

EMISIONES DE ESCAPE DE AUTOBUSES DE TRANSPORTE PÚBLICO

Combustibles y vehículos para transporte urbano sostenible

1. Resumen ejecutivo

El programa Combustibles y Vehículos para Transporte Urbano Sostenible (CVTUS) de EMBARQ tiene como propósito abordar un enfoque imparcial para analizar el impacto de diversos combustibles y tecnologías en flotas de transporte público. El programa aborda conjuntamente los costos del ciclo de vida y las emisiones de los autobuses de transporte público. Su objetivo es dar recomendaciones para el contexto específico de ciudades en India, México y Brasil, países en los que trabaja EMBARQ. Este informe, el primero del programa CVTUS, recopila un amplio conjunto de datos obtenidos en pruebas para medir emisiones de los autobuses de transporte público en uso. Estos datos se emplearán en un meta-análisis con el objetivo de definir los rangos de las emisiones de escapes para las diversas combinaciones de combustible y tecnologías. El análisis considera tanto las emisiones locales como globales, para comprender cómo repercuten sobre la salud humana y el medio ambiente.

Informe elaborado por:

Erin Cooper, Analista de investigación, EMBARQ

Magdala Arioli, Ingeniera de transportes, EMBARQ Brasil

Aileen Carrigan, Planificadora de transporte senior, EMBARQ

Umang Jain, Especialista en transporte, EMBARQ India

CONTENIDO

1. RESUMEN EJECUTIVO	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. ANTECEDENTES EN EMISIONES DE ESCAPE	3
3.1 Significado de las emisiones	3
3.2 Normas sobre emisiones	5
4. COMBUSTIBLES Y TECNOLOGÍAS	7
4.1 Contenido de energía de los combustibles	7
4.2 Actuales investigaciones sobre combustibles, tecnologías y emisiones	7
5. META-ANÁLISIS DE EMISIONES DE ESCAPES DE FLOTAS DE AUTOBUSES URBANOS	10
5.1 Metodología	10
5.2 Recopilación de datos	11
5.3 Análisis de datos	13
6. RESULTADOS DE META-ANÁLISIS DE EMISIÓN DE ESCAPES	20
7. CONCLUSIÓN	23
REFERENCIAS	25
REFERENCIAS DE DATOS	26
APÉNDICE 1: NORMAS SOBRE EMISIONES	30
APÉNDICE 2: RESULTADOS DEL META-ANÁLISIS	31

Lista de abreviaturas

3WC	Catalizador de tres vías
B100	Biodiésel puro (100%)
B20	20% de biodiésel, 80% de diésel de petróleo
B5	5% de biodiésel, 95% de diésel de petróleo
GNC	Gas natural comprimido
CO	Monóxido de carbono
CO _{2e}	Dióxido de carbono equivalente
D	Diésel
D15	Diésel con 15 ppm de azufre
D150	Diésel con 150 ppm de azufre
D50	Diésel con 50 ppm de azufre
DOC	Catalizador de oxidación diesel
DPF	Filtro de partículas diésel
E	Etanol
EEV	Vehículo ecológico avanzado
RGE	Recirculación de gases de escape
GEI	Gases de efecto invernadero
HC	Hidrocarburos
MCI	Motor de combustión interna
GNL	Gas natural licuado
HCNM	Hidrocarburos no metanos
NREL	Laboratorio Nacional de Energía Renovable
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O ₃	Ozono
OC	Catalizador de oxidación
MP	Material particulado
RCS	Reducción catalítica selectiva
HCT	Hidrocarburos totales
DUBA	Diésel ultra bajo en azufre

Lista de tablas

Tabla 1	Emisiones de los tubos de escape de vehículos utilitarios pesados usados para transporte	4
Tabla 2	Normas europeas sobre emisiones para vehículos de transporte público (g/km)	6
Tabla 3	Normas de la EPA sobre emisiones (g/km)	6
Tabla 4	Combustibles actualmente en uso por las agencias de transporte público en Brasil, India y México	7
Tabla 5	Combustibles, contenido de energía y rendimiento energético	8
Tabla 6	Contenido de azufre en diésel en Brasil, México, India, Estados Unidos y Europa	8
Tabla 7	Número de puntos de datos por año, norma de emisiones y país	12
Tabla 8	Combinaciones de tecnologías en conjunto de datos	13
Tabla 9	Cantidad de puntos de datos por combustible	13

Lista de ilustraciones

Figura 1	Partículas que ingresan al cuerpo humano	5
Figura 2a	Promedio de emisiones de CO por tecnología (g/km)	14
Figura 2b	Promedio de emisiones de HCT por tecnología (g/km)	15
Figura 2c	Media para emisiones de NO _x por tecnología (g/km)	15
Figura 2d	Media para emisiones de material particulado por tecnología (g/km)	16
Figura 2e	Media para emisiones de CO ₂ por tecnología (g/km)	16
Figura 3a	Cambio porcentual en emisiones medias para combustibles sin postratamiento de escapes comparados con D > 150	17
Figura 3b	Cambio porcentual en emisiones medias para DUBA con tecnologías comparado con DUBA	18
Figura 3c	Cambio porcentual en emisiones medias para GNC con tecnologías comparado con GNC	18
Figura 4	RI para emisiones de CO ₂ equivalente según la norma europea	19
Figura 5	Emisiones de NO _x y CO _{2e} con relación a la distancia recorrida	19
Figura 6	Emisiones de CO, HCT y material particulado con relación a la altitud	20
Figura 7	Emisiones de NO _x con relación al material particulado por tecnología	21
Figura 8	Emisiones de NO _x con relación al material particulado, acercamiento sobre los rangos para el cuadrante de bajas emisiones	21
Figura 9	Comparación de emisiones de CO _{2e} y material particulado por tecnología	22
Figura 10	Emisiones de CO _{2e} y material particulado, acercamiento sobre los rangos para el cuadrante de bajas emisiones	22

Algunas de las emisiones de escape que se asocian comúnmente con las fuentes móviles son el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x) y el material particulado. Estas emisiones pueden causar contaminación del aire local y ser determinantes en problemas de salud humanos (Agencia de protección ambiental de Estados Unidos, 2012a). En muchos países, existen normas que regulan estas emisiones y que estimulan el desarrollo de tecnologías para vehículos de motor y mejores postratamientos de los escapes. Las emisiones de escapes también producen gases de efecto invernadero, específicamente dióxido de carbono, que las tecnologías de postratamiento de escapes no reducen. Las recientes reglamentaciones sobre emisiones de gases de efecto invernadero en Europa solo cubren los vehículos y camionetas para transporte de pasajeros, en tanto que en el año 2011, Estados Unidos anunció las primeras reglamentaciones sobre emisiones de gases de efecto invernadero y normas para la economía de combustible para motores y vehículos utilitarios pesados (Lindqvist 2012).

Los combustibles considerados en este análisis son: diésel con diversas concentraciones de azufre, biodiésel (al 100 por ciento y mezcla del 20 por ciento con diésel), gas natural comprimido (GNC), gas natural licuado (GNL) y etanol. Las tecnologías consideradas son motores de combustión interna (MCI) estándares e híbridos de MCI-eléctrico, en combinación con una variedad de tecnologías de postratamiento de escapes. Cada combustible y cada tecnología tienen beneficios y costos. Se empleó la técnica del meta-análisis estadístico para combinar los resultados de 24 estudios independientes y así determinar un rango de valores de emisiones para distintas combinaciones de combustibles y tecnologías. El análisis evaluó numerosos factores para los cuales se disponía de datos, incluyendo el tipo específico de combustible y tecnologías pertinentes, estándares de emisiones, pruebas en campo y de laboratorio, ciclos de manejo, emisiones de CO₂ equivalente, distancia recorrida y altitud.

En general, los resultados del meta-análisis de los estudios compilados están en línea con los resultados de estudios sobre tecnologías y combustibles individuales. El meta-análisis demuestra que hay un amplio rango de valores de emisiones, incluso para el mismo combustible y la misma tecnología. Muchos de los factores explorados, como la altitud y el ciclo de manejo, afectan las emisiones. El análisis permite comprender estas variaciones a fin de evaluar con más precisión los resultados de pruebas de emisiones adicionales. Con frecuencia las tecnologías se desarrollan para cumplir las normas de emisiones y los resultados de este estudio implican que las normas sobre emisiones por lo general son efectivas. Sin embargo, está demostrado que

no todos los autobuses cumplen las normas de emisiones esperadas, específicamente en los casos de NO_x y material particulado, que también se pueden asociar con el desgaste sobre el autobús.

El análisis también muestra que ningún combustible en particular es mejor en todas las categorías de emisiones si se usan las tecnologías de postratamiento de escapes apropiadas, lo que significa que estas tecnologías son fundamentales para reducir las emisiones. Las tecnologías que muestran las emisiones más bajas en cuanto a contaminantes clave, como NO_x, material particulado y CO₂, son el gas natural comprimido con un catalizador de tres vías, el biodiésel puro (100%) y el diésel ultrabajo en azufre con reducción catalítica selectiva. Sin embargo, como no es posible clasificar ninguno de los combustibles como el mejor en cuanto a la reducción de todas las emisiones, es importante considerar los costos de los ciclos de vida y las emisiones del ciclo de vida para autobuses en ubicaciones específicas antes de tomar decisiones relativas a la selección de la flota. El costo del ciclo de vida y los componentes de emisiones generan muchas variantes posibles, ya sean globales o locales, que pueden repercutir sobre las recomendaciones relativas al combustible o al vehículo. El comprender cómo los combustibles y las tecnologías contribuyen a las emisiones de los escapes es el primer paso para comprender los costos y el impacto reales de las flotas de autobuses urbanos en diversos contextos urbanos.

2. INTRODUCCIÓN

Incluso con la abundancia de información disponible en las últimas décadas relativas a combustibles y vehículos alternativos, con frecuencia no queda claro cuáles tipos de vehículos y combustibles debería elegir una agencia de transporte público para su flota de autobuses. Las investigaciones actuales relativas a combustibles y vehículos con frecuencia proporcionan información detallada de costos de autobuses de transporte público o sobre las emisiones para tecnologías y combustibles específicos en sitios específicos. Muchas de las grandes agencias de transporte público del mundo, en particular de Estados Unidos y Europa, han efectuado exhaustivas pruebas sobre combustibles y vehículos y análisis de la relación entre costo y eficacia para programas locales y nacionales. Sin embargo, cada enfoque a los análisis, así como los combustibles y las tecnologías consideradas en las pruebas, puede variar significativamente. Por tanto, los resultados de estudios individuales o de pequeños muestreos de estudios pueden no ser fáciles de comparar a los resultados de los estudios de otras agencias o no se aplican a otros sitios. Además, incluso con la cantidad de investigaciones y datos disponibles sobre los autobuses de transporte público,

con frecuencia no se dispone de información acerca de los costos del ciclo de vida completo de los vehículos de acuerdo a los distintos tipos de combustibles ni de las emisiones durante su ciclo de vida. Incluso cuando existen datos sobre las emisiones de los contaminantes locales, las emisiones de gases de efecto invernadero y los costos de vehículos, estos factores no siempre son considerados conjuntamente.

El propósito del programa Combustibles y Vehículos para Transporte Urbano Sostenible (CVTUS) de EMBARQ es comprender mejor los costos del ciclo de vida completo y las emisiones de los autobuses de transporte público según los distintos tipos de combustibles, así como la correlación entre costos y emisiones, a fin de ayudar a las agencias dedicadas al transporte público a tomar decisiones a la hora de realizar adquisiciones para flotas de autobuses urbanos. El proyecto se centrará en las condiciones de México, Brasil e India, países en los que actualmente trabaja EMBARQ, a fin de elaborar recomendaciones locales en diversos contextos urbanos.

Como parte del programa CVTUS, el objetivo de este documento es dar a conocer mejor cómo repercuten los tipos de combustibles y las tecnologías pertinentes sobre la emisión de escapes mediante la compilación de datos y la investigación en diversas agencias de transporte público y gubernamentales de distintos países. Si bien se intentó proporcionar el conjunto de datos más amplio, los datos fueron recopilados solamente en pruebas efectuadas en autobuses de transporte público en uso o que se usaron en el pasado. Por lo tanto, no representan todas las condiciones posibles para todas las combinaciones de combustibles y tecnología (en particular, en lo relativo a tecnologías emergentes y autobuses a etanol), debido a la falta de disponibilidad de estudios de este tipo. Este informe no considera emisiones distintas a las emisiones de escapes. Por ejemplo, no se incluyen las emisiones ascendentes de la producción de petróleo, la fabricación automotriz o las pérdidas durante la carga de combustible del vehículo.

Puesto que los resultados de las emisiones de vehículos de los autobuses individuales pueden variar en gran medida, una muestra pequeña de pruebas en autobuses, como las que por lo general realizan las agencias, podría no ser representativa de un tipo de combustible dado generalmente. La investigación compilada que aquí se presenta crea una base de datos más amplia de resultados de pruebas de emisiones a partir de los cuales las agencias pueden elegir. Este informe es útil para crear un marco de trabajo para la selección de vehículos pero no constituye una recomendación final sobre los tipos de combustible para alguna agencia de transporte público en particular. Se

requiere un análisis de ciclo de vida completo de un vehículo de transporte público en términos de costos y emisiones.

Este documento aborda los siguientes temas:

- significado de emisiones reguladas y sin regular
- normas sobre emisiones
- rangos de emisiones esperados para distintos combustibles y tecnologías
- efectos de tecnologías específicas en la reducción de emisiones sobre las emisiones esperadas
- factores adicionales que puedan conducir a cambios en las emisiones esperadas

3. ANTECEDENTES SOBRE EMISIONES DE ESCAPES

Es importante comprender las emisiones reguladas y sin regular para poder comprender las normas sobre emisiones aplicables a los distintos tipos de escapes de los autobuses de transporte público. El material particulado, los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el monóxido de carbono, los cuales son incluidos en el análisis, son temas de gran preocupación debido a las altas concentraciones de hollín, ozono y smog en muchas zonas urbanas, y los impactos negativos sobre la salud. Los compuestos orgánicos volátiles y el humo negro también son emisiones significativas pero no se incluyen en el meta-análisis debido a la falta de datos. Actualmente se controlan las emisiones del tubo de escape de los autobuses de transporte público en muchos países. Los programas nacionales de pruebas en vehículos y las normas de emisiones en vehículos se enfocan en la reducción de las emisiones locales.

3.1 Significado de las emisiones

La contaminación del aire es un grave problema de salud ambiental que afecta a la gente del mundo. La exposición a los contaminantes del aire en gran medida está fuera del control de las personas y exige la acción de las autoridades públicas a nivel nacional, regional e incluso internacional. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), es posible atribuir la muerte prematura de más de dos millones de personas debido a los efectos de la contaminación del aire en las ciudades, causada al menos parcialmente por la combustión de combustible (OMS 2006).

Los principales contaminantes relacionados con los escapes de transporte se sintetizan en la Tabla 1, junto con los países en los que están regulados. La OMS muestra que

Tabla 1 Emisiones de los tubos de escape de vehículos utilitarios pesados usados de transporte

Tipos de emisiones	Contaminante local	Contaminante de GEI	Regiones/países donde están regulados
Monóxido de carbono (CO)	x		EE. UU., Europa, Brasil, India, México
Dióxido de carbono (CO ₂)	x	x	EE. UU.
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	x	x	EE. UU., Europa, Brasil, India, México
Hidrocarburos totales (THC) ^a			Europa, Brasil, India
Hidrocarburos no metanos (HCNM)	x		EE. UU., México
Material particulado (MP) ^b	x		EE. UU., Europa, Brasil, India, México
Metano (CH ₄)		x	Europa
Dióxido de azufre (SO ₂)	x		EE. UU., Europa, Brasil, India, México, a través de normas sobre calidad de combustibles.

Notas:

^a Hidrocarburos totales hace referencia a los hidrocarburos no metano más metano.

^b El material particulado considerado en el estudio incluye todos los tamaños de partículas, aunque la mayoría tiene un diámetro inferior a 2,5 nanómetros, tanto en el caso del diésel como del GNC.

los óxidos de nitrógeno y los dióxidos de azufre afectan la salud de modo significativo, en tanto que se ha determinado de modo cuantificable que el material particulado y el ozono (O₃) están relacionados con la mortalidad. Existe un aumento aproximado del 6 por ciento en la mortalidad por cada aumento de 10 µg/m³ en MP_{2,5} y un aumento del 3 al 5 por ciento en mortalidad para cada aumento de 60 µg/m³ en el O₃ (OMS 2006). Los efectos sobre la salud y el medio ambiente de las emisiones de escapes que se suelen someter a pruebas, que se sintetizan en la Tabla 1, se detallan mejor en las publicaciones de la OMS y de la

Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos (OMS 2006, EPA 2012a).

Monóxido de carbono (CO): El monóxido de carbono es resultado de la combustión incompleta del combustible y se emite directamente de los tubos de escape de los vehículos. El CO puede ser precursor de CO₂ y del ozono, dos importantes gases de efecto invernadero. Si bien la exposición al CO no tiene un efecto acumulativo sobre la salud, los efectos instantáneos de concentraciones elevadas pueden ser peligrosos (Nylund *et al.* 2004, Macías, Martínez y Unal 2010).

Dióxido de carbono (CO₂): El CO₂ es un gas de ocurrencia natural que representa aproximadamente el 77 por ciento de los gases de efecto invernadero globales (Baumert, Herzog y Pershing 2005). Es también un producto secundario de la quema de combustibles fósiles y la biomasa, otros procesos industriales y cambios en el uso de la tierra. El CO₂ procedente de los escapes de los vehículos de transporte no está reglamentado en todos los países ni para todos los tipos de vehículos. Estas reglamentaciones son bastante nuevas y se cumplen mediante la realización de mejoras en el rendimiento energético y no por los postratamientos de los escapes (Lindqvist 2012).

Óxidos de nitrógeno (NO_x): Los óxidos de nitrógeno son una importante familia de compuestos químicos que contaminan el aire. Estos gases altamente reactivos afectan la salud y conducen a aumentos en el calentamiento global. Las emisiones de NO_x aumentan a consecuencia del aumento de la temperatura del motor (Macías *et al.* 2010). Las emisiones de NO_x procedentes de la combustión vienen principalmente bajo la forma de óxido nítrico (NO) (Nylund *et al.* 2004). El NO se puede oxidar en dióxido de nitrógeno (NO₂) que es un poderoso contaminante del aire por sí mismo y también puede reaccionar en la atmósfera para formar ozono y lluvia ácida. Algunas tecnologías de reducción de emisiones pueden aumentar la porción de NO₂ en los escapes de diésel. El óxido nítrico (N₂O), un importante gas de efecto invernadero, constituye una porción muy pequeña de las emisiones totales de NO_x para todos los tipos de combustible (EPA 2012b).

Hidrocarburos no metanos (HCNM): Los hidrocarburos no metanos en los escapes proceden de combustible parcialmente quemado. Los contaminantes potenciales derivados de los hidrocarburos, como el acetilaldehído y el formaldehído, son numerosos y tienen distintos efectos (sobre los ojos, la piel e irritación de las vías respiratorias). Los hidrocarburos pueden afectar negativamente la salud o contribuir al ozono o al smog a nivel del suelo (Macías *et al.* 2010, Nylund *et al.* 2004).

Metano (CH_4): El metano, bajo la forma de combustible sin quemar, es una emisión de los tubos de escape que proviene fundamentalmente de los combustibles del gas natural. Aunque no es tóxico, el metano tiene un potencial de calentamiento global que es 25 veces más elevado que el del CO_2 (Nylund *et al.* 2004, Environment Canada 2011a).

