

## **EFFECTOS NOCIVOS SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE PROVOCADOS POR LAS CARRETERAS ESPAÑOLAS**

Daniel Garraín<sup>(p)</sup>, Rosario Vidal

### **Abstract**

When assessing atmospheric emissions from roads, we need to take into account not only gaseous and particle emissions from the vehicles running on them. Applying the Life Cycle Assessment (LCA) methodology to roads allows for an analytical assessment of the complete life cycle of these infrastructures, from material extraction for their construction to recycling, including use and maintenance.

In this study, we performed an assessment of the environmental impact caused by the construction and use of Spanish roads through the application of LCA. The categories considered were those related to air quality, namely global warming, formation of tropospheric ozone precursors and acidification. A noteworthy effort was made in data compilation and treatment, given the fact that existing information on the subject in Spain is scarce and fragmentary.

The results reflect the importance of the environmental impact associated to the construction stage as compared to that associated to road use. Additionally, our aim is to stress the need to compile data in order to create a reliable database to assess the environmental impact of roads along their entire life cycle.

*Keywords: LCA, global warming, ozone precursors, acidification, road*

### **Resumen**

Cuando se evalúan las emisiones atmosféricas asociadas a las carreteras, no sólo hay que tener en cuenta las emisiones gaseosas y de partículas de los vehículos que transitan por las mismas. La metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) aplicada a las carreteras permite una evaluación analítica del ciclo de vida completo de estas infraestructuras, desde la extracción de materiales para su construcción hasta su reciclaje, incluyendo la utilización y el mantenimiento de las mismas.

En este estudio se ha llevado a cabo la evaluación del impacto medioambiental que se produce en las etapas de construcción y uso de las carreteras españolas mediante la aplicación de ACV. Las categorías de impacto que se han tenido en cuenta han sido aquellas relacionadas con la calidad del aire, como el calentamiento global, la formación de precursores de ozono troposférico y la acidificación. Cabe destacar el esfuerzo de búsqueda de información y su tratamiento para realizar el análisis del impacto medioambiental de este tipo de infraestructura, dado que la información existente al respecto en España es escasa y dispersa.

Los resultados reflejan la importancia del impacto medioambiental asociado a la etapa de construcción de carreteras comparado con el impacto de la utilización de las mismas. Con ello se pretende resaltar, además, la necesidad de recopilación de datos que permitan crear una base fiable para poder evaluar el impacto de las carreteras a lo largo de su ciclo de vida completo.

*Palabras clave: ACV, calentamiento global, precursores de ozono troposférico, acidificación, carretera*

## **1. Introducción**

La sociedad es consciente de la continua degradación del medio ambiente que existe en nuestro planeta producida por los contaminantes generados por el transporte. La contaminación provocada por el transporte en España representa uno de los principales elementos de insostenibilidad del modelo actual de desarrollo. Informes del Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2005 y 2006) advierten de que el transporte continúa siendo “insostenible” ya que las demandas de transporte y mercancías crecen por encima de la media europea en los últimos años. Es por esto que el gobierno español está impulsando una serie de medidas y herramientas para reducir el ruido y los contaminantes atmosféricos producidos por el transporte, y en concreto por el transporte privado por carreteras por ser el modo que más emisiones de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas genera dentro del cómputo de las emisiones debidas al transporte en todos sus modos (TRAMA, 2005).

No obstante, en las últimas décadas ha surgido entre la población una conciencia medioambiental que ha generado estrategias y metodologías capaces de evaluar el impacto al medio para conseguir una posterior disminución de contaminantes. Ya en el año 2000, la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) publicó un informe (TERM, 2000) con el que se pretendía allanar el camino a la integración de las políticas ambientales y sectoriales referidas al transporte.

Una de las herramientas más ampliamente aceptada por la comunidad científica para evaluar el impacto medioambiental es el ACV, un procedimiento analítico que evalúa el ciclo de vida completo de un proceso o actividad, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado, la reutilización y la eliminación final.

## **2. Objetivos, alcance y unidad funcional**

El objetivo de este estudio es evaluar el impacto medioambiental que se produce en las etapas de construcción y uso de las carreteras españolas mediante la aplicación de ACV. Las categorías de impacto que se han tenido en cuenta han sido aquellas más significativas de entre las relacionadas con los efectos sobre la calidad del aire, como son el calentamiento global, la formación de precursores de ozono troposférico y la acidificación.

