

REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES DEL TRANSPORTE POR CARRETERA A TRAVÉS DE UN DISEÑO Y EXPLOTACIÓN EFICIENTE

Autores:

Justo Borrajo Sebastián (D. G. Carreteras – Mº de Fomento)
Ángel Sampedro Rodríguez (Prof. Dtor. Ingeniería de Carreteras UAX)
Enrique Miralles Olivar (Asociación Española de la Carretera)
Elena de la Peña González (Asociación Española de la Carretera)
Elena del Real Suárez (Asociación Española de la Carretera)
Nerea Aizpurúa Giráldez (Asociación Española de la Carretera)

Proyecto subvencionado por el Ministerio de Fomento

1. INTRODUCCIÓN

El transporte por carretera impone una serie de externalidades que conviene evaluar de forma correcta para lograr su reducción. Dentro de estas externalidades, cobra especial importancia la emisión de gases contaminantes, perjudiciales desde el punto de vista de la sostenibilidad y de la salud humana.

La Asociación Española de la Carretera, en el marco de las ***“Subvenciones para la realización de estudios y acciones de difusión relacionados con el transporte, sus infraestructuras, y las demás competencias del Ministerio de Fomento” (ORDEN FOM/2219/2008)***, ha desarrollado el proyecto ***“Reducción de la emisiones contaminantes del transporte por carretera a través de un diseño y explotación eficiente”***, con el objetivo principal de estudiar los principales factores que, desde el punto de vista de las infraestructuras de carreteras, determinan las emisiones contaminantes de los vehículos que circulan por ellas, considerando las fases de diseño y explotación.

A partir de este estudio, se ha desarrollado una metodología específica, disponible en un calculador, que permite su evaluación y análisis previos, lo cual supone una herramienta muy útil para los planificadores y proyectistas de carreteras, poniendo a su disposición, de forma sencilla, una primera estimación de las emisiones generadas por las distintas soluciones planteadas, colaborando en la toma de decisiones en

cuanto a su reducción, tanto en la fase de diseño, como en la explotación, cubriendo el planteamiento de políticas, etc.

La aplicación del *Protocolo de Kioto* y la *Ciencia del Cambio Climático* han introducido nuevas variables a considerar en el análisis medioambiental de cualquier actividad humana, y han incrementado la preocupación por las emisiones de gases. El sector de la carretera no es una excepción, de manera que las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) han pasado a ser un factor de evaluación medioambiental más, tanto en la fase de construcción, como en la posterior de explotación.

Una vez que se empieza a considerar, este factor puede llegar a convertirse en uno de los más importantes para el caso de una infraestructura de transporte como es una carretera, sobre todo si se tiene en cuenta que el transporte tiene una significativa responsabilidad en el total de emisiones de CO₂ y es uno de los sectores que mayores incrementos ha experimentado en los últimos años. Por lo tanto, cualquier actuación sobre estas emisiones tendrá grandes implicaciones para el entorno a corto, medio y largo plazo.

La consideración de las emisiones de GEI, según los compromisos adquiridos por un gran número de países, entre ellos todos los miembros de la Unión Europea, para el cumplimiento del citado Protocolo, va a afectar de gran manera a las evaluaciones medioambientales que se puedan realizar sobre cualquier actividad humana a partir de ahora.

Desde el año 2005 y hasta el 2012 son numerosas las legislaciones y políticas puestas en marcha a nivel internacional, europeo, nacional, autonómico y local que afectan directa o indirectamente a la ingeniería de carreteras en España.

Además, ya se está hablando de "*Kioto 2*" (*Post-Kioto*), que será la continuación de estas políticas y que, aunque debería haberse empezado a establecer en la pasada *Cumbre de Copenhague*, en diciembre del año pasado todavía no se ha empezado a esbozar.

Aunque el presente proyecto ha tenido por objeto el análisis de todas las emisiones contaminantes, se ha basado, fundamentalmente, en las emisiones de GEI, pues sobre estas es sobre las que hay mayor disponibilidad de datos debido a la preocupación de la sociedad por el citado problema del Cambio Climático. Además, la

mayor parte de las medidas que reducen las emisiones de GEI contribuyen a reducir cualquier otro tipo de emisión contaminante, como se ha podido comprobar.

Una ingeniería de carreteras sostenible y responsable implica considerar bien las afecciones al entorno derivadas de la construcción y posterior explotación de la carretera desde los puntos de vista de los procesos constructivos en sí, de los materiales empleados y de todos los factores que intervengan en su posterior explotación.



Foto 1: El Protocolo de Kioto regula las emisiones de GEI.

La implantación del **Plan Estratégico de Infraestructuras y Transportes 2005-2020 (PEIT)**, del Ministerio de Fomento, estima una reducción de 30 millones de toneladas de CO₂ en el año 2020.

Para ello, el PEIT articula la mejora del comportamiento ambiental del transporte en dos ámbitos: la disminución de los impactos globales del transporte (principalmente en lo referente al cambio climático) y la calidad ambiental en el entorno natural y urbano. Considera como efectos de carácter global la evolución de las emisiones de GEI de acuerdo con las directrices del Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión y

plantea la estabilización de las emisiones del transporte en el período 2005-2007 y su disminución en 2012 hasta los niveles de 1998.

El logro de estos objetivos tan ambiciosos se basa en una visión unitaria de las infraestructuras y servicios a través de la intermodalidad del transporte, la gestión integrada de los sistemas de transporte desde criterios de seguridad, calidad y eficiencia energética, en lograr equilibrar el territorio y mejorar su accesibilidad, en la mejora de la movilidad urbana, en la mejora del sistema de transporte de mercancías y de su inserción internacional, y en el fomento de la I+D+i en el sector del transporte.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo principal del estudio ha sido desarrollar una metodología que permite evaluar las emisiones de gases contaminantes de una carretera, en función de todos los parámetros que las determinan, para así poder analizar la eficacia de las posibles medidas de mejora y reducción para implantar en cada caso. La metodología desarrollada ha dado lugar a un calculador de emisiones de especial utilidad en las fases de diseño y explotación de carreteras.

En el contexto del desarrollo global del proyecto, se han marcado los siguientes objetivos parciales:

- Determinar los factores sobre los que se puede incidir para reducir las emisiones en la fase de diseño de carreteras.