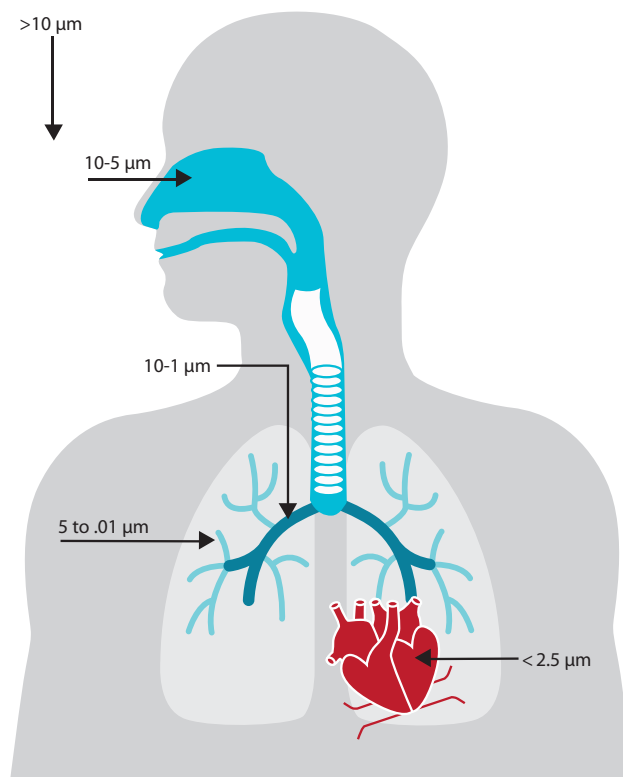
Material particulado (MP): El material particulado está compuesto por una mezcla de pequeñas partículas y gotículas, que incluyen ácidos, como nitratos y sulfatos, compuestos químicos orgánicos, metales, suelo o polvo. La combustión puede generar una gran cantidad de partículas muy finas que poseen un diámetro de 10 nanómetros o menos, pero esto se regula con la medición de la cantidad total de todos los tamaños de partículas del material particulado. El cuerpo humano no puede protegerse de las partículas ultrafinas, que pueden ingresar al corazón y a los pulmones por inhalación (Figura 1) y tienen graves efectos sobre la salud: enfermedades respiratorias o afecciones cardíacas y pulmonares, entre otras (EPA 2012a).

Dióxido de azufre (SO_2): Las emisiones de SO_2 de las fuentes móviles son proporcionales al contenido de azufre en los combustibles (PNUMA 2007). El SO_2 está relacionado con numerosos efectos negativos sobre la salud, incluyendo afecciones del sistema respiratorio (EPA 2012a).

Otros contaminantes: El ozono (O_3) no es una emisión generada directamente por la combustión móvil pero se forma en la atmósfera mediante un complejo conjunto de reacciones químicas en las que participan hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y la luz solar. El ozono al nivel del suelo es un contaminante nocivo pero no está reglamentado como contaminante procedente de los tubos de escape. Es el principal componente del smog, que es responsable de asfixia, tos y picor en los ojos (EPA 2012a).

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) pueden tener efectos negativos sobre la salud o contribuir a la contaminación atmosférica. También se ha demostrado que la exposición a los escapes de humo negro aumenta el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón y por ende, aumenta el riesgo de mortalidad (De Hartog *et al.* 2010). Los sulfatos y nitratos podrían tener algunos efectos negativos sobre la salud, en particular en combinación con otros compuestos de las emisiones. Sin embargo, las concentraciones de estos contaminantes emitidos por los vehículos modernos, combinadas por los combustibles y lubricantes de bajo contenido en azufre donde estos estén disponibles, son bajas en comparación con otras fuentes de emisión e inhalación (Nylund *et al.* 2004).

Figura 1 Partículas que ingresan al cuerpo humano



Esta figura muestra el tamaño de las partículas que pueden llegar a los sistemas respiratorios y circulatorios. El cuerpo humano no puede protegerse contra la exposición a partículas ultrafinas.

3.2 Normas sobre emisiones

Muchos gobiernos nacionales usan normas y pruebas de emisiones para controlar la cantidad y los tipos de emisiones nocivas que se liberan al medio ambiente como resultado directo de la combustión del combustible. Las emisiones de escape consideradas en este informe se basan en los contaminantes regulados por las normas de emisiones europeas (Euro) y las normas de la EPA estadounidenses, que incluyen NO_x , HCT o HCNM, MP y CO. Con frecuencia, las normas que regulan las emisiones en otros países se basan en estas normas. Para el año 2010, las normas de Brasil, México e India eran bastante similares a las normas Euro III, Euro IV y Euro III respectivamente.

Para realizar pruebas de emisiones, las normas requieren una variedad de ciclos de manejo con los límites de emisiones correspondientes. Las Tablas 2 y 3 contienen ejemplos de los límites de las normas europeas y de la EPA. Para fines comparativos, se han convertido ambos

conjuntos de emisiones a g/km. Aunque hay diferencias en los umbrales propuestos por cada agencia, la tendencia general es hacer normas progresivas para reducir los contaminantes clave, como NO_x y material particulado. Las normas sobre CO en Estados Unidos no han cambiado notablemente porque los vehículos utilitarios pesados a motor diésel no son una fuente de contaminación significativa (Administración Federal de Transporte, 2006). Las normas de la EPA relativas al CO y HCT son mucho más estrictas que las europeas, aunque las relativas al O_x y el material particulado son comparables.

Los ciclos de manejo requeridos para los pruebas de emisiones en distintos países se pueden basar en las normas internacionales y en las condiciones de manejo en los distintos lugares. Las normas de emisiones europeas usan dos ciclos de manejo específicos. Desde el año 2000, los ciclos han sido el ciclo estacionario europeo (ESC), una secuencia de velocidades y cargas constantes, y el ciclo transitorio europeo (ETC), que simula los patrones típicos de manejo. La prueba de la EPA se realiza con diversos ciclos de pruebas, que incluyen un ciclo de prueba transitorio, que incluye las condiciones de manejo en zonas urbanas y autopistas, y una prueba de estado continuo con una

secuencia de cargas y velocidades constantes (Dieselnet 2012).

La reglamentación de las emisiones de gases de efecto invernadero es más reciente en Estados Unidos y Europa. En la actualidad, la norma sobre emisiones de la Unión Europea cubre apenas los vehículos y camionetas para transporte de pasajeros y no los vehículos pesados. Puesto que en la actualidad no existe una tecnología de postratamiento que pueda reducir las emisiones de CO₂ de los vehículos para el transporte por carretera, las reducciones de CO₂ se logran mediante mejoras en el rendimiento energético (Lindqvist 2012). En Estados Unidos, la EPA y la Administración Nacional de Seguridad de Tráfico en Carreteras (NHTSA) elaboran las primeras normativas para vehículos y motores utilitarios pesados. Según EPA, las reglamentaciones se instrumentarán en etapas a partir de 2014 y para el año 2018 las reglamentaciones debieran crear una reducción promedio en las emisiones de gases de efecto invernadero por vehículo del 17 por ciento. Se espera que las normas propuestas permitan ahorrar más de seis mil millones de barriles de petróleo para el 2025 y reduzcan en más de 3.1 mil millones de toneladas métricas las emisiones de CO₂ (EPA 2012c).

Tabla 2 Normas europeas de emisiones para vehículos de transporte público (g/km)

Normas sobre emisiones	Fecha	CO	HCT	NO _x	MP
Euro I	1992	8,1	1,98	14,4	0,648
Euro II	1998	7,2	1,98	12,6	0,27
Euro III	2000	3,78	1,188	9	0,18
Euro IV	2005	2,7	0,828	6,3	0,036
Euro V	2008	2,7	0,828	3,6	0,036
EEV		2,7	0,45	3,6	0,036
Euro VI	2013	2,7	0,234	0,72	0,018

Fuente: Lindqvist 2012.

Notas: 1) Con frecuencia las pruebas de emisiones convierten los resultados de g/kWh a g/km. Nylund *et al.* (2004) utilizan el factor de conversión de 1,8 km por g/kWh. Véase el Apéndice 1 si desea las fuentes completas para las conversiones. 2) EEV representa una norma de emisiones voluntaria entre las normas Euro V y Euro VI (Dieselnet 2009).

Tabla 3 Normas de la EPA sobre emisiones (g/km)

Normas sobre emisiones	CO	HCT	NO _x	HCNM	HCNM + NO _x	MP
1994	45,06	3,78	14,54			0,20
1996	45,06	3,78	11,63			0,15
1998	45,06	3,78	11,63			0,15
2004 (1)	45,06	3,78			6,98	0,03
2004 (2)	45,06	3,78		2,91	7,27	0,03
2007	45,06	3,78	3,92	0,41		0,03
2010	45,06	3,78	0,58	0,41		0,03

Fuente: Programa Cooperativo de Investigación sobre Transporte Público, 2011.

Notas: La EPA convierte g/bhp-hr a g/mi usando 4,679 bhp-hr por mi. Véase el Apéndice 1 si desea las fuentes completas para las conversiones. 2004 (1) y (2) representan dos opciones distintas para el cumplimiento.

4. COMBUSTIBLES Y TECNOLOGÍAS

Al seleccionar las tecnologías de autobuses en particular, las agencias de transporte público deben equilibrar disponibilidad de combustible y vehículos, condiciones locales y necesidades del servicio. Diversas opciones de combustible se han sometido a pruebas dentro de programas nacionales mediante pruebas en institutos, programas piloto de agencias y, locales, mediante pruebas en agencias. Existen numerosas combinaciones de tecnologías de postratamiento de escapes y combustibles posibles. Sin embargo, no todas estas combinaciones estarán disponibles en la siguiente década en todos los países ni en todas las agencias de transporte público. Todos los combustibles que se tratan en este informe están disponibles, o pronto lo estarán, en Brasil, India o México.

La Tabla 4 muestra los combustibles actualmente en uso por las agencias de los tres países tratados en este informe. Brasil tiene una amplia variedad de combustibles. Las ciudades en México usan combustible diésel, híbridos y GNC. En India, a consecuencia de una orden del Tribunal Supremo, 13 grandes ciudades debieron exigir el uso de vehículos a GNC a partir del año 2001, mientras que el combustible diésel sigue disponible para autobuses en otras ciudades (Roychowdhry 2010).

4.1 Contenido de energía de los combustibles

El interés por la utilización de combustibles alternativos ha crecido como forma de explorar posibles mejoras con respecto al diésel en cuando a calidad del aire y a las emisiones de gases de efecto invernadero. Las preocupaciones más recientes sobre los combustibles incluyen el cumplir con las normas sobre emisiones, el hacer frente a la seguridad del combustible y al reducir la volatilidad de los precios. A la vez, el diésel sigue siendo

un importante combustible en el transporte público urbano debido a su alta densidad de energía, que significa que un menor volumen de combustible puede llevar más lejos a un autobús. La Tabla 5 muestra el contenido de alta energía del diésel con relación a otros combustibles que se pueden usar en flotas de autobuses urbanos. El biodiésel también tiene un elevado contenido de energía y su rendimiento energético es similar al de los autobuses a diésel. Con el tiempo se han realizado numerosas mejoras a los autobuses a diésel para reducir las emisiones, como se analizará en esta sección. Las normas sobre las emisiones más recientes muestran que los autobuses que usen cualquier tipo de combustible cumplirán las mismas estrictas normas sobre emisiones.

4.2 Actuales investigaciones sobre combustibles, tecnologías y emisiones

Las siguientes subsecciones exploran la literatura existente sobre los tipos de combustible y las emisiones características de los combustibles. Además, describen las tecnologías de postratamiento de los escapes y las reducciones de emisiones esperadas de cada tecnología. Los datos de algunos de los estudios individuales descritos aquí se incluyen también en el meta-análisis en la Sección 5.

4.2.1. Diésel

La mayoría del combustible diésel disponible es diésel de petróleo refinado del petróleo crudo (Programa Cooperativo de Investigación sobre Transporte Público 2011). Debido a la preocupación del agotamiento de los recursos de petróleo crudo mundiales, se están explorando otras fuentes de diésel, que pueden tener distintas características de emisiones. Cada país ofrece diversos grados de diésel con distintos contenidos de azufre. Las emisiones del diésel se ven afectadas por la cantidad de azufre que contiene

Tabla 4 Combustibles actualmente en uso por las agencias de transporte público en Brasil, India y México

Países objetivo	Bajo en azufre Diésel ^a	Diésel	Etanol	B5	B20	B100	GNC	Híbrido
Brasil	x	x	x	x	x	x		x
India	x	x					x	
México	x	x					x	x

^a Diésel con bajo contenido de azufre: 50 ppm de contenido de azufre

Tabla 5 Combustibles, contenido energético y eficiencia energética

Combustible	Contenido energético por galón ^a	Eficiencia energética
Diésel	128.000 - 130.000 Btu	3,2 mpg
Biodiésel	117.000 - 120.000 Btu	3,3 mi/DGE
GNC	33.000 - 38.000 Btu a 3000 psi 38.000 - 44.000 Btu a 3600 psi	2,7 mi/DGE
Etanol (E85)	~ 80.000 Btu	3,2 mi/DGE
Hidrógeno	Gas: ~6,500 Btu a 3.000 psi ~16,000 Btu a 10.000 psi	2,7 mi/DGE
GNL	~73.500 Btu	2,7 mi/DGE

Fuentes:

^a Departamento de Energía 2012
^b TCRP 2011

Notas:

DGE: galón equivalente de diésel
psi: libras por pulgada cuadrada
Btu: Unidad térmica británica

el diésel y también por las tecnologías de reducción de emisiones. Las emisiones de CO son bajas en el caso de los motores diésel. Las emisiones de HCT del diésel por lo general son no-metano, y no constituyen una gran preocupación respecto al calentamiento global. Las principales preocupaciones relativas al combustible diésel son las emisiones de NO_x MP (Nylund *et al.* 2004).

4.2.1.1 Contenido de azufre del combustible diésel

La reducción del contenido de azufre en los combustibles no solo reduce la contaminación del aire relacionada con el azufre sino que también permite el uso de tecnologías de postratamiento de escapes. El azufre en el combustible contribuye a la formación de partículas que obstruyen los filtros y por lo tanto reducen la efectividad de las tecnologías de reducción de emisiones, como los filtros de partículas diésel. Por lo general, en los países en desarrollo el contenido de azufre es superior a 500 partes por millón (ppm); los niveles de azufre por debajo de ese valor permiten el uso de catalizadores de oxidación. Por debajo de 50 ppm, se dispone de tecnologías para la reducción de emisiones (PNUMA 2007). La Tabla 6 presenta el contenido de azufre en diésel en Brasil, México, India, Estados Unidos y Europa.

4.2.1.2 Tecnologías para la emisión-reducción de diésel

Convertidor catalítico de oxidación en vehículos a diésel:

El convertidor catalítico de oxidación en vehículos a diésel (DOC) utiliza un proceso químico para descomponer los contaminantes de los motores diésel dentro de la corriente de escape, transformándolos en compuestos menos nocivos. Esto reduce las emisiones de material particulado, hidrocarburos y CO (Translink 2006). El convertidor catalítico de oxidación solo se puede usar cuando el contenido de azufre en diésel es inferior a 500 ppm (PNUMA 2007).

Filtro de partículas diésel:

Un filtro de partículas diésel (DPF) es un dispositivo montado sobre el sistema de escape en el mismo lugar y con la misma configuración general que otros dispositivos de postratamiento de escapes típicos (por ejemplo, silenciador y catalizador de oxidación). Esto ayuda a cumplir las normas de la EPA 2007. El monóxido de carbono y los hidrocarburos se transforman en dióxido

Tabla 6 Contenido de azufre en diésel en Brasil, México, India, Estados Unidos y Europa

País	2012 (ppm)	Objetivo futuro (ppm) ^a	Ubicación
Brasil ^b	50	10	Principales ciudades
	500	50	Áreas metropolitanas
	1800	500	A nivel nacional
México ^b	15	15	Región fronteriza al norte y 3 grandes áreas metropolitanas
	500	50	A nivel nacional
India ^c	50		Principales ciudades
	350		Áreas metropolitanas
	500		A nivel nacional
EE. UU. ^d	15		A nivel nacional
Europa ^d	10		A nivel nacional

Fuente:

^a Brasil 2013, México 2015

^b PNUMA 2012a

^c PNUMA 2012b

^d PNUMA 2012c

de carbono y agua, respectivamente. El catalizador también aumenta la proporción en dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxido de nitrógeno (NO) en el escape. El NO se oxida a NO₂ para eliminar el material particulado del escape. Un DPF puede reducir las partículas emitidas por el diésel a niveles comparables al nivel de partículas emitidas por el GNC (Meléndez *et al.* 2005). El efecto de reducción de las partículas del DPF tiende a ser mejor cuando las partículas son de mayor tamaño, superiores a 100 nanómetros (Nylund *et al.* 2004). Un filtro de partículas diésel solo es efectivo con combustible diésel cuyo contenido de azufre es inferior a 50 ppm (PNUMA 2007).

Recirculación del gas de escape: La tecnología RGE hace recircular los gases de escape (fundamentalmente los que contienen nitrógeno inerte, CO₂ y vapor de agua) dentro de los cilindros del motor. Esta recirculación enfría el motor, lo que a su vez reduce las emisiones de NO_x y posiblemente, el material particulado (Murtonen y Aakko-Saksa 2009). La RGE se ha usado durante más de 25 años en los motores de encendido por bujía (TCRP 2011).

Reducción catalítica selectiva: La reducción catalítica selectiva (RCS) combina urea y agua para producir amoníaco y CO₂, que luego se combinan con NO_x para producir nitrógeno y agua (Murtonen y Aakko-Saksa 2009). La RCS puede reducir las emisiones de NO_x del 75 al 90 por ciento (TCRP 2011). Esto ayuda a cumplir las normas de la EPA de 2010.

4.2.2. Híbrido MCI-eléctrico

Un vehículo híbrido eléctrico puede alimentarse de dos fuentes de energía almacenada: un combustible consumible y un sistema de almacenaje de energía recargable (Wayne *et al.* 2004). Las emisiones de escape asociadas con un híbrido son iguales a las emisiones asociadas con las de los motores de combustión interna, pero las emisiones pueden disminuir en sistemas híbridos que logran un menor consumo de combustible. Se logra una reducción en el consumo de combustible mediante el frenado regenerativo y las reducciones de operaciones transitorias del motor mediante un sistema de gestión de potencia mejorado (Consejo Empresarial Mundial Para el Desarrollo Sostenible 2004).

4.2.3 Gas natural comprimido

El gas natural es una fuente de energía fósil común con elevado contenido de metano que se comprime para aumentar la densidad de la energía (TCRP 2011). Las emisiones de gas natural comprimido (GNC) son fundamentalmente metano y NO_x. La relación aire-combustible para combustión, como mezcla pobre¹ y estequiométrica,² también puede reducir las emisiones (Nylund *et al.* 2004). En comparación con el diésel, las emisiones de material particulado y NO_x del GNC son menores, aunque la cantidad varía según el autobús (Meléndez *et al.* 2005). Por lo general, el GNC tiene un bajo índice de emisión de material particulado, aunque el combustible sigue emitiendo partículas nocivas para la salud. Con altas cargas de pasajeros, la cantidad de material particulado puede aumentar a niveles comparables a los del diésel (Nylund *et al.* 2004, Jayaratne *et al.* 2009). El GNC también emite mayor cantidad de formaldehídos y otras nanopartículas que afectan negativamente la salud, incluso con catalizadores de oxidación.

4.2.3.1 Tecnologías para la reducción de emisiones del GNC

Oxidación catalítica: La oxidación catalítica (OC) está diseñada para oxidar tanto el CO como los HC, lo que a su vez produce CO₂. Los catalizadores de oxidación pueden reducir las emisiones de HC, CO y CH₄ (Nylund *et al.* 2004, Translink 2006, Johnson Matthey 2011).

Catalizadores de tres vías: Los catalizadores de tres vías (3WC) también son conocidos como catalizadores de oxidación-reducción. Están diseñados para oxidar tanto el CO como los HC, y para reducir el NO₂. Esto da como resultado la producción de CO₂, nitrógeno y agua (Johnson Matthey 2011).

4.2.4 Gas natural licuado

El gas natural licuado (GNL) es un gas natural enfriado con mayor contenido de energía que el gas natural comprimido. Los vehículos a GNC y GNL usan los mismos motores y, por lo tanto, cumplen las mismas normas de emisiones y usan las mismas tecnologías para la reducción de emisiones (TCRP 2011).

¹ Una mezcla pobre, de baja relación aire-combustible, puede emplear índices de compresión más altos y por lo tanto tener mejor rendimiento, permitir un uso de combustible eficiente y generar bajas emisiones de hidrocarburos de escape.² Una relación estequiométrica de combustible-aire permite completar el quemado del combustible.