En la literatura se dispone de algunos análisis del ciclo de vida centrados en infraestructuras de carreteras. Treloar *et al.* (2004) y Spielmann *et al.* (2004) han aplicado un método simplificado de ACV basado en la categoría de energía para diseño, mantenimiento y operación de carreteras, y fabricación y retirada de vehículos. Bowman y Moll (2002) han analizado diferentes sistemas de transporte de pasajeros por tierra en Holanda utilizando sólo la categoría de energía.

Mroueh *et al.* (2000) y Stripple (2001) han elaborado bases de datos sobre construcción de infraestructuras de carreteras y obras de ingeniería civil para comparar diferentes alternativas de construcción.

El reciclaje de carreteras no se ha sometido a estudio ya que este proceso no se ha tenido en cuenta a la hora de construir nuevas infraestructuras de carreteras hasta hace muy poco tiempo, y los datos al respecto son escasos. No obstante, según la Dirección General de Carreteras (Rodríguez López, 2006), desde el año 2005 se están empezando a aplicar en las carreteras nuevas técnicas que aprovechan el 50% del material del antiguo firme, reduciendo así el impacto ecológico y el coste de las obras de reparación.

En cuanto a la evaluación del impacto derivado del uso de carreteras, son muy frecuentes los ACV centrados en el impacto ambiental de los diferentes medios de transporte sobre la calidad del aire. En este estudio, la evaluación del impacto medioambiental está basada en las emisiones de los vehículos en función del consumo, tipo de combustible y tipo de vehículo.

El mantenimiento y la operación también son procesos a tener en cuenta dentro del uso de carreteras. Existen autores que realizan ACV de los procesos de operación, considerando la sal para deshielo, la energía de las quitanieves, el uso de herbicidas, la poda de arbustos y siega, el pintado de rayas, la electricidad para semáforos, etc. (Spielmann *et al.*, 2004; Stripple, 2001). En la literatura aparece también el análisis de las operaciones de mantenimiento de las carreteras suecas (Choki, 2005). Desafortunadamente, en España no se dispone por el momento de la información para analizar estos impactos ambientales, y por esta razón quedan al margen de nuestro estudio.

El impacto se determinó en cada caso tomando la unidad funcional (calentamiento global: kg de CO<sub>2</sub> equivalente; precursores de ozono: kg de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> equivalente; acidificación: kg de SO<sub>2</sub> equivalente) y expresando los resultados por pasajeros-kilómetro (pkm) y por toneladas-kilómetro (tkm) por año. Si agregamos el producto del número de vehículos por la distancia que recorren en un año, obtenemos el número de vehículos-kilómetro por año. A partir de este dato, el número de pasajeros-kilómetro es el resultado de multiplicar los vehículos-kilómetro recorridos por coches, motocicletas y autocares (denominados como ligeros) por la ocupación media de los mismos, descontando en estos últimos el conductor del vehículo; y el número de toneladas-kilómetro se obtiene al multiplicar los vehículos-kilómetro recorridos por vehículos pesados por la carga media de los mismos.

### **3. Inventario y evaluación del impacto sobre la calidad del aire de las infraestructuras de carreteras españolas**

#### **3.1 Uso de carreteras**

Los contaminantes producidos por el uso de las carreteras se estimaron en base a las emisiones de los vehículos que transitan por las mismas mediante el programa informático COPERT III.

El programa COPERT III, financiado por la Agencia Europea del Medio Ambiente en el marco de actividades del *European Topic Center on Air and Climate Change* (ETC/ACC), sirve para calcular las emisiones de contaminantes a la atmósfera del transporte rodado para incluirlas en inventarios nacionales oficiales. Este programa estima las emisiones de todos los contaminantes atmosféricos producidos por las diferentes clases de vehículos.

