodología para definir los estándares de eficiencia energética y etiquetado para vehículos de carga en línea con las ambiciones de ascenso tecnológico, de reducción de consumo de combustible y con los compromisos ambientales a 2030 y 2050 de Colombia.

El presente informe (entregable No. 2) reporta los resultados obtenidos relacionados con el primer objetivo tendiente a establecer la línea base de consumo energético de vehículos de carga.

2 Metodología

La siguiente figura ilustra la metodología empleada para determinar la línea base de consumo de combustible en Colombia. Inicialmente se describe la flota de vehículos pesados existente, posteriormente los combustibles que usan, la instrumentación usada para medir las variables relevantes, la campaña de monitoreo realizada y los análisis realizados para obtener las métricas deseadas. A continuación, se describe cada una de estas actividades.

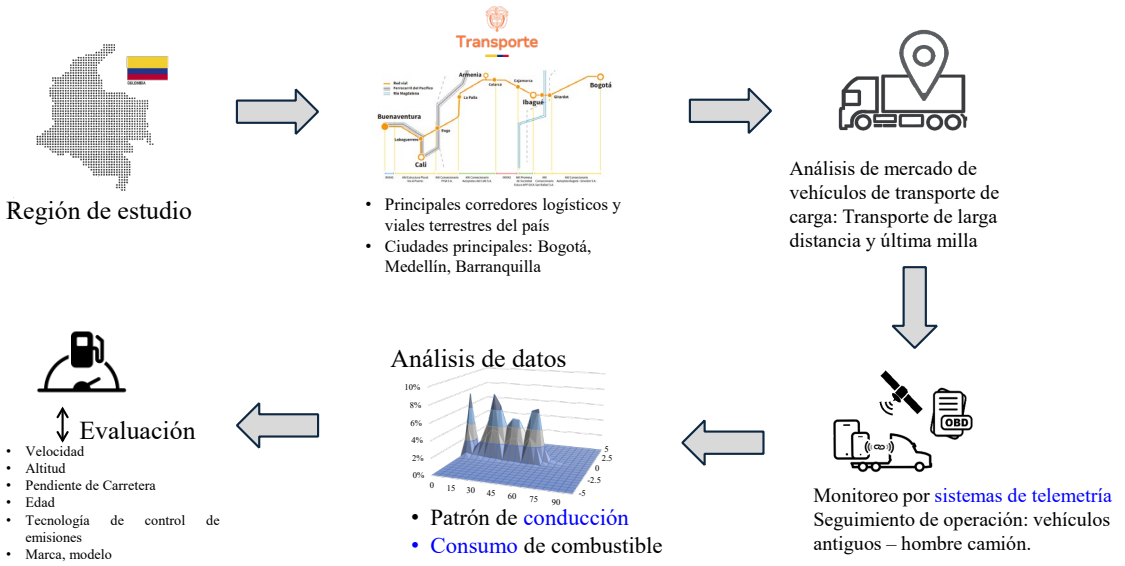


Figura 2.1. Metodología para determinar la línea base de consumo de combustible de la flota de vehículos de carga en Colombia.

2.1 Descripción de la región

Colombia posee características que inciden en el alto consumo de combustible de los vehículos. Es un país de tamaño mediano bajo el contexto de América Latina (LATAM) con una población de ~52 millones de habitantes, concentrados en las principales ciudades: Bogotá (7,9 millones de habitantes), Medellín (2,6), Cali (2,2), Barranquilla (1,3). Estos centros urbanos se encuentran dentro de los tres ramales de la cordillera de los Andes y la Costa Caribe. Algunas ciudades se encuentran a gran altura (Bogotá a 2.650 msnm) y a nivel del mar (Barranquilla). Posee puertos comerciales en ambos océanos (Buenaventura en el océano Pacífico y Barranquilla en la Costa Atlántica). Esto implica que los vehículos de carga de larga distancia suben y bajan estas cordilleras y/u operan a diferentes alturas sobre el nivel del mar. Esta característica de topografía de alta montaña incrementa sustancialmente el consumo de combustible de los vehículos. El consumo de combustible de los vehículos de carga en Colombia es aproximadamente el doble comparado con México en el cual predomina el terreno plano (Huertas et al., 2022; Serrano-Guevara et al., 2023).

Colombia se encuentra en la región ecuatorial, entre 4º de latitud sur y 16º de latitud norte, lo cual hace que posea un clima cálido (33°C) y húmedo (83%) (IDEAM, 2024). Estas condiciones climáticas conllevan a que los usuarios demanden con mayor frecuencia el uso de aire acondicionado

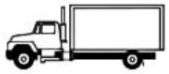
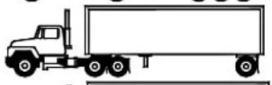
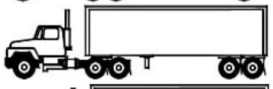
al interior de los vehículos. Este uso del aire acondicionado se ve reflejado en un mayor consumo de combustible (~5%).

2.2 Caracterización de la flota de vehículos de carga en Colombia

Clasificación de vehículos de carga

La Tabla 2.1 muestra la clasificación de los vehículos automotores para transporte de carga acorde a su configuración (Mintransporte, 2004). Se incluye la denominación que se considera análoga a la clasificación de la Resolución Consolidada UNECE/TRANS/WP.29/78/ Rev.6. El Foro Mundial para la Armonización de la reglamentación sobre Vehículos de la Organización de las Naciones Unidas toma como base esta reglamentación para todos los reglamentos asociados. Aunque los vehículos de dos y tres ruedas, como motos y triciclos, se usan como transporte de carga a nivel urbano, no se incluyen en este estudio al no considerarse vehículos pesados. Igualmente, los vehículos no automotores están excluidos del presente estudio.

Tabla 2.1. Clasificación de vehículos automotores de carga en Colombia, por configuración según Resolución 4100 de 2004 y por denominación según UNECE/TRANS/WP.29/78/ Rev.6

Vehículo	Configuración		Descripción	Gráfica	Máximo PBV (kg)	Denominación aproximada (UNECE)
	Detallada					
Camión	C2	C2	Rígido de 2 ejes. Camión sencillo.		16.000	N1
	C3	C3	Rígido de 3 ejes		28.000	N2
	C4	C4(1)	Rígido de 4 ejes. 1 eje direccional y 1 eje trídem.		31.000	N2
		C4(2)	2 ejes direccionales y 1 tándem		36.000	N2
		C4(3)	2 ejes delanteros de suspensión independiente		32.000	N2
Tracto-camión con remolque	2S	2S1	Articulado. 2 ejes y semirremolque de 1 eje		27.000	N2
		2S2	Articulado. 2 ejes y semirremolque de 2 ejes		32.000	N2
		2S3	Articulado. 2 ejes y semirremolque de 3 ejes		40.500	N2
	3S	3S1	Articulado. 3 ejes y semirremolque de 1 eje		29.000	N3
		3S2	Articulado. 3 ejes y semirremolque de 2 ejes		48.000	N3
		3S3	Articulado. 3 ejes y semirremolque de 2 ejes		52.000	N3

Descripción de la población de vehículos de carga

De acuerdo con el Registro Único Nacional de Tránsito, RUNT, Colombia cuenta con 433.294 vehículos de carga, los cuales en su gran mayoría fueron importados (> 99%). Aproximadamente 371.921 vehículos de estos vehículos están activos. La Figura 2.2 y la Tabla 2.2 presentan la composición de los vehículos de carga por configuración y tipo de energía usada. El 85% de los vehículos usan diésel, mientras 12,7% usan gasolina. Se destaca la casi nula participación de vehículos de carga eléctricos (<0,1%) o a gas natural (GNVC, 0,6%). En su gran mayoría están destinados al servicio público (80,5% en la Figura 2.2.b). El 75,9% son de 2 ejes y 72% son camiones. Por otro lado, la Figura 2.2.d) muestra que la gran mayoría de los camiones tienen menos de 10.000 kg de capacidad de carga.

En el Departamento de Cundinamarca se registra una tercera parte de los vehículos de carga del país (124.445). En el Distrito Capital se han registrado un poco más de 20.000 (5,4%). Antioquia, el segundo departamento con más registros, alcanza un 15,7% con 58.350 vehículos de carga. Otro 15% se distribuye entre Santander y el Valle del Cauca. El resto de los departamentos participan con menos del 4% de la población cada uno. De la Figura 2.2.f) se destaca que el 29% de los camiones tiene más de 30 años, mientras que el 56% de los tractocamiones tienen entre 11 y 20 años y un 22% hasta cinco años de antigüedad. De acuerdo con la clasificación de la Tabla 2.1, basada en la resolución 4100 de MinTransporte (2004), el 99% de vehículos registrados están dentro de las configuraciones C2 (74%), C3 (8%), 2SX (2%), y 3SX (14%). Finalmente, la Figura 2.2.e) muestra la participación del mercado de las más de 270 marcas presentes en el país, de las cuales cinco de ellas tienen el 70% de participación, lideradas por Chevrolet con cerca del 30%, la mayoría (89%) por venta de camiones.