4.2.5. Biodiésel

El biodiésel se elabora por lo general con aceite de soja o de colza, aunque se dispone de otras fuentes. Con frecuencia es producido a través de un proceso denominado transesterificación, que combina aceites con alcohol y un catalizador para producir biodiésel (TCRP 2011). El biodiésel tiene naturalmente una menor cantidad de azufre que el diésel, lo que también puede reducir las emisiones de material particulado (Translink 2006).

La diferencia entre las emisiones de diésel y biodiésel depende del porcentaje de la mezcla o de la porción de diésel con relación al biodiésel. En el caso de las mezclas de B20 (es decir, 20 por ciento de biodiésel y 80 por ciento de diésel), el Laboratorio Nacional de Energía Renovable demuestra que el biodiésel puede reducir las emisiones de NO_x entre el 3 y el 6 por ciento, y reducir las emisiones de material particulado entre 15 y 20 por ciento. El biodiésel también puede contribuir a la reducción de HC, HC no metano y CO. Sin embargo, el requisito de que todo el combustible cumpla las normas sobre emisiones EPA 2010 ha hecho que las diferencias entre diésel y biodiésel sean casi insignificantes (TCRP 2011).

Puesto que el diésel y el B20 son bastante similares, muchos nuevos modelos de autobuses pueden funcionar usando cualquiera de estos dos combustibles (TCRP 2011). Puesto que el B20 usa los mismos modelos de autobuses, estos modelos tienen las mismas tecnologías de reducción de emisiones que los autobuses a diésel.

4.2.6. Etanol

El etanol, o alcohol etílico, por lo general se elabora a partir de maíz, caña de azúcar o materia prima celulósica. En general, la emisión de material particulado de los autobuses a etanol es similar a la de los motores diésel con DPF. El etanol produce menos emisiones de NO_x en comparación con el diésel pero emite mayor cantidad de emisiones de HC y CO que el diésel. Los modelos de motores más recientes desarrollados para cumplir las normas sobre emisiones más estrictas pueden tener también valores de HC y CO inferiores (Motta 1996).

4.2.7 Combustibles sin emisiones de escapes nocivas

Existen otros combustibles y tecnologías de propulsión, como el hidrógeno, las celdas de combustible de hidrógeno, la electricidad y la electricidad a batería, que no producen las nocivas emisiones de los tubos de escape. Estas no se abordan en la porción sobre emisiones de tubos de escape de esta investigación pero se incluirán en otra parte de la investigación del proyecto sobre emisiones y costos del ciclo de vida.

5. META-ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE ESCAPE DE LAS FLOTAS DE AUTOBUSES URBANOS

Este meta-análisis presenta una visión general de las emisiones de escapes que pueden producirse a consecuencia de una combinación de combustibles y tecnologías. Se compiló un gran conjunto de datos con 368 entradas para proporcionar los valores más representativos posibles para cada combinación (descripciones del estudio disponibles en las referencias de los datos). Este enfoque puede contribuir a mejorar la comprensión del rango de posibles emisiones, ya que hay una significativa variación entre la emisiones de los autobuses del mismo tipo de combustible, tecnología y modelo (Agencia de Transporte Municipal de San Francisco, 2002, Jayaratne *et al.* 2009).

5.1 Metodología

Este meta-análisis compara estudios de autobuses de transporte público similares para hallar tendencias entre un mayor número de pruebas de laboratorio y de campo realizadas en distintos lugares. Los resultados de cada estudio no se pueden comparar directamente debido a diversas condiciones de las pruebas que no se pueden controlar, como edad del autobús, terreno específico o ciclo de manejo. Sin embargo, el método del meta-análisis permite obtener resultados generalizados de una variedad de autobuses probados en una diversidad de condiciones y la normalización de los datos mediante el aumento del tamaño de la muestra para cada combustible y tecnología contemplada en el estudio (Borenstein *et al.* 2009).

El análisis recurrió tanto a un rango o recorrido intercuartílico (RI) para hallar un rango probable de emisiones como a un intervalo de confianza para hallar los valores de emisiones promedio.³ Mediante ambas técnicas, se comparan las emisiones de acuerdo a los siguientes criterios:

- tipo de combustible específico y tecnologías relevantes: compara las emisiones de distintas calidades de combustibles, tipos de combustible y tecnologías.
- Norma europea: muestra si los autobuses están cumpliendo con las normas exigidas.⁴
- Pruebas en campo y pruebas de laboratorio: compara los pruebas realizados en rutas de laboratorio y en campo.
- Ciclo de manejo: compara los ciclos de estado continuo, urbanos y urbanos/suburbanos.
- CO₂ equivalente: incluye dióxido de carbono equivalente en muchas categorías para demostrar el efecto sobre el calentamiento global.

- Odómetro: compara las emisiones con los kilómetros en el odómetro de un autobús.
- Altitud: compara las emisiones con la altitud de la prueba.

En la metodología se consideraron las siguientes descripciones de factores:

Pruebas de campo vs. pruebas de laboratorio

Muchos de los estudios recopilados para el presente trabajo presentan resultados de emisiones obtenidos mediante pruebas de laboratorio. Para tales pruebas, el vehículo es conducido sobre el dinamómetro de chasis. Luego, el autobús sigue un ciclo de manejo específico mientras se van recopilando los datos de las emisiones. Las pruebas de campo incluyen la recopilación de los datos de las emisiones mientras el autobús es conducido en su ruta regular en una ciudad. Esta prueba no sigue un ciclo de manejo estándar y recopila datos de autobuses que operan bajo condiciones normales. Para ambos tipos de pruebas, con frecuencia se utilizan distintas cargas y pesos, lo cual repercute sobre las emisiones pero esto no se aborda en el presente informe.

Ciclos de manejo

Las emisiones varían en base a los ciclos de manejo. En general, los ciclos de manejo más agresivos generan mayores emisiones. Los ciclos de manejo podrían representar solamente manejos urbanos, lo que significa que hay numerosas paradas y arranques, y con frecuencia grandes variaciones en la velocidad. Los ciclos suburbanos tienen menos paradas y arranques, y los autobuses pueden alcanzar velocidades de funcionamiento más elevadas. Los ciclos de estado continuo aumentan hasta alcanzar velocidad y permanecen durante un cierto período de tiempo, pudiendo repetir el proceso a distintas velocidades. Puesto que hay una amplia variedad de ciclos de manejo, se los agrupó por los ambientes que representan: ciclos urbanos, urbano a suburbano y de estado continuo.

CO₂e equivalente (CO₂e)

El CO₂e combina la cantidad de un contaminante con su potencial de calentamiento global en 100 años. La diferencia entre los combustibles de gas natural y otros

con respecto a los gases de efecto invernadero es que los hidrocarburos para los combustibles de gas natural se componen de aproximadamente un 90 por ciento de metano (Ver cálculos en el Apéndice 2). La sección “Significado de las emisiones” explica las emisiones y su relación con el potencial de calentamiento global.

Odómetro

Nylund (2004) señala que los motores desgastados pueden generar mayores emisiones de material particulado. Por lo tanto, para identificar cualquier relación entre el desgaste del vehículo y las emisiones, se compararon los datos de las emisiones con la distancia recorrida durante la vida útil.

Altitud

Los estudios indican que las emisiones de HC, CO y MP aumentan con la altitud (Yanowitz *et al.* 2000). McCormick *et al.* (2000) señalan que la relación entre altitud y emisiones no está debidamente cuantificada y que, para los autobuses que circulan a altas altitudes, los valores de las emisiones observadas de HC, CO y MP podrían ser inferiores a los valores usados en el modelado de las emisiones. Del mismo modo, la altitud no pareciera tener un efecto sobre las emisiones de NO_x. Ambos estudios no tienen en cuenta las nuevas normas y tecnologías referentes a las emisiones de los autobuses. Dadas las potenciales variaciones en las emisiones a mayor altitud, se registró la ciudad donde se realizó cada prueba junto con su altitud, o con una altitud estimada lo más precisamente posible, junto a los datos indicados en los informes. Esto es pertinente a este análisis ya que Ciudad de México y otras ciudades mexicanas están situadas a gran altitud (más de 2000 metros sobre el nivel del mar). Esto no es muy preocupante en Brasil ni en India, donde la mayoría de las ciudades están a baja altitud (menos de 500 metros por arriba del nivel del mar). La zona de la cordillera del Himalaya en India también es de alta altitud pero contiene muy pocas zonas urbanas.

5.2 Recopilación de datos

Los datos de las emisiones de los escapes se recopilaron de 24 fuentes en total, entre las que hay informes de ciudades que realizaron pruebas de emisiones, laboratorios gubernamentales, institutos con instalaciones para pruebas con autobuses así como informes similares presentados en publicaciones revisadas por pares. Los informes incluyen

³El rango o recorrido intercuartílico (RI) provee un rango probable de valores de emisiones para tipos de combustibles dados. El rango intercuartílico representa el 50 por ciento intermedio de puntos de datos limitados por los cuartiles superior e inferior (percentiles 75 y 25) (Healey 2005). Al elaborar el intervalo de confianza, asumimos primero que los datos representan una distribución normal (Borenstein *et al.* 2009). Luego determinamos los valores promedio y las desviaciones estándar para determinar el rango que incluye el porcentaje deseado de los valores de emisiones para cada tipo de combustible. ⁴ No hay suficientes datos para incluir las normas de la EPA.

pruebas en campo o de laboratorio para autobuses de transporte público de 12 m (40 pies). No se incluyeron pruebas en motores independientes. Al principio, se intentó encontrar datos sobre la mayor cantidad de tipos de combustible que pudieran aplicarse a México, India o Brasil. Sin embargo, en el conjunto de datos finales se mantuvieron solamente los combustibles pertinentes para esos lugares. Los estudios también se limitaron a pruebas realizadas durante la última década, salvo en el caso de los combustibles en los que no se disponía de datos de pruebas recientes.

La Tabla 7 muestra la cantidad de puntos de datos en el conjunto de datos para cada categoría, que incluye países en los que se completó en prueba, el año cuando se culminó el estudio (o se lo publicó, si el año del estudio no estaba disponible), los combustibles y las normas sobre emisiones. La Tabla 8 muestra la combinación de las tecnologías representadas en el conjunto de datos. Cada punto de datos puede representar una prueba realizada

en un autobús individual o un promedio de tres a cuatro pruebas en un autobús, según cómo se realizó el estudio. Una gran porción de los estudios se realizó entre los años 2002 y 2006. Esto no representa a las tecnologías más recientes pero puede representar el período de atraso en la aceptación de nuevas tecnologías. El período de atraso puede deberse a la reducción del costo de las nuevas tecnologías, la incorporación de las nuevas tecnologías en la fabricación de autobuses en los diversos países y los ciclos de renovación de las flotas de las agencias. También se contó con datos limitados en los autobuses certificados por la EPA porque en los informes no se indicaban el año de certificación. La mayoría de los datos representan a Estados Unidos, Europa y Canadá, debido fundamentalmente a la limitada disponibilidad de las instalaciones para pruebas en otros lugares.

Tabla 7 Número de puntos de datos por año, norma de emisiones y país

Año	Puntos de datos	Norma sobre emisiones	Puntos de datos	País	Puntos de datos
1994	8	EPA 1998	7	EE. UU.	137
1995	8	EPA 2002	4	China	4
1999	15	EPA 2004	9	Europa	99
2001	15	EPA 2007	6	Canadá	73
2002	37	Euro I	5	Australia	12
2003	58	Euro II	40	India	19
2004	65	Euro III	25	Brasil	1
2005	44	Euro IV	17		
2006	30	EEV ^a	49		
2007	5				
2008	14				
2009	60				
2010	5				

Notas:
^a EEV representa una norma sobre emisiones voluntaria entre las normas Euro V y Euro VI (Dieselnet 2009).

Tabla 8 Combinaciones de tecnologías en conjunto de datos

Generalidades	Puntos de datos	Combustible	Puntos de datos	Combinación	Puntos de datos
Oxidación catalítica (OC)	57	D + OC	25	RGE + OC	8
Catalizador de tres vías (3WC)	40	GNC + OC	27	RCS + DPF	10
Filtro de partículas diésel (DPF)	43	GNC + 3WC	40	DPF + RGE	7
Recirculación del gas de escape (EGR)	23	D + DPF	41		
Reducción catalítica selectiva (RCS)	18	D + RGE	14		
		D + RCS	11		

Calidad de combustible

También se recopilaron datos sobre el consumo y la calidad del combustible. Debido a la variedad de definiciones de diésel ultra bajo en azufre, diésel bajo en azufre y diésel convencional, el contenido de azufre en el combustible (partes por millón, o ppm) se registró a partir de los informes. Cuando estos datos no estaban disponibles, las estimaciones se basaron en el año del estudio y las normas aplicables a los combustibles por país o por agencia para esa fecha. Los combustibles fueron entonces recategorizados sobre la base de cuáles contenidos de azufre, en ppm, (por ejemplo, 15, 50 y más de 150 ppm) coincidían más estrechamente con el contenido de azufre del combustible (véase Tabla 9). Existen también numerosas calidades de GNC pero no se han elaborado normas específicas. El biodiésel tiene muchas variantes. Por los informes disponibles, aquí se representa el biodiésel NExBTL renovable hidrotreatable (de aceite vegetal o grasa animal) y los ésteres metílicos de colza y soja.

Según su disponibilidad en los informes, los datos se recopilaron del ciclo de manejo, la distancia recorrida, la ubicación de la prueba (para tener en cuenta la altitud), las pruebas en campo o las pruebas de laboratorio, la norma europea o de la EPA del vehículo, modelo y tipo de motor. También se identificó, en la medida de lo posible, las tecnologías de los autobuses, para incluir la presencia de filtros de partículas, catalizadores o recirculación del gas de escape. Se recopilaron datos de emisiones de CO₂, CO, NO_x, THC, CH₄, HCNM y MP. Todas las unidades de emisiones fueron convertidas a gramos por kilómetro. (Véase los factores de conversión en el Apéndice 1.)

5.3 Análisis de datos

La siguiente sección presenta los resultados del meta-análisis. En primer lugar, el análisis tuvo en cuenta las emisiones individuales (CO, MP, NO_x, HCT y CO₂e), según la combinación de combustible y tecnología. Otros factores adicionales, como las normas europeas, los ciclos de manejo, la altitud y las pruebas de campo y en laboratorio, arrojaron otros resultados significativos durante el análisis.

Tabla 9 Cantidad de puntos de datos por combustible

Combustible	Puntos de datos
Diésel – 15 ppm	80
Diésel – 50 ppm	29
Diésel – 150 + ppm	62
Biodiésel 100%	14
Biodiésel 20%	9
GNC	112
GNL	8
Etanol	17
Híbrido	25

En el apéndice que se encuentra en línea están disponibles gráficos adicionales.

5.3.1 Emisiones reguladas

Las Figuras 2 y 3 muestran los resultados del análisis del intervalo de confianza de las combinaciones de combustibles y tecnologías. Los resultados del rango intercuartílico están disponibles en el apéndice que se encuentra en línea. La Figura 2 demuestra las emisiones comúnmente reguladas por tecnología. Los límites de las normas europeas se muestran para identificar cuáles tipos de tecnologías están cumpliendo la norma.

En la Figura 3 se encuentra un resumen de los resultados. En general, las tecnologías para la reducción de emisiones son muy efectivas para la reducción de CO, HCT y MP. No obstante, son menos efectivas para reducir las de NO_x. Los combustibles sin tecnologías para reducción de emisiones pueden aumentar las emisiones con relación al diésel convencional.

Monóxido de carbono: Las menores emisiones de monóxido de carbono proceden de B100 y D15 con

RGE, D15 con OC, DPF o híbrido, y GNC con OC. Esto es razonable, si se considera que los catalizadores de oxidación y filtros de partículas diésel están hechos para reducir las emisiones de CO. Ambas tecnologías de reducción catalítica selectiva (RCS) demostradas tienen emisiones de CO más elevadas que los combustibles similares sin SCR. Las emisiones de CO más altas provienen de combustibles sin tecnologías para la reducción de emisiones: etanol, GNL y GNC.

Hidrocarburos totales: Debido a su composición, el diésel tiene valores de HCT muy bajos. Esto se refleja en la Figura 2b. El HCT es importante para el GNC, el GNL y el etanol. Un catalizador de oxidación reduce las emisiones de GNC en casi el 50 por ciento, mientras que un 3WC reduce las emisiones en casi el 100 por ciento. Con un 3WC, las emisiones de HCT de un vehículo a GNC son comparables a las de un vehículo diésel y biodiésel.

Óxidos de nitrógeno: El GNC con 3WC tiene la menor emisión de NO_x, seguidas por el B100 con RGE y RCS, y D15 con RGE y RCS. Esto confirma los resultados esperados, ya que el 3WC, RGE y RCS han sido todos diseñados para reducir el NO_x. El valor del NO_x para el E93

Figura 2a Promedio para emisiones de CO por tecnología (g/km)

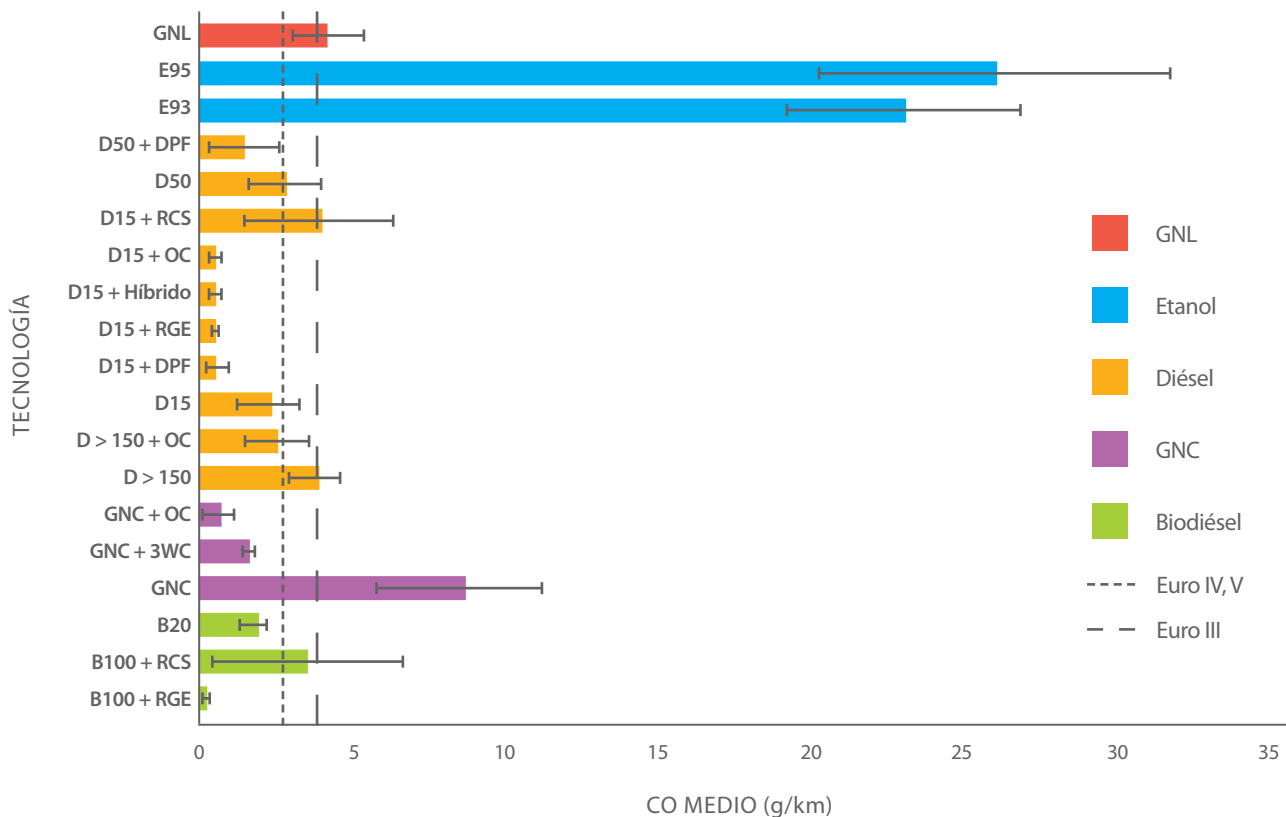


Figura 2b Promedio para emisiones de HCT por tecnología (g/km)