Entre los contaminantes calculados se encuentran los óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono y de azufre, metano, amoníaco, compuestos orgánicos volátiles, metales pesados, partículas, monóxido de carbono, etc. Las emisiones estimadas, además, distinguen entre tres fuentes distintas: emisiones producidas durante el encendido del motor, emisiones durante la estabilización térmica del motor y las debidas a la evaporación de combustible. Las emisiones totales se calculan como el producto de los datos de actividad introducidos por el usuario y los factores de emisión dependientes de la velocidad calculados por el propio programa.

Los datos recogidos para obtener la estimación de los contaminantes producidos por el tráfico en España han sido tratados previamente a su introducción en el programa COPERT III:

- Consumos y especificaciones de los combustibles para automóviles (CORES, 2005; Empresas suministradoras).
- Temperaturas máximas y mínimas mensuales en España (Instituto Nacional de Estadística; datos del año 2004) .
- Parque de vehículos (MFOM, 2005):
  - Por antigüedad.
  - Por tipo de combustible.
  - Por tipo de vehículo:
    - Turismos y motocicletas por cilindrada.
    - Camiones y furgonetas por carga útil.
    - Autobuses y autocares.
- Kilometraje anual recorrido por tipo de vehículo (MEET, 1999)
- Velocidades medias por tipo de vehículo y vía (Burón *et al.*, 2004).
- Ratio de distribución kilométrica por tipo de vehículo y vía (MEET, 1999).

Los resultados obtenidos por el programa COPERT III de los contaminantes producidos por el tráfico se pueden desglosar por tipo de vía en la que se producen y por tipo de vehículo, quedando de la siguiente forma:

Contaminante	Cantidad emitida por tipo de vehículo [t]	TIPO DE VÍA	
		Vías interurbanas	Autopistas y autovías
COVNM	Ligeros	21802	20789
	Pesados	13746	6942
CH <sub>4</sub>	Ligeros	593	868
	Pesados	462	350
N <sub>2</sub> O	Ligeros	1049	2142
	Pesados	432	504
NH <sub>3</sub>	Ligeros	3385	4303
	Pesados	356	400
SO <sub>2</sub>	Ligeros	2	3
	Pesados	2	2

CO <sub>2</sub>	Ligeros	6087946	8875820
	Pesados	6913719	7280584
CO	Ligeros	83667	157458
	Pesados	104123	50193
NO <sub>x</sub> (como NO <sub>2</sub> )	Ligeros	35063	56819
	Pesados	50646	42327

Tabla 1. Toneladas de contaminantes emitidas por el tráfico rodado en España, por tipo de vehículo y tipo de vía (sin contar vías urbanas), año 2004.

### 3.2 Construcción de carreteras

Para calcular el impacto ambiental asociado a la construcción de carreteras se realizó un inventario de los materiales y recursos energéticos empleados en el proceso. Estos datos se introdujeron en el programa de evaluación SimaPro v7.0 para cada metro de cada tipo de carretera que se construye en un año. Para la consecución de estos datos se han recopilado y tratado los datos según el diagrama de la figura 1.