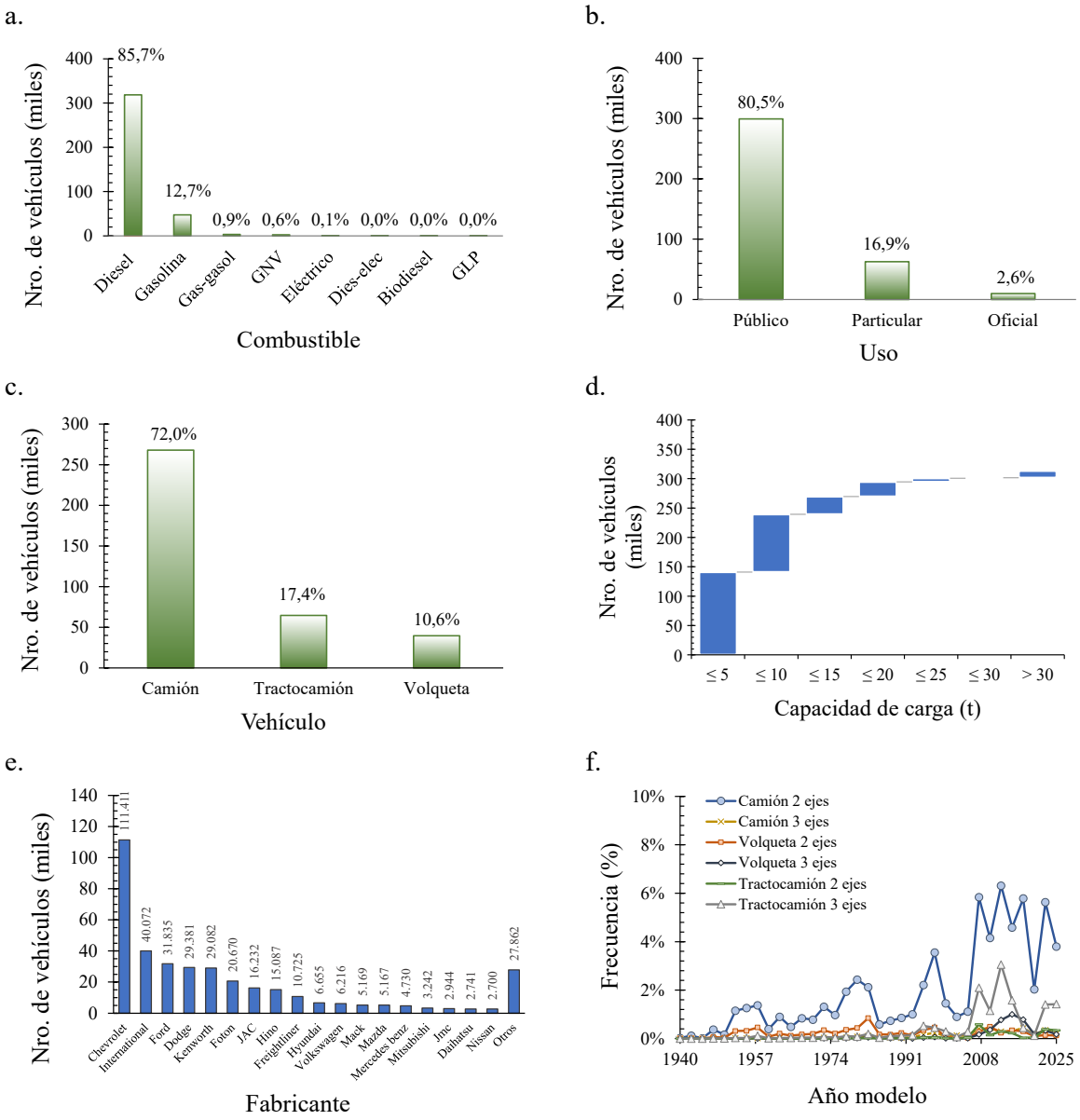


Figura 2.2. Descripción de la composición de la población de vehículos de carga en Colombia. a.) Composición por tipo de combustible usado. b.) Composición por servicio. c.) Composición por tipo de vehículo, d.) capacidad de carga, e.) principales fabricantes y f.) año modelo por tipo de vehículo. Fuente (RUNT).

Tabla 2.2. Composición de la población de vehículos de carga por configuración, clase y combustible usado (RUNT)

Configuración	Clase	Biodiésel	Diésel-eléctrico	**Diésel**	Eléc-trico	Gas-Gasol	Gaso-lina	GLP	GNV	Subtotal	Total
C2	Camión	9	104	20.449	395	3.086	43.467	8	769	251.287	273.707
	Tractocamión	-	-	11	-	-	2	-	-	13	
	Volqueta	-	-	20.679	-	38	1.623	-	67	22.407	
2S	Camión	-	-	-	-	-	2	-	-	2	8.743
	Tractocamión	1	-	8.447	1	-	112	-	180	8.741	
	Camión	-	2	14.443	20	11	490	-	226	15.192	
C3	Camión	-	-	60	-	-	3	-	-	63	31.123
	Tractocamión	2	1	15.773	-	-	59	-	33	15.868	
	Camión	-	-	2	-	-	-	-	-	2	
3S	Camión	10	1	53.239	6	31	1.430	-	994	55.711	55.714
	Tractocamión	-	-	1	-	-	-	-	-	1	
C4	Camión	-	1	1.292	1	-	8	-	19	1.321	2.555
	Volqueta	-	1	1.205	-	1	-	-	15	1.222	
4S	Tractocamión	-	-	9	-	-	3	-	-	12	
Otros/ND	Camión	-	-	78	-	-	1	-	-	79	79
Total		22	110	318.688	423	3.167	47.200	8	2.303	371.921	37.,921

2.3 Fuentes de energía utilizadas en los vehículos de carga

Para comparar el consumo de combustible entre tecnologías que utilizan diferentes fuentes de energía, el consumo de combustible (FC) se expresó en términos de litros equivalentes de diésel (DEL). En Colombia, el contenido energético de un litro de diésel es de 42,42 MJ (Tabla 2.3). De esta forma 1,26 m^3 de gas natural, o 1,2 L de gasolina tienen el mismo contenido energético de un litro de diésel (Tabla 2.3) (UPME, 2016). De manera similar, el consumo de los vehículos eléctricos se expresó en DEL. En este contexto, 1 DEL corresponde a la energía eléctrica promedio que el sistema nacional de generación eléctrica puede producir a partir de 42,42 MJ (10,64 kWh) de energía. Según Corficolombiana, (2021) el sistema eléctrico colombiano tiene una eficiencia de 72%. Por ende, 1 DEL produce 7,24 kWh de energía eléctrica.

Tabla 2.3. Principales fuentes de energía utilizadas en los vehículos de carga en Colombia y sus respectivos factores de emisión.

Combustible	Poder calorífico inferior (kJ/kg)	Densidad (kg/m^3)	Densidad energética (kJ/L)	DEL (L, m^3 o kWh/DEL)	Factor de emisión de CO_2 (EF)					
					TtW ($kgCO_2/TJ$)	TtW ($kgCO_{2e}/TJ$)	WtT* ($kgCO_{2e}/TJ$)	TtW (gCO_2/L, m^3 o kWh)	TtW (gCO_{2e}/L, m^3 o kWh)	WtW (gCO_{2e}/L, m^3 o kWh)
Diésel B10	42.419	852	36.136	1,00	74.193	75.336	17.169	2.681	2.722	3.343
Gas Natural	39.499	0,72	28,58	1,26	55.539	58.910	11.661	1.587	1.684	2.550
Gasolina E10	40.659	741	30.137	1,20	66.778	69.598	18.000	2.012	2.097	3.165
Electricidad**	NA	NA	NA	7,24	0	0	31.111**	0	0	112

* Factores de emisión para estimación de emisiones de gases de efecto invernadero 2024. (GOV.UK, 2024)
** Factor de emisión del Sistema Interconectado Nacional para inventarios de emisiones de GEI (UPME, 2024)
TtW: Tank to Wheel: Emisiones de tanque a la rueda (durante la operación del vehículo); WtW: Well to wheel: Emisiones del pozo a la rueda.

2.4 Instrumentación de los vehículos

Todos los vehículos fueron monitoreados mediante sistemas de telemetría. Estos sistemas se conectan a la red CAN (Controller Area Network) del vehículo y leen los valores instantáneos reportados por los diferentes sensores que el fabricante instala en el vehículo para controlar la operación del motor

y sus periféricos. Se obtienen lecturas de localización, velocidad del vehículo, RPM del motor, y consumo energético. La Tabla 2.4 muestra las características técnicas de estos sensores.

Pepper (2010), Quirama et al., (2020)y SAE, (2020) mostraron que las lecturas de consumo de combustible obtenidas por este método coinciden con mediciones obtenidas mediante diferencia de pesos, el cual es el método recomendado en la industria automotriz (SAE J1082). La localización del vehículo se obtiene mediante GPS con una resolución menor a 3 m. Las RPM del motor se obtienen mediante optoacopladores localizados en el cigüeñal o eje del motor eléctrico, los cuales poseen resoluciones menores a 5 RPM.

Tabla 2.4. Especificación técnica de la instrumentación utilizada en este proyecto.

Dispositivo	GO9/Geotab	Inway
Modelo	GO9 device	Inway-Can
Frecuencia (Hz)	1/15	1/7
Señales adquiridas (unidades y precisión	• Combustible acumulado (L, $\pm 0{,}1$) • Posición: longitud y latitud (grados, $\pm 1E-5$) • Velocidad de vehículo (km/h, ± 1) • Velocidad de motor (RPM, ± 5)	• Energía acumulada (L or kWh, $\pm 0{,}1$) • Posición: longitud y latitud (grados, $\pm 1E-5$) • Velocidad de vehículo (km/h, ± 1) • Velocidad de motor (RPM, ± 5)

2.5 Altitud

Los datos de localización provistos por GPS poseen exactitudes aceptables (<3 m) en el plano horizontal. Sin embargo, por su principio de funcionamiento, los datos reportados de altitud provenientes de GPS poseen incertidumbres inadecuadas para ser usadas en un modelo de eficiencia energética para vehículos. Como alternativa de solución, la altitud se obtuvo a través del Modelo Digital de Elevación (DEM) de la herramienta GPS Visualizer (www.gpsvisualizer.com/elevation) utilizando como entrada la ubicación del vehículo (longitud y latitud). El Instituto Nacional de Vías (*INVIAS*) utiliza postes de referencia ubicados a cada kilómetro sobre las principales carreteras del país, cuya ubicación y altitud e información adicional están disponibles en la página web del Ministerio de Transporte. Cuando el vehículo cruza cerca de un poste de referencia, la altitud se obtuvo como la altitud del puesto de referencia que es reportada por INVIAS. Un análisis de correlación entre estos dos métodos (GPS visualizar e INVIAS) mostró que están altamente correlacionados ($R^2 = 0{,}99$) y reportan valores similares (pendiente ~1).

2.6 Carga transportada

La medición y/o estimación de la carga transportada en vehículos se ha convertido en un elemento estratégico para optimizar la eficiencia energética con que se usan las flotas de transporte y garantizar la sostenibilidad operativa en el sector logístico. Este enfoque es especialmente relevante, considerando que el consumo de combustible, que representa cerca del 50% de los costos operativos de las flotas, está directamente relacionado por variables como el peso de la carga, la planificación eficiente de las actividades y el diseño de las rutas vehiculares. Una gestión adecuada de estos factores no solo permite reducir costos operativos, sino que también contribuye significativamente a disminuir el impacto ambiental de las operaciones logísticas, promoviendo un modelo más sostenible y competitivo en el sector logístico (Huertas et al., 2022; Zhang et al., 2023).

Para determinar el SFC* medido en L/100 t-km es indispensable monitorear la carga transportada por los vehículos. Los vehículos de carga usualmente no incluyen sensores que permitan determinar el peso de la carga transportada. Por ende, los sistemas de telemetría actuales no incluyen esta variable dentro del servicio de monitoreo de los vehículos. En este estudio, la variable de carga transportada fue obtenida mediante dos métodos: El registro Nacional de Despacho de Carga (RNDC) y el uso de sensores de carga.

Registro Nacional de Despacho de Carga

El decreto 1079 de 2015 obliga al generador de carga a reportar la carga transportada en todos los viajes intermunicipales que realicen en el portal Registro Nacional de Despachos de Carga (RNDC) del Ministerio de Transporte. Mediante colaboración con este ministerio, se tuvo acceso al historial de reporte de carga que realizaron los vehículos de transporte de carga entre septiembre 2023 y agosto 2024 por las diferentes vías del país. La Figura 2.3 presenta una descripción de los viajes y de la carga transportada en el período, clasificada por configuración y/o tipo de carga (sólida y líquida). De esta información se destaca:

- Más de 14 millones de viajes, de los cuales el 95% son de carga sólida.
- Los meses con mayor movimiento son de agosto a octubre.
- Anualmente se transportan más de 65 millones de remesas, de las cuales el 75% se realiza en camiones rígidos de 2 ejes, el 2% en camiones rígidos de 3 ejes, el 7% en tractocamiones de 3 ejes y el 16% en tractocamiones de 3 ejes.
- Los camiones de 2 ejes hacen el 64% de los viajes de carga sólida, pero transportan el 19% de la carga total, mientras los tractocamiones realizan el 27% de los viajes llevando el 71% de la carga.
- Por otro lado, los tractocamiones hacen el 77% de los viajes de carga líquida, transportando el 82% del total, mientras que los camiones de 3 ejes mueven el 10% de la carga con un 10% de los viajes. Los camiones de 2 ejes hacen el 11% de los viajes moviendo sólo el 2% de la carga líquida.
- Los viajes más largos son realizados por tractocamiones, con un promedio superior a las 40h de viaje, mientras los camiones de 3 ejes tienen el promedio más bajo (27h), la cual sigue siendo una duración alta. La duración promedio de viaje es de 37 h.