La metodología desarrollada permite analizar los factores más determinantes en las emisiones de los distintos gases considerados, con el objeto de poder evaluar las posibles actuaciones que, durante la fase de diseño (planeamiento, estudio y proyecto) permiten reducir dichas emisiones: entorno, tipo de carretera, sección transversal (carriles y arcenes), accesos, velocidad de proyecto, rasantes, tipo de terreno, distancias de adelantamiento, etc.

- Determinar los factores sobre los que se puede incidir para reducir las emisiones durante la explotación de una carretera.

Esta metodología permite también analizar los factores que determinan estas emisiones durante la fase más importante, la de explotación: parámetros de diseño, intensidades de tráfico, distribución de los tipos de vehículos, etc.

- Estudiar la mayor o menor eficacia de las posibles medidas de reducción de emisiones contaminantes, por medio de la realización de simulaciones utilizando la metodología propuesta.

Mediante su aplicación se ha evaluado la eficacia que, desde el punto de vista de la reducción de emisiones de gases contaminantes, se obtiene al aplicar distintas medidas de reducción, de las que ya existen experiencias en carreteras de la red del Ministerio de Fomento.

Así, se ha evaluado la efectividad prevista que implican las medidas de construcción de carril BUS-VAO, restricciones al tráfico, calmado del tráfico y sistemas de regulación del tráfico basados en velocidad variable. Aunque estas medidas no se han desarrollado con este objetivo, se puede concluir que, bien planteadas y aplicadas, permiten, además, reducir las emisiones de algunos gases contaminantes

El calculador desarrollado permite evaluar, para un tramo de carretera analizado, los ahorros de emisiones que se obtendrían con la aplicación de todas estas medidas, para ver cuál es la más eficaz en la reducción de emisiones de cada tipo de gas analizado.

- Desarrollo de una metodología específica para distintos tipos de carretera (autopistas o autovías y carreteras convencionales) y para distintos tipos de entorno (urbano o periurbano e interurbano).

De las metodologías existentes, se ha realizado una selección de aquéllas que podrían adaptarse al diseño y la gestión de las carreteras. Este aspecto es muy importante, tanto para esta metodología como para futuros desarrollos, pues existen numerosos estudios y bases que, si bien, pueden aplicarse a otros sectores, no es fácil ni creíble su extrapolación a la ingeniería de carreteras y a los factores y parámetros disponibles.



Foto 2: La metodología desarrollada permite evaluar medidas de reducción (Ej.: Carril BUS-VAO).

3. LAS EMISIONES DE GASES Y EL TRANSPORTE POR CARRETERA

El transporte por carretera representa importantes afecciones sobre el entorno; algunas de ellas son marcadamente positivas, como la mejora de la accesibilidad, la generación de riqueza, la provisión de mayores oportunidades a la población, etc; sin embargo, otras son negativas, como las derivadas de la congestión y la contaminación. Hasta hace pocos años, la calidad del aire ha sido el principal tema de preocupación desde el punto de vista de las emisiones del transporte por carretera, pero las significativas mejoras de la tecnología han mitigado muchos de estos riesgos.

La adopción, a partir de 1970, de varias directivas sobre las emisiones de los vehículos de motor, ya sean vehículos ligeros (automóviles, vehículos industriales ligeros) o pesados (camiones, autobuses), ha provocado una reducción progresiva de las emisiones de gases y de partículas, así como, en cierta medida, del ruido de esos vehículos. Las reducciones de las emisiones atmosféricas, fijadas por las normas «Euro» I a V, se refieren a cuatro contaminantes principales: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), partículas e hidrocarburos.

Actualmente, los gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo de energía de los vehículos se plantean como la principal preocupación para la ordenación sostenible del transporte por carretera.

El transporte es uno de los sectores económicos más importantes ya que, además de sus características propias como sector productivo, contribuye en gran medida al desarrollo y competitividad de todos los demás sectores, y, por tanto, al de todo el sistema económico. Este carácter horizontal hace, si cabe, mucho más complejo integrar consideraciones ambientales en su desarrollo.

Hay que partir de la base de que un sistema de transporte eficaz es fundamental y necesario para garantizar el desarrollo económico y la cohesión social. Sin él, no es posible alcanzar dicho desarrollo.

Las directrices de la UE plantean sistemas de transportes eficientes y eficaces, que garanticen, entre otros aspectos, una alta movilidad para las personas y las mercancías de forma competitiva, el equilibrio territorial y, además, deben proteger el medio ambiente.

Las emisiones de gases GEI en el sector del transporte crecen de forma continua. Aunque se han hecho mejoras en la eficiencia energética de los diferentes modos de transporte y se han introducido combustibles no fósiles, el incremento de la demanda de transporte es mayor que estos beneficios.

En Europa el transporte contribuye aproximadamente a la cuarta parte de las emisiones de gases GEI. Según las fuentes analizadas en el estudio, algunas predicciones para los Estados Europeos indican que las emisiones de gases GEI para el sector del transporte en 2010 serán las mismas que en 2005, un 27% superior sobre los niveles de 1990.

El Consejo de la Unión Europea ha propuesto que los países desarrollados reduzcan sus emisiones un 30% en 2020 comparadas con 1990. Si no se llega a un acuerdo, la UE está preparando el compromiso para reducirlas al menos un 20%. Respecto a estos objetivos se presentó en Enero de 2008 la regulación por parte de la Comisión Europea.

El transporte por carretera es con diferencia la mayor fuente de emisiones (93%) del total de las emisiones del transporte. Los sectores del transporte de mercancías y de pasajeros eligen la carretera con mayor frecuencia que otros modos de transporte; en la Unión Europea, la carretera asumió el 44% de del total de transporte de mercancías y el 85% de pasajeros en 2006.

En España, las emisiones originadas por las actividades de transporte superaron en 2006 las 108 Mt CO₂ eq. , lo que supone el 25,4% de las emisiones totales en España y un aumento del 88% desde 1990. Este incremento está directamente relacionado con el notable crecimiento de la demanda de transporte. En este sentido el peso del sector del transporte ha crecido del 21,4% en 1990 al 25,4% en 2006 considerando el conjunto de los gases de efecto invernadero.