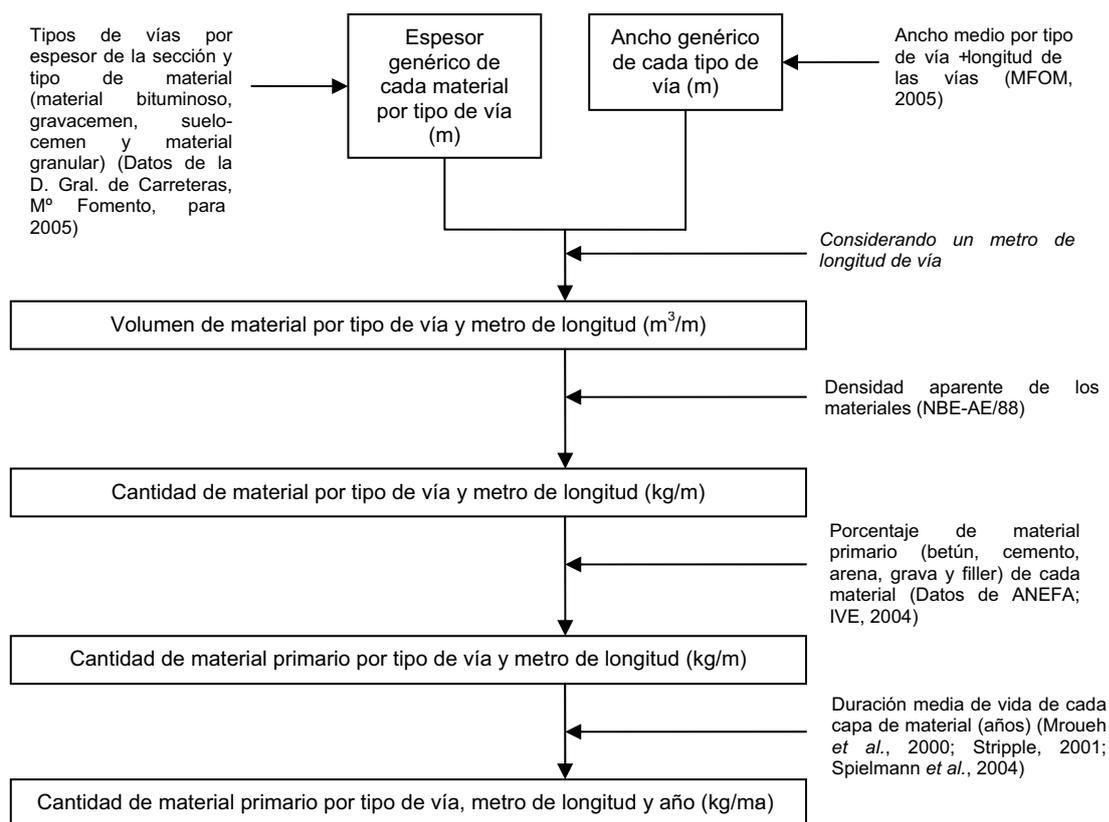


Figura 1. Diagrama de flujo de la adquisición de datos de inventario para obtener la cantidad de materiales empleados en la construcción de carreteras en España, año 2004.

Además de estos datos, hay que tener en cuenta otros datos de inventario, desglosados por tipo de vía, tales como:

- Consumo de combustible de la maquinaria empleada para la construcción de vías (IVE, 2004).
- Consumo de combustible durante la extracción y trituración de áridos (Stripple, 2001).
- Consumo de combustible durante el transporte de materiales (Spielmann *et al.*, 2004).
- Emisiones de contaminantes (COVNM) en la fabricación de materiales para la construcción de vías (Spielmann *et al.*, 2004).

En la tabla 2 se detallan los valores de los contaminantes emitidos (en forma de equivalentes) por la construcción de carreteras obtenidos tras introducir los datos de inventario anteriores en el programa SimaPro v7.0.

Cantidad de contaminante	Tipo de vía	
	Vías interurbanas	Autopistas y autovías
Kg CO <sub>2</sub> eq. / ma	32,640	93,540
Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq. / ma	0,013	0,031
Kg SO <sub>2</sub> eq. / ma	0,248	0,603

Tabla 2. Factores de asignación de contaminantes emitidos por la construcción de carreteras en España, por tipo de vía (sin contar vías urbanas), año 2004.

### 3.3 Asignación de impactos

Para realizar comparaciones de forma adecuada, la Agencia Europea del Medio Ambiente sugiere expresar los resultados en las unidades que se han descrito anteriormente: cantidad de contaminante emitido por pkm -para el caso de vehículos ligeros- o por tkm -para vehículos pesados-. Para ello, se deben calcular los factores de asignación de impactos referidos a la frecuencia de paso de vehículos por tipo de vías en el caso de los contaminantes emitidos por el uso de carreteras; o referidos a la carga del vehículo -ya sea de pasajeros o de mercancías- para los contaminantes emitidos durante la construcción de estas infraestructuras.

En el caso del uso, estos valores se tienen que determinar a partir de los datos introducidos en el programa de evaluación COPERT III:

- Flota de vehículos (MFOM, 2005)
- Kilometraje anual recorrido por tipo de vehículo (MEET, 1999)
- Ratio de distribución kilométrica por tipo de vehículo y vía (MEET, 1999)
- Datos de transporte por tipo de vehículo (MFOM, 2005) y tráfico por tipo de vía (MFOM, 2005) para conseguir el valor de carga media por tipo de vehículo, ya sea de pasajeros o de mercancías.