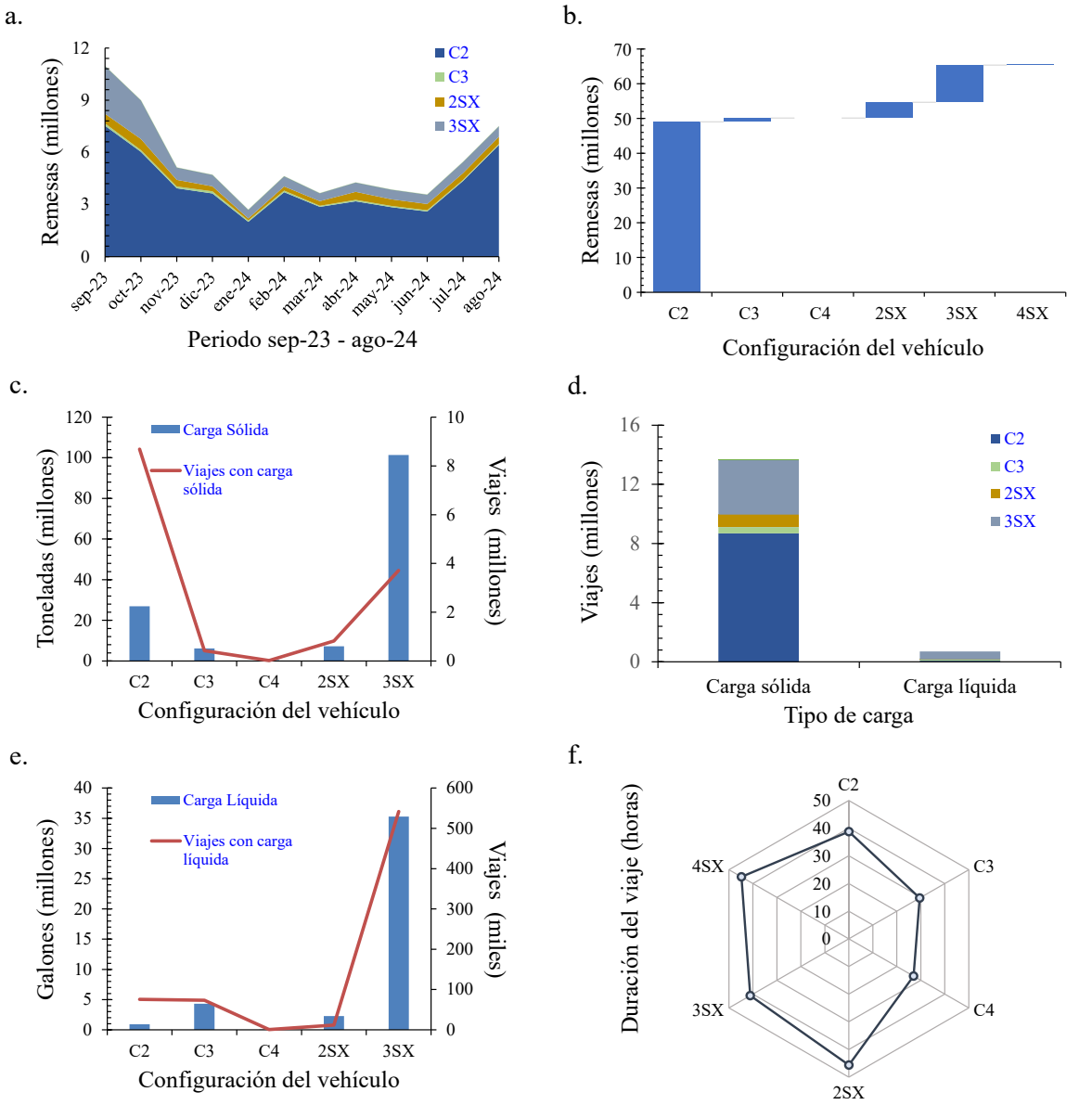


Figura 2.3. Carga transportada en Colombia de septiembre 2023 a agosto 2024 acorde con RNDC. (a) serie mensual de remesas totales por configuración. (b) remesas totales en el período por configuración. (c) Carga sólida por configuración. d) Viajes totales por tipo de carga. (e) Carga líquida por configuración. (f) Duración promedio de los viajes por configuración (RNDC, 2024).

Sensor de carga

Para propósitos de evaluar el desempeño energético de los vehículos que operan dentro de la ciudad o aquellos que no están obligados a reportar la carga transportada se hace necesario contar con un sensor que mida la carga transportada y que pueda ser acoplado al sistema de telemetría con el que se monitorea la operación de los vehículos. Debe ser resistente a la intemperie y a las vibraciones. Debe contar con un rango de medición 0 a 50 toneladas y una precisión deseable inferior al 5%. Adicionalmente, debe ser de bajo costo (< 100 USD) con el propósito de tener la posibilidad de conectar uno o dos a cada vehículo.

Se exploraron versiones comerciales de potenciómetros angulares, potenciómetros lineales y sensores de ultrasonido que miden la carga transportada como la deflexión (variación en altura promedio) del chasis del vehículo. Adicionalmente, se exploraron galgas extensiométricas y celdas de carga que miden el peso de la carga transportada como la variación en los esfuerzos generados en resortes y ballestas de la suspensión del vehículo. También se encontró que es factible medir la carga transportada como variaciones en la presión en vehículos con sistema de suspensión neumática. Sin embargo, los vehículos usados para el transporte de carga usualmente tienen sistemas de suspensión de resorte y ballestas. Se evaluó la aplicabilidad de estos sensores mediante pruebas en laboratorio y en carretera. Finalmente, usando los criterios de diseño especificados, se concluyó que el sensor de ultrasonido es el más adecuado para la medición del peso transportado en vehículos de carga.

La empresa INWAY adaptó su sistema de telemetría para incluir la lectura del sensor de ultrasonido dentro de las variables monitoreadas de la operación de los vehículos. Este sensor se instaló en 10 vehículos buscando incluir múltiples tecnologías vehiculares, fuentes de energía, operación urbana e interurbana. Cada sensor fue calibrado usando datos del RNDC o del peso registrado por las empresas monitoreadas. El Anexo 2A describe en detalle el trabajo realizado seleccionando y adaptando sensores para monitorear el peso transportado en vehículos de transporte de carga por medio sistemas de telemetría.

2.7 Campaña de monitoreo

En este informe se reporta el monitoreo en tiempo real de 1.164 vehículos de carga durante los últimos cinco años de operación. Estos vehículos fueron equipados con diferentes sistemas de medición para registrar tanto datos instantáneos como acumulados desde su instrumentación. Entre las variables monitoreadas se incluyen el consumo total de combustible, la distancia total recorrida, la velocidad promedio, entre otras.

La Tabla 2.5 presenta las principales fuentes de información utilizadas para calcular el consumo específico de combustible reportado en este estudio. Entre estas se incluyen resultados de investigaciones previas, como las de Díaz et al. (2017) y Huertas et al. (2022), quienes monitorearon aproximadamente 70 vehículos durante largos períodos. Asimismo, se incorporaron los resultados de UPME (2023), donde se determinó el factor de emisión de aproximadamente 31 vehículos de carga utilizando un ciclo de conducción y sensores comerciales para medir el consumo de combustible y las emisiones vehiculares.

Adicionalmente, a través de convenios de colaboración con diversas empresas, se obtuvo información operativa de más de 1.000 vehículos de carga pertenecientes a las configuraciones vehiculares enumeradas en la Tabla 2.1. Estos vehículos operan en las principales ciudades y corredores logísticos del país.

La Figura 2.4 muestra la distribución por configuración y tipo de combustible de los vehículos monitoreados en este estudio. Los vehículos tipo volqueta registrados en el RUNT corresponden a la clasificación de camión rígido según la resolución 4100 del MinTransporte (ver Tabla 2.1). Además, los camiones rígidos de dos ejes se han subdividido en dos configuraciones según su capacidad de carga: C2P para aquellos con una capacidad máxima de 5.5 toneladas y C2G para los de mayor

capacidad (~12 toneladas). En cuanto a las configuraciones 2SX y 3SX, el dígito numérico indica el número de ejes del tractor (unidad motriz del tractocamión), mientras que la X representa el número de ejes de la unidad de arrastre (semirremolque) en la parte posterior, que, según el RNDC, típicamente puede ser dos o tres. Es importante destacar que este estudio abarca el 99% de las configuraciones registradas en el RUNT, incluyendo vehículos que utilizan diésel y gas natural como fuentes de energía.

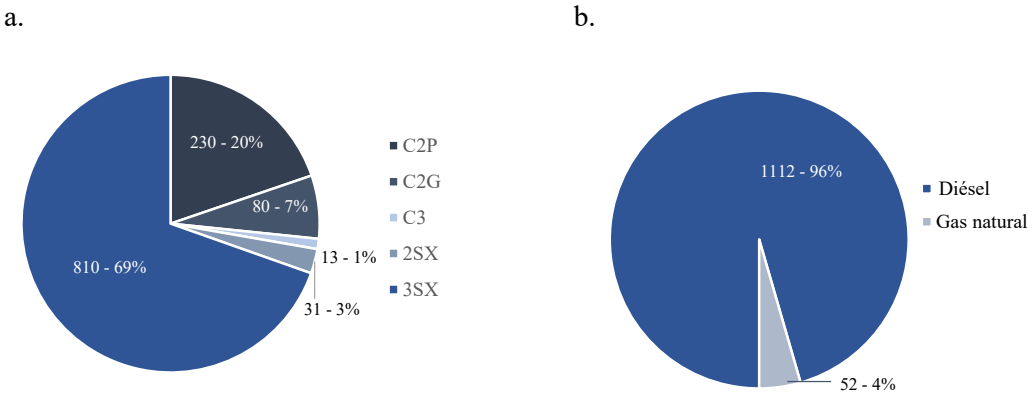


Figura 2.4. Descripción de la muestra de vehículos de carga monitoreados en el presente estudio.

Bajo ciclo de conducción se monitorearon 31 vehículos de carga, de los cuales 21 son de año modelo entre 2018 y 2023. Para estos vehículos se obtuvieron 65 pruebas válidas, con un total de 286 litros de combustible, 684 km recorridos y una actividad de 6.639 t-km. Por otro lado, bajo condiciones normales de operación se reporta 404 k viajes, 51,1 M de km recorridos, 23,2 M de litros equivalentes de diésel (DEL) utilizados. 132k de estos viajes reportan carga transportada, con una actividad total de 508 M de t-km y 23,2 M de DEL.

Para la interpretación de los resultados, los 1.164 vehículos monitoreados en este proyecto fueron clasificados según su afiliación empresarial. Se identificó que pertenecen a ocho empresas que prestan servicios de transporte de carga. Una de estas empresas representa el 3,22% de total de carga transportada en 2023 (reporte RNDC) y dos de ellas un 0,05% cada una. Adicionalmente, los vehículos no asociados a una empresa se identifican como pertenecientes a la empresa de telemetría responsable del monitoreo, alcanzando un total de nueve empresas de transporte involucradas en este estudio.