En cuanto al reparto modal, la carretera causó el 89,2% de las emisiones, la aviación nacional el 6,6%, el cabotaje marítimo el 3,9% y el ferrocarril el restante 0,3%. Por tipo de vehículo, el 53,2% de las emisiones del transporte por carretera corresponden a los turismos y motocicletas, mientras que el 33,5% proviene de los vehículos pesados (autobuses y camiones) y el restante 13,3% de los vehículos de transporte ligeros. Por pauta de conducción, el 49,6% de las emisiones del transporte por carretera se produjeron en vías de alta velocidad, preferentemente en trayectos interurbanos, mientras que el 36,6% corresponde al ámbito urbano y el restante 13,8% a las pautas de conducción intermedias.

Un indicador para valorar la eficacia de las medidas para reducir las emisiones del transporte, y en particular del vehículo privado, son las emisiones específicas de dióxido de carbono de los turismos nuevos, en línea con los Acuerdos Voluntarios establecidos por la Comisión Europea con los fabricantes europeos, japoneses y coreanos. Así, según el informe de la Comisión Europea de 2009, y basado en datos de 2007, la media comunitaria de las emisiones de coches nuevos era en 1995 de 158 g CO₂/km, frente a 185 g CO₂/km, es decir, una reducción del 17%; mientras que en el caso de España estos valores eran de 152 g CO₂/km en 2007 y 175 g CO₂/km (1995).
(Fuente: Estrategia Española de Movilidad Sostenible).

4. IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS GASES CONTAMINANTES

La identificación y cuantificación de los gases contaminantes asociados a la construcción y explotación de carreteras es uno de los resultados más interesantes del proyecto desde el punto de vista de aplicación.

Las metodologías y bases de datos existentes, a partir de las cuales se realizan los cálculos de emisiones de gases, son muy heterogéneas, complejas, y difíciles de comprobar. Además, desde un principio, se consideró de gran importancia tener en cuenta la evolución tecnológica de los combustibles, motores y vehículos que hace que las emisiones de gases hayan variado en los últimos años.

Finalmente, los gases contaminantes considerados han sido el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas (PM) y dióxido de carbono (CO₂).

El cálculo de los factores de emisión (gr/km) de los gases contaminantes (NO_x, CO, CO₂, HC, PM) se ha basado en la última versión del documento *EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme)* de la EEA (European Environment Agency).

Dicha Guía de Inventario de Emisiones Contaminantes, anteriormente conocida como la *Guía de Core Inventory Air Emissions (CORINAIR)*, proporciona orientación sobre la estimación de las emisiones procedentes de fuentes antropogénicas y naturales. Está diseñada para facilitar la presentación de los inventarios de emisiones de los países de la Convención Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP) de la Comisión Económica para Europa (CEPE) y la Directiva sobre emisiones de la UE.

La actual versión es de 2009 y se ha actualizado sustancialmente en comparación con ediciones anteriores (La primera versión del inventario fue la CORINAIR 1985 y ha sido actualizada en 5 ocasiones).

El estándar europeo de emisiones unitarias para los tipos de vehículos usado en el calculador es el correspondiente al vigente **Euro 4**, introducido por la *Directiva 98/69/CE relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor*. Se requiere una reducción adicional del 57% para el CO y el 47% de HC y NO_x en comparación con la

norma *Euro 3*, por medio de una mejor vigilancia del abastecimiento de combustible y de postratamiento de gases y el control.

El método seguido por los autores para determinar los gramos de contaminantes es implementada en *COPERT4* (Computer programme to calculate emissions from road transport) y combina datos técnicos (factor de emisión) y datos de actividad (vehículos km).

De la misma manera, la metodología desarrollada se apoya en instrumentos tales como ***ARTEMIS (Assessment and reliability of transport emission models and inventory systems)***, el Manual de factores de emisión de la plataforma internacional DACH-NLS (fruto de la cooperación entre Alemania (D), Austria (A), Suiza (CH), Países Bajos(NL) y Suecia (S), y otros modelos (por ejemplo EMV-Exhaust Emissions from Road Traffic) en Suecia, LIPASTO Emisión Calculation Model en Finlandia, y Versit + emisión model en los Países Bajos).

Así, se han considerado los siguientes tipos de vehículos, que son los considerados por el Ministerio de Fomento en sus estudios de tráfico:

- Turismos (vehículos ligeros) gasolina y diesel.
- Vehículos pesados de gasolina.
- Vehículos pesados de diesel (incluidos autobuses).
- Motocicletas.



Foto 3: Las condiciones del tráfico y el reparto modal determinan las emisiones contaminantes.

5. METODOLOGÍA PARA EL CALCULADOR DE EMISIONES

La herramienta desarrollada parte del conocimiento acumulado hasta el momento en distintos campos, como son la ingeniería de tráfico y la sostenibilidad. El principal valor añadido del proyecto ha consistido en conjugarlos de tal manera que sea posible determinar la cantidad de emisiones de cada tipo de gas a partir de aspectos relacionados con el diseño y la modificación de las condiciones existentes en una vía.

El calculador desarrollado tiene dos modos de trabajo: “DISEÑO” y “EXPLOTACIÓN”, con diferentes entradas de datos, según sea la fase en la que se aplique. Además, en realidad, se han desarrollado cuatro calculadores, pues cada uno de ellos se ha desarrollado también para dos tipos de carreteras: uno para vías de gran capacidad (autopistas y autovías), y otro para carreteras convencionales.

Actualmente, existen distintos calculadores capaces de ofrecer como resultado la cantidad de emisiones en una determinada vía para un tráfico real o estimado. Sin embargo, mediante este Calculador es posible realizar comparaciones en función de los parámetros de diseño, con lo que el proyectista puede comprobar en tiempo real cómo afectará un determinado parámetro (o la combinación de varios) a las emisiones generadas por esa solución.

Como se ha mencionado anteriormente, la metodología escogida para calcular las emisiones es la utilizada por la Agencia Europea de Medio Ambiente y está basada en la metodología de los proyectos *COPERT 4* y *ARTEMIS*. En ella, cada tipo de vehículo tiene asignada una fórmula para calcular la emisión de cada contaminante, en la cual la variable a considerar es la **velocidad media de recorrido**.