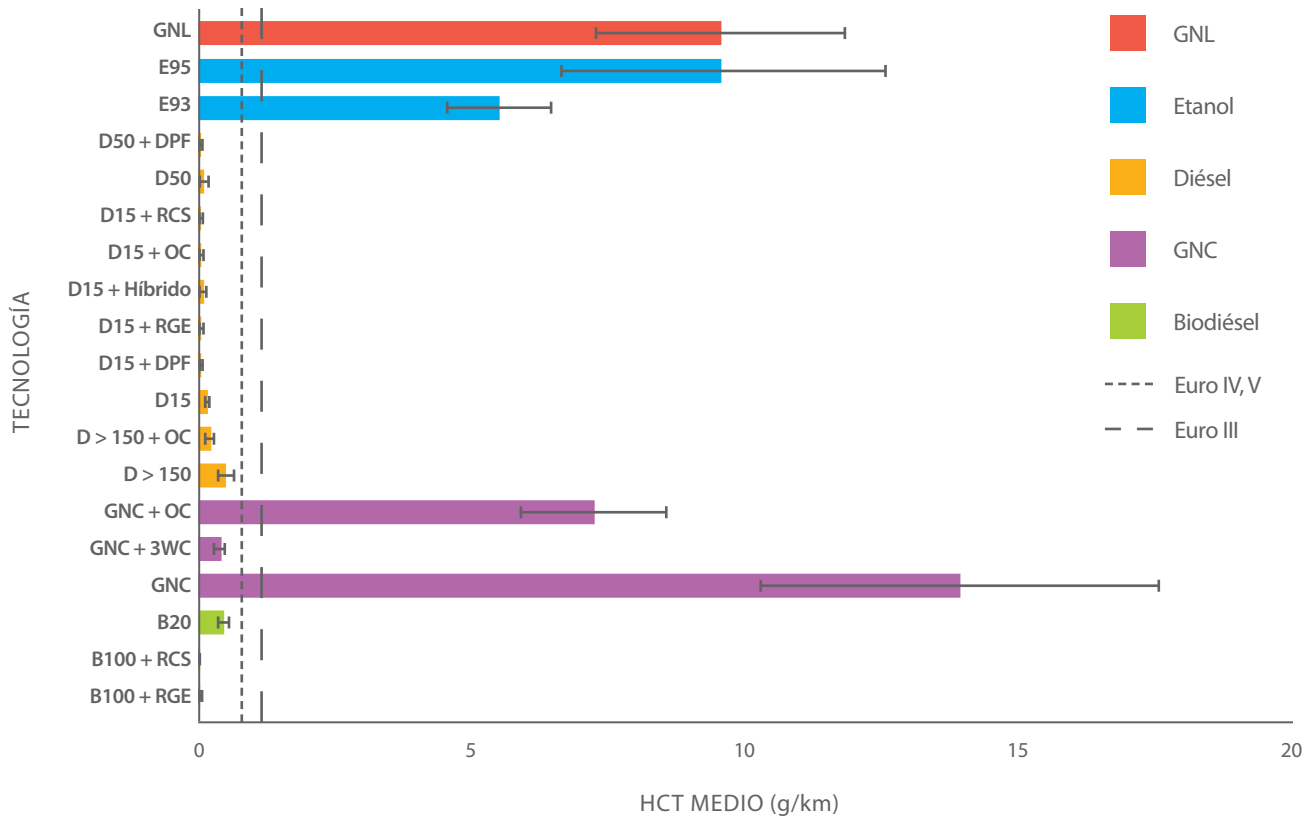


Figura 2c Promedio de emisiones de NO_x por tecnología (g/km)

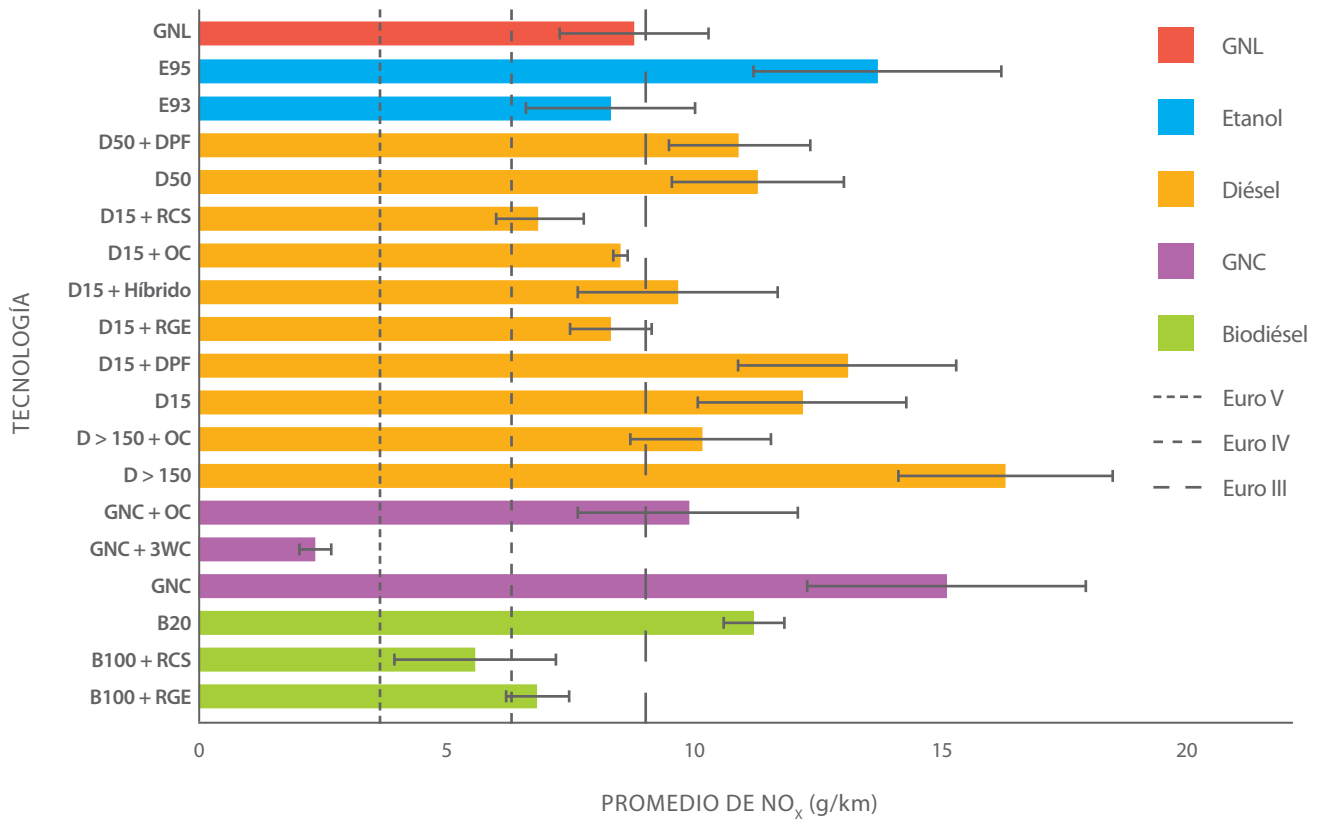


Figura 2d Promedio de emisiones de material particulado por tecnología (g/km)

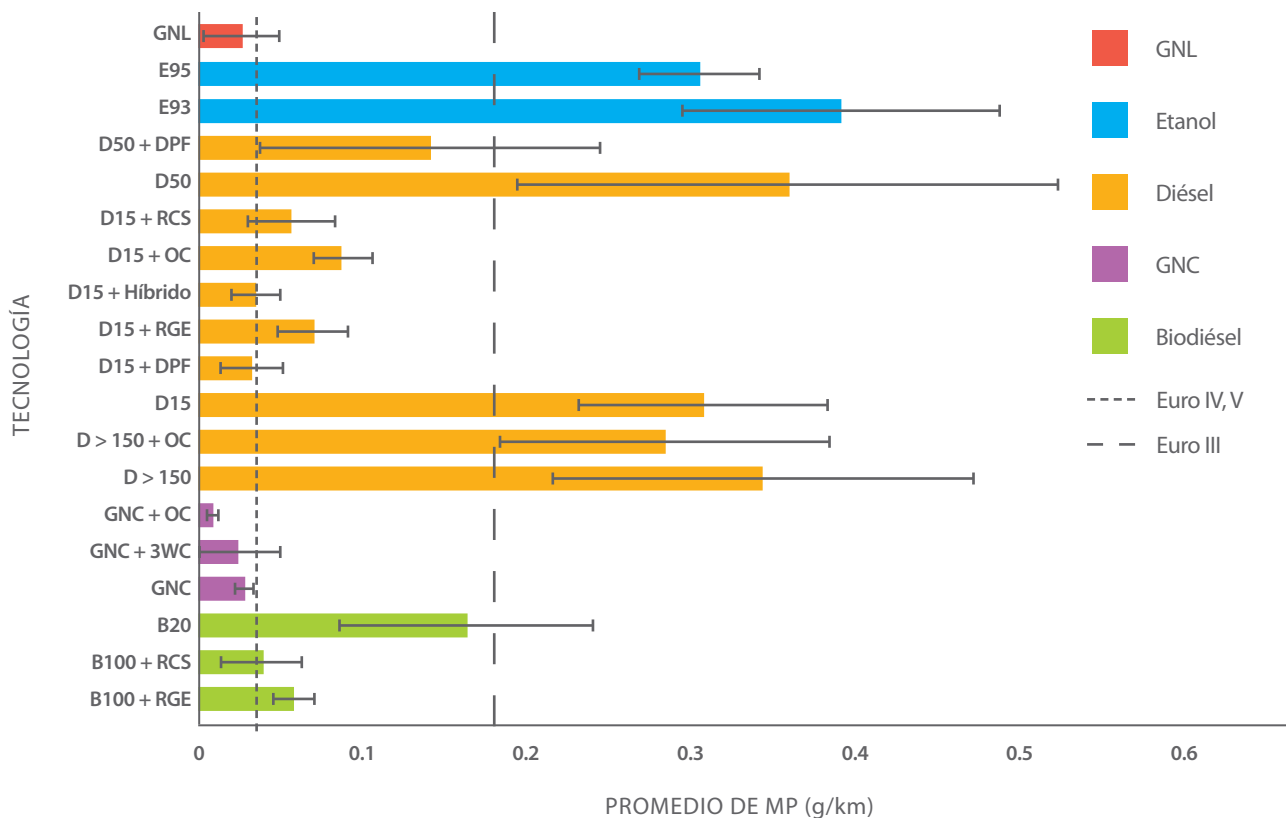
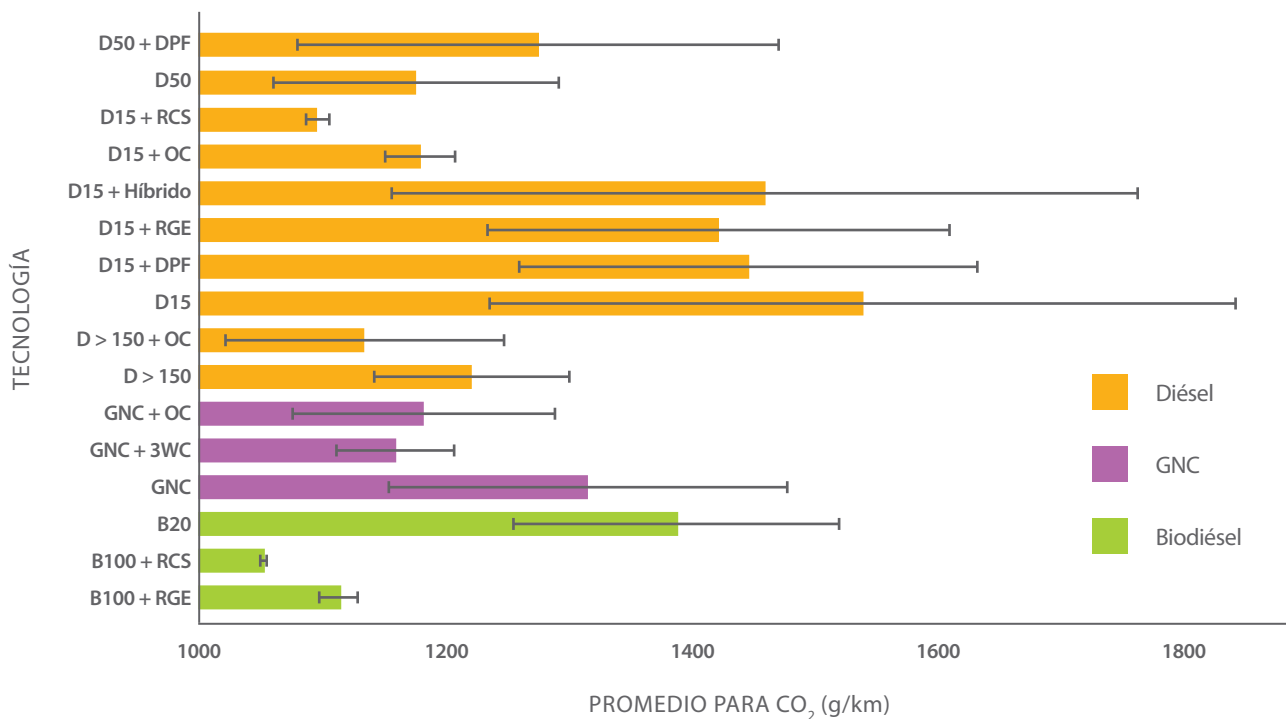


Figura 2e Promedio de emisiones de CO₂ por tecnología (g/km)



también es comparable con el D15 con RGE. La Figura 2c muestra también que los catalizadores de oxidación también son efectivos para reducir las emisiones de NO_x en tanto que los DPF tienen muy poco efecto sobre estas emisiones de NO_x o las aumentan. Los principales emisores de NO_x son los D >150, CNG y E95 sin tecnologías.

Material particulado: El GNC y el GNL son particularmente bajos en lo que se refiere a emisiones de partículas. En el caso de los combustibles diésel, los datos demuestran que hay una significativa reducción del material particulado por la aplicación de todas las tecnologías, en particular los DPF. Sin embargo, otros combustibles emiten menor cantidad de material particulado. El B20 tiene un 50 por ciento menos de material particulado en comparación con el D15, y el GNC con 3WC tiene un 25 por ciento menos que el que el D15 con DPF.

Dióxido de carbono: El promedio y el rango intercuartílico muestran que hay un amplio rango de emisiones de CO₂. Estos datos también demuestran que las tecnologías usadas para reducir los contaminantes locales pueden aumentar las emisiones de CO₂. El CO₂ equivalente muestra también que las tecnologías podrían aumentar también las emisiones generales de los gases de efecto invernadero, y esas normas de emisiones no regulan las de los gases de efecto invernadero.

5.3.2. Factores adicionales

Normas europeas (véase los gráficos en el Apéndice en línea:) La norma EPA no se analizó debido a la falta de puntos de datos. Se observa que los autobuses satisfacen las normas sobre emisiones europeas para HCT, sin embargo no cumplen la norma europea relativa a las emisiones de CO en todos los casos. El índice medio de emisiones para los vehículos clasificados para Euro III y IV cumple la norma, pero algunos valores son más altos que la norma. En general, los autobuses no cumplen con las normas sobre emisiones de NO_x y no todos los autobuses cumplen las normas sobre emisiones relativas al material particulado. La Figura 4 muestra el rango intercuartílico para las emisiones de CO₂ equivalente según la norma europea. Si bien el CO₂ no está reglamentado por las normas europeas, los datos muestran que las emisiones de CO₂e promedio disminuyeron a medida que la norma avanzaba de Euro II a Euro IV pero aumentaron para la norma interina de EEV entre Euro IV y Euro V. El rango intercuartílico para las emisiones de CO₂ también disminuyó a medida que progresaron las normas de emisiones.

Pruebas de campo y de laboratorio: El GNC y el diésel son los únicos combustibles que cuentan con una cantidad significativa de pruebas de laboratorio y de campo para comparar. Las pruebas de campo tienen a mostrar rangos de emisiones mayores en comparación con las pruebas de laboratorio, y los valores medios para las emisiones de NO_x y CO₂ son claramente más bajos que los valores medios

Figura 3a Cambio porcentual de emisiones promedio para combustibles sin postratamiento de escapes comparados con D > 150

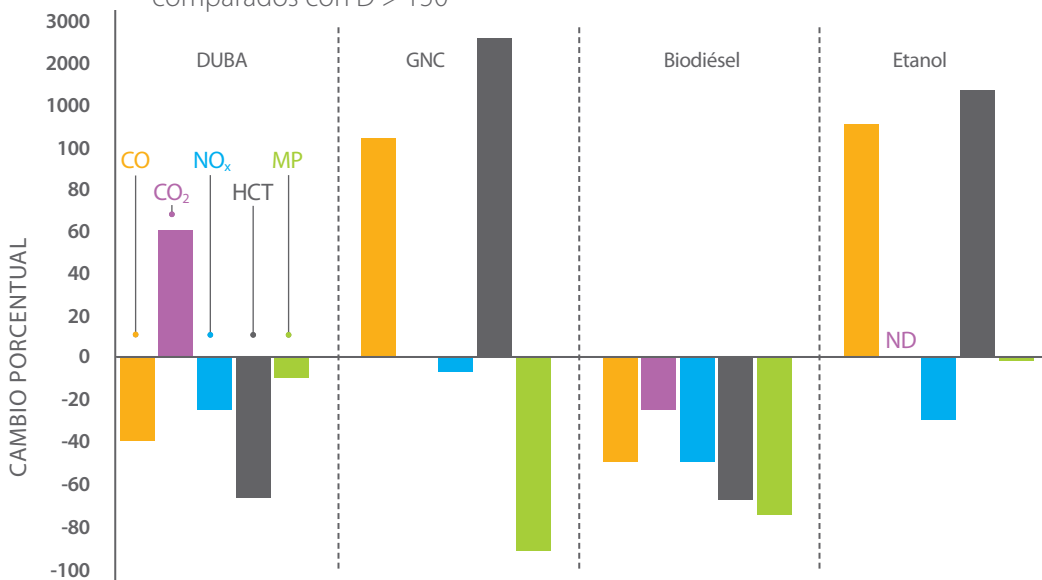


Figura 3b Cambio porcentual en emisiones medias para DUBA con tecnologías comparado con DUBA

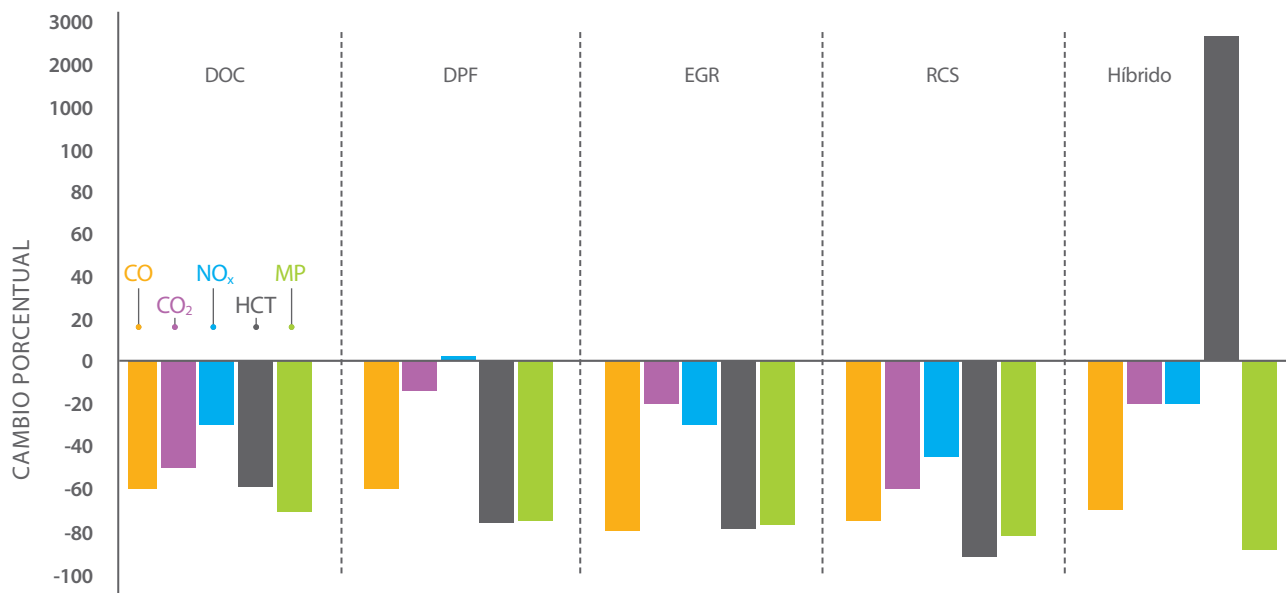
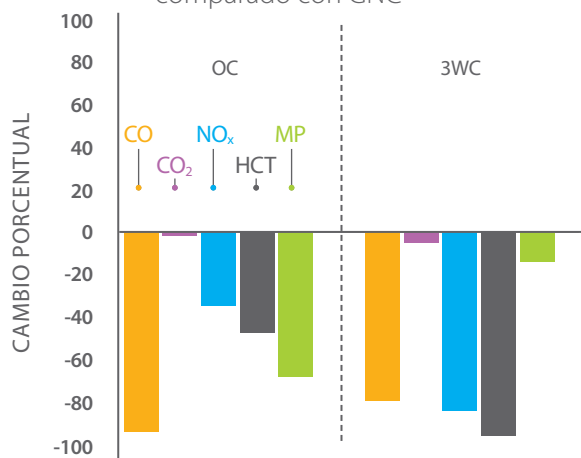


Figura 3c Cambio porcentual en emisiones promedio para GNC con tecnologías comparado con GNC

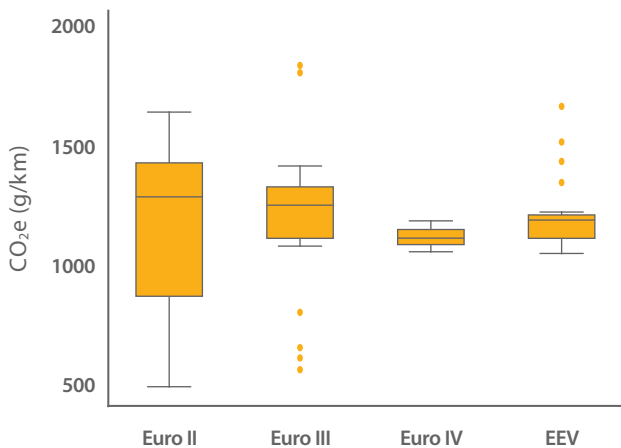


obtenidos en las pruebas de campo (véase el Apéndice en línea). Es importante comprender la variedad de resultados de las pruebas en laboratorio y de campo cuando se comparen las pruebas futuras. La comparación de una única prueba de campo con otro de laboratorio puede arrojar resultados sesgados.