Con estos datos, se obtienen los factores de asignación para transporte de viajeros y mercancías detallados en la tabla 3.

<b>Factor de asignación</b>	<b>Vías interurbanas</b>	<b>Autopistas y autovías</b>
Millones de pkm	153111,65	126107,55
Millones de tkm	85895,33	88944,57

Tabla 3. Factores de asignación para transporte de viajeros y mercancías en España, según los datos introducidos en el programa COPERT III por tipo de vía, año 2004.

En el caso de la construcción de carreteras, los valores de asignación de impactos se obtienen a partir de:

- Datos de tráfico y transporte por tipo de vía y tipo de vehículo (MFOM, 2005).
- Longitud total de cada tipo de vía (MFOM, 2005).
- Factor de asignación de la carga por tipo de vehículo (Spielmann *et al.*, 2004)

Con estos datos, se obtienen los factores de asignación de impacto para la carga de cada tipo de vehículo, según se detalla en la tabla 4.

<b>Factor de asignación</b>	<b>Vías interurbanas</b>	<b>Autopistas y autovías</b>
ma/pkm	2,147E-04	1,774E-05
ma/tkm	6,650E-04	4,271E-05

Tabla 4. Factor de asignación de impacto de la carga del vehículo por la construcción de carreteras en España, por tipo de vía, año 2004.

#### **4. Resultados y conclusiones**

Antes de analizar estos resultados y obtener conclusiones al respecto, cabe destacar el esfuerzo de recopilación de datos y su tratamiento previa a su introducción en los programas de evaluación (COPERT III y SimaPro v7.0), para realizar el análisis del impacto medioambiental de las infraestructuras de carreteras, dado que la información existente al respecto en España es escasa y dispersa.

Las figuras 2, 3 y 4 muestran los resultados de la evaluación de los impactos de la construcción y el uso de las carreteras españolas sobre la calidad del aire desglosados por tipo de contaminante. Estos resultados muestran, como era predecible, que la cantidad de contaminantes producidos por el tráfico es mucho mayor que la cantidad asociada a la construcción de vías. Sin embargo, esta cantidad no resulta despreciable frente a la primera.