Por lo tanto, la clave se encuentra en la determinación de la velocidad de recorrido de la manera más fiable posible, para lo cual se aplica la metodología recogida en el *Manual de Capacidad Americano (HCM2000)*.

Tanto para el caso de carreteras de gran capacidad (autopistas y autovías) como para el de carreteras convencionales, el HCM2000 presenta una metodología capaz de determinar la velocidad media de recorrido de los vehículos, la cual es utilizada como dato de entrada en la fase de “DISEÑO” en el Calculador de Emisiones.

En el caso de que el Calculador se utilice en el modo “EXPLOTACIÓN”, las velocidades y tráfico utilizados como dato de entrada serán las reales, ya que se dispondrá de las mediciones de velocidades y aforos pertinentes.

Cuando el usuario del Calculador desee comprobar cómo afectará la implementación de una nueva medida (por ejemplo, la construcción de un carril BUS-VAO), dichos valores reales serán corregidos automáticamente por el modelo mediante unos factores introducidos en su base de datos, fruto de la investigación llevada a cabo durante el análisis del estado del arte.

Finalmente, el calculador indica cuál es la medida que menos contamina por tipo de emisiones, por lo que el usuario de la herramienta será capaz de identificar la medida más adecuada para disminuir en la medida de lo posible la cantidad de emisiones de un determinado gas, lo cual constituye un gran apoyo a la hora de llevar a cabo un análisis multicriterio.

Como se ha comentado anteriormente, la determinación de la velocidad media de recorrido que es utilizada como dato de entrada en el Calculador de Emisiones se lleva a cabo mediante la aplicación de la metodología propuesta por el *Manual de Capacidad Americano (HCM2000)*, el cual, a partir de una serie de parámetros de diseño, es capaz de determinar, entre otras cosas, la velocidad de recorrido y el Nivel de Servicio de la vía.

Así pues, factores como la inclinación de la rasante, el número de carriles, la longitud de la vía, la anchura de carriles y arcones o la velocidad de diseño influirán de manera significativa en la velocidad media de recorrido de los vehículos que circulen por una vía.

Una anchura de carriles generosa favorecerá velocidades elevadas, mientras que carriles más angostos contribuirán a una moderación de la velocidad. El Manual de capacidad identifica una serie de factores de ajuste que provocarán variaciones en la velocidad media de recorrido respecto de la velocidad de flujo libre (velocidad de recorrido en condiciones ideales, sin tráfico y con buenas condiciones de la vía).

Por lo tanto, el usuario de la herramienta únicamente tendrá que conocer los parámetros de diseño de la vía objeto de estudio para comprobar cómo modificarían ciertas variaciones de los mismos al volumen final de emisiones de cada gas contaminante por cada tipo de vehículo.

De igual manera, si se utiliza el Calculador en el modo de "EXPLORACIÓN", los valores conocidos de tráfico y velocidad a través de su medición en el campo serán corregidos por una serie de factores de ajuste propuestos a partir de la bibliografía y experiencias previas estudiadas durante la fase de análisis del estado del arte.

A partir de aquí, se calculan los factores de emisión (gr/km) de los gases contaminantes (NO_x, CO, CO₂, CH, PM), basándose en la metodología descrita en el capítulo anterior.

6. PRUEBA PILOTO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Con el objeto de poder comprobar y exponer el funcionamiento del calculador desarrollado, se ha realizado una prueba piloto, que ha consistido en la aplicación a los tipos de carreteras genéricos que existen en la Red del Ministerio de Fomento, considerando tramos de 10 km de longitud, y usando los modos de DISEÑO y EXPLORACIÓN.

Además, se ha realizado un análisis de sensibilidad para ver la influencia de los distintos parámetros de entrada en las emisiones de gases contaminantes resultantes.

Este análisis se ha realizado para un tramo de autovía típico de la Red de Carreteras del Estado, tanto en la fase de diseño, como en la fase de explotación.

6.1 Autopista. Fase de diseño

La prueba piloto ha consistido en la aplicación de la metodología a un tramo de autovía de 10 km de longitud que discurre por entorno interurbano, con tres carriles por sentido de 3,5 m de anchura, 1 enlace cada 6 kilómetros y una velocidad de proyecto de 120 km/h.

El trazado en alzado presenta una rampa de 5 km del 0,5 %, seguida de una pendiente de 3 km del 0,5 % y finaliza con otra rampa de 2 km del 0,5 %. Se ha considerado un tramo de autovía prácticamente horizontal, para más adelante ir viendo la sensibilidad frente a los cambios de rasante.

A partir de aquí, los parámetros de tráfico considerados en el período de proyecto son los que refleja la siguiente tabla:

Tabla 1. Composición del tráfico

% ligeros estimado	% pesados (sin autobuses) estimado	% vehículos recreo	% motocicletas estimado	% autobuses estimado	V= VOLUMEN DE TRÁFICO TOTAL ESTIMADO PARA LA HORA PUNTA (en un sentido) (veh/h)	% TRÁFICO EN SENTIDO MÁS CARGADO
77,00%	14,00%	4,00%	2,00%	3,00%	3.500	50,00%

El volumen de tráfico estimado para la hora punta se corresponde con una Intensidad Media Diaria de 26.923 vehículos/día. Con estos datos, según los cálculos basados en el Manual de Capacidad, se obtiene una velocidad media de recorrido de 114 km/h, y unas emisiones de gases anuales totales reflejadas en la siguiente tabla:

Tabla 2. Emisiones contaminantes

EMISIONES (Kg)				
CO	HC	NO _x	PM	CO ₂
417.182,00	17.544,66	68.215,73	2.311,22	19.779.927,96

Una vez obtenidos los resultados de emisiones de gases contaminantes anuales, para unos parámetros determinados de diseño, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad para comprobar cómo afectan determinadas variaciones en dichos parámetros a las emisiones contaminantes totales.