Ciclos de manejo: Para todas las emisiones, los ciclos urbanos muestran un rango más amplio y valores de emisiones más altos que los otros ciclos de manejo. Por lo general, los ciclos de estado continuo y los ciclos urbano a suburbano muestran menores emisiones (de al menos 30 por ciento y 20 por ciento, respectivamente). No existe una clara tendencia por combustibles o tecnologías individuales. Cuando se comparen datos de pruebas en el futuro, esta respectiva diferencia en las emisiones por ciclo de manejo debería ser tomada en cuenta. (Ver los gráficos en el Apéndice en línea.)

Odómetro: Si bien todas las emisiones se trazaron con relación a la distancia recorrida, solamente los kilómetros de autobuses recorridos graficados con relación a las emisiones de NO_x muestran que los kilómetros recorridos es un buen elemento para predecir una mayor cantidad de emisiones de NO_x. El intervalo de confianza es mayor para una distancia recorrida más alta, debido en particular a menos puntos de datos de distancia recorrida alta. El trazado del CO₂ equivalente con relación a los kilómetros

Figura 4 RI para emisiones de CO₂ equivalente según la norma europea



de autobús recorridos también muestra cierta correlación, aunque la relación no es tan fuerte como en el caso de las emisiones de NO_x (Figura 5).

Altitud: El análisis muestra una correlación entre las emisiones de CO, HCT y material particulado, y la altitud, aunque carece de suficientes datos para mayores altitudes que permitan demostrar una fuerte correlación. El rango de valores esperados varía para cada tipo de combustible. El CO muestra un incremento para el caso del diésel y de los híbridos de aproximadamente 2 g/km por cada aumento de 1500 metros en la altitud. El rango de los valores de CO para el caso del diésel y de los híbridos es, a groso modo, 15 g/km. Por lo tanto, un aumento en el CO de 2 g/km (como se muestra en la Figura 6) sería un aumento del 10 por ciento sobre un aumento de 1500 metros de altitud. En el caso del HCT, solamente el GNC mostró un aumento correlacionado con la altitud. Un análisis similar con el CO muestra que un aumento de 1500 metros en la altitud daría como resultado un aumento del 10 por ciento en el HCT. Si se considera el material particulado del biodiésel o del diésel, hay aproximadamente un 10 por ciento de aumento también con un aumento de 1500 metros de altitud. La Figura 6 muestra la relación entre la altitud y las emisiones para el CO, HCT y MP. (Véase el Apéndice en línea si desea conocer más datos.)

Figura 5 Emisiones de NO_x y CO₂e con relación a la distancia recorrida

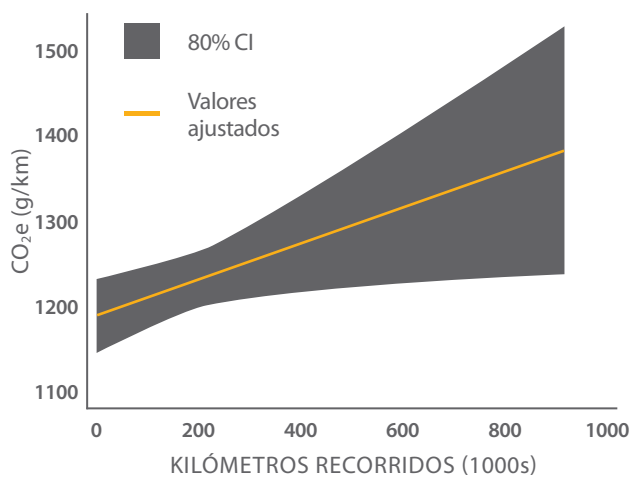
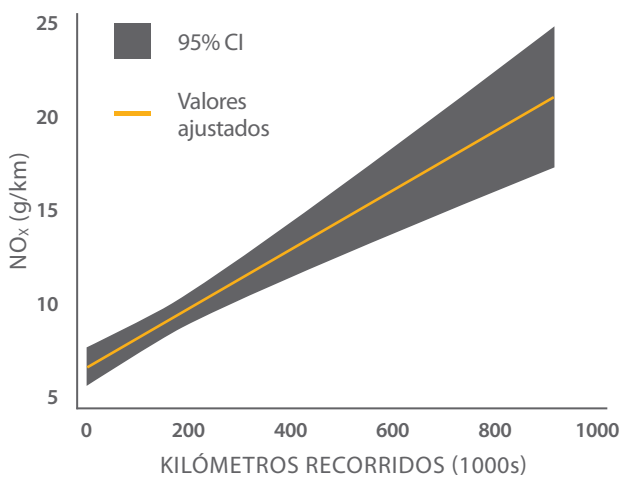
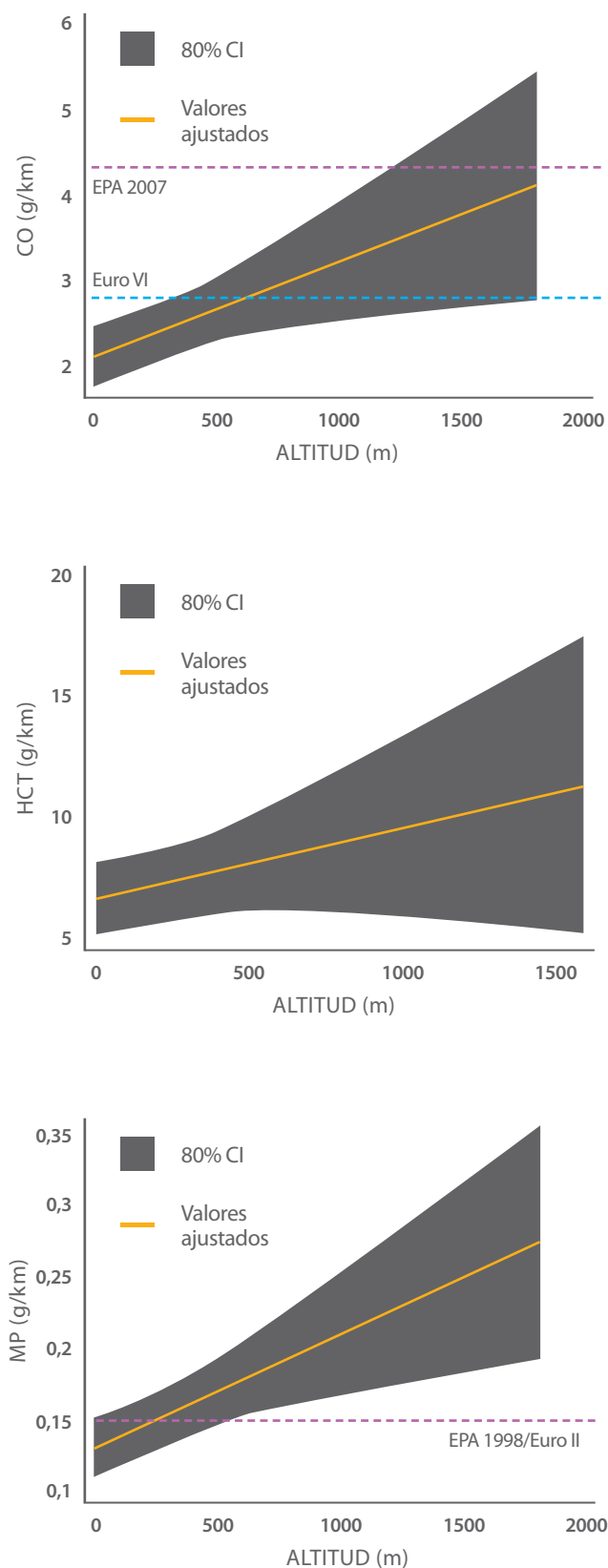


Figura 6 Emisiones de CO, HCT y material particulado con relación a la altitud



Comparación de emisiones de NO_x, CO₂e y PM: El NO_x y el material particulado están considerados entre los contaminantes locales más nocivos, en tanto que el CO₂ equivalente es importante para el calentamiento global. El gráfico de las emisiones de NO_x y CO₂e con relación al material particulado muestra el combustible y las tecnologías con mejor desempeño entre estos contaminantes. Las Figuras 7 y 8 siguientes se concentran en el NO_x y el material particulado. La Figura 7 muestra los valores medios para cada combinación de combustible y tecnología. El cuadrante inferior muestra los combustibles con mejor desempeño en ambas categorías. La Figura 8 es un acercamiento al cuadrante inferior, que también muestra los rangos (basados en el intervalo de confianza) para cada una de estas combinaciones. Esto muestra que la combinación GNC + 3WC es la mejor en términos de emisiones de NO_x y, en algunos casos, de material particulado. Las Figuras 9 y 10 analizan el CO₂ equivalente, y muestran que la combinación combustible B100 + RCS es generalmente la mejor al comparar las emisiones de CO₂e y de material particulado. Las figuras muestran, sin embargo, que el rango de resultados posibles no hace que una combinación de combustible y tecnología sea siempre mejor que otras. Algunas de las combinaciones con mejores beneficios generales son el GNC + 3WC, B100 + RCS, D15 + RCS y B100 + RGE.

6. RESULTADOS DEL META-ANÁLISIS DE EMISIONES DE ESCAPES

El meta-análisis muestra valores de emisiones similares a los esperados o al de las normas de emisiones para cada tipo de combinación de combustible y tecnología. Las tecnologías produjeron los cambios esperados sobre las emisiones, tanto reguladas como sin regular. Esto se observa claramente en los combustibles sin tecnologías D5, GNL, GND y etanol, ya que los datos analizados muestran que las emisiones son elevadas para cada una de estas categorías.

Debido al hecho que las tecnologías de postratamiento de escapes se suelen desarrollar para cumplir las normas sobre emisiones, los datos demuestran que estas normas por lo general son efectivas. Sin embargo, los datos muestran también que no todos los autobuses cumplen las normas de emisiones esperadas, específicamente en los casos de NO_x y material particulado. Esto podría también ser resultado del diferente tipo de pruebas efectuadas para certificar los niveles de emisiones comparados con las pruebas de autobuses de transporte público en uso que aquí se muestran. Las normas sobre emisiones, que no consideran todavía las emisiones de los gases de efecto invernadero, no repercuten sobre las emisiones de CO₂ equivalente.

Figura 7 Emisiones de NO_x con relación al material particulado por tecnología

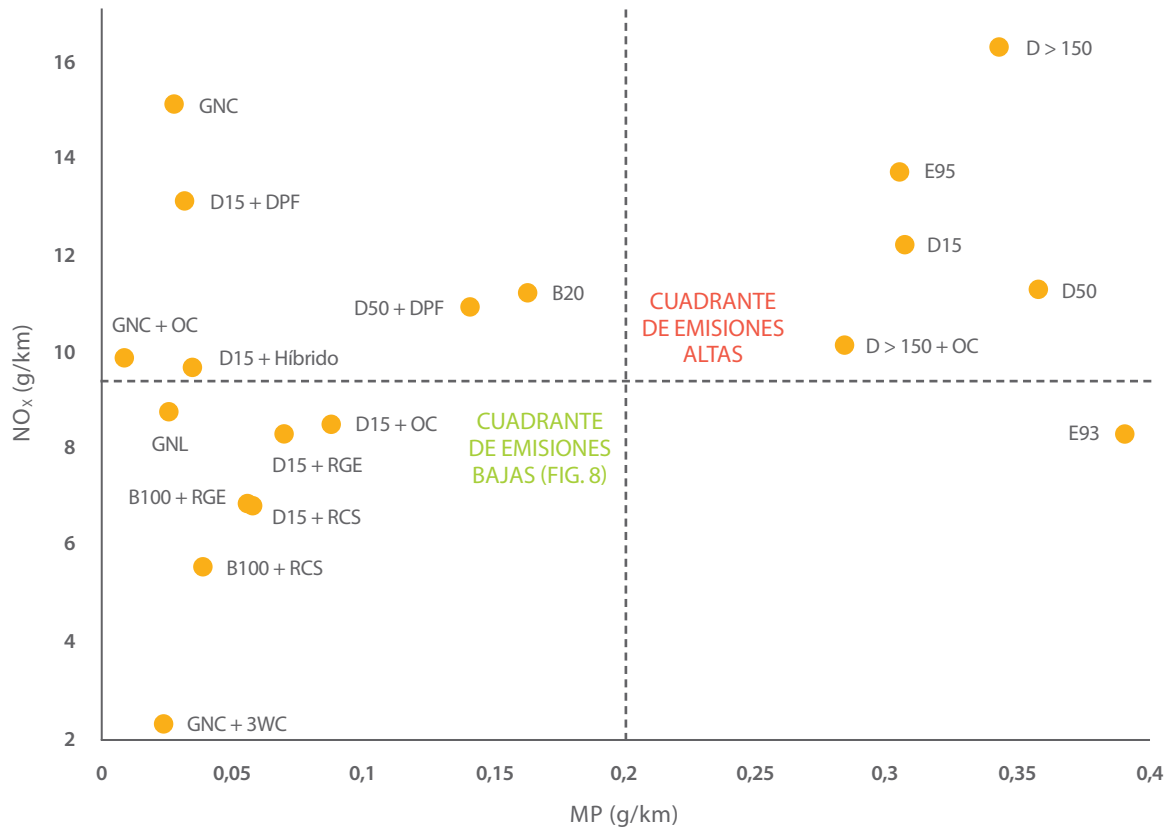


Figura 8 Emisiones de NO_x con relación al material particulado, aproximación a los rangos del cuadrante de bajas emisiones