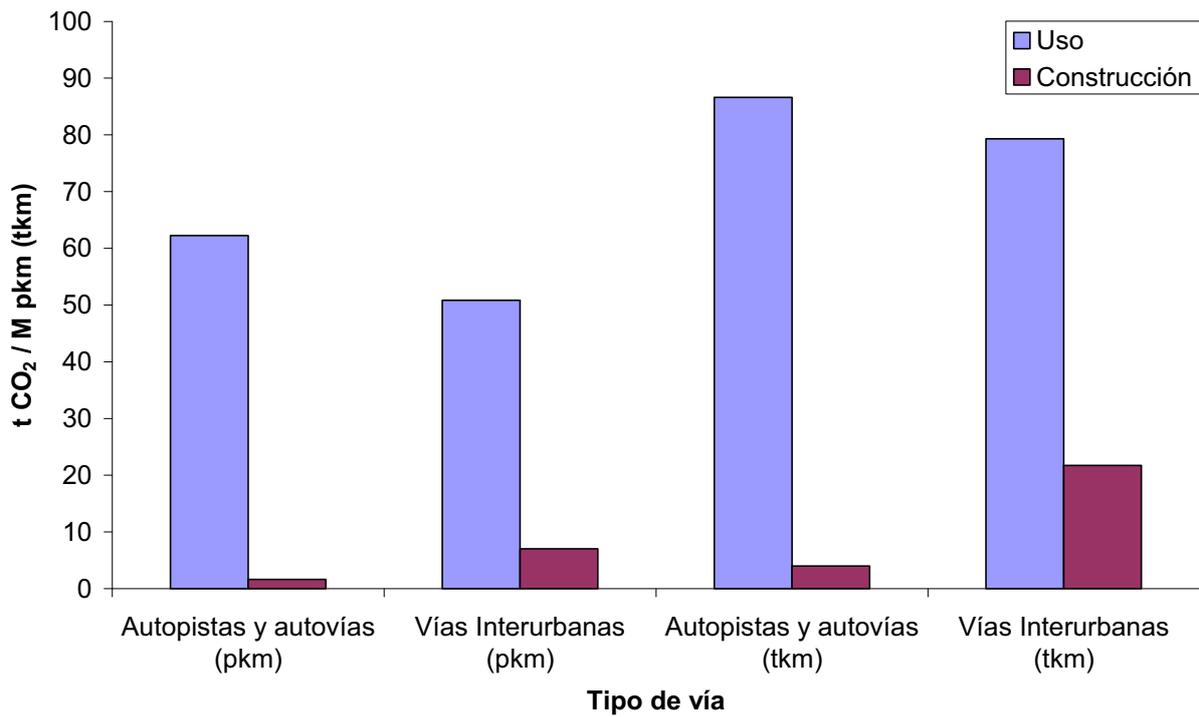


Figura 2. Emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente por pkm (tkm) por tipo de vía en España, año 2004.

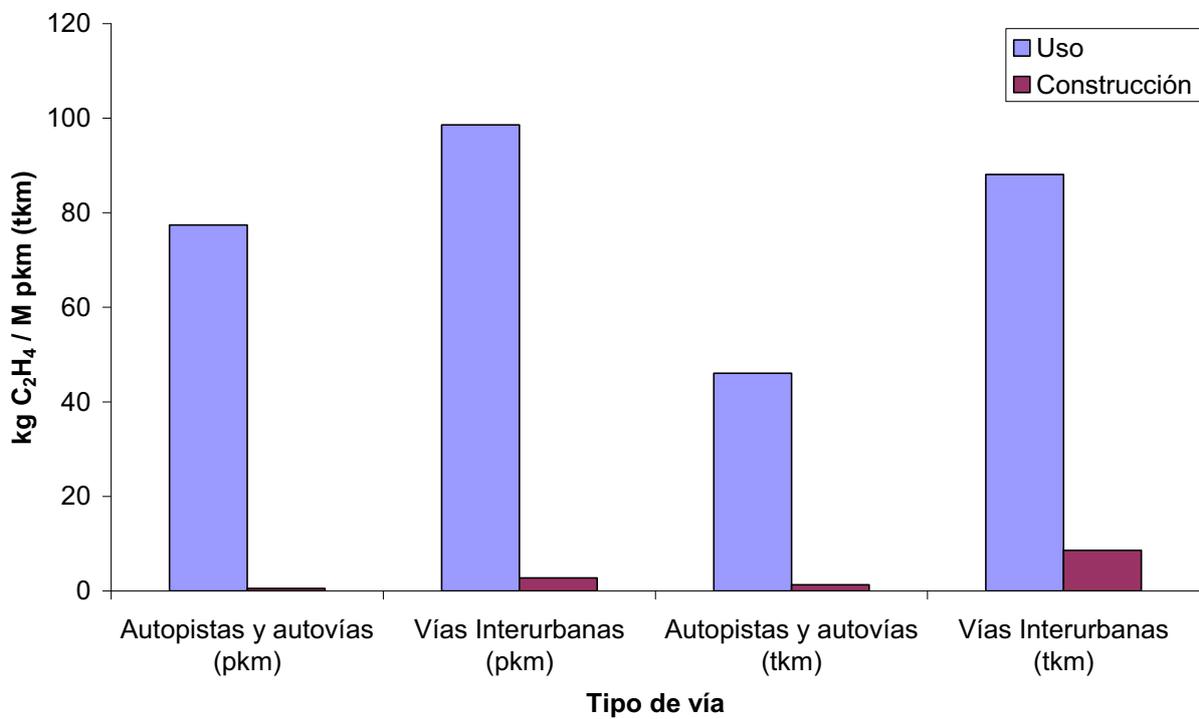


Figura 3. Emisiones de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> equivalente por pkm (tkm) por tipo de vía en España, año 2004.