Tabla 2.5. Resumen de los datos recolectados durante la campaña de monitoreo realizada en el presente proyecto. Fuentes de información utilizadas para determinar la línea base de consumo energético de los vehículos de carga en Colombia.

Fuente	Periodo	Viajes totales (#)	Tipo de viaje	Alcance de viaje	# de vehículos	# de tipos de vehículos	Consumo (L)	Emisiones (Sí/No)	Distancia (km)	Peso	Comentarios
FECOC +	2021-2022	C2: 53 ciclos C3: 54 ciclos TC: 54 ciclos	Ciclo de conducción en carretera	Urbano e intermunicipal	31 (3 altitudes)	C2: 4 por altitud C3: 4 por altitud + 1 TC: 4 por altitud	626	Sí	1.576	Sí. Neto	Recorridos de aprox. 10 km siguiendo DC. Datos instantáneos.
LAP	2019	30	Operación real	Principales corredores logísticos y ciudades	25	C3: 8 TC: 17	8.600	No	16.300	No	Datos consolidados de cada viaje.
CRJD	2014	526	Operación real	Principales corredores logísticos	19	5	144k	No	295k	Sí	Viajes logísticos
OS	2018-2020	835	Operación real	Principales corredores logísticos	45	2S2: 3 C3: 4 3S3: 38	274k	No	432k	Sí	"Segundo a segundo" Procesado por viaje y por tipo de vehículo y datos del RNDC
CM	2024	216	Operación real	Ciudades principales y corredores logísticos	24	C2P: 112 3SX: 104	25k	No	76k	No	Operación mensual
DTR	2024	282	Operación real	Corredores logísticos	144	Gas natural: 52 Diésel:92	912k	No	1,6M	Sí	Flota diésel y gas natural
CCT	2024	43k	Operación real	Ciudades y corredores logísticos	336	C2P: 170 C2G: 41 2SX: 9	2,49M	No	8,99M	Sí	Flota diésel
Trsr	2024	3.221	Operación real	Corredores logísticos	327	3SX: 327 3SX C2P: 32	10,84M	No	20,18M	Sí	Flota diésel
LAP	2020 - 2024	374k	Operación real	Ciudades y corredores logísticos	235	C2G: 21 C3: 9 2SX: 5 3SX 168	8,7M	No	19,9M	Sí (28%)	Viajes logísticos (origen y destino)

2.8 Análisis de calidad de los datos

Consideramos los datos solo cuando el motor del vehículo estaba en marcha, lo que significa que la velocidad del motor estaba por encima del rango de ralentí (>500 RPM), y los valores de velocidad del vehículo eran físicamente plausibles (0-120 km/h). En el caso de los ciclos de conducción, los perfiles obtenidos de la monitorización del vehículo debían tener una diferencia relativa inferior al 5% con respecto al perfil de velocidad-tiempo de los datos originales del ciclo de conducción. Para evaluar la eficiencia energética del vehículo, se descartaron los viajes o pruebas con valores de SFC superiores al percentil 99 o inferiores al percentil 1 en cada configuración de vehículo, con el fin de eliminar los valores atípicos o extremos que podrían no ser representativos de las condiciones normales de operación. En las secciones anteriores y posteriores, solo se informan los datos válidos después del análisis de calidad de datos antes mencionado.

2.9 Análisis de datos

Una vez recolectado los datos de monitoreo de la operación cotidiana de los vehículos pesados en Colombia, se consolidó una base de datos donde para cada vehículo analizado se reporta un identificador del vehículo, categoría/configuración (Tabla 2.1), y los valores promedio durante la campaña de monitoreo de SFC (L/100 km), SFC*(L/100 t-km), η (%) y EI* (gCO2e/t-km). En esta sección se reporta el proceso de consolidar dicha base de datos.

El índice de emisión se calcula multiplicando el factor de emisión de la Tabla 2.3 por la cantidad de combustible o energía consumida, la cual es reportada por el sistema de telemetría. En este informe, las emisiones de gases de efecto invernadero se reportan mediante un análisis de pozo a rueda (Well-to-Wheel, WtW), el cual incluye la evaluación de las emisiones generadas durante la producción, transporte y distribución del combustible, así como las emisiones generadas durante su uso en el vehículo.

2.9.1 Vehículos nuevos

La eficiencia energética de un vehículo - (η) (Ecuación 2.1) se define como la fracción de la energía consumida por el vehículo (E_s) que es convertida en trabajo mecánico que realizan las ruedas de tracción en la interfase rueda-carretera (W_x). Es importante destacar que para la evaluación de esta métrica de eficiencia energética (η) debe excluirse los períodos de ralentí. Al adicionar los consumos de energía en los periodos de ralentí el valor obtenido empieza a depender de la forma como se usa el vehículo y se pierde la bondad de la métrica de eficiencia que aísla los demás factores y evalúa exclusivamente la tecnología vehicular. De no excluirse los períodos de ralentí, el resultado variaría en función del tiempo que el vehículo pase en esta condición, lo que no reflejaría de manera precisa el desempeño de la tecnología. Durante el ralentí, el motor consume energía sin generar trabajo útil, por lo que la eficiencia energética en esos momentos es cero. De acuerdo con la Ecuación 2.1, la eficiencia global del vehículo es la pendiente de la gráfica *Wx vs Es*, la cual se puede obtener después de un análisis de regresión lineal entre estas dos variables.

$$\eta = \frac{W_x}{E_s} \tag{2.1}$$

$$E_s = \rho\, V_f\, LHV \tag{2.2}$$

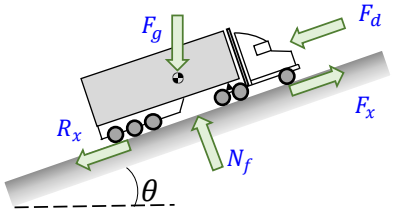
$$E_s = \int V\, I\, dt \tag{2.3}$$

Determinación de Es

Para el caso de vehículos propulsados por motores de combustión interna, la energía consumida por el vehículo (*Es*) es igual al contenido de energía química contenido en el combustible consumido (Ecuación 2.2) durante la prueba o viaje monitoreado. En la Ecuación 2.2 ρ es la densidad V_f el volumen acumulado de combustible consumido, y *LHV* el poder calorífico inferior del combustible. Para el caso de vehículos propulsados por motores eléctricos la energía consumida (*Es*) corresponde a la energía eléctrica suministrada por el paquete de baterías (Ecuación 2.3). En la Ecuación 2.3 *V* el voltaje e *I* la corriente instantánea suministrada por la batería.

Determinación de Wx

Para pruebas en carretera siguiendo un ciclo de conducción u observando las condiciones normales de operación del vehículo durante un viaje a 1 Hz, W_x es el trabajo necesario para propulsar el vehículo bajo las condiciones externas de pendiente de la carretera, resistencia a la rodadura y fuerza aerodinámica y que además satisface la demanda de velocidad y aceleración requerida por el conductor (Huertas et al., 2022). Las Ecuaciones 2.4-2.11 permiten calcular W_x usando los datos instantáneos de velocidad y pendiente de la carretera (Gillespie, 1992).



$$W_x = \int P_x \, dt = \int F_x \, V dt \quad (2.4)$$

$$F_x = F_i + R_x + F_d + F_g \quad (2.5)$$

$$F_i = M \, m_{f_i} \, a \quad (2.6)$$

$$R_x = f_r \, M \, g \cos\theta \quad (2.7)$$

$$F_d = \frac{1}{2} \, c_d \, A_f \, \rho_{air} \, V^2 \quad (2.8)$$

$$F_g = M \, g \sin\theta \quad (2.9)$$

$$m_{f_i} = 1 + 0.04\left(N_{TD_i}\right) + 0.0025\left(N_{TD_i}\right)^2 \quad (2.10)$$

Donde:
M: Masa total del vehículo
V: Velocidad del vehículo
a: Aceleración del vehículo
fr: Coeficiente de Resistencia a la rodadura
θ: Pendiente de carretera
c_d: Coeficiente de arrastre/aerodinámico
A_f: Área transversal/de arrastre
ρ_{air}: Densidad del aire
N_{TD_i}: Relación de transmisión instantánea
m_{f_i}: Factor de masa para masa equivalente
F_g: Fuerza de gravedad
F_d: Fuerza aerodinámica
R_x: Fuerza de resistencia a la rodadura
F_i: Fuerza inercial
F_x: Fuerza de tracción (fuerza en rueda)
P_x: Potencia en rueda
W_x: Trabajo de tracción

Determinación del SFC

La determinación del consumo especifico de combustible (SFC) en L/100 km se realiza mediante la Ecuación 2.11, donde V_f es el volumen acumulado de combustible consumido medido mediante alguna de las técnicas especificadas en la sección 2.5 y L la distancia recorrida durante el ciclo de conducción o viaje monitoreado.

$$SFC = \frac{V_f}{L} \, 100 \quad (2.11)$$

Para determinar *SFC* en vehículos nuevos mediante pruebas sobre dinamómetro de chasis, se requiere modificar la programación del dinamómetro para simular el peso total del vehículo (peso del vehículo más carga útil). Adicionalmente se requiere un dinamómetro con la capacidad de soportar la carga por eje de estos vehículos que bajo la regulación en Colombia debe ser máximo de 11 toneladas para eje sencillo y cuatro llantas, 22 toneladas para eje doble y ocho llantas, y 24 toneladas para eje triple y 12 llantas (Mintransporte, 2004). Finalmente, se requiere de un proceso de verificación que los resultados del dinamómetro reproducen los resultados observados en carretera. En la práctica, la determinación de esta métrica, en la mayoría de los casos no se realizan sobre dinamómetro de chasis. El método recomendado para la determinación de esta métrica es mediante pruebas en pista, en cuyo caso el vehículo debe simular la carga nominal mediante tanques de agua o bolsas de arena (UPME, 2023).

Para obtener valores representativos de esta métrica para vehículos nuevos bajo condiciones reales de operación en Colombia se debe observar el valor promedio de dicha métrica después de los 5.000 km de uso del vehículo, esto con el fin de conseguir estabilidad en la incertidumbre o porcentaje de error generado durante el periodo de monitoreo. Ver Anexo 2B sobre la distancia mínima requerida para obtener valores estables y representativos de SFC. No se espera que los valores obtenidos de SFC bajo condiciones reales de operación coincidan con los valores obtenidos mediante pruebas sobre dinamómetro o en ruta siguiendo ciclos de conducción por cuanto el SFC es fuertemente influenciado por la carga transportada y los estilos de manejo del conductor.

*Determinación del SFC**

El consumo especifico de combustible por carga transportada (*SFC*)* expresada en L/t-km se calcula mediante la Ecuación 2.12 donde *P* es la carga útil transportada. Se resalta que esta carga *P* excluye el peso del vehículo vacío.

$$SFC^* = \frac{V_f}{P\,L} \tag{2.12}$$

Por las razones expresadas anteriormente, el *SFC** pocas veces se obtiene mediante pruebas sobre dinamómetro de chasis. Se prefiere obtener mediante pruebas en pista. En este caso *P* corresponde a la carga nominal del vehículo. Es decir, la carga máxima declarada por el fabricante que por diseño puede transportar el vehículo. Al igual que en la determinación de SFC, el vehículo debe simular la carga nominal mediante tanques de agua o bolsas de arena.