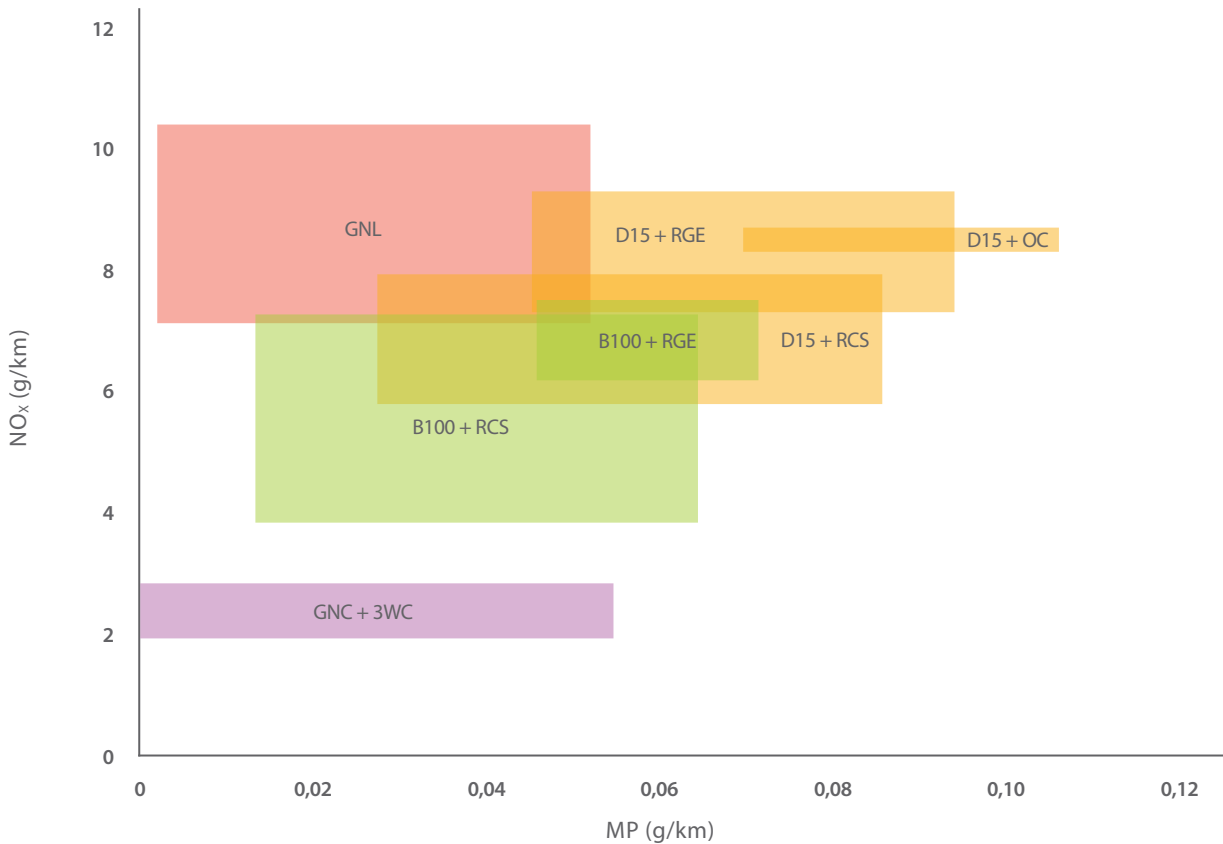


Figura 9 Comparación de emisiones de CO₂e y material particulado por tecnología

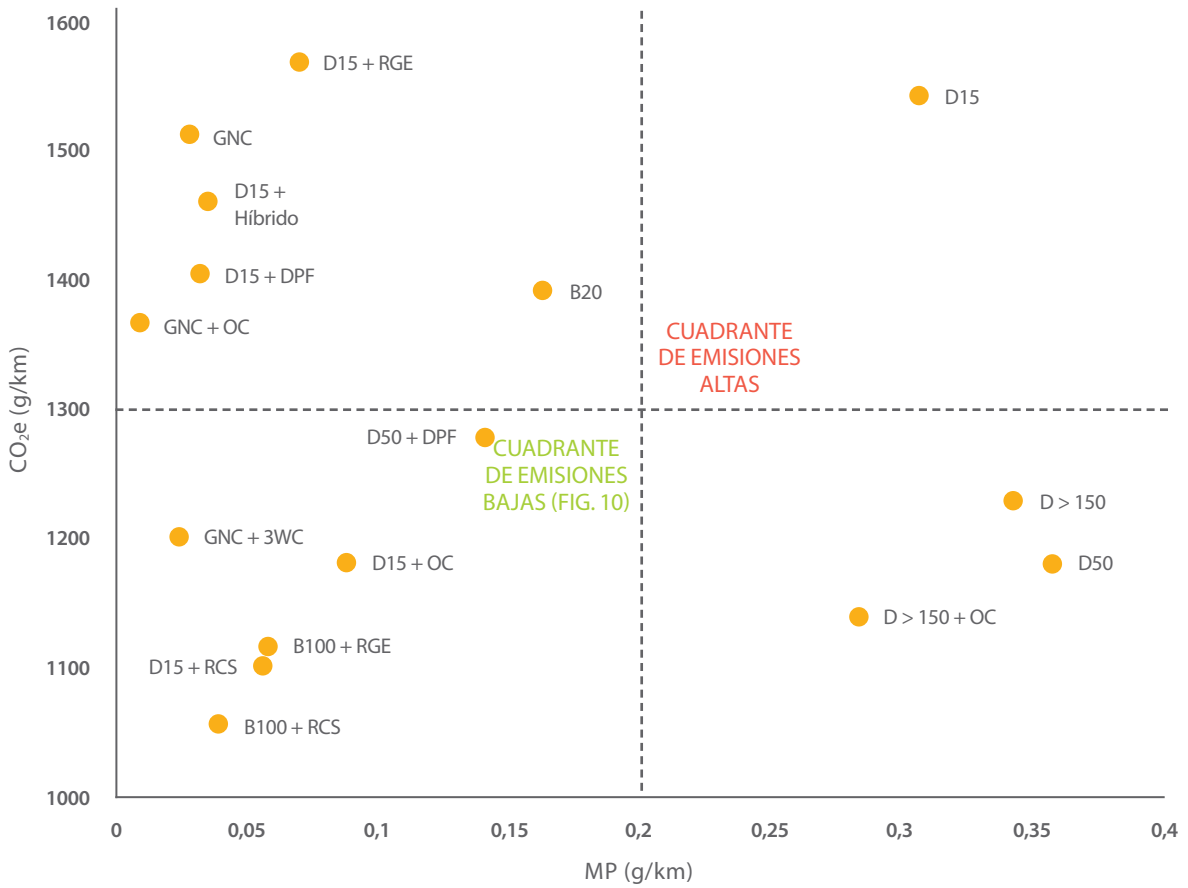
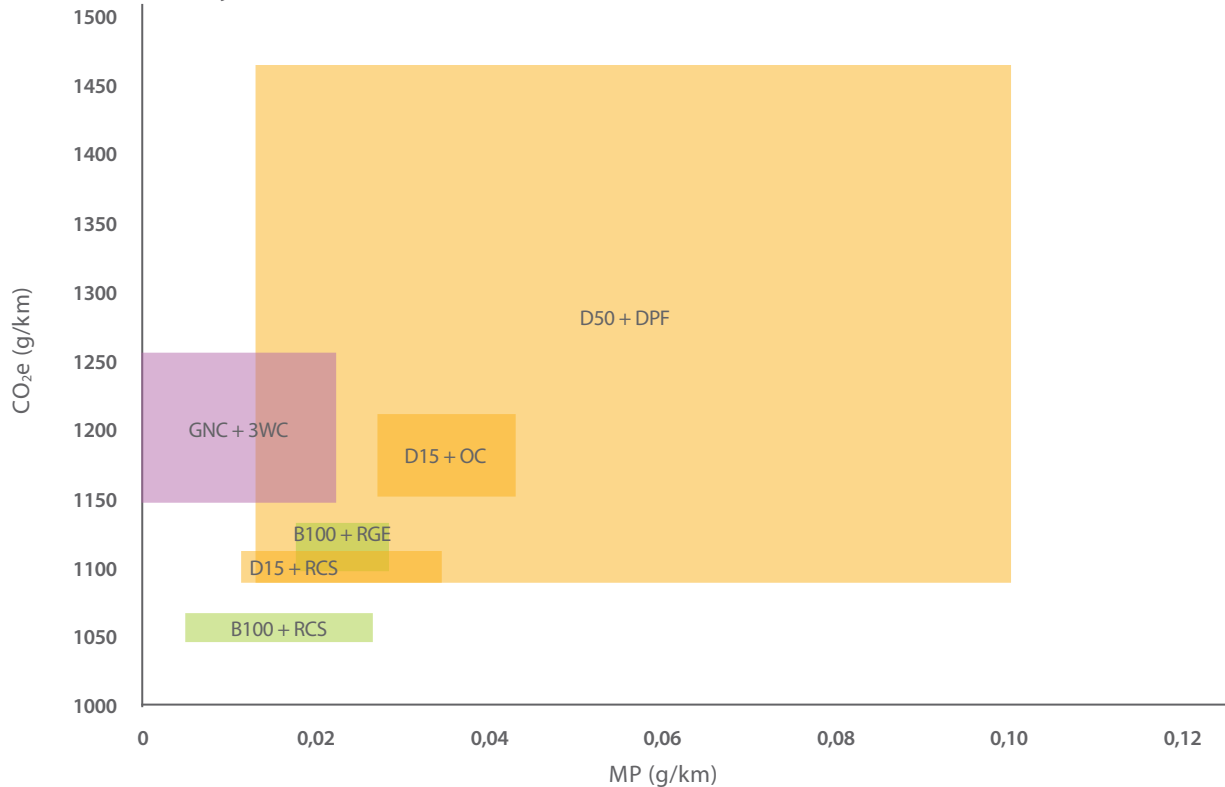


Figura 10 Emisiones de CO₂e y material particulado, aproximación a los rangos para del cuadrante de bajas emisiones



Muchos factores pueden afectar las emisiones. El ciclo de manejo repercute sobre las emisiones, como se muestra en algunos de los informes de este estudio. El ciclo de manejo urbano, con muchas paradas y arranques, muestra mayores emisiones en todas las categorías, pero el efecto es bastante coherente en todos los casos de tipos de combustibles y emisiones. También hay diferencias en los valores de las emisiones entre las pruebas de campo y los de laboratorio para el mismo tipo de combustible, aunque no existe una tendencia clara para todas las emisiones. En estas pruebas, las emisiones de CO₂ y de NO_x son, a grosso modo 10 y 20 por ciento, respectivamente más elevadas en el caso de las pruebas de campo que en el de las pruebas de laboratorio. El análisis muestra también que hay correlación entre altitud y CO, MP y HCT. Cada categoría mostró un aumento aproximado del 10 por ciento en las emisiones sobre un incremento de 1500 metros en la altitud para tipos de combustible específicos. En todos los casos, más datos pueden mejorar la precisión de los efectos estimados de distintos ciclos de manejo, pruebas de campo y altitud.

Si se observan los kilómetros de vida útil recorridos por un vehículo con relación a las emisiones, se ve que una mayor distancia recorrida en un vehículo sirve para predecir bien las emisiones de NO_x. Esto se debe, quizás, porque los autobuses más antiguos no tienen las tecnologías más actuales y los motores gastados pueden tener emisiones más elevadas (Nylund 2004). Existe también una correlación entre kilómetros recorridos y emisiones de CO₂ equivalentes.

En general, cuatro tecnologías muestran las menores emisiones en categorías importantes que afectan la contaminación, la salud y las emisiones de gas de efecto invernadero (NO_x, MP y CO₂ equivalente): el gas natural comprimido con catalizador de tres vías (GNC + 3WC), el biodiésel al 100 por ciento con reducción catalítica selectiva (B100 + RCS), el diésel con 15 ppm de contenido de azufre con reducción catalítica selectiva (D15 + RCS) y el biodiésel al 100 por ciento con recirculación de gas de escape (B100 + RGE). Ningún combustible manifiesta una ventaja visible con relación a otros combustibles en todas las categorías pero las tecnologías de control son un factor importante para la reducción de emisiones.

7. CONCLUSIÓN

Como parte del programa Combustibles y Vehículos para Transporte Urbano Sostenible, este informe busca mejorar el conocimiento de las emisiones de escapes y emplea la técnica del meta-análisis para identificar la combinación de combustibles y tecnologías de postratamiento que más repercuten en la reducción de las emisiones. El informe analiza tanto las emisiones locales como globales, para comprender cómo repercuten sobre la salud y el medio ambiente. Este informe ayudará a informar a los encargados de adquisición de flotas de autobuses específicamente en Brasil, India y México.

Los análisis demuestran que puede haber diversos valores para emisiones bajo distintas condiciones, incluso para combustibles y tecnologías similares. La compilación de la amplia base de datos presentada aquí aprovecha la información existente para dar a las agencias un resumen de los datos más pertinentes y permite comprender mejor los valores representativos de cada combinación de combustible y tecnología. Este conjunto de datos también representa los autobuses de transporte público en uso, no a los autobuses sometidos a pruebas antes de comenzar a operar. Las pruebas en estos autobuses muestran cómo una mayor distancia recorrida puede influir sobre ciertos tipos de emisiones, incluso si no está previsto que la tecnología para reducir emisiones se deteriore con el tiempo. Por lo general, los datos sobre pruebas en las emisiones de alta calidad sobre una variedad de tecnologías, altitudes, ciclos de manejo, pruebas de campo o de laboratorio, y en países específicos no siempre están fácilmente disponibles debido al costo que implica la realización de estas pruebas. Por lo tanto, hay oportunidad de mejorar la exactitud de los resultados cuando se recaban datos adicionales.

El meta-análisis tiene en cuenta numerosos factores que pueden contribuir a aumentar o disminuir las emisiones además de la tecnología del vehículo. Hay factores específicos que, como el ciclo de manejo, muestran que los ciclos de manejo urbanos tienen mayor cantidad de emisiones que los ciclos de manejo menos agresivos. Entender esto es importante para comparar los resultados de las pruebas de emisiones y también para comprender cómo la reducción del manejo agresivo puede en sí misma reducir las emisiones. Cuando se observan las emisiones con relación a la altitud, los datos muestran que hay aproximadamente un aumento del 10 por ciento en las emisiones de diésel, biodiésel, híbridos y GNC para algunos contaminantes.

En general, los análisis muestran que ningún combustible es significativamente mejor para reducir todas las emisiones de escape si se utilizan las tecnologías de control correctas; por lo tanto, estas técnicas de control son una parte necesaria para la reducción de las emisiones. A la vez, los combustibles o las tecnologías que podrían reducir un contaminante podrían aumentar otras emisiones, en especial en el caso del CO₂ y el material particulado. Si bien todas las emisiones son importantes, las de NO_x, CO₂e y el material particulado son particularmente nocivas pues contribuyen al calentamiento global y afectan la salud pública. Los esfuerzos por mejorar las normas de emisión, que con frecuencia impulsan nuevos desarrollos tecnológicos, han logrado la reducción de las emisiones de NO_x y de material particulado. La inclusión de CO₂ en estas normas, tal como lo prevé Estados Unidos para los vehículos utilitarios pesados en el año 2014, debería traducirse en una mayor economía de combustible y quizás en tecnologías que reduzcan las emisiones de CO₂.

Puesto que los resultados no recomiendan una combinación específica de combustible y tecnologías, las condiciones locales serán importantes para determinar cuáles combustibles deberían usar las agencias de transporte público. Por ejemplo, si en un lugar hay una gran cantidad de material particulado causado por otras industrias, el GNC podría ser la mejor opción. Si el GNC no es fácil de obtener en el país, el uso de biodiésel o diésel con tecnología para la reducción de emisiones también es una buena opción para minimizar las emisiones de los escapes. Sin embargo, si no se dispone de diésel bajo en azufre, la agencia debe alcanzar un equilibrio en la relación de los costos del combustible y de la contaminación local. En todos los casos de potenciales opciones de combustible, hay constantes investigaciones sobre los efectos en la localidad y la salud humana, que se deberían controlar para efectuar recomendaciones que usen los datos más actualizados.

Es importante considerar y entender las emisiones de escape cuando se hacen elecciones de combustible, en particular en un contexto local y con relación al tiempo de desfase en la aceptación de las nuevas tecnologías. Sin embargo, esta investigación y análisis muestran que la innovación tiene el potencial de hacer que las emisiones de escapes sean prácticamente iguales para todos los combustibles. Esto destaca que es menester comprender mejor los costos del ciclo de vida y las emisiones del ciclo de vida de los autobuses de transporte público cuando se toman decisiones de combustible para ser usado en el transporte público. Estos dos componentes generan muchos factores posibles, ya sean globales o locales, que pueden repercutir sobre las recomendaciones finales relativas al combustible o al vehículo. Algunos

de estos factores incluye dónde y cómo son fabricados los combustibles y autobuses, la capacidad de dar entrenamiento al personal y el mantener autobuses con distintas tecnologías, y los costos de combustible y mano de obra futuros. Estos factores relacionados a costos y emisiones, que incluyen emisiones de escape, demuestran que hay entradas globales y locales, además de repercusiones globales y locales. El comprender cómo los combustibles y las tecnologías contribuyen a las emisiones de los escapes es el primer paso para comprender los costos y el impacto reales de las flotas de autobuses urbanos.

Referencias

- Baumert, K.A., T. Herzog y J. Pershing. 2005. *Navigating the Numbers: Greenhouse Gas Data and International Climate Policy*. Washington, DC: Instituto de Recursos Mundiales.
- Borenstein, M., L. Hedges, J. Higgins y H. Rothstein. 2009. *Introduction to Meta-Analysis*. Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd.
- De Hartog, J.J., H. Boogaard, H. Nijland y G. Hoek. 2010. "Do the Health Benefits of Cycling Outweigh the Risks?" *Environmental Health Perspectives* 118(8), Agosto de 2010, 1109-1116.
- Departamento de Energía (DOE). 2012. Ficha de datos de combustibles alternativos en línea en http://www.afdc.energy.gov/pdfs/afv_info.pdf.
- Dieselnet. 2012. "Marco regulatorio". En línea en <http://dieselnet.com/standards/>.
- Environment Canada. 2011. "Potenciales de calentamiento global". En línea en <http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=En&n=CAD07259-1>.
- Administración Federal de Transporte. 2006. "Estudio sobre combustibles alternativos: Informe al Congreso sobre las opciones de políticas para aumentar el uso de combustibles alternativos en los vehículos de transporte público". En línea en http://www.fta.dot.gov/documents/Alternative_Fuels_Study_Report_to_Congress.pdf.
- Healey, J. 2005. *Estadísticas: A Tool for Social Research*. Belmont, CA: Thomson Wadsworth.
- Jayarathne, E., Z. Ristovski, N. Meyer y L. Morawaska. 2009. "Emisiones de partículas y gaseosas de autobuses que operan con gas natural comprimido y con combustible diésel ultra bajo en azufre en cuatro cargas constantes de motor." *Science of the Total Environment* 407: 2845-2852.
- Johnson Matthey. 2011. "Technologies". En línea en <http://ect.jmcatlysts.com/site.asp?siteid=833>
- Lindqvist, K. 2012. Normas de emisiones para vehículos de carretera pesados y livianos. Gotenburgo, Suecia: Secretaría del clima y la contaminación ambiental
- Macias, J. M., H. Martínez y A. Unal. 2010. "Bus Technology Meta-Analysis." Reunión anual del Consejo de Investigación sobre Transporte.
- McCormick, R.L., M.S. Graboski, T.L. Alleman y J. Yanowitz. 2000. "Idle Emissions from Heavy-Duty Diesel and Natural Gas Vehicles at High Altitude (Emisiones en ralentí de vehículos utilitarios pesados con motor diésel y gas natural a elevadas alturas)" *Journal of the Air and Waste Management Association* 50(11): 1992-1998.
- Meléndez, M., J. Taylor, J. Zuboy, W.S. Wayne y D. Smith. 2005. Pruebas de emisiones realizadas por la Autoridad de Tránsito del Área Metropolitana de Washington (WMATA) para autobuses de transporte público a gas natural y diésel. Washington, DC: Laboratorio Nacional de Energía Renovable, Innovación para el futuro de nuestra energía.
- Motta, R.P., P. Norton y K. Kelly. 1996. *Autobuses de transporte público que utilizan combustible alternativo*. Golden, CO: Laboratorio Nacional de Energía Renovable.
- Murtonen, T. y P. Aakko-Saksa. 2009. *Combustibles alternativos para vehículos y motores utilitarios pesados*. Helsinki, Finlandia: VTT Centro de investigaciones técnicas de Finlandia.
- Nylund, N.K., K. Erkkila, M. Lappi y M. Ikonen. 2004. Estudio de emisiones en autobuses de transporte público: Comparación de emisiones de autobuses diésel y gas natural. Helsinki, Finlandia: VTT Centro de investigaciones técnicas de Finlandia.
- Roychowdhry, A. 2010. "Programa de GNC en India: Desafíos del futuro." Nueva Delhi, India: Centro para las ciencias y el medio ambiente.
- Agencia de transporte municipal de San Francisco. 2002. "Programa piloto de combustible alternativo: Resultados de la evaluación inicial de 6 meses." En línea en <http://www.sfmta.com/cms/rclean/altipilot.htm>.
- Programa Cooperativo de Investigación sobre Transporte Público (TCRP). 2011. Informe 146 del TCRP: *Guidebook for Evaluating Fuel Choices for Post-1020 Transit Bus Procurements* (Guía para la evaluación de opciones de combustible para la adquisición de autobuses de transporte público post-1020). Washington, DC: Transportation Research Board.
- TransLink. 2006. Proyecto de demostración de combustibles alternativos y tecnología para autobuses, Fase 1 – Informe de programa de pruebas. Vancouver, Canadá: TransLink.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2007. "Abrir la puerta a vehículos más limpios en países en desarrollo y en transición: El papel de los combustibles con menor contenido de azufre." Informe sobre el grupo de trabajo sobre azufre de la Sociedad para Combustibles y Vehículos Limpios (PCFV). Nairobi, Kenya.
- PNUMA. 2012a. "Estado de la calidad del combustible y las normas sobre emisiones de vehículos: Latinoamérica y el Caribe." En línea en http://www.unep.org/transport/pcf/PCF/Maps_Matrices/LAC/matrix/LAC_FuelsandVeh_June2012.pdf.
- PNUMA. 2012b. "Estado de la calidad del combustible y las normas sobre emisiones de vehículos en la región del pacífico asiático." En línea en http://www.unep.org/transport/pcf/PCF/Maps_Matrices/AP/matrix/AsiaPacific_Fuels_Vehicles_June2012.pdf.
- PNUMA. 2012c. "Niveles del contenido de azufre en el diésel actuales y propuestos en Asia, Europa y Estados Unidos". En línea en <http://www.unep.org/transport/pcf/PCF/DataADBSulfurDiesel.pdf>.
- Agencia de Protección ambiental (EPA) de Estados Unidos. 2012a. "Contaminantes del aire." En línea en <http://www.epa.gov/air/airpollutants.html>.
- EPA EE. UU. 2012b. "Anexo 1: Análisis de categorías clave. Inventario de las emisiones de gases de efecto invernadero y sumideros: (1990-2010)." En línea en <http://www.epa.gov/climatechange/Downloads/ghgemissions/US-GHG-Inventory-2012-Annex-1-Key-Category-Analysis.pdf>.
- EPA EE. UU. 2012c. "Cambio climático." En línea en <http://www.epa.gov/climatechange/index.html>.
- EPA EE. UU. 1998. "Actualización de los factores de conversión de emisiones para motores utilitarios pesados para MOBILE6: Análisis de consumo de combustible específico por frenos y cálculo de los factores de conversión de emisiones para motores utilitarios pesados". En línea en <http://www.epa.gov/oms/models/mobile6/m6hde004.pdf>.
- Wayne, W.S., N.N. Clark, R.D. Nine y D. Elefante. 2004. "Comparación de emisiones y economía de combustible entre autobuses para transporte público eléctricos híbridos y de motor convencional." *Energy and Fuels* 18, 257-270.
- Consejo Empresarial Mundial Para el Desarrollo Sostenible (WBCSD) 2004. *Mobilidad 2030*. Londres: Consejo Empresarial Mundial Para el Desarrollo Sostenible
- Organización Mundial de la Salud (OMS) 2006. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. En línea en http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair_agq/en/.
- Yanowitz, J., R. McCormick y M. Graboski. 2000. Emisiones de vehículos utilitarios pesados diésel en uso. *Ciencia y tecnología del medio ambiente*. 34 (5): 729-740.

Referencias de datos

Battelle, C.K. y L. Eudy. 2008. Autobuses de transporte público con celda de combustible: Tercer informe de evaluación Distrito de transporte público Alameda-Contra Costa. Laboratorio Nacional de Energía Renovable. Informe técnico NREL/TP-560-43545-1

La agencia, con el respaldo de la Administración Federal de Transporte (FTA), presentó tres autobuses de celda de combustible que fueron puestos en prueba de servicio con operaciones limitadas durante un año. La prueba dio como resultado que los autobuses con celda de combustible no eran tan eficientes en términos de consumo de combustible como los autobuses a diésel. Las baterías de celda de combustible aún requieren mejoras en términos de vida útil, y los técnicos necesitan tiempo para aprender sobre los nuevos vehículos. Los costos totales de mantenimiento por kilómetro recorrido eran más elevados los que funcionaban con celda de combustible que los que usaban diésel: sin embargo, los autobuses con celda de combustible, exigidos por la legislación californiana, siguen en uso.

Bose, R. y S. Sundar. 2005. Resultados de pruebas de emisiones de autobuses a diésel con y sin oxidación catalítica y trampa para regeneración de partículas, y autobuses con GNC y catalizador de tres vías en India. Congreso Mundial de SAE 2005 SAE, Abril 11-14.

Ocho autobuses que cumplen con la norma Euro II, que usan diésel con distintos niveles de azufre y con o sin dispositivos de control de emisiones, y dos autobuses a GNC que cumplen con la norma Euro II y tienen catalizadores detres vías se sometieron a prueba sobre un dinamómetro de chasis usando el ciclo de manejo de Mumbai. Las emisiones del material particulado de los autobuses que usan diésel ultra bajo en azufre (50 ppm máximo) y están dotados de trampa de partículas y las de los autobuses con GNC eran comparables; las emisiones de CO y HC eran menores en los casos de los autobuses a diésel y las de NO_x eran menores en las de los autobuses con GNC. Si bien la reducción progresiva del azufre disminuía las emisiones de material particulado, sus niveles eran significativamente menores cuando se les agregaban dispositivos de control de emisiones apropiados.

Clark, N.N, M. Gautam, B.L. Rapp, D.W. Lyons, M.S. Graboski, T.L. McCormick, T.L. Alleman y P. Norton. 1999. Caracterización de emisiones de autobuses de transporte público a diésel y GNC utilizando dos laboratorios con dinamómetro de chasis: Resultados y cuestiones presentadas. SAE International Spring Fuels and Lubricants, May 3-6.

Este estudio realizó pruebas con tres autobuses a GNC y tres a diésel. Los autobuses se evaluaron en uno de los laboratorios de emisiones de utilitarios pesados para transporte de la Universidad de Virginia Occidental y con un dinamómetro de chasis de base fija en el Instituto para Investigación de Combustibles y Motores en Altas Altitudes de Colorado. En ambos laboratorios se determinó que las emisiones de NO_x y material particulado eran substancialmente inferiores en el caso de los autobuses con GNC que las emisiones de los autobuses a diésel. Se observó que, al modificar la velocidad del movimiento del pedal durante las aceleraciones en el ciclo del Distrito Central de Negocios (CBD), se podría caracterizar los estilos de manejo como agresivo y no agresivo. Las emisiones de material particulado fueron mucho más elevadas para el estilo de manejo agresivo. Es evidente que los hábitos del conductor pueden causar una desviación substancial en las emisiones para el ciclo de manejo en el CBD. Cuando las emisiones de CO se utilizan como sustituto de agresión del conductor, un análisis de regresión demuestra que las emisiones de NO y material particulado de dos laboratorios coinciden bastante en los casos de estilos de manejo equivalentes. Las implicaciones de los hábitos de los conductores para los inventarios de las emisiones y las normativas son considerados brevemente.

Coroller, P. y G. Plassat. 2003. Estudio comparativo sobre las emisiones de escape de los autobuses urbanos a diésel y GNC. Presentado por la Agencia del Ambiente y de la Gestión de Energía (ADEME) de Francia, división de Aire y Transporte, en la conferencia de DEER 2003 por el doctor Thierry SEGUELONG, Aaqius & Aaqius.

En este estudio se sometieron a pruebas siete vehículos, a GNC y diésel, con un ciclo de pruebas en laboratorio que representa los autobuses urbanos en París. Los resultados mostraron que los vehículos a GNC

generaban menos emisiones que los autobuses a diésel Euro II sin postratamiento. Sin embargo, el uso de filtros antipartículas y diésel ultra bajo en azufre hizo que las emisiones del diésel y del GNC fuesen comparables.

Folkesson, A., C. Andersson, P. Alvforsa, M. Alakülab y L. Overgaard. 2003. "Real-Life Testing of a Hybrid PEM Fuel Cell Bus." Journal of Power Resources 118: 349-357.

Este artículo evalúa los autobuses a combustible híbrido con celda de combustible de membrana electrolítica polimérica (PEM) sometidos a pruebas bajo diversas condiciones. Este autobús era un híbrido en serie, accionado a batería y con celda de combustible. El autobús se operó utilizando el procedimiento FTB 75 y sometido a los ciclos de servicio de Braunschweig. El consumo de energía se comparó con un consumo de energía similar de vehículos a diésel. Los resultados demuestran que la celda de combustible consume menos energía que el promedio para toda la ciudad de los autobuses a diésel. Bajos niveles de ruido, elevados niveles de comodidad y freno regenerativo hacen más atractivos los vehículos; sin embargo es necesario mejorar la durabilidad y reducir los costos antes que las celdas de combustible puedan convertirse en vehículos para el mercado masivo.

Frey, H. C., N.M. Roupail, H. Zhai, T.L. Farias y G.A. Gonçalves. 2007. "Comparación del consumo de combustible en el mundo real para autobuses de transporte público a diésel e hidrógeno y su implicación en las emisiones." Transportation Research Board Parte D, 12: 281-291.

Este informe compara el consumo de combustible diésel e hidrógeno de los autobuses de transporte público de Porto, Portugal, con los resultados de una prueba de la EPA realizado en autobuses a diésel en Ann Arbor, Michigan, en 2002. Las pruebas se realizaron durante un día sobre una ruta de 7,8 km con pendientes importantes (10 por ciento). Los índices de consumo de combustible se relacionaron con la velocidad, la carga de pasajeros y la potencia específica del vehículo. En general, el consumo de combustible durante el ciclo de manejo para los vehículos de transporte público a hidrógeno es más alto pero similar al consumo de combustible para los vehículos a diésel. Las emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida son mayores para los vehículos a hidrógeno que a diésel, pero los vehículos a hidrógeno producen menos CO, NO_x y HC.

Jalihal, S. A. y T. S. Reddy. 2006. "Evaluación de impacto de las medidas para mejorar la calidad del aire: Caso de estudio de Delhi". Journal of Transportation on Engineering 132: 482-488

En este estudio, el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, el material particulado y los hidrocarburos se estiman sobre la base de kilómetros de vehículo recorridos por distintos vehículos en la ciudad en el curso del tiempo cuando las medidas de mejoras comenzaron a aplicarse sobre una base creciente. La mejora se debió, como se buscaba, no solo por la conversión a GNC de los autobuses sino por el efecto combinado de muchos otros pasos, como una mejor tecnología vehicular y calidad del combustible, el descarte de los viejos vehículos a diésel, la conversión de los rickshaws motorizados a GNC, etc.

Jayarathne, E., Z. Ristovski, N. Meyer y L. Morawaska. 2009. "Emisiones de partículas y gaseosas de autobuses que operan con gas natural comprimido y con combustible diésel ultra bajo en azufre en cuatro cargas constantes de motor." Science of the Total Environment 407: 2845-2852

El estudio evaluó las emisiones de escape de 13 autobuses a GNC y nueve autobuses a diésel ultra bajo en azufre. Los autobuses fueron sometidos a cuatro cargas de motores: ralenti, 25, 50 y 100 por ciento de la potencia máxima. A medida que la carga aumentaba, también aumentaban las emisiones de ambos combustibles. El estudio mostró que el diésel emitía una cantidad mayor de partículas, aunque la diferencia no era estadísticamente significativa. Los valores para el CO₂ para los autobuses a CNG también eran más bajos que los de los autobuses a diésel.

Khillare, P.S., T. Agarwal y V. Shridhar. 2008. "Impacto de la implementación de GNC en la concentración de PAH en el aire ambiente de Delhi: Análisis comparativo de escenarios previos y posteriores al GNC." Environmental Monitoring and Assessment 147: 223-233

El presente estudio da a conocer la evaluación comparativa del estado de la calidad del aire con relación a PM10 e hidrocarburos aromáticos

policíclicos (HAP) antes y después de la introducción de GNC en el sistema de transporte público de Delhi. El estudio se realizó durante dos períodos de tiempo: 1998 y 2004. Luego de la conversión total del sistema de transporte público a GNC en el año 2002, los datos de GNC posteriores indican una drástica reducción del 51–74 por ciento en la concentración de PM10 y de 58–68 por ciento en la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos totales (THAP), en comparación con los datos antes del GNC.

Lowell, D.M., W. Parsley, C. Bush y D. Zupo. 2003. "Comparación de autobuses de diésel limpio con autobuses a GNC." División de Transporte Público de la Ciudad de Nueva York de la MTA, Departamentos de Autobuses, Investigación y desarrollo.

Valiéndose de datos publicados anteriores sobre las emisiones reguladas y no reguladas, esta investigación se comparó el desempeño ambiental de los actuales autobuses de transporte público de nueva generación que operan con gas natural comprimido (GNC) y diésel ultra bajo en azufre (DUBA) e incorporan filtros de partículas diésel (DPF). Además, en esta investigación se compararon los costos de capital y operativos de los autobuses con GNC y equipados con filtros de partículas diésel. La comparación de costos se basó fundamentalmente en la experiencia de la división de transporte público de la MTA de la Ciudad de Nueva York que opera autobuses a GNC desde 1995 y autobuses equipados con DPF con DUBA desde el año 2001. Se observa que el costo incremental (comparado con el diésel de "referencia") de operar una estación con 200 autobuses es seis veces más alto para los autobuses a GNC que para los de «diésel limpio». Contribuyen, en partes iguales, al costo aumentado de los autobuses a GNC el mayor costo de capital requerido para la compra de autobuses y para la instalación de la infraestructura para abastecer de combustible, y los mayores costos operativos para la adquisición de combustible, mantenimiento de autobuses y mantenimiento de la estación de combustible.

McCormick, R.L., A. Williams, J. Ireland, M. Brimhall y R.R. Hayes. 2006. "Effects of Biodiesel Blends on Milestone Report." Laboratorio Nacional de Energía Renovable. Informe de Milestone. NREL/MP-540-40554.

El objetivo del estudio fue determinar si al someter el vehículo completo a la prueba, y no solo los motores, sobre un dinamómetro de chasis de utilitario pesado proporciona una medida mejor, más realista, de cómo repercute el B20 sobre las emisiones de contaminantes reguladas. Se sometieron a pruebas ocho vehículos utilitarios pesados con motor diésel, entre los que había tres autobuses de transporte público, dos autobuses escolares, dos camiones Clase 8 y un autocar. Cuatro cumplieron el requisito para utilitarios pesados de 1998, que establece 4 g/bhp-h NO_x y cuatro cumplieron el límite fijado en 2004 de 2,5 g/bhp-h NO_x+HC. Se emplearon ciclos de manejo que estimulan la conducción en zonas urbanas y autopistas. Cada vehículo fue sometido a pruebas con combustible diésel derivado de petróleo y una mezcla al 20 por ciento del volumen de ese combustible con un biodiésel derivado de soja. En promedio, el B20 causó la reducción de las emisiones de material particulado y CO en el orden del 16 al 17 por ciento, y la reducción de las emisiones de HC del 12 por ciento, relativo al diésel de petróleo. Las emisiones de estos tres contaminantes casi siempre disminuyeron, siendo la excepción un vehículo equipado con un filtro de partículas diésel que mostró muy bajas emisiones de MP, CO y HC; y no hubo cambios significativos en las emisiones para la mezcla de B20. El impacto del B20 sobre las emisiones de NO_x varió según la tecnología de motores/vehículos y el ciclo de prueba, que osciló entre el -5,8 por ciento y el +6,2 por ciento.

McKenzie, E.C. y P. Durango-Cohen. 2010. "Environmental Impact and Cost Effectiveness of Hydrogen Fuel Cell Buses: Going Beyond the CT Transit Demonstration Project." Reunión anual del Consejo de Investigación sobre Transporte.

Este documento empleó los resultados de un proyecto de demostración realizado en Hartford, Connecticut, para efectuar un análisis de ciclo de vida de buses con celdas de combustible y analizar los resultados de la correlación económica y ambiental. El análisis económico de ciclo de vida de entrada-salida (EIO-LCA) y los datos del DOE se usan para describir y analizar las emisiones de gases de efecto invernadero tanto de las celdas de combustible como de los autobuses a diésel. Se identifican cuatro factores como diferencias fundamentales entre los autobuses con celda de combustible y diésel: combustión del motor diésel y uso de combustible,

generación de electricidad, producción de hidrógeno y producción de batería ZEBRA. Este documento analiza también la función de la producción de energía en las emisiones de gases de efecto invernadero, y destaca la necesidad de usar fuentes de energía limpias para maximizar los beneficios de vehículos de celda de combustible. La efectividad de costos y la necesidad de generar electricidad no contaminante son dos barreras que traban la implementación y que deben ser superadas para que los autobuses con celda combustible sean una opción viable para el transporte público urbano en Estados Unidos.

Moreira, J.R., S.T. Coelho, S.M.S.G. Velázquez, S.M. Apolinário, E.H. Melo y P.H.B. Elmadjian. 2009. "BEST Project – contribution of Ethanol Usage in Public Urban Transport." Disponible en < <http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/simea2008.pdf>.>

Este documento presenta el proyecto BEST: Bioetanol para transporte sostenible, elaborado por el Centro Brasileño de Referencia en Biomasa CENBIO. Se trata de una iniciativa de la Unión Europea, coordinada por el Ayuntamiento de Estocolmo, que busca promover el uso del etanol como reemplazo del diésel en el transporte público urbano. Esta investigación evalúa el uso del etanol como reemplazo del combustible diésel en los autobuses de transporte público en Brasil mediante la comparación de la producción operativa de la flota experimental (consumo de combustible, desempeño y fallas ocurridas), teniendo como referencia un autobús a diésel equivalente. Los vehículos sometidos a pruebas fueron evaluados y controlados para demostrar la eficiencia energética del etanol. El autobús a etanol reduce hasta en un 80 por ciento las emisiones de gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global. El motor usado en las pruebas está bien avanzado, incluso para las normas europeas sobre la contaminación.

Motta, R., P. Norton, K. Kelly, C.K. Battelle, L. Schumacher y N. Clark. 1996. Autobuses de transporte público que utilizan combustible alternativo. Resultados final del Programa de evaluación de vehículos del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL).

El Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), con una subvención del Departamento de Energía de Estados Unidos emprendió un programa para estudiar el desempeño, la fiabilidad, los costos y las emisiones de los autobuses de transporte público que utilizan combustible alternativo (GNL, GNC, B20, etanol y metanol) y compararlos con autobuses a motor diésel (controles). El programa recopiló datos de operaciones y mantenimiento detallados de más de 100 autobuses en ocho agencias de transporte público en Estados Unidos. La meta fue efectuar pruebas en 10 autobuses de cada tipo de combustible alternativo, con 10 controles, divididos entre dos agencias, en funcionamiento sobre 18 meses. La Universidad de Virginia Occidental usó un dinamómetro de chasis transportable para medir las emisiones de los autobuses en un ciclo de manejo en el Distrito Central de Negocios.

Murtonen, T. y P. Aakko-Saksa. 2009. "Combustibles alternativos para vehículos y motores utilitarios pesados." Investigación de trabajo del VVT 128. VTT Finlandia.

Este informe analiza los vehículos utilitarios pesados que usan aceite vegetal hidrotratado, biodiésel (éster), gas natural convertido a diésel líquido, GNC y mezclas seleccionadas con referencia a combustible diésel fósil. Se emplearon tres motores y cinco autobuses metropolitanos para el estudio de las emisiones reguladas (HC, CO, NO, MP) y compuestos de emisiones sin regular (CO₂, aldehídos, distribución de tamaño de partículas y cantidad total, hidrocarburos poliaromáticas, mutagénesis de partículas, y numerosos compuestos gaseosos mediante espectroscopía infrarroja de Fournier). Los resultados demuestran que, en muchos casos, todas las emisiones reguladas disminuyen con combustibles aceite vegetal hidrotratado (HVO), gas natural convertido a diésel líquido (GTL) y metiléster de colza (RME), en comparación con el combustible diésel EN590. Los combustibles alternativos tienen un efecto positivo sobre las emisiones, que se consideran nocivas para la salud humana.

Nylund N. y K. Erkkilä. 2005. "Evaluación de emisiones de autobuses: Informe resumido de 2002–2004." VTT Finlandia.

Como parte de un estudio de autobuses a nivel nacional, el VTT examinó tres autobuses que cumplían con la norma Euro III diésel y cuatro autobuses a GNC aptos para la norma EEV. El VTT inspeccionó también la efectividad de los catalizadores de oxidación, catalizadores de tres vías y

filtros de partículas diésel. Los vehículos fueron sometidos a una prueba en laboratorio con ciclos de manejo de Braunschweig y del condado de Orange. Los resultados demostraron que los autobuses a diésel con filtros y los autobuses con GNC con catalizadores generan una cantidad significativamente menor de emisiones que el diésel sin postratamiento.

Pelkmans, L., D. de Keukeleere, H. Bruneel y G. Lenaers. 2001. "Influence of Vehicle Test Cycle Characteristics on Fuel Consumption and Emissions of City Buses." SAE International Spring Fuels and Lubricants, May 7-9. Se evaluaron tres tecnologías de autobuses urbanos (diésel, GNC con control de combustible estequiométrico y 3WC, y un autobús a GNC con controles de combustible con tecnología de mezcla pobre [lean burn]) para determinar el consumo de combustible y las emisiones tanto en ciclos de manejo de tráfico urbano real y de pruebas. El objetivo del proyecto era buscar relaciones claras entre diversos ciclos de prueba en los países de la Agencia Internacional de Emergencia suscritos al Acuerdo de Combustibles para Motores Avanzados (IEA-AMF) y la correspondencia de estos ciclos con el tráfico real. Los resultados indican que la relación entre los ciclos de manejo en el tráfico de una ciudad real y de otra simulada difieren entre una tecnología y otra. Se determinó que la capacidad de aceleración del autobús es muy importante y que los requisitos de aceleración del ciclo de manejo en una ciudad simulada deberían corresponder a las capacidades reales del autobús.

Proc, K., R. Barnitt, R. Hayes, M. Ratcliff y R. McCormick. 2006. "Evaluación de 100.000 millas de autobuses de transporte público operados con mezclas de biodiésel (B20)." SAE International. Durante un período de dos años se operaron nueve autobuses de transporte público de 12 metros (40 pies) que marchaban a B20 y diésel. Cinco de los autobuses funcionaron exclusivamente con B20 (mezcla de biodiésel al 20 por ciento) y los cuatro restantes con diésel de petróleo. Cada autobús acumuló casi 160.000 km (100.000 millas) a lo largo del estudio. Los autobuses a B20 se compararon con los de diésel de petróleo, en términos de economía del combustible, costo de mantenimiento del vehículo, llamadas para informar problemas mecánicos sufridos en la ruta y emisiones. No se observaron diferencias entre la economía del combustible promedio en la carretera de ambos grupos según los datos en uso; sin embargo, las pruebas en laboratorio, revelaron una reducción de casi el dos (2) por ciento en la economía de combustible en el caso de los vehículos alimentados con B20. Los costos de mantenimiento relacionados con el motor y el sistema de combustible fueron casi idénticos para ambos grupos hasta el último mes del estudio. Las emisiones de las pruebas de emisiones en chasis de laboratorio donde se comparó el B20 en uso y el diésel de petróleo en el ciclo CSHVC mostraron reducciones en todos los contaminantes medidos, incluso en los óxidos de nitrógeno.

Programme de démonstration en transport urbain Transports Canada. 2009. Informe técnico sobre tecnología de híbridos. En este proyecto demostrativo realizado por Transport Canada se compararon ocho autobuses eléctricos-híbridos con seis autobuses a diésel normales de agencias de autobuses regionales y metropolitanas. Los autobuses cumplían las normas EPA 2002 o 2007. Las emisiones y el consumo de combustible de los autobuses se midieron durante una prueba de laboratorio del ciclo de manejo de Manhattan. También se consideraron el efecto de la temperatura exterior y del aire acondicionado. Esto se combinó con pruebas de campo más extensas y pruebas de pista relacionadas con otras características de desempeño del autobús. Se pudo demostrar que, a bajas velocidades, los híbridos presentan ventajas. Sin embargo, el informe concluye que la selección del combustible óptimo para un autobús depende de las características operativas de las rutas de autobús.

Pruebas de campo de Autobuses de Tecnologías Alternativas en la Ciudad de México, Reporte Final. Equipo de Transporte y Cambio Climático Región Latinoamérica y Caribe Publicaciones de Desarrollo Sustentable, Secretaría del Medio Ambiente, México 2006. Este estudio fue realizado por varias instituciones internacionales (el Centro de Transporte Sustentable-EMBARQ, entre ellas), para la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, con el objeto de apoyar y sostener información a fin de ampliar el sistema de corredores estratégicos para autobuses dentro del sistema de Autobuses de Tránsito Rápido en el Distrito Federal. El análisis de las tecnologías empleadas en los autobuses

consistió en una serie de pruebas comparativas entre autobuses que emplean tecnologías y combustibles alternativos (híbridos y GNC) y vehículos diésel normales (diésel normal y diésel ultra bajo en azúfre, 15 ppm y 50 ppm), para demostrar las ventajas técnicas, económicas, ambientales y de clima bajo la operación en las condiciones presentes en la zona metropolitana de la Ciudad de México.

Para evaluar el impacto ambiental, se utilizaron dos métodos de medición de contaminantes: un dinamómetro de chasis y un sistema de medición de emisiones vehiculares a bordo (RAVEM). Antes de iniciar las pruebas, se desarrolló un recorrido representativo denominado "Ciclo de manejo de la Ciudad de México" a partir de la información obtenida de la circulación de los autobuses del Distrito Federal. El ciclo es representativo de autobuses a baja y media velocidad y autobuses operando en condiciones de corredor de transporte.

En las pruebas se utilizaron siete vehículos a diésel de 12 m, tres a diésel articulados de 18 m, dos autobuses a diésel con DPF, un híbrido con diésel sin DPF y tres a GNC con catalizador oxidativo. Los autobuses se probaron con una carga que representaba una carga de 70 pasajeros.

Una de las conclusiones del estudio fue que el uso de "trampas de partículas" con diésel de bajo contenido en azufre redujo significativamente las emisiones de PM10. Con relación a las emisiones de NO_x, se demostró que en los autobuses a diésel variaban considerablemente, y muchos de ellos excedieron los estándares de emisión para las cuales tenían certificación. Presumiblemente, los motores no estaban calibrados a la altitud (la baja presión atmosférica) de la Ciudad de México.

Agencia de transporte municipal de San Francisco. 2002. Programa piloto de combustible alternativo: Resultados de la evaluación inicial de 6 meses <http://www.sfmta.com/cms/rclean/altipilot.htm>. El SFMTA hizo pruebas en autobuses a GNC, híbridos y diésel en un ciclo de manejo de CBD, de autobuses de Nueva York y de San Francisco. Los autobuses a diésel tuvieron la mejor economía de combustible, en tanto que los híbridos tuvieron la mejor economía de combustible en ciclos de manejo exigentes. En el caso de los autobuses híbridos y a GNC, las emisiones eran bajas, al igual que lo ocurrido en el caso de los autobuses a diésel con filtros antipartículas. Sin embargo, las emisiones de CO fueron más altas en el caso de los autobuses a GNC. Los costos del GNC en cuanto a combustible y mantenimiento eran, por lo general, también más elevados. Las pruebas también notaron que la economía del combustible puede verse afectada por la utilización de un combustible diésel de baja calidad con filtro antipartículas, ya que puede obstruir el filtro.

TransLink. 2006. Proyecto de demostración de combustibles alternativos y tecnología para autobuses, Fase 1 - Informe de programa de pruebas. TransLink. Vancouver, Canadá. La agencia de transporte público realizó pruebas en diez autobuses: diésel común, GNC, híbrido con diésel UBA, 20 por ciento biodiésel y diésel con postratamiento. Las pruebas de emisiones se realizaron sobre una pista de pruebas con un ciclo de manejo diseñado para imitar los servicios a baja velocidad urbanos. Las emisiones se registraron usando sistemas PEMS y DOES2. En general, los vehículos híbridos y luego los diésel con postratamiento generaron la menor cantidad de emisiones, seguidos por el biodiésel y el GNC. La fiabilidad variaba entre autobuses de igual tecnología. Los autobuses híbridos y a GNC mostraban los menores costos por concepto de combustible del proyecto, en tanto que los híbridos usaban la mayor cantidad de combustible por kilómetro y el GNC usaba la mayor cantidad de combustible por kilómetro.

Turrio-Baldassarria, L., C.L. Battistelli, L. Contia, R. Crebellia, B. De Berardisa, Na.L. Iamicelia, M. Gambinob y S. Iannaccone. 2004. "Comparación de emisiones de motor de autobús urbano alimentado con mezcla de gasóleo y biodiésel." Science of the Total Environment 327: 147-162. Se estudiaron las características químicas y toxicológicas de las emisiones de un autobús urbano alimentado con diésel y mezcla de biodiésel. Los gases de escape fueron generados por un motor diésel utilitario pesado Euro 2 turbocargado, funcionando bajo condiciones de estado continuo en el ciclo de 13 modos según la prueba europea (CEE R49).

Además, se cuantificaron los contaminantes regulados y sin regular, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) cancerígenos y derivados nitratos (nitro-HAP), compuestos de carbonilo e hidrocarburos aromáticos ligeros. También se evaluó el efecto de los combustibles bajo estudio relativos a la distribución de tamaño del material particulado (MP). El uso de la mezcla biodiésel pareciera dar como resultado una pequeña reducción de las emisiones de la mayoría de los compuestos poliaromáticos; estas diferencias, sin embargo, no tienen significado estadístico para un nivel de confianza del 95 por ciento. Por otra parte, el formaldehído, tiene un aumento estadísticamente significativo del 18 por ciento con mezcla biodiésel. Las pruebas toxicológicas in vitro muestran una potencia mutagénica y un perfil genotóxico similares a los de las emisiones de diésel y biodiésel. Los análisis microscópicos de electrones indican que el material particulado de ambos combustibles tiene la misma composición química, morfología, forma y espectro granulométrico, estando la mayoría de las partículas dentro del rango de 0,06 a 0,3 μm .

Agencia de Protección ambiental (EPA) de Estados Unidos. 2009. Análisis del ciclo de vida de emisiones de gases de efecto invernadero a partir de combustibles renovables efectuado por EPA.

La EPA ha analizado cómo repercuten los gases de efecto invernadero durante su ciclo de vida generados por una gama de combustibles que actualmente se espera contribuyan significativamente a cumplir el volumen indicado por EISA hasta a través de 2022. Los resultados preliminares de la investigación de la EPA sugieren que el cambio del uso terrestre inducido por el biodiésel puede producir significativas emisiones de gases de efecto invernadero a corto plazo; sin embargo, el desplazamiento del petróleo por los biocombustibles a lo largo de los años siguientes puede compensar sobre el impacto previo de la conversión de la tierra. Por lo tanto, el horizonte de tiempo sobre el cual se analizan las emisiones y la aplicación de un índice de descuento para valorar las emisiones a corto plazo con respecto a las de largo plazo son factores críticos.

Wayne, W.S., N.N. Clark, R.D. Nine y D. Elefante. 2004. "Comparación de emisiones y economía de combustible entre autobuses para transporte público eléctricos híbridos y de motor convencional." Energy and Fuels 18. 257-270.

Los autobuses de transporte público híbridos-eléctricos ofrecen beneficios potenciales con relación a los autobuses de tránsito convencionales de capacidad comparable, entre los que se incluye menor consumo de combustible, menor cantidad de emisiones y el uso de motores de menor tamaño. Las mediciones de emisiones se realizaron sobre un autobús de transporte público New Flyer modelo 1998 de 40 pies equipado con un motor diésel Cummins ISB 5.9-L, un filtro catalítico de material particulado y un sistema impulsor de la serie Allison. Se comparó los resultados con los de un motor a diésel, de impulsión convencional, equipado con catalizador de oxidación, y un autobús con motor a gas natural licuado (GNL). Las pruebas se realizaron de acuerdo a las pautas de prácticas recomendadas por SAE J2711. En promedio, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) de los autobuses híbridos equipados se redujeron en un 50 por ciento, con relación a las de los autobuses diésel convencionales, y un diez por ciento en comparación con las emisiones del autobús de GNL. Las emisiones de material particulado (MP) de los autobuses híbridos equipados con un filtro catalizador se redujeron en un 90 por ciento, con relación a lo de los autobuses a diésel convencionales, y eran compatibles con los del autobús de GNL.

Apéndice 1: Conversiones y normas sobre emisiones

Las conversiones a g/km se realizaron con los factores de conversión provistos por EPA y Nylund *et al.* 2004 y los datos de conversiones siguientes.

Apéndice Tabla 1 Normas europeas sobre emisiones en g/km

Normas sobre emisiones	Fecha	CO	HCT	NO _x	PM10
Euro I	1992	4,5	1,1	8	0,36
Euro II	1998	4	1,1	7	0,15
Euro III	2000	2.1	0.66	5	0.1
Euro IV	2005	1.5	0.46	3.5	0.02
Euro V	2008	1.5	0.46	2	0.02
EEV		1.5	0.25	2	0.02
Euro VI	2013	1.5	0,13	0,4	0,1

Fuente: <http://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>.

Apéndice Tabla 3 Conversión de datos

Conversión
1 milla = 1,609344 km
1 galón = 3,78541 litros
1 pie = 0,3048 metros
4,679 bhp-hr/milla (EPA 1998)
37,95 kWh/galón de diésel

Apéndice Tabla 2 Normas de la EPA sobre emisiones g/bhp-hr

Normas sobre emisiones	CO	HCT	NO _x	HCNM	HCNM + NO _x	MP
1994	15,5	1,3	5			0,07
1996	15,5	1,3	4			0,05
1998	15,5	1,3	4			0,05
2004 (1)	15,5	1,3			2,4	0,01
2004 (2)	15,5	1,3		1	2,5	0,01
2007	15,5	1,3	1,35	0,14		0,01
2010	15,5	1,3	0.2	0,14		0,01

Apéndice 2: Resultados de meta-análisis

Apéndice Tabla 4 Resultados de análisis de emisiones de monóxido de carbono (g/km)

Combustible y tecnología	Rango de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
GNL	3,820	2,890	6,710	4,110	1,459
E95	26,470	11,620	38,090	26,020	8,538
E93	17,400	17,150	34,550	23,038	5,612
D50 + DPF	5,525	0,001	5,526	1,415	1,769
D50	8,313	0,005	8,318	2,789	2,575
D15 + RCS	8,720	0,070	8,790	3,904	4,371
D15 + OC	0,360	0,220	0,580	0,433	0,151
D15 + Híbrido	3,491	0,029	3,520	0,623	0,813
D15 + RGE	0,430	0,150	0,580	0,446	0,136
D15 + DPF	5,216	0,060	5,276	0,503	1,069
D15	13,316	0,017	13,333	2,256	2,969
Diésel > 150 + OC	6,660	0,360	7,020	2,488	2,208
Diésel > 150	19,303	0,026	19,329	3,785	3,462
GNC + OC	5,480	0,010	5,490	0,615	1,190
GNC + 3WC	2,780	0,400	3,180	1,507	0,644
GNC	42,660	0,150	42,810	8,523	9,519
B20	2,040	1,380	3,420	1,802	0,615
B100 + RCS	7,940	0,080	8,020	3,483	4,232
B100 + RGE	0,260	0,070	0,330	0,220	0,110

Apéndice Tabla 5 Resultados de análisis de emisiones de dióxido de carbono CO₂ (g/km)

Combustible y tecnología	Rango de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
D50 + DPF	818,62	781,38	1600,00	1274,63	265,73
D50	1236,00	558,00	1794,00	1175,58	300,44
D15 + RCS	53,00	1070,00	1123,00	1095,64	17,77
D15 + OC	121,00	1129,00	1250,00	1178,57	39,15
D15 + Híbrido	1339,90	702,70	2042,60	1458,86	452,45
D15 + RGE	1009,76	1129,00	2138,76	1421,07	396,46
D15 + DPF	1365,26	773,50	2138,76	1444,90	440,35
D15	1947,10	644,00	2591,10	1538,21	691,89
Diésel > 150 + OC	785,90	766,10	1552,00	1133,66	218,19
Diésel > 150	1030,99	602,01	1633,00	1220,78	241,98
GNC + OC	1143,03	457,00	1600,03	1181,49	312,36
GNC + 3WC	947,00	580,00	1527,00	1158,55	174,70
GNC	827,50	806,50	1634,00	1314,85	278,37
B20	42,00	1366,00	1408,00	1387,00	29,70
B100 + RCS	6,00	1047,00	1053,00	1049,57	2,57
B100 + RGE	49,00	1087,00	1136,00	1113,43	20,21

Apéndice Tabla 6 Resultados de análisis de emisiones de NO_x (g/km)

Combustible y tecnología	Rango de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
GNL	6,210	5,840	12,050	8,746	2,260
E95	12,000	8,820	20,820	13,694	3,766
E93	8,010	5,410	13,420	8,303	2,561
D50 + DPF	5,080	8,500	13,580	10,909	2,143
D50	15,200	4,600	19,800	11,272	4,687
D15 + RCS	3,390	5,260	8,650	6,852	1,621
D15 + OC	0,500	8,200	8,700	8,487	0,202
D15 + Híbrido	21,781	3,409	25,190	9,658	5,902
D15 + RGE	5,260	6,170	11,430	8,289	1,767
D15 + DPF	28,180	5,260	33,440	13,096	7,268
D15	25,775	2,735	28,510	12,193	6,976
Diésel > 150 + OC	9,550	5,850	15,400	10,121	3,214
Diésel > 150	41,467	2,213	43,680	16,272	9,546
GNC + OC	34,380	3,620	38,000	9,862	6,793
GNC + 3WC	6,000	0,500	6,500	2,305	1,218
GNC	65,780	4,560	70,340	15,095	11,262
B20	2,830	9,410	12,240	11,200	1,006
B100 + RCS	4,020	4,160	8,180	5,547	2,006
B100 + RGE	1,860	5,950	7,810	6,807	0,859

Apéndice Tabla 7 Resultados de análisis de emisiones de MP (g/km)

Combustible y tecnología	Rango de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
GNL	0,100	0,010	0,110	0,026	0,034
E95	0,140	0,250	0,390	0,305	0,055
E93	0,410	0,140	0,550	0,391	0,144
D50 + DPF	0,401	0,009	0,410	0,141	0,154
D50	1,975	0,005	1,980	0,358	0,437
D15 + RCS	0,100	0,013	0,113	0,056	0,048
D15 + OC	0,061	0,064	0,125	0,088	0,024
D15 + Híbrido	0,190	0,000	0,190	0,035	0,042
D15 + RGE	0,131	0,010	0,141	0,070	0,045
D15 + DPF	0,314	0,000	0,314	0,032	0,063
D15	0,964	0,070	1,034	0,307	0,253
Diésel > 150 + OC	0,880	0,020	0,900	0,284	0,228
Diésel > 150	2,012	0,001	2,013	0,343	0,442
GNC + OC	0,030	0,000	0,030	0,009	0,010
GNC + 3WC	0,500	0,000	0,500	0,024	0,089
GNC	0,080	0,010	0,090	0,028	0,019
B20	0,410	0,076	0,486	0,163	0,124
B100 + RCS	0,064	0,011	0,075	0,039	0,034
B100 + RGE	0,036	0,039	0,075	0,058	0,017

Apéndice Tabla 8 Resultados de análisis de emisiones de HCT (g/km)

Combustible y tecnología	Rango de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
GNL	8,700	6,590	15,290	9,563	3,380
E95	12,120	5,030	17,150	9,591	4,434
E93	4,160	3,730	7,890	5,508	1,401
D50 + DPF	0,093	0,002	0,095	0,023	0,032
D50	0,500	0,000	0,500	0,074	0,142
D15 + RCS	0,030	0,000	0,030	0,014	0,011
D15 + OC	0,070	0,030	0,100	0,066	0,023
D15 + Híbrido	15,290	0,000	15,290	4,766	6,401
D15 + RGE	0,060	0,000	0,060	0,035	0,022
D15 + DPF	0,228	0,000	0,228	0,029	0,051
D15	0,431	0,000	0,431	0,169	0,124
Diésel > 150 + OC	0,610	0,060	0,670	0,222	0,180
Diésel > 150	2,394	0,006	2,400	0,509	0,532
GNC + OC	13,750	0,650	14,400	7,250	3,794
GNC + 3WC	1,460	0,040	1,500	0,397	0,377
GNC	48,150	1,250	49,400	13,952	13,124
B20	0,550	0,350	0,900	0,469	0,178
B100 + RCS	0,010	0,000	0,010	0,003	0,005
B100 + RGE	0,020	0,010	0,030	0,021	0,011

Agradecimientos

Los autores agradecen el generoso apoyo de FedEx, que hizo posible la investigación, junto con la orientación inicial de Keshav Sondhi y Jimmy Mathis, ambos expertos en combustibles y vehículos de FedEx. Extendemos también nuestro reconocimiento al equipo de combustibles y vehículos: Jorge Macias, Hilda Martínez, Cynthia Menéndez y Georg Schmid, CTS-EMBARQ México, así como a los valiosos comentarios de Marco Balam Almanza, Amit Bhatt, Darío Hidalgo, Luis Antonio Lindau, Karl Peet y Rodolfo Lacy Tamayo.



Las marcas de servicio de FedEx fueron utilizadas con permiso.



Desde el año 2002, la red EMBARQ se ha extendido a México, Brasil, China, India, Turquía y la Región Andina, para colaborar con autoridades de transporte locales para reducir la contaminación, mejorar la salud pública y crear espacios públicos urbanos seguros, accesibles y atractivos. La red cuenta con más de 120 expertos de campos que van desde la arquitectura hasta la gestión de la calidad del aire, desde la geografía hasta el periodismo, y desde la sociología hasta la ingeniería civil y de transporte.



www.embarq.org

EMBARQ GLOBAL

10 G Street NE, Suite 800
Washington, DC 20002
EE.UU.
+1 (202) 729-7600

EMBARQ ANDINO

Palacio Viejo 216, Oficina 306
Arequipa, Perú
+51 54959695206

EMBARQ BRAZIL

471 Rua Luciana de Abreu
#801, Porto Alegre/RS
BRASIL, 90570-060
+55 (51) 33126324

EMBARQ CHINA

Unit 0902, Chaowai SOHO Tower A
Yi No. 6
Chaowai Dajie, Distrito Chaoyang
Beijing 100020, China
+86 10 5900 2566

EMBARQ INDIA

Godrej and Boyce Premises
Gaswork Land, Lalbaug
Parel, Mumbai 400012
+91 22 24713565

EMBARQ MÉXICO

Calle Belisario Domínguez #8, Planta Alta
Colonia Villa Coyoacán, C.P. 04000
Delegación Coyoacán, México D.F.
+52 (55) 3096-5742

EMBARQ TURQUÍA

Tufekci Salih Sok. N.º: 5
6 Amaysa Apt., Beyoglu
34433 Estambul, Turquía
+90 (212) 244 74 10