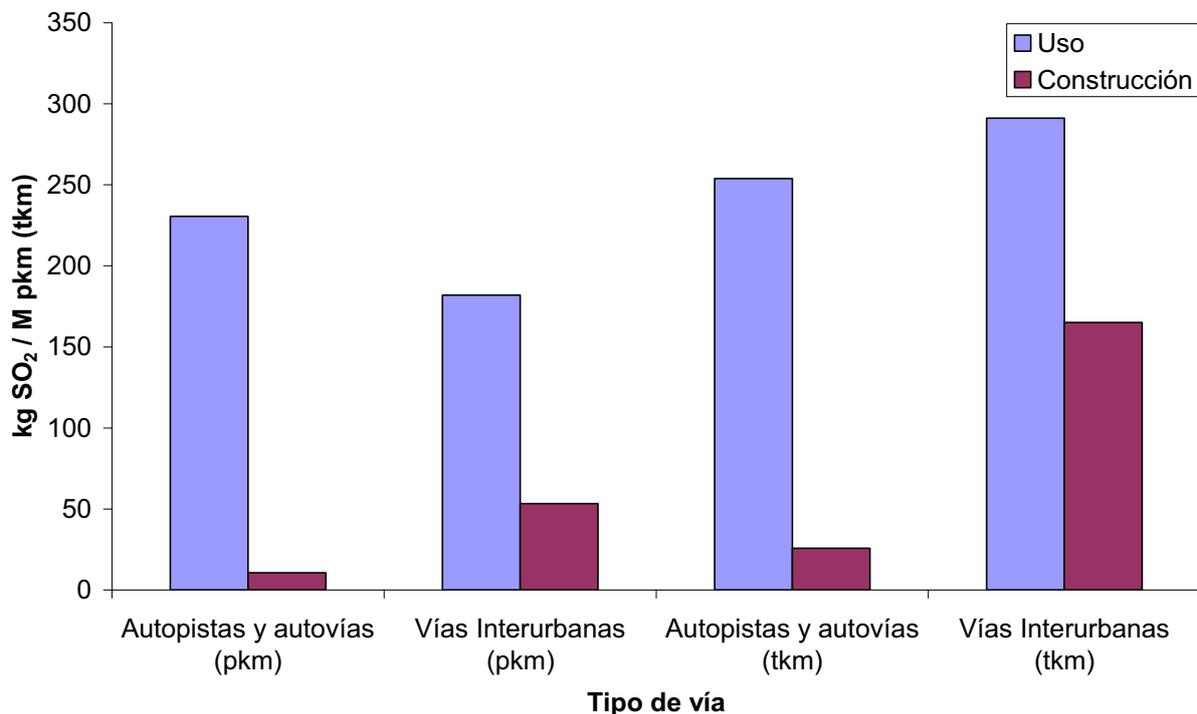


Figura 4. Emisiones de SO<sub>2</sub> equivalente por pkm (tkm) por tipo de vía en España, año 2004.

Quando se habla de carreteras e impacto medioambiental, normalmente este impacto se achaca al tráfico de los vehículos y a sus emisiones atmosféricas. De los resultados obtenidos se puede afirmar que la construcción de las mismas degrada considerablemente el medio ambiente. Comparando los resultados por tipo de vía, se observa que las autopistas y autovías son más sostenibles que el resto de la red interurbana en cuanto a la fase de construcción. Esto es atribuible a la mayor circulación de vehículo por autopistas y autovías en comparación con las vías de la red interurbana. Esto hace que, aunque para la construcción de una autopista o autovía se necesite un mayor número de recursos, las emisiones por flujo de pasajeros o mercancías sean mucho menores. Las emisiones que causa la construcción de autopistas y autovías por número de pasajeros o cantidad de mercancías transportadas son aproximadamente un 80% menores que las causadas por el resto de la red de carreteras. Un ejemplo de esta situación sería la escasa circulación que existe en las vías interurbanas de la meseta española, provocando que el efecto nocivo sea mayor.

En cuanto al uso de las carreteras, resulta más complicado afirmar qué tipo de vía es más sostenible, ya que la emisión de contaminantes depende de varios factores relacionados básicamente con el consumo de combustible: velocidad del vehículo, número de arranques y paradas o nivel de carga de viajeros y mercancías. Se puede afirmar que en las categorías de calentamiento global y acidificación existe una mayor afectación en autopistas y autovías, justificable por el mayor consumo de combustible al circular los vehículos por esas vías a mayor velocidad. En el caso de los precursores de ozono troposférico, la mayor cantidad de eteno equivalente emitida en las vías interurbanas puede ser atribuida a la realización de un mayor número de arranques en frío en estas vías, durante los cuales se emiten cantidades apreciables de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, que son los principales precursores del ozono fotooxidante o troposférico.

Finalmente, cabe destacar que con estos resultados y conclusiones se pone de manifiesto la necesidad de realizar una recopilación de datos que permitan crear una base fiable para poder hacer evaluaciones del impacto de las carreteras a lo largo de su ciclo de vida completo y no únicamente centradas en su etapa de uso, sino que incluyan además el mantenimiento, la operación y el reciclaje de este tipo de infraestructuras.

## Referencias

ANEFA, *Asociación Española de Fabricantes de Áridos*. Datos de la página web: <http://www.aridos.org> [Junio 2006]

Bowman, M.E., Moll, H.C. (2002) "Environmental analysis of land transportation systems in the Netherlands", *Transportation Research part D: Transport and Environment*, 7 (5), 2002, pp. 331-345.

Burón, J.M., López, J.M., Aparicio, F., Martín, M.A., García, A. (2004) "Estimation of road transport emissions in Spain from 1988 to 1999 using COPERT III program", *Atmospheric Environment*, 38.

CORES, (2005) "Boletín Estadístico de Hidrocarburos. Nº97", *Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos*, Ministerio de Industria y Comercio.

Choki, S. (2005) "Life cycle assessment of road maintenance works in Sweden", *Environmental Engineering and Sustainable Infrastructure (EESI), Report*, Stockholm.

IVE, (2004) "Base de datos para la Construcción. Años 2003-2004", Instituto Valenciano de la Edificación.

MEET, (1999) "Methodologies for calculating transport emissions and energy consumption for road transport", *Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport*, Transport Research laboratory, USA.

MFOM, (2005) "Anuario 2004", Ministerio de Fomento.

MMA, (2005) "Perfil Ambiental de España 2004. Informe basado en indicadores", *Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental*.

MMA, (2006) "Perfil Ambiental de España 2005. Informe basado en indicadores", *Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental*.

Mroueh, U.M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Wellman, K. (2000) "Life cycle assessment of road construction", *Finnra Reports 17/2000*, The Finnish National Road Administration.

NBE-AE/88, Real Decreto RD 1370/1988, de 25 de Julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación "NBE-AE/88. Acciones en la edificación.

Rodríguez López, B. (2006) "Recicladas y como nuevas", *Revista del Ministerio de Fomento*, nº547.

Spielmann, M., Kägi, T., Stadler, P., Tietje, O. (2004) "Life cycle inventories of transport services", *Ecoinvent report N° 14*, Swiss centre for life cycle inventories, Dübendorf.

Stripple, H. (2001) "Life cycle assessment of roads –A pilot study for inventory analysis", *Swedish National Road Administration (IVL)*, Gothenburg.

TERM, (2000) "Towards a transport and environment reporting mechanism (TERM) for the EU- Part I and II", *European Environmental Agency*.

TRAMA, (2005) "TRAMA 2005. Informe sobre transporte y medio ambiente", *TRANSYT (Centro de Investigación del Transporte) y Ministerio de Medio Ambiente*.

Treloar, G.J., Love, P.E.D., Crawford, R.H. (2004) "Hybrid life-cycle inventory for road construction and use", *Journal of construction engineering and management – ASCE* 130 (1), 2004, pp. 43-49.

## **Agradecimientos**

Este trabajo se ha desarrollado como parte del proyecto "Indicadores de impacto y vulnerabilidad de las infraestructuras españolas". XXIV Concurso Público de "Ayudas a la investigación 2005" sobre temas de infraestructuras de la Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación del Ministerio de Fomento de España (Orden FOM/2376/2005).

## **Correspondencia**

Daniel Garraín Cordero.  
Grupo de Ingeniería del Diseño (GID).  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción.  
Universitat Jaume I de Castellón.  
Av. Sos Baynat, s/n. 12071 Castellón (España)  
Tel.: ☎4 964729252 Fax: ☎4 964728106  
E-mail: garrain@uji.es  
URL: <http://www.gid.uji.es>

Rosario Vidal Nadal.  
Grupo de Ingeniería del Diseño (GID).  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción.  
Universitat Jaume I de Castellón.