

## EMISIONES DE CO<sub>2eq</sub> COMO INDICADOR DE SOSTENIBILIDAD EN INFRAESTRUCTURAS LINEALES

G. Fernández

F. Rodríguez

*Departamento Ingeniería Civil: Construcción, ETSICCP Universidad Politécnica de Madrid*

F.J. Acosta

J.A. Delgado

A. Berzosa

J.M. Barandica

*Departamento de Ecología. Facultad de Biología Universidad Complutense de Madrid*

### Abstract

Following Life Cycle Assessment (LCA) standards, an analysis of the state of the art related with Greenhouse Gases (GHG) emissions of road projects is developed with emphasis on the inventory assessment, the existing data and information, and the necessary and possible scope in this sustainability indicator. The analysis addresses the emission inventory of Greenhouse Gas (in this case, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) related to all sources identified by standards: energy use, combustion processes, chemical reactions (lime, cement, bitumen ...), waste management, land use change and agricultural processes.

**Keywords:** *emission factor, CO<sub>2</sub> emissions, infrastructure project, sustainability, Greenhouse Gases (GHG)*

### Resumen

Tomando como base los estándares relacionados con el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), se realiza un estado del conocimiento relacionado con la evaluación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de los proyectos de carreteras dando especial importancia al análisis del inventario, de la información, de los datos existentes y del alcance necesario y posible en este indicador de sostenibilidad. En este análisis de inventario se tratan las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (en este caso, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O) relacionadas con todas las fuentes indicadas por las normas: uso de energía, procesos de combustión, reacciones químicas (cal, cemento, betún,...), gestión de residuos, cambio de uso de suelo y procesos agrícolas.

**Palabras clave:** *factor de emisión, emisiones de CO<sub>2</sub>, infraestructuras, sostenibilidad, gases efecto invernadero (GEI)*

### 1. Introducción

Una de las dimensiones fundamentales de la Sostenibilidad es el cambio climático. En los proyectos de infraestructuras queda justificada esta relación tras una serie de encuestas y entrevistas mantenidas con los diferentes involucrados en el ciclo de vida de un proyecto de infraestructuras y obtener como resultado que las emisiones de Gases Efecto Invernadero

(GEI) o  $CO_{2eq}$  son la segunda variable más importante de lo que se considera como un proyecto o una construcción sostenible (Fernández y Rodríguez, 2010).

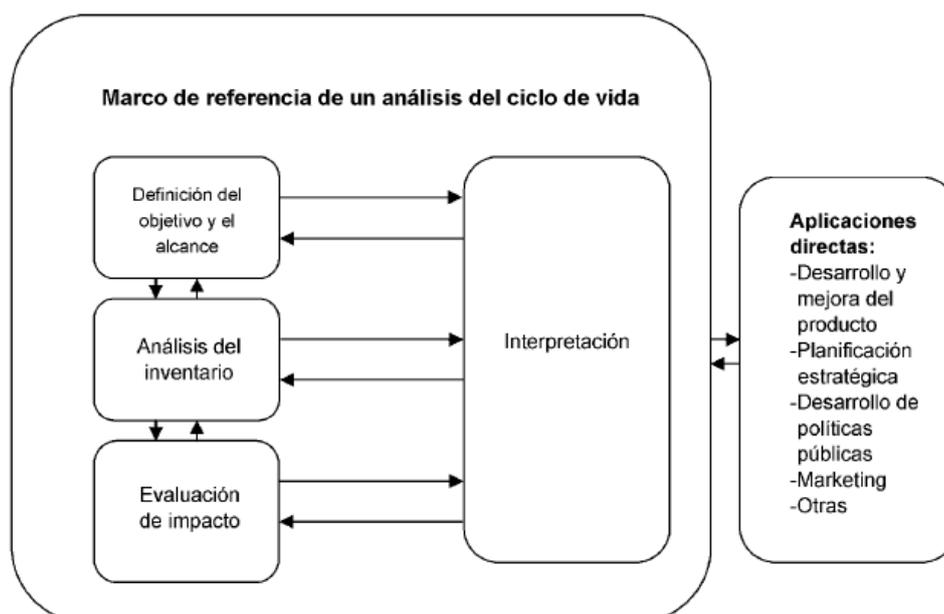
Profundizando, pues, en este indicador como una de las actividades del proyecto de investigación CLEAM-CENIT (Construcción Limpia Eficiente y Amigable con el Medio Ambiente), y con el marco de trabajo para el desarrollo de indicadores de sostenibilidad aportado por el estándar ISO 21929-1 (2006), la consideración del ciclo de vida de todo indicador resulta fundamental. De este modo, las normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006) sobre Análisis del Ciclo de Vida (ACV) nos van a permitir desarrollar este indicador e identificar oportunidades de mejora en las distintas etapas del proyecto; aportar información en la toma de decisiones; seleccionar aspectos ambientales relevantes; y, además, mejorar el marketing y el compromiso ambiental de los distintos actores involucrados.