Para ello, se han ido variando el número de carriles, la anchura de carril y arcén, la velocidad de proyecto, las rasantes y el tipo de terreno. A partir de estas, se han comparado 5 soluciones:

- La Solución 0 corresponde a la situación de partida, es decir, al diseño original planteado.
- Las soluciones 1 y 2 mantienen todos los parámetros de diseño de la solución 0 excepto las rasantes, que dan lugar a un tipo de terreno ondulado para la Solución 1 y montañoso para la Solución 2.
- La Solución 3 implica reducciones de 80 cm de la anchura de calzada y de 60 cm en los despejes laterales respecto de la situación inicial de diseño.
- La Solución 4 implicaría una reducción del número de carriles por sentido (2 carriles en lugar de 3).
- La Solución 5 consiste en una modificación de la velocidad de diseño (de 120 a 110 km/h).

Una vez introducidos estos parámetros en el calculador de emisiones para Autopistas y Autovías en la fase de diseño, se han obtenido los siguientes valores totales de emisiones por cada tipo de gas:

Tabla 3. Análisis comparativo de emisiones

		EMISIONES (Kg)				
		CO	HC	NO _x	PM	CO ₂
Solución 0	NO HACER NADA	417.182,00	17.544,66	68.215,73	2.311,22	19.779.927,96
Solución 1	VARIACIÓN RASANTE (ONDULADO-inclinación media=2,3%)	415.325,41	17.475,07	93.027,40	2.323,71	24.389.884,50
Solución 2	VARIACIÓN RASANTE (MONTAÑOSO-inclinación media=5%)	403.826,64	17.075,40	105.481,74	2.188,89	29.263.050,78
Solución 3	VARIACIÓN ANCHURA DE CALZADA (reducción de 80 cm en calzada y 60 cm en despejes laterales)	415.199,87	17.464,32	66.524,99	2.280,68	19.778.128,74
Solución 4	VARIACIÓN Nº CARRILES POR SENTIDO (de 3 a 2)	404.956,81	17.050,24	55.644,22	2.101,39	19.761.331,23
Solución 5	VARIACIÓN VELOCIDAD DE DISEÑO (de 120 a 110)	410.267,36	17.250,09	61.655,39	2.195,59	19.772.073,23

La tabla anterior refleja las emisiones totales por tipo de gas durante un año (en kg) que cada una de las soluciones provocaría para un tráfico determinado. El código de

colores identifica los valores máximo y mínimo, siendo el color rojo el indicador de la máxima emisión y el verde el de la mínima.

Como puede apreciarse, la reducción en el número de carriles (de 3 a 2) es la medida que más influye en la reducción de emisiones del tipo HC, NOx, PM y CO₂. Esto es debido a que al reducir la capacidad de la vía, se empeora el nivel de servicio de la misma, disminuyendo considerablemente la velocidad de recorrido de los vehículos, siendo ésta la variable más determinante respecto a la emisión de gases contaminantes. A continuación se incluye una tabla en la que se presentan las variaciones en % de las emisiones de cada Solución respecto del diseño inicial (Solución 0).

Tabla 4. Análisis comparativo de emisiones 2

		EMISIONES (Kg)				
		CO	HC	NO _x	PM	CO ₂
Solución 0	NO HACER NADA	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Solución 1	VARIACIÓN RASANTE (ONDULADO)	-0,45%	-0,40%	36,37%	0,54%	23,31%
Solución 2	VARIACIÓN RASANTE (MONTAÑOSO)	-3,20%	-2,67%	54,63%	-5,29%	47,94%
Solución 3	VARIACIÓN ANCHURA DE CALZADA (reducción de 80 cm en calzada y 60 cm en despejes laterales)	-0,48%	-0,46%	-2,48%	-1,32%	-0,01%
Solución 4	VARIACIÓN Nº CARRILES POR SENTIDO (de 3 a 2)	-2,93%	-2,82%	-18,43%	-9,08%	-0,09%
Solución 5	VARIACIÓN VELOCIDAD DE DISEÑO (de 120 a 110)	-1,66%	-1,68%	-9,62%	-5,00%	-0,04%

Llegados a este punto, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Los diseños que más restringen las velocidades medias de circulación provocan las mayores reducciones de emisiones contaminantes entre los gases analizados. Tal es el caso de la variación del número de carriles (de 3 a 2) y de la variación de la velocidad de diseño (de 120 a 110 km/h).
- Las variaciones de rasante pueden provocar disminuciones en algunos gases contaminantes ya que al aumentar la rasante media, disminuye la velocidad de recorrido. Sin embargo también pueden traer consigo aumentos muy significativos de otras emisiones (NOx, CO₂), ya que para los vehículos pesados y autobuses éstas dependen en gran medida de la inclinación de la rasante, no sólo de la velocidad.

- Sin embargo, las variaciones de la rasante no son determinantes en la cantidad de emisiones de CO y HC.
- Una reducción de 80 cm de la calzada en un sentido y de 60 cm en los despejes laterales consigue reducir la velocidad media de los vehículos en algo menos de 3 km/h, lo cual favorece la reducción de emisiones pero no tanto como otras medidas, como la variación de la velocidad de diseño.

Nótese que todas estas variaciones en la cantidad global de emisiones se corresponden con modificaciones de un único factor de diseño, pudiéndose alcanzar reducciones más significativas mediante la combinación de varias modificaciones.

A continuación se presenta una tabla en la que se compara la situación inicial de diseño con una combinación de dos modificaciones de los parámetros: la variación de la anchura de la calzada y la disminución de la velocidad de diseño.

Tabla 5. Análisis comparativo de emisiones 3

		EMISIONES (Kg)				
		CO	HC	NO _x	PM	CO ₂
Solución 0	NO HACER NADA	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Solución 1	VARIACIÓN RASANTE (Ondulado)	-0,45%	-0,40%	36,37%	0,54%	23,31%
Solución 2	VARIACIÓN RASANTE (Montañoso)	-3,20%	-2,67%	54,63%	-5,29%	47,94%
Solución 3	VARIACIÓN ANCHURA DE CALZADA (reducción de 80 cm en calzada y 60 cm en despejes laterales)	-0,48%	-0,46%	-2,48%	-1,32%	-0,01%
Solución 4	VARIACIÓN Nº CARRILES POR SENTIDO (de 3 a 2)	-2,93%	-2,82%	-18,43%	-9,08%	-0,09%
Solución 5	VARIACIÓN VELOCIDAD DE DISEÑO (de 120 a 110 km/h)	-1,66%	-1,68%	-9,62%	-5,00%	-0,04%
Solución 6	COMBINACIÓN MEDIDAS 3 Y 5	-1,95%	-1,98%	-11,60%	-5,98%	-0,05%

Como puede apreciarse, el efecto de la combinación de las soluciones 3 y 6 (reducción anchura de calzada y variación de la velocidad de diseño) trae consigo una reducción adicional de emisiones, pero inferior a la producida mediante la variación del número de carriles.

En cualquier proceso de planificación y diseño es necesario llevar a cabo un análisis multicriterio, considerando diversos factores en el estudio. A pesar de que la variación del número de carriles ha demostrado ser la medida más eficaz en el ejemplo propuesto, se trata de un ejercicio teórico, ya que esta medida difícilmente podrá ser llevada a la práctica debido a problemas de congestión, económicos, sociales, etc.

6.2 Autopista. Fase de explotación

En esta ocasión se ha analizado el efecto que causaría sobre la cantidad total de emisiones de cada gas la instalación de un *sistema de señalización dinámica o variable* para la reducción de la velocidad en función de las condiciones del tráfico. Asimismo, se ha evaluado el impacto de sistemas de gestión, como la restricción del tráfico de vehículos pesados.

El sistema de señalización dinámica es el que se ha implantado, por ejemplo, en los accesos a Barcelona, en la autovía de Castelldefels y en la autopista del Garraf. Consiste en variar los límites de velocidad en función de la densidad del tráfico. Los tres objetivos de esta medida son la reducción de las situaciones de congestión, la mejora de la seguridad vial y, por supuesto, la reducción de la contaminación atmosférica.

En cuanto a las restricciones de tráfico, se han tomado como ejemplo algunas experiencias llevadas a cabo en Estados Unidos sobre restricciones de circulación de vehículos pesados.

Para su análisis, se parte de la situación inicial contemplada en el caso anterior, para el mismo tramo. A continuación se presenta una tabla comparativa en la que se puede apreciar la disminución de emisiones conseguida gracias a la instalación de un sistema de este tipo

Tabla 6. Análisis comparativo entre situación inicial, señalización dinámica y restricción del tráfico

ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS		EMISIONES (Kg)				
		CO	HC	NO _x	PM	CO ₂
ALTERNATIVA 0	NO HACER NADA	417.182,00	17.544,66	68.215,73	2.311,22	19.779.927,96
ALTERNATIVA 1	SEÑALIZACIÓN DINÁMICA	290.421,17	12.214,23	41.079,58	1.520,42	14.118.065,13
ALTERNATIVA 2	RESTRICCIONES DE TRÁFICO	263.704,20	15.153,61	54.563,99	1.844,64	15.192.722,10
REDUCCIÓN DE EMISIONES (%)	SEÑALIZACIÓN DINÁMICA	-30,39%	-30,38%	-39,78%	-34,22%	-28,62%
	RESTRICCIONES DE TRÁFICO	-36,79%	-13,63%	-20,01%	-20,19%	-23,19%

Como puede observarse, la implementación de un sistema de gestión de señalización dinámica provocaría una reducción de emisiones del 30,4%% de CO, del 30,38% de HC, del 39,8% de NO_x, del 34,2% de PM y del 28,6% de CO₂.

Las restricciones de tráfico de vehículos pesados también consiguen reducciones significativas de emisiones, especialmente de CO (-36,8%) y CO₂ (-23,2%).

Cada una de las medidas analizadas tiene a su vez un efecto sobre la seguridad vial. La gestión de señalización dinámica constituye un sistema flexible, capaz de ajustarse a las condiciones reales de circulación y meteorológicas, lo cual incide directamente sobre la seguridad de la vía. En cuanto a las restricciones de vehículos pesados, distintos estudios llevados a cabo en Estados Unidos afirman que la restricción de tráfico de los vehículos pesados podría generar mejoras en la seguridad debido a la homogeneización del tráfico, así como una reducción de los tiempos de viaje.



Foto 3: La metodología desarrollada permite evaluar cualquier tipo de carretera.

7. APLICACIÓN PRÁCTICA: “N-230” EN LLEIDA

Con el objeto de poder realizar una aplicación real con el calculador desarrollado, se ha considerado un Estudio Informativo que el Ministerio de Fomento ha estado realizando en la misma época en que se ha desarrollado el presente proyecto.

Para ello, se ha tomado el Estudio Informativo para el Acondicionamiento a Carretera C-80 de la “N-230 Sopeira – Frontera con Francia, tramo: Boca Norte del túnel de Viella – Frontera con Francia (PP.KK. 156+640 al 187+100)”, en la Provincia de Lleida.

El objeto de este Estudio Informativo es el de acondicionar la citada carretera convencional a una velocidad de proyecto de 80 km/h y a una plataforma de 7,00 metros de ancho de calzada y arcenes de 1,5 metros.



 <p>Ministerio de Fomento</p>	<p>SECRETARÍA DE ESTADO DE PLANIFICACIÓN E INFRAESTRUCTURAS Secretaría General de Infraestructuras DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS DEMARCACIÓN DE CARRETERAS DEL ESTADO EN CATALUÑA. UNIDAD DE LLEIDA</p>		
	<table border="1"> <tr> <td>RED DE CARRETERAS DEL ESTADO</td> <td>CLAVE: EE2-L-17</td> </tr> </table>	RED DE CARRETERAS DEL ESTADO	CLAVE: EE2-L-17
	RED DE CARRETERAS DEL ESTADO	CLAVE: EE2-L-17	
	<p>TIPO DE ESTUDIO: ESTUDIO INFORMATIVO</p>		
	<table border="1"> <tr> <td>CLASE DE OBRA: ACONDICIONAMIENTO CARRETERA C-80</td> <td>TRAMO: BOCA NORTE DEL TÚNEL DE VIELLA – FRONTERA CON FRANCIA, PP.KK. 156+640 AL 187+100</td> </tr> </table>	CLASE DE OBRA: ACONDICIONAMIENTO CARRETERA C-80	TRAMO: BOCA NORTE DEL TÚNEL DE VIELLA – FRONTERA CON FRANCIA, PP.KK. 156+640 AL 187+100
	CLASE DE OBRA: ACONDICIONAMIENTO CARRETERA C-80	TRAMO: BOCA NORTE DEL TÚNEL DE VIELLA – FRONTERA CON FRANCIA, PP.KK. 156+640 AL 187+100	
<table border="1"> <tr> <td>CARRETERA: N-230 SOPEIRA – FRONTERA CON FRANCIA</td> <td>PROVINCIA: LLEIDA</td> </tr> </table>	CARRETERA: N-230 SOPEIRA – FRONTERA CON FRANCIA	PROVINCIA: LLEIDA	
CARRETERA: N-230 SOPEIRA – FRONTERA CON FRANCIA	PROVINCIA: LLEIDA		
<p style="text-align: center;">FASE A</p>			
<p>INGENIERO DIRECTOR DEL ESTUDIO: JUAN ANTONIO ROMERO LACASA</p>			
<p>INGENIERO AUTOR: RAFAEL ARGÜELLES PINTOS</p>			
<p>CONSULTOR:  </p>			

Ilustración 1: Portada del Estudio Informativo de la carretera N-230.

La finalidad fundamental es la de mejorar la carretera existente para evitar el tráfico pesado por las travesías urbanas y, dentro de éste, el de mercancías peligrosas en particular. El tráfico aforado presenta un valor de la IMD de 3.360 (año 2006) y su distribución modal es la siguiente: 1% motocicletas, 83% ligeros y 16% pesados.

Aunque el Estudio Informativo se encuentra en la Fase A y no llega a definir todos los parámetros que deben introducirse en el modelo, se ha realizado una simulación, adoptando valores estimados donde no se ha dispuesto de valores concretos.

En el Estudio se plantean 7 soluciones alternativas, que son las que se han analizado y comparado, desde el punto de vista de las emisiones de gases contaminantes que generarían cada una.

Los datos que han variado entre las distintas alternativas corresponden a las rasantes en función de los ejes de trazado que las componen. Su descripción pormenorizada se encuentra en el citado estudio.

No obstante, en la siguiente tabla se resumen las principales características del trazado de las 7 soluciones analizadas. En ella se describen los radios mínimo y máximo de las curvas en planta, las longitudes de tramos con rasante mayor o igual del 6%, la longitud en túnel y la longitud en viaducto. Todas en metros.

Tabla 7. Características de trazado

ALTERNATIVA	Rmin	Rmax	Long $\geq 6\%$	Long Túnel	Long Viaducto
1	470	5.000	8.623	4.870	2.995
2	400	5.000	8.320	1.470	3.015
3	400	5.000	7.850	850	2.840
4	400	5.000	7.760	510	2.800
5	400	5.000	5.374	1.050	5.165
6	400	5.000	6.430	1.120	6.795
7	400	5.000	5.735	1.110	3.645

El resultado de las emisiones totales anuales de las 7 alternativas obtenido con el calculador es el que se refleja en la siguiente tabla.

Tabla 8. Análisis comparativo de emisiones

EMISIONES(kg/ año)	CO	HC	NOX	PM	CO2
ALTERNATIVA 1	10.990	1.501	4.931	313	2.753.345
ALTERNATIVA 2	12.055	1.646	5.409	344	3.020.251
ALTERNATIVA 3	11.943	1.631	5.359	340	2.992.156
ALTERNATIVA 4	12.111	1.654	5.435	345	3.034.299
ALTERNATIVA 5	11.887	1.623	5.334	339	2.978.108
ALTERNATIVA 6	12.391	1.692	5.560	353	3.104.537
ALTERNATIVA 7	13.176	1.800	5.913	376	3.301.205

Como puede apreciarse, no existe gran diferencia entre estas alternativas, pues el trazado, tanto en planta como en alzado, es muy similar. Sin embargo, la alternativa 1 destaca sensiblemente sobre las demás, al mostrarse como la que menores emisiones implicaría.

Lo que es importante, desde el punto de vista de los investigadores, es que en las conclusiones del citado Estudio Informativo del Ministerio de Fomento se proponen cuatro alternativas como las mejores para desarrollar más en detalle en la siguiente fase.

Estas soluciones son las alternativas 1, 3, 4 y 5. Como puede apreciarse en la tabla anterior, estas alternativas también están entre las mejores en cuanto a la emisión de gases contaminantes, según los resultados obtenidos por el calculador desarrollado.

Una definición del trazado de estas alternativas en la siguiente fase permitiría su evaluación y comparación con el calculador citado, permitiendo seguir seleccionando las mejores desde el punto de vista de este factor.

8. CONCLUSIONES

Una vez desarrollada la metodología propuesta y su aplicación a casos concretos, puede concluirse el carácter práctico e innovador del calculador y de los resultados obtenidos.

A partir de los ejemplos de aplicación y del análisis de sensibilidad realizados, empleando el calculador desarrollado para estimar las emisiones y la reducción obtenida mediante la aplicación de medidas reductoras, puede concluirse que no todas las medidas son eficaces en todos los casos.

Así, para el caso de autopistas y autovías, en general, pueden extraerse las siguientes conclusiones del análisis de sensibilidad realizado:

- Las emisiones de NO_x son las que más varían al modificar los parámetros de diseño.
- Las emisiones de CO₂ crecen significativamente al aumentar la inclinación de la rasante, sin embargo se mantienen casi inalteradas con otras modificaciones

del diseño, como la variación de la anchura de la calzada, la variación del número de carriles por sentido o la variación de la velocidad de diseño de la vía.

- La velocidad de recorrido es uno de los factores que más influyen en la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera, por lo que aquellas medidas que más restrinjan este parámetro conseguirán unas mayores reducciones en las emisiones.
- Con el fin de no empeorar otros aspectos como el nivel de servicio, es conveniente conjugar las acciones que producen cambios en varios parámetros, en vez de modificar en gran medida uno sólo.
- Mediante esta herramienta, el diseñador, que habitualmente tenía en cuenta los parámetros de diseño para compensar movimientos de tierra, garantizar la seguridad mediante la elección de radios adecuados, el cálculo de distancias de parada y visibilidad suficientes, etc., también podrá comprobar si dichos parámetros perjudican o benefician al medioambiente por las emisiones de gases contaminantes que sean capaces de generar o reducir.

Esta metodología supone una herramienta más para que el Ministerio de Fomento y el resto de Administraciones puedan tomar decisiones en las distintas fases de la ingeniería de carreteras (planificación, estudios, proyecto y explotación) a favor de soluciones sostenibles, que impliquen unas menores afecciones al entorno y a la salud humana.

9. REFERENCIAS

- Ainchil, J. et al. (2008). *Métodos de evaluación de la contribución a la sostenibilidad del empleo de residuos y materiales subóptimos en firmas de carreteras*. España: II Congreso Nacional de Firmes.
- André, M. et al. (1999). *Methods of estimations of atmospheric emissions from transport. European scientific stat of the art*. Action COST 319. Final report.
- Blasco, P. (2005). *Carreteras ecológicas*. El mundo, 5.600.

- Copeland, C. et al. (1983). *Simulation of vehicles emissions at intersections*. Texas: Texas State Department of Highways and public, Transportation Planning Division.
- De la Peña González, E. (2008). *El transporte por carretera y el cambio climático*. Carreteras, 160, (67-74).
- EEA, 2006. *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2008*. EEA Report. No 5/2008.
- EEA, 2008. *Beyond transport policy-exploring and managing the external drivers of transport demand*. Illustrative case studies from Europe. EEA. Technical Report. N° 12/2008. Copenhagen.
- EEA, 2008. *Climate for a transport change. TERM 2007: indicators tracking for a transport and environment in the European Union*. EEA Report. No 1/2008.
- EEA, 2008. *Manual for the European Environment Agency Air Pollutant emissions Data Viewer (NEC Directive)*. EEA, Copenhagen.
- EEA, 2008. *Success stories within the road transport sector on reducing greenhouse emission and producing ancillary benefits*. EEA Report. No 2/2008.
- European Conference of Ministers of Transport (2003). *Implementing sustainable urban travel policies*. Paris: OECD Publications Service.
- Gkatzoflias, D. et al. (2007). *COPERT 4 Computer programme to calculate emissions from road transport*. User manual (version 5.0). Greece: Laboratory of applied thermodynamics mechanical engineering department. Aristotle University Thessaloniki.
- Greenhouse Gas Inventory Programme: *Changes Made from 2005 GHGI*. Reino Unido: National Atmospheric Emissions Inventory.
- Haworth, N. et al. (2004). *Driving to reduce fuel consumption and improve road safety*. Australia: Monash University Accident Research Centre.

- Internacional Climate Change Programs (2008). *Lessons Learned from the European Union's emissions Trading Scheme and the Kyoto Protocol's Clean Development Mechanism*. United States: Accountability Office.
- IPCC, 2007: *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Joumard, R (1999) *Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network and scientific state-of-art*. Action COST 319. Final Report. France.
- Khanna, P. *Canada's approach to reducing GHG emissions from motor vehicles*. Ontario: Natural Resources Canada.
- Kouridis, C. et al. (2000). *COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport*. Copenhagen: European Environment Agency.
- Larsen, B. (2008). *Copenhagen Consensus 2008 Air Pollution Challenge Paper*. Copenhagen: Consensus Centre.
- Lesueur, D. et al. (2008). *Una herramienta para evaluar el análisis de ciclo de vida en la construcción de carreteras: el software GAIA*. España: II Congreso Nacional de Medio Ambiente en Carreteras.
- Meira, P. A. (2008). *Comunicar el Cambio Climático. Escenario social y líneas de actuación*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino - Organismo Autónomo de Parques Nacionales.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2006). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Madrid: Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica.

- Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MARM) (2007). *Perfil Ambiental de España 2007*. Madrid: MARM.
- Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MARM) (2008). *Emisiones de gases de efecto invernadero*. Madrid: Banco público de indicadores ambientales del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.
- Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MARM). (2008). *Nota sobre los principales resultados de la 14ª Conferencia de las partes de la convención marco de Naciones Unidas sobre cambio climático y del vigésimo noveno periodo de sesiones de los órganos subsidiarios*. Poznan(Polonia). España: Oficina Española de Cambio Climático.
- Ministerio de Medio Ambiente, Secretaría General para la prevención de la contaminación y del cambio climático (2008). *Inventario de Gases de Efecto Invernadero de España 1990-2006*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.
- Pulido Sánchez, C. (2004). *Tema 72: Conducción económica y contaminación del medio ambiente*. Precauciones a adoptar para evitar la contaminación. La descontaminación como actividad previa a la baja del vehículo: su finalidad (5-10), en Pulido, C. Temario Específico Escala Superior Técnicos de Tráfico. Madrid.
- Ntziachristos, L. et al. (2009). 1.A.3.b. Road Transport TFEIP endorsed draft. *Emisión Inventory Guidebook*. European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) / European Environment Agency (EEA).
- Pulido Sánchez, C. (2004). *Tema 73: La contaminación atmosférica: el deterioro del medio ambiente. Los vehículos como fuente de contaminación. Medida directa de la contaminación producida por los vehículos. Monóxido de carbono. Humos. Medida de contaminación en el medio ambiente (4-12)*, en Pulido, C. Temario Específico Escala Superior Técnicos de Tráfico. Madrid.
- Racero, J. et al. *Metodología para el inventario de emisiones contaminantes y consumo energético en zonas urbanas*. Aplicación a Sevilla.

- Sampedro, A. *El protocolo de Kioto en la ingeniería de carreteras*. Revista Carreteras. Madrid.
- Shah, J. (2008). *Copenhagen Consensus 2008 Air Pollution Perspective Paper*. Copenhagen: Consensus Centre.
- Soto Sánchez, José A. et al. (2008). *Sistemas de baja emisión*. Carreteras, 155, (41-59).
- Terrón Alonso, Juan Á. *Biocombustibles: experiencia de utilización de la EMT de Madrid*. España: Municipal de Transportes de Madrid.
- The Netherlands Ministry of Housing Spatial Planning and the Environment. *Traffic Emissions Policy Document*. The Hague: VROM.
- Verbeek, R. et al. (2008). *Impact of biofuels on air pollutant emissions from road vehicles (Management Summary)*. Delft: TNO.
- Radhakrishnan M. et al. *Impact of left lane truck restriction strategies on multilane highways in Louisiana*. Louisiana Transportation Research Center and Department of Civil and Environmental Engineering. Louisiana State University.