El *SFC** también se puede obtener observando las condiciones normales de operación de los vehículos bajo las condiciones locales de uso. En este caso se debe observar el valor promedio de dicha métrica después de los 5.000 km de uso del vehículo. Ver Anexo 2B sobre la distancia mínima requerida para obtener valores estables y representativos de *SFC**. De nuevo, no se espera que los valores obtenidos de *SFC** bajo condiciones reales de operación coincidan con los valores obtenidos mediante pruebas sobre dinamómetro o en ruta siguiendo ciclos de conducción por cuanto el *SFC** es fuertemente influenciado por la carga transportada y los estilos de manejo del conductor. La métrica de *SFC** es la métrica más cercana a los valores observados por los usuarios. Adicionalmente, tiene la ventaja que incluye explícitamente la carga transportada.

2.9.2 Vehículos en uso

Para el caso de vehículos en uso, se evaluó la eficiencia energética en el uso del vehículo para transportar carga. Como se describió en las secciones anteriores, el consumo energético real de los vehículos de carga es afectada por condiciones externas (topografía, clima, estado de las vías), la tecnología del vehículo y la forma como usa el vehículo. Este último factor es responsabilidad de las empresas de transporte de carga.

La métrica más apropiada para evaluar la eficiencia en el uso del vehículo es el consumo energético especifico por carga transportada (*SFC**, DEL/100 t-km). En este caso el *SFC** se obtiene mediante la Ecuación 2.12 pero se evalúa exclusivamente monitoreando permanentemente la operación de los vehículos. Se obtiene un valor promedio representativo por empresa. Sin embargo, dado que las características de operación de cada empresa son diferentes, el valor obtenido de *SFC** solo es comparable contra valores históricos obtenidos de esta métrica dentro de la misma empresa. El mayor inconveniente de esta métrica es la falta de familiaridad de las comunidades involucradas con el concepto de DEL. Sin embargo, este concepto es esencial para comparar el desempeño de diferentes tecnologías al interior de cada empresa de transporte.

En respuesta a este inconveniente, surge el uso del índice de emisión de gases de efecto invernadero EI_{CO2} expresado en gCO_{2e}/t-km como métrica para evaluar la eficiencia energética con la cual se usan los vehículos en las empresas de transporte. Esta métrica se obtiene como el promedio ponderado por actividad (t-km) resultante de multiplicar el consumo específico (*SFC**) por el factor de emisión listado en la Tabla 2.3.

$$EI_{CO2e} = \frac{\sum v_{f\,i,j,k}\ EF_k}{\sum P_{i,j,k}\ L_{i,j,k}} \quad (2.13)$$

En la Ecuación 2.13 los subíndices corresponden al vehículo *i*, en el viaje *j*, el cual usa fuente energética *k*. La suma se debe realizar sobre todos los vehículos de la empresa, y todos los viajes realizados incluyendo aquellos donde los vehículos viajan vacíos.

2.9.3 Consumo de combustible en los principales corredores logísticos de Colombia

Para este trabajo se consideraron los viajes de transporte de carga que se realizan a lo largo de los diferentes corredores logísticos de Colombia. Los corredores logísticos se refieren a la infraestructura que facilita el intercambio y desarrollo del comercio en el país, a través de los cuales se moviliza la carga tanto del comercio exterior como del comercio interno. Un corredor logístico articula integralmente uno o varios orígenes y destinos en aspectos como la infraestructura de transporte, el flujo de información y comunicación, las prácticas comerciales y las actividades que facilitan el comercio (Decreto 1478, 2014) Los corredores logísticos están definidos por el Ministerio de Transporte en su portal logístico(Mintransporte, 2021). El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) utiliza un código de seis dígitos para identificar las carreteras del país mediante *postes de referencia*. Los dos primeros dígitos representan el nombre de la ruta (principales ciudades de origen y destino), los dos siguientes especifican el tramo de la ruta (lugares secundarios que conecta), y los dos últimos se refieren a la posición (en kilómetros) de ese punto en la ruta. Por ejemplo: 4001-37; el 40 es la ruta entre la costa pacífico y los llanos orientales; 01 corresponde al tramo entre Buenaventura y Buga, ambos en el departamento de Valle del Cauca, y el 37 corresponde al km 37 de ese tramo de vía. En la Tabla 2.6 se resumen las principales características de los ocho corredores logísticos de Colombia.

Tabla 2.6. Características de los corredores logísticos considerados en este trabajo.

ID	Corredor logístico	Principales ciudades	Máx Altura (msnm)	Mín Altura (msnm)	Máx pendiente [%]	Distancia* [km]
1	Bogotá – Costa Caribe	Bogotá, Puerto Boyacá, Ciénega, Barranquilla, Cartagena	2.840	0	8,7	2.225
2	Bogotá – Buenaventura	Buenaventura, Cali, Bogotá, Popayán, Pasto, Ipiales	3.246	0	13,5	1.617
3	Bogotá – Cúcuta	Bogotá, Tunja, Bucaramanga, Cúcuta	3.850	70	6,6	1.477
4	Medellín – Costa Caribe	Medellín, Cartagena, Montería, Cali, Manizales	3.672	0	7,4	2.446
5	Medellín – Bucaramanga	Medellín, Barrancabermeja, Bucaramanga	1.546	67	5,3	450
6	Bogotá – Villavicencio	Bogotá, Duitama, Yopal, Aguazul, Villavicencio	3.465	220	6,7	831
7	Bogotá – Orinoquía	Arauca, Saravena, Yopal, Villavicencio, San José del Guaviare	645	120	2,5	1.218
8	Bogotá – Putumayo	Bogotá, Puerto Asís, Mocoa, Neiva	2.785	260	6,7	793

** Se considera como la suma de la longitud de los tramos de carretera en los corredores.*

Como se describió anteriormente, el INVIAS utiliza postes de referencia ubicados a cada kilómetro sobre las principales carreteras del país, cuya ubicación y altitud e información adicional están disponibles en su página web.

Para cada poste de referencia se determinó el promedio de la velocidad y el consumo real de combustible de los vehículos cuando cruzan dicho poste. Dentro del cálculo de valores promedio se incluyeron datos ~100 m antes y después de la ubicación del poste de referencia. Se amplió esta distancia hasta 500 m y no se observó diferencias relevantes en los resultados obtenidos. A medida que se incrementa el intervalo de observación, la variabilidad de los valores promedio disminuye, ya que los errores o condiciones locales tienden a cancelarse al promediar los datos. Los resultados se reportaron como el consumo específico de combustible (*SFC*) expresado en litros de combustible por cada 100 km recorridos.

Se tuvo en cuenta que las carreteras de doble sentido tienen el mismo poste de referencia para cada sentido de la carretera. Por lo tanto, es necesario realizar un seguimiento de la dirección de desplazamiento de los vehículos al momento de analizar los datos.

3 Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos aplicando la metodología descrita en la sección anterior. Estos resultados constituyen la línea base de eficiencia energética de los vehículos de carga en Colombia para el año 2024.

3.1 Eficiencia energética en vehículos nuevos

Asumiendo que la eficiencia energética de los vehículos pesados no varía sustancialmente durante sus primeros años de operación, y usando la metodología descrita en la sección 2, se obtuvo los resultados mostrados en la Figura 2.5. Estos datos incluyen datos de eficiencia obtenidos observando la operación cotidiana de los vehículos y las obtenidas en pruebas en pista siguiendo ciclo de conducción. Se observa (Figura 2.5.a) que la eficiencia energética de los vehículos pesados usados para el transporte de carga varía entre 26% y 40% con tendencias centrales entre 27% y 33% dependiendo de la configuración del vehículo (Tabla 2.7).

Evolución de la eficiencia energética de los vehículos nuevos

La Figura 2.5.b) muestra la evolución de la eficiencia energética de los vehículos de carga en función del año modelo y de la certificación de emisiones de gases (Figura 2.5.c), las cuales se obtuvo monitoreando los vehículos entre el año 2021-2024 por medio de telemetría en Colombia. Esta figura muestra variaciones estadísticamente despreciables en la eficiencia energética con el año modelo y la tecnología de postratamiento de gases (certificación de emisiones). Este resultado posiblemente se deba a que las mejoras en consumo energético desarrolladas por los fabricantes sean contrabalanceadas por el incremento asociado a la operación de sistemas de postratamiento de gases de escape que los mismos fabricantes han adicionado para satisfacer las regulaciones cada vez más exigentes sobre emisiones contaminantes.

Tabla 2.7. Eficiencia energética de vehículos de modelo reciente discriminada por configuración. (η) *se obtuvo monitoreando la operación normal de los vehículos. SFC y EI se obtuvieron mediante pruebas en pista siguiendo el ciclo de conducción de vehículos de carga.*

Configuración	Combustible	η (%)	SFC (DEL/100 km)	EI (g CO2e/km)
C2P	Diésel	27,52 ± 0,92	16,89 ± 1,04	564 ± 34,86
C2G		31,90 ± 2,47	38,69 ± 2,99	1.293 ± 99,89
C3		28,29± 0,90	NA	NA
2SX		31,60 ± 0,76*	NA	NA
3SX		33,40 ± 0,24	61,85 ± 5,88	2.067 ± 196,72

* Eficiencia promedio de vehículos en uso (año modelo >2021) de esa configuración y combustible
NA: no se monitoreó bajo el protocolo establecido el consumo de combustible de dicha configuración

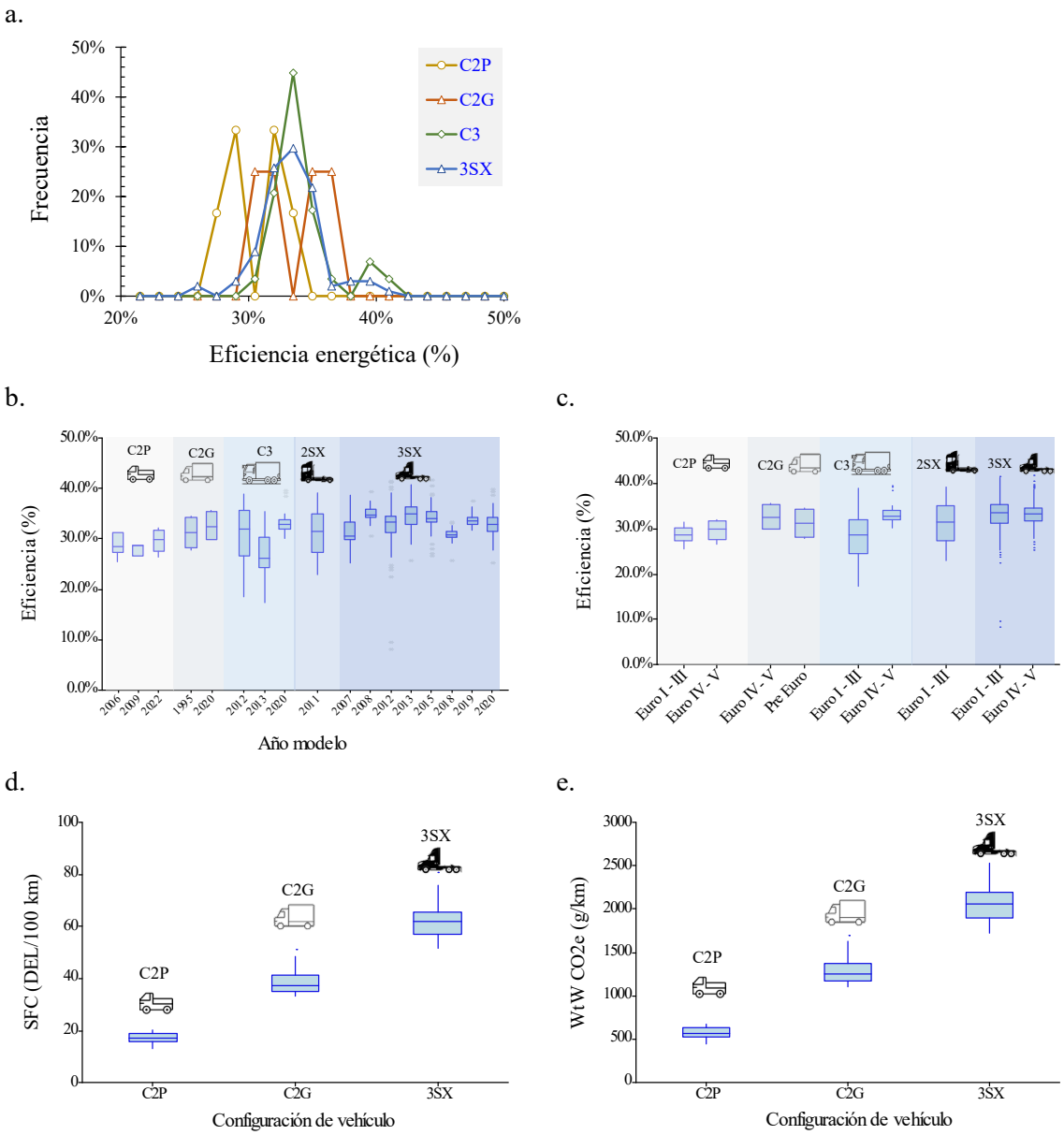


Figura 2.5. Eficiencia energética de vehículos de carga operando en Colombia entre los años 2021-2024. a.) Distribución de frecuencias de eficiencia energética para vehículos de carga de años modelo recientes (>2018); b.) evolución anual de la eficiencia energética y d.) evolución por tipo tecnología de control de emisiones. a, b y c se obtuvieron monitoreando los vehículos bajo condiciones reales de operación siguiendo la metodología propuesta en este estudio (telemetría más registro de carga transportada). d.) SFC y e.) GEI (WtW) por configuración siguiendo ciclo de conducción para vehículos pesados obtenido mediante pruebas en carretera.

Como se describió en la sección 2.9.1, la eficiencia energética de los vehículos también se puede expresar como consumo especifico (SFC) mediante prueba en carretera siguiendo un ciclo de conducción. Las Figuras 2.5.d-e) muestra los resultados reportados en UPME (2023) cuando los

vehículos siguen en pista el ciclo de conducción respectivo para su configuración vehicular. No se encuentran disponibles resultados de consumo especifico mediante pruebas sobre dinamómetro de chasis. Se destaca que los fabricantes de vehículos pesados no reportan esta información en Colombia, ya que no se ha establecido un formato para hacerlo. Las Figuras 2.5.d-e) muestran que estos valores de *SFC* e *EI* dependen fuertemente del tamaño del vehículo, lo cual dificulta el uso de esta métrica para propósitos comparativos entre tecnologías.

3.2 Vehículos en uso

La Figura 2.6 y la Tabla 2.8 muestran la línea base de consumo de combustible de los vehículos de carga en Colombia para el año 2024. Esta fue obtenida exclusivamente observando la operación normal de diversas tecnologías de vehículos operando en diferentes empresas de transporte (E1-E9), así como el registro nacional de despacho de carga (RNDC). Se presenta el promedio ponderado (la relación entre litros consumidos y kilómetros recorridos durante el monitoreo), junto con el intervalo de confianza del 95%. Según el teorema del límite central, los promedios siguen una distribución normal para cada tipo de configuración vehicular y de combustible. Como se describió anteriormente estas métricas (*SFC, SFC*, EI, EI**) dependen de las condiciones particulares de operación de cada empresa y por tanto los valores reportados solo pueden ser usados para evaluar las mejoras en el desempeño de la empresa un año tras otro. La Figura 2.6.a) muestra que el *SFC* no necesariamente varía de acuerdo con el tamaño del vehículo, como en la comparación entre las configuraciones C3, 2SX y 3SX. Este resultado se debe a que el SFC depende además de múltiples factores adicionales y operacionales. También confirma que la métrica de *SFC* o *SFC** no puede ser usada para comparar tecnologías vehiculares, excepto cuando el vehículo sigue el mismo ciclo de conducción.

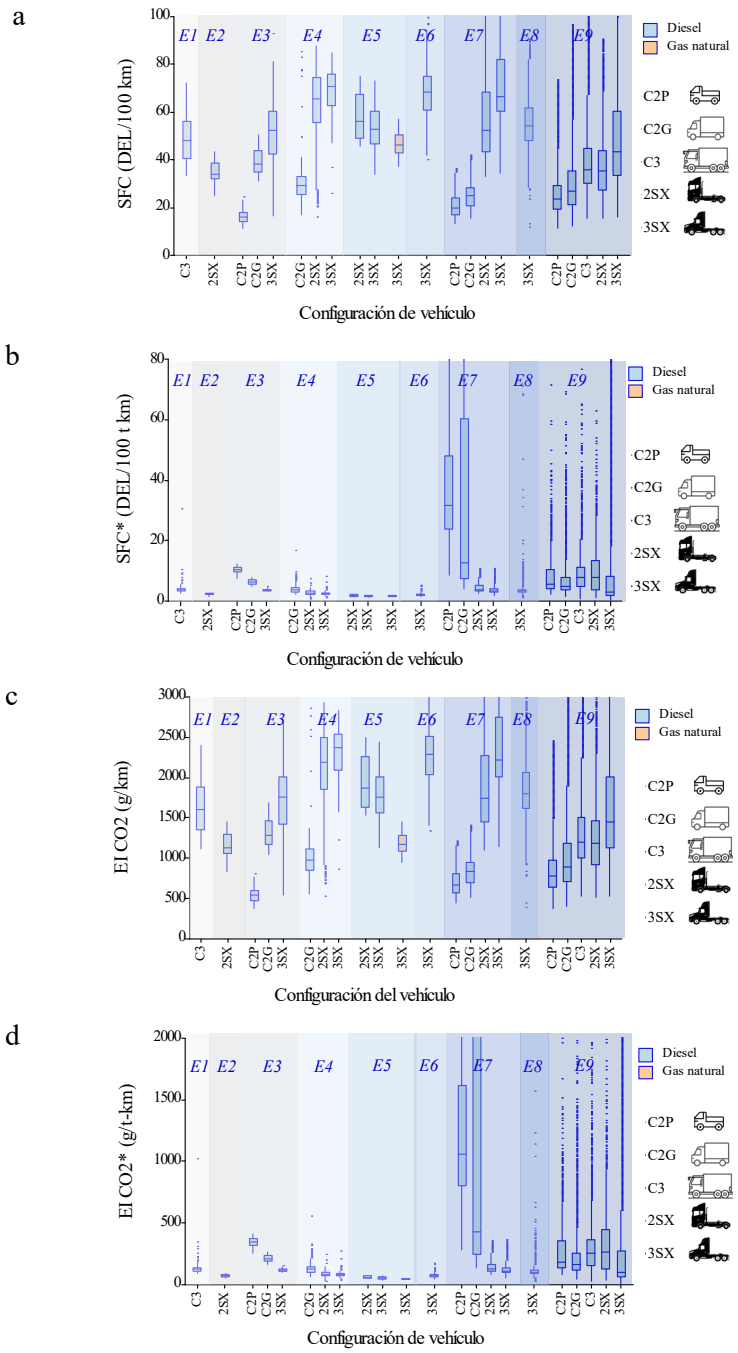


Figura 2.6. Línea base 2024 de consumo de combustible de vehículos de carga en uso en Colombia obtenida observando la operación normal de los vehículos mediante telemetría en combinación con el registro nacional de carga. a.) SFC y b.) SFC por configuración vehicular y empresa. c). EI y d.) EI* por configuración vehicular y empresa. E1-E7 indican las empresas monitoreadas.*

Tabla 2.8. Consumo típico de combustible de vehículos pesados en Colombia, obtenidos monitoreando la operación cotidiana de los vehículos mediante telemetría en combinación con el registro nacional de carga.

Emp	Comb – config	Vehículos	Viajes	Viajes cargados	SFC (DEL/100 km)	SFC* (DEL/100 t-km)	EI (g CO2e /km)	EI* (g CO2e /t-km)
1	D – C3	4	119	119	46,31 ± 1,69	3,64 ± 0,49	1.548 ± 56,40	121,74 ± 16,46
2	D – 2SX	3	45	45	34,65 ± 1,35	2,04 ± 0,08	1.158 ± 45,29	68,13 ± 2,66
	D – C2P	28	163	51	15,23 ± 0,40	10,04 ± 0,33	509 ± 13,50	335,74 ± 10,91
3	D – C2G	10	49	49	39,77 ± 1,55	6,20 ± 0,23	1.329 ± 51,73	207,39 ± 7,73
	D – 3SX	16	166	50	40,98 ± 2,33	3,41 ± 0,10	1.370 ± 77,86	114,08 ± 3,24
	D – C2G	7	227	227	29,96 ± 1,21	3,74 ± 0,22	1.002 ± 40,59	124,91 ± 7,22
4	D – 2SX	14	240	240	61,92 ± 2,07	2,26 ± 0,11	2.070 ± 69,13	75,57 ± 3,81
	D – 3SX	3	54	54	67,59 ± 4,25	2,26 ± 0,29	2.259 ± 142,03	75,50 ± 9,74
	D – 2SX	3	5	5	55,29 ± 9,62	1,60 ± 0,28	1.848 ± 321,64	53,57 ± 9,32
5	D – 3SX	92	179	179	54,74 ± 1,25	1,59 ± 0,04	1.830 ± 41,84	53,04 ± 1,21
	GN – 3SX	52	103	103	46,88 ± 0,93	1,58 ± 0,03	1.191 ± 23,57	40,06 ± 0,76
6	D – 3SX	39	669	669	66,86 ± 1,10	1,95 ± 0,03	2.235 ± 36,89	65,22 ± 1,12
	D – C2P	170	22.089	20.120	19,94 ± 0,07	27,47 ± 0,27	667 ± 2,19	918,11 ± 8,91
7	D – C2G	41	4.567	3.832	24,78 ± 0,16	11,16 ± 0,98	828 ± 5,46	373,06 ± 32,62
	D – 2SX	9	525	482	53,50 ± 2.01	3,81 ± 0.15	1.788 ± 67,04	127,47 ± 5,03
	D – 3SX	116	16.614	15.250	66,10 ± 0,46	3,25 ± 0,02	2.210 ± 15,45	108,48 ± 0,78
8	D – 3SX	327	3.221	2.978	53,74 ± 0,43	3,04 ± 0,31	1.797 ± 14,39	101,55 ± 10,36
	D – C2P	32	35.421	2.587	22,16 ± 0,10	5,38 ± 0,26	741 ± 3,30	179,68 ± 8,57
	D – C2G	22	17.476	4.273	25,80 ± 0,20	4,41 ± 0,20	862 ± 6,63	147,28 ± 6,71
9	D – C3	9	17.344	3.588	37,63 ± 0,23	6,14 ± 0,25	1.258 ± 7,79	205,17 ± 8,32
	D – 2SX	5	6.639	2.651	36,28 ± 0,32	4,35 ± 0,30	1.213 ± 10,86	145,52 ± 10,01
	D – 3SX	174	278.109	75.206	46,60 ± 0,09	2,87 ± 0,08	1.558 ± 3,01	96,05 ± 2,52

3.3 Consumo energético en los principales corredores logísticos de Colombia

Observando el consumo energético de los vehículos cada vez que pasan por un poste de referencia se obtuvo el consumo energético de los vehículos en los principales corredores logísticos de Colombia (Figura 2.7).

a

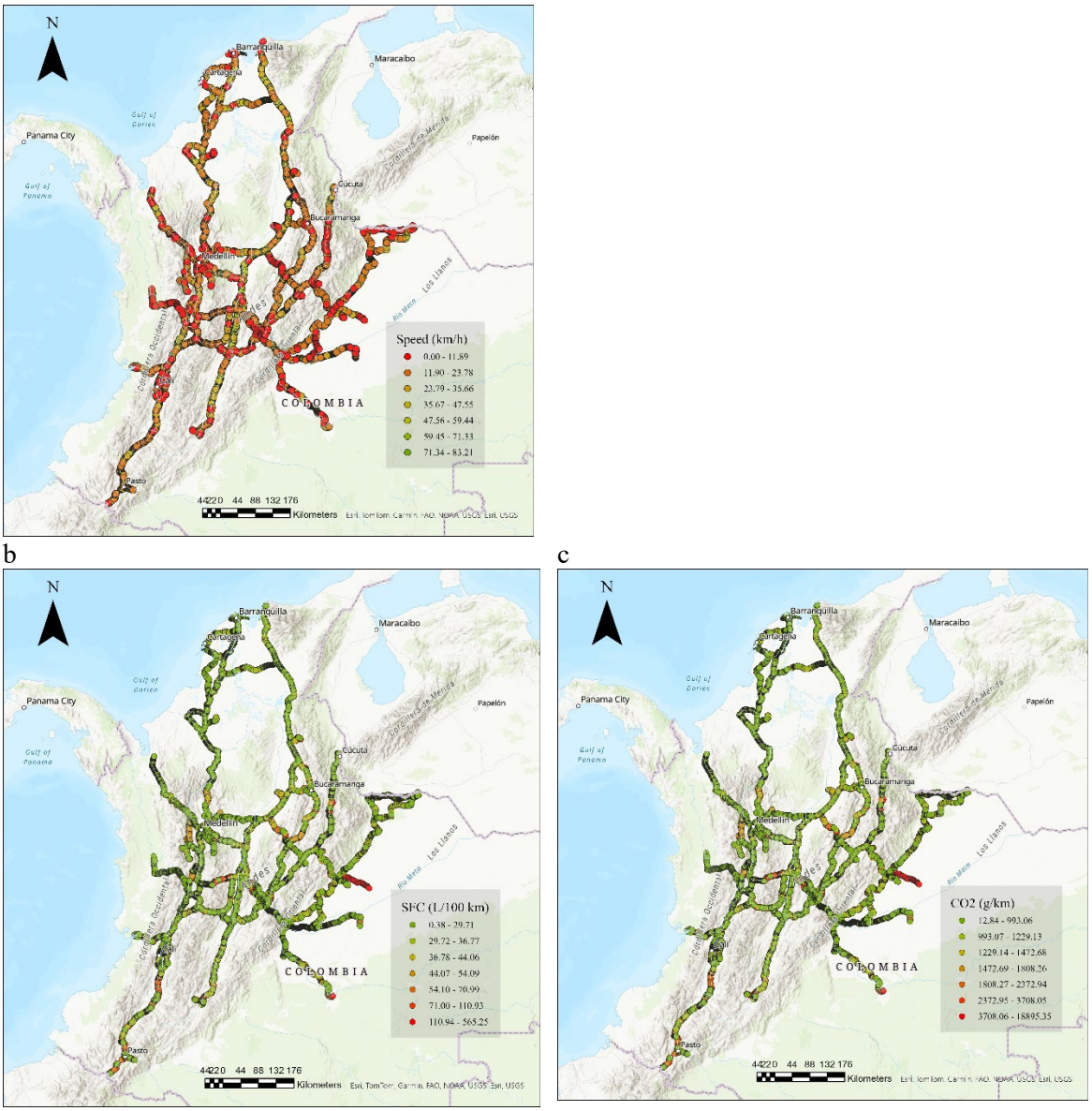


Figura 2.7. Consumo de combustible de vehículos de carga obtenidos km a km sobre los principales corredores logísticos de Colombia. a.) velocidades promedio. b.) SFC y c.) EI obtenidos monitoreando la operación cotidiana de los vehículos mediante telemetría.

Tabla 2.9. Parámetros característicos (CP's) que describen los patrones de conducción de los conductores de carga en los principales corredores logísticos de Colombia. Para cada CP y SFC, los valores resaltados en azul y rojo corresponden a la mejor y peor condición, respectivamente.

Parámetros característicos (CP)	SFC

Corredor logístico	Max velocidad	Velocidad promedio	Std. dev. velocidad	% ralenti	% tiempo acelerando	% tiempo des-acelerando	% tiempo en velocidad crucero		SFC*
	km/h	km/h	km/h	%	%	%	%	L/100 km	L/100 t-km
Todos	114	35,25	20,72	6,78	18,58	19,20	55,43	65,30	2,77
1	114	41,34	21,96	4,01	21,06	20,94	53,99	47,20	2,21
2	92	31,10	17,86	4,08	15,29	16,28	64,35	73,56	2,32
3	101	36,19	20,14	9,35	14,32	15,05	61,29	88,20	3,22
4	92	40,23	21,20	3,67	24,22	24,72	47,40	57,12	2,77
5	100	46,98	22,25	5,21	20,61	21,05	53,13	61,08	2,92
6	101	35,36	19,30	7,57	15,06	14,83	62,55	64,49	2,09
7	87	38,66	21,46	5,68	20,27	20,18	53,87	52.73	2,98
8	85	36,36	17,40	5,41	16,75	16,00	61,84	61,41	1,80

La Tabla 2.9 muestra que la velocidad promedio general de estos corredores es de ~ 35,3 km/h, que es baja en comparación con los valores promedio reportados para USA (99 km/h). También muestra que los corredores 5 (Mllin-Bmga) y 2 (Bta-Bvra) son los corredores más rápidos y lentos, respectivamente. Sin embargo, las comparaciones anteriores están sesgadas porque las topografías de las carreteras son muy diferentes. Por ejemplo, el corredor 5 va de 67 a 1.546 msnm en 450 km con una pendiente positiva promedio de 3,34% atravesando una sola cadena montañosa, mientras que el corredor 2 va de 0 a 3.242 msnm en 1.617 km con una pendiente promedio de 1,04% y una pendiente positiva promedio de 8,34%, cruzando tres cadenas montañosas. La pendiente máxima permitida es del 7%, pero el corredor cinco exhibe tramos con hasta el 13% (Tabla 2.9). A pesar de ser el corredor más lento, es el más utilizado en Colombia, con 1.018.291 viajes al año Mintransporte, (2021). Por esta razón, el gobierno colombiano inició hace 18 años un proyecto para acelerar este corredor mediante una serie de túneles que atraviesan estas montañas. En 2020 comenzó a funcionar y contiene el túnel más grande del país con una longitud de 8,65 km (Mintransporte, 2020). La información proporcionada en este trabajo puede ser utilizada para identificar las secciones del corredor que requieren un tipo similar de trabajo de modernización.

Las Tabla 2.9 muestra que estos vehículos pesados funcionan con largos períodos de ralentí. Se comprobó que los datos con el motor apagado se excluyeran del análisis. Estos grandes tiempos de inactividad se generan en las áreas de parada y arranque en las carreteras primarias debido a obras de mejora de infraestructura. Además, estos grandes tiempos de ralentí ocurren porque los conductores duermen dentro de la cabina con el sistema de aire acondicionado encendido y, por lo tanto, deben mantener el motor del vehículo encendido. En la actualidad, existen tecnologías eléctricas que abordan esta necesidad de proporcionar aire acondicionado para la cabina del vehículo sin utilizar el motor del vehículo (Koç et al., 2016). Se requiere trabajo adicional para evaluar la factibilidad económica y el impacto ambiental de estas tecnologías para el caso de los corredores logísticos estudiados en este trabajo.

Huertas et al (2022) mostraron que las variaciones del consumo de combustible de los vehículos por altura son despreciables comparados con las incertidumbres del método de determinación de SFC o SFC*; UPME (2023) reportaron resultados similares en FECOC +.

3.4 Consumo energético en las principales ciudades de Colombia

Usando los datos obtenidos por telemetría se determinó el consumo de combustible (*SFC*) que exhiben los vehículos de carga que durante 2021-2024 operaron en las principales ciudades de Colombia. Se incluyó Bogotá, Medellín y Barranquilla. Como se describió anteriormente, estos centros urbanos se localizan a diferentes alturas sobre el nivel del mar: 2.600, 1.500 y 0 msnm, respectivamente.

La Figura 2.8 y Tabla 2.10 ilustran que la muestra de vehículos monitoreados en estas ciudades exhibe valores estadísticamente similares dentro de sus respectivas configuraciones. Este resultado concuerda con lo observado por Huertas et al (2022), donde se concluyó que las posibles diferencias en consumo de combustible que exhibe un vehículo por altitud son despreciables comparadas con las variaciones de las mediciones. Se resalta que los resultados de *SFC* dependen de las condiciones externas, tecnología vehicular y principalmente de la forma como se usan los vehículos. Por tanto, es de esperarse grandes variaciones en los resultados (tamaños de los rectángulos). Estos resultados no pueden ser usados para comparar el desempeño de las tecnologías. Tampoco para evaluar la eficiencia con que las empresas transportadoras usan los vehículos.

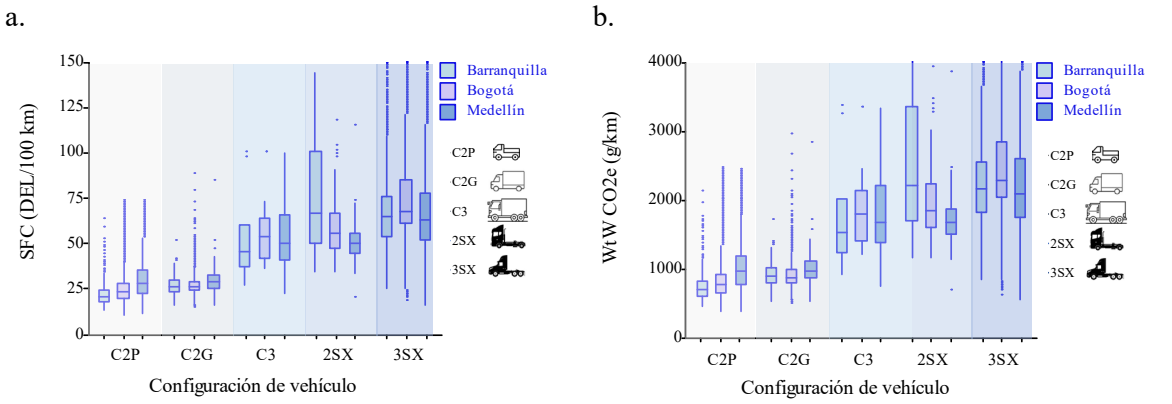


Figura 2.8. Consumo de combustible y emisiones de CO_{2e} de los vehículos de carga que operan en las principales ciudades colombianas: Bogotá (2.400 msnm), Medellín (1.500 msnm) y Barranquilla (0 msnm).

Tabla 2.10. Consumo específico de combustible (DEL/100 km) e índice de emisión (g CO2e/km) para vehículos operando bajo condiciones normales en las principales ciudades (Barranquilla, Bogotá y Medellín).

Ciudad	Configuración	Nro. de vehículos	Nro. de viajes	SFC (DEL/100 km)	EI (g CO_{2e}/km)
Barranquilla	C2P	19	1.928	20,43 ± 0,23	683 ± 6
	C2G	10	153	26,08 ± 0,93	872 ± 25
	C3	6	12	43,24 ± 15,18	1.445 ± 413
	2SX	4	173	65,80 ± 4,50	2.200 ± 122
	3SX	159	1.995	60,03 ± 1,24	2.007 ± 34

	C2P	43	21.738	22,15 ± 0,10	741 ± 3
	C2G	26	1.869	25,17 ± 0,29	841 ± 8
Bogotá	C3	7	15	53,29 ± 9,38	1.782 ± 255
	2SX	8	105	55,58± 2,96	1.858 ± 81
	3SX	198	7.055	72,41 ± 0,75	2,420 ± 21
	C2P	44	4.226	23,77 ± 0,36	795 ± 10
	C2G	18	828	29,27 ± 0,38	979 ± 10
Medellín	C3	7	41	44,30 ± 6,08	1.481 ± 165
	2SX	8	77	49,37 ± 2,78	1.650 ± 76
	3SX	194	1.995	58,88 ± 1,27	1.968 ± 35

4 Conclusiones

El presente trabajo tiene como objetivo establecer la línea base de eficiencia energética de los vehículos usados para el transporte de carga en Colombia. El RUNT reporta que en en la actualidad ~360 mil vehículos con una edad promedio de 16 años. En su gran mayoría operaban con diésel (85%) y fueron importados (> 99%).

La Ley 1972 de 2019 establece que a partir del 2023 las fuentes móviles con motor a diésel, fabricadas, ensambladas o importadas en Colombia deben cumplir con la normativa Euro VI o su equivalente. No obstante, es importante destacar que los fabricantes de vehículos no reportan valores de alguna métrica de eficiencia energética ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). En la práctica, algunos fabricantes de vehículos pesados solo proporcionan el consumo específico de combustible del motor, expresado en gramos por kilovatio hora (g/kWh), sin ofrecer información sobre el rendimiento de combustible de los vehículos, lo cual limita la capacidad de la autoridad ambiental para monitorear y evaluar el impacto ambiental de estos vehículos de manera efectiva.

Para lograr establecer la línea base de consumo de combustible de los vehículos pesados en Colombia, se monitorearon a 1 Hz, mediante sistemas de telemetría, >1.000 vehículos mientras operaban bajo condiciones normales de uso en Bogotá, Medellín, Barranquilla y los principales corredores logísticos en el periodo 2019-2024. Adicionalmente, se usaron los datos obtenidos en el proyecto FECOC donde se evaluaron 31 vehículos mediante pruebas en carretera siguiendo ciclos de conducción para la configuración respectiva.

Los vehículos nuevos a diésel (año modelo >2022) mostraron una eficiencia energética promedio de ~32,5% y un consumo específico de combustible (*SFC*) e índice de emisión (EI_{CO2}) que dependen de su configuración vehicular. Los vehículos C2P mostraron un *SFC*=16,89 L/100km, y un EI_{CO2}=564 gCO_2e/km. Los vehículos C2G mostraron un *SFC*=38,69 L/100km y un EI_{CO2}=1.293 gCO_2e/km. Los vehículos 3SX exhibieron un *SFC*=31,85 DEL/100 km y un EI_{CO2}=2.067 gCO_2e/km. Estos valores se obtuvieron siguiendo el ciclo de conducción para vehículos de carga desarrollado en el proyecto FECOC.

Para el caso de los vehículos en uso, se obtuvieron valores de referencia tanto del consumo específico de combustible (*SFC*) como del consumo específico de combustible por carga transportada (*SFC**) discriminados por empresa. Estos valores no pueden ser utilizados para hacer comparaciones entre empresas, por cuanto las condiciones operativas de cada uno de ellos son diferentes. Se encontró que el consumo energético de estos vehículos esta influenciado por 3 factores principales:

- Las condiciones externas tales como topografía, estado de las vías, etc., lo cual es responsabilidad del gobierno nacional. Se estableció que la métrica para evaluar este factor es el consumo especifico SFC expresado en L/100 km. Se obtuvo el valor promedio del SFC en cada km sobre los principales corredores viales. Los valores obtenidos son útiles para estimar el consumo total de combustible esperado de los vehículos transportando carga en cada corredor vial. Adicionalmente, sirve para identificar los puntos de la malla vial de mayor consumo.
- La tecnología vehicular, lo cual es responsabilidad directa de los fabricantes. El desempeño energético de los vehículos se evalúa con la métrica de eficiencia energética (η) o el SFC medido cuando el vehículo reproduce el ciclo de conducción para vehículos de carga de Colombia en pista o sobre dinamómetro de chasis. η es la fracción de la energía contenida en el combustible consumido que es transformada en el trabajo mecánico que propulsa el vehículo contrarrestando las fuerzas externas (resistencia rodadura, aerodinámica, gravedad) satisfaciendo la demanda de velocidad y aceleración deseada por el conductor. Se estableció un método para evaluar dicha métrica usando los datos del monitoreo mediante telemetría. Se obtuvieron eficiencias entre 24% y 34% para las 27 tecnologías evaluadas. También se encontró que la eficiencia energética de los vehículos ha permanecido esencialmente igual durante los últimos diez años independientemente de la tecnología de tratamiento de gases de escape (Nivel EPA o EURO). Adicionalmente, se encontró que el SFC medido sobre dinamómetro de chasis crece con el GVWR y por ende esta métrica solo puede ser usada para comparar tecnologías dentro de la misma familia o configuración. En la práctica, en Colombia los vehículos pesados no son evaluados mediante pruebas sobre dinamómetro de chasis.
- La forma como se usan los vehículos (logística, hábitos de conducción), lo cual es responsabilidad de la empresa transportadora. La eficiencia energética se evalúa mediante el SFC* expresado en DEL/100-t-km. Los datos de carga se obtuvieron del RNDC e instalando un sensor de carga a los vehículos monitoreados mediante telemetría. Se encontraron valores representativos de esta métrica para nueve empresas. Los valores obtenidos dependen de las condiciones particulares de operación de cada empresa. Se concluyó que esta métrica solo puede ser usada para comparar el desempeño de la empresa contra si misma un año tras otro.

5 Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a las siguientes empresas e instituciones que contribuyeron al desarrollo del presente proyecto: Coordinadora Mercantil, Corautos Andino, Edinsa, Lap Technologies, TCC, Logyca, Navisaf, Transer y Ditransa. También expresan su gratitud a las siguientes iniciativas o instituciones: Ministerio del Transporte, Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Minas y Energía de Colombia.

Finalmente, los autores reconocen las contribuciones de las siguientes personas: Juan Carlos Castillo Herrera, Ana María Valencia, José David Flórez Durango, Alonso Elías Cantillo Manotas de la Universidad EAFIT, Edwin Alexander García, Alejandro Mesa Mesa, Edgar David Pereira Rocha, Jackeline Saldarriaga y Julián Felipe Álvarez de la Universidad de Antioquia, Camila Cubillos y Juan Pablo Bocarejo de la Universidad de los Andes (Colombia); Samuel Garrido del Tecnológico de Monterrey (México); y Luis Tipanluisa de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH – Ecuador).

6 Referencias

Corficolombiana. (2021). *Generación eléctrica en Colombia y su transición hacia Fuentes Renovables No Convencionales*.

Decreto 1478, Pub. L. No. 1478 (2014).

Gillespie, T. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers.

GOV.UK. (2024). *Greenhouse gas reporting: conversion factors 2024*. https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2024

Huertas, J. I., Serrano-Guevara, O., Díaz-Ramírez, J., Prato, D., & Tabares, L. (2022). Real vehicle fuel consumption in logistic corridors. *Applied Energy*, *314*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118921

Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). A comparison of three idling options in long-haul truck scheduling. *Transportation Research Part B: Methodological*, *93*, 631–647. https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.08.006

MinAmbiente. (2022). *Resolución 0762*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/09/Resolucion-762-de-2022.pdf

MinEnergía, & UPME. (2020). *Plan Energético Nacional 2020-2050*.

MinEnergía, & UPME. (2022a). *Actualización Plan Energético Nacional (PEN) 2022 - 2052*. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/PEN-2052.aspx

MinEnergía, & UPME. (2022b). *Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía*.

MinEnergía, UPME, & Steer. (2020). *Realizar un estudio que permita identificar las clases de vehículos y modalidades de transporte susceptibles de realizar el ascenso tecnológico hacia tecnologías de cero y bajas emisiones a nivel nacional*. www.steergroup.com

Mintransporte. (2004). *Resolución 4100* (4100). https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=241

MinTransporte. (2020). *Gremios del transporte y Gobierno realizaron primera visita conjunta al Túnel de La Línea*. https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/8896/gremios-del-transporte-y-gobierno-realizaron-primera-visita-conjunta-al-tunel-de-la-linea/

Mintransporte. (2021). *Portal Logístico de Colombia*. https://plc.mintransporte.gov.co/

Pepper, G. T. (2010). *Methods and system for determining consumption and fuel efficiency in vehicles*.

Quirama, L. F., Giraldo, M., Huertas, J. I., & Jaller, M. (2020). Driving cycles that reproduce driving patterns, energy consumptions and tailpipe emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *82*. https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102294

SAE. (2020). *Fuel Consumption Test Procedure - Type II J1321_202010*. https://www.sae.org/standards/content/j1321_202010

Serrano-Guevara, O. S., Huertas, J. I., Quirama, L. F., & Mogro, A. E. (2023). Energy Efficiency of Heavy-Duty Vehicles in Mexico. *Energies*, *16*(1). https://doi.org/10.3390/en16010459

UNFCCC. (2012). *Introduction of low-emission vehicles/technologies to commercial vehicle fleets*. https://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/2O6QYCVZS5JB0IAPKFRW3D74H1X8MN

UPME. (2016). *Calculadora FECOC*. http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html

UPME. (2020). *Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+) Fase I: Determinación de los ciclos de conducción de fuentes móviles de carretera para Colombia*.

UPME. (2023). *Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos (FECOC+) Fase 2.2: Determinación de los factores de emisión de vehículos pesados de carga (camiones y tractocamiones) y de pasajeros (buses) a la altitud de Bogotá y Barranquilla*.

UPME. (2024). *Resolución No. 705 de 2024*.

UPME, IREES, TEP, & corpoema. (2019). *Resumen Ejecutivo BEU Sector Transporte*.