## 2. Objetivos y Alcance

El estudio del estado del conocimiento de las emisiones de GEI en los proyectos de carreteras es el primer objetivo específico planteado mediante una perspectiva de ACV, por la importante repercusión de las emisiones no sólo en la etapa de construcción, sino también en las de uso, mantenimiento y demolición. Las fases se han marcado siguiendo los pasos de un ACV (figura 1), siendo los objetivos planteados para este artículo los siguientes:

- Una primera definición del alcance y los objetivos del indicador “*Emisiones de  $CO_{2eq}$* ”. Para ello se busca la identificación de estándares y normas relacionados con los GEI, la identificación de los gases que se deben tener en cuenta, la selección de las fuentes de emisiones en un proyecto de infraestructuras y las publicaciones y resultados existentes en este ámbito a nivel internacional.
- El estudio y análisis de los datos e información necesaria para la aplicación de este indicador en los proyectos de infraestructuras. La revisión de la documentación relacionada con el inventario de un proyecto de infraestructuras resulta realmente extensa y se ha tratado de realizar una muestra representativa de los datos obtenidos.

Figura 1: Marco de Referencia de un ACV (ISO 14040,2006:16)



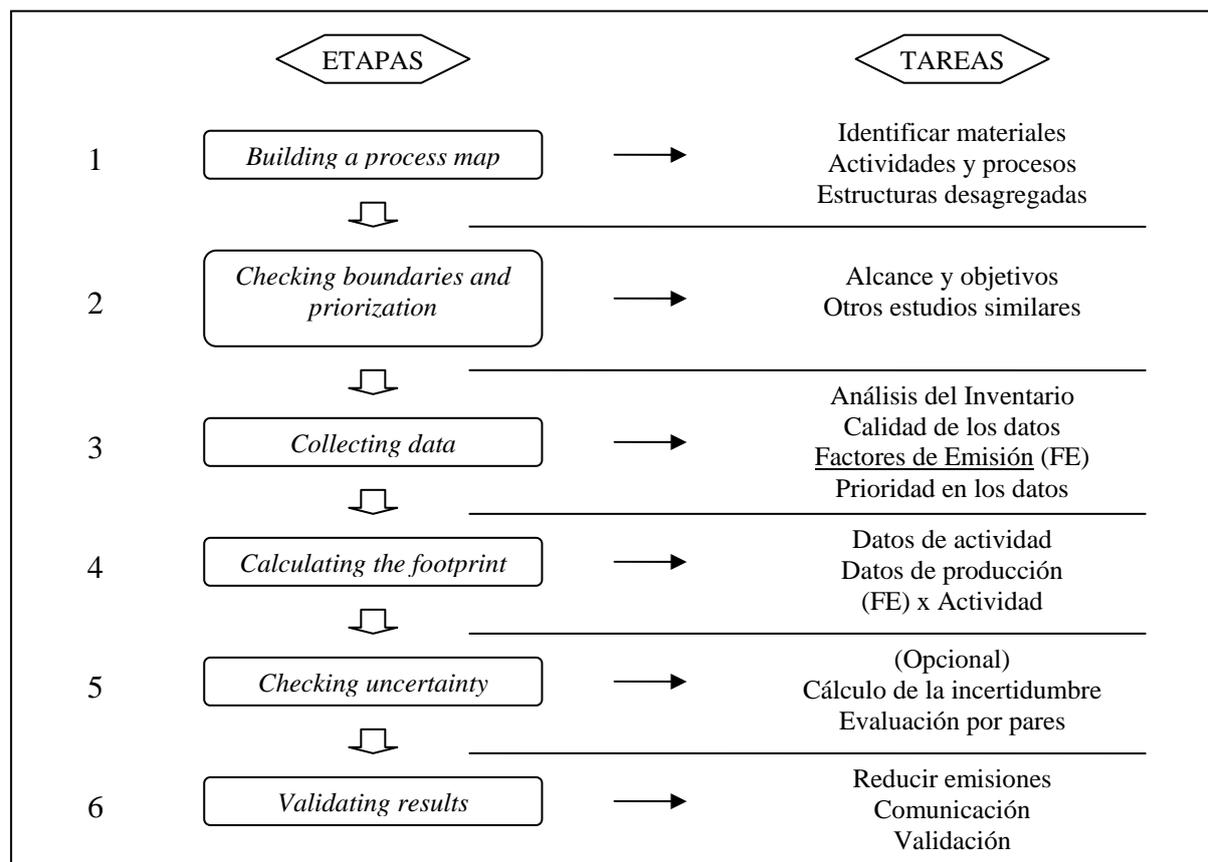
Quedan fuera de los objetivos de este artículo, el diseño de una herramienta de cuantificación de emisiones por estar actualmente en proceso de desarrollo y el largo proceso de diseño, programación, mejora y validación al que debe someterse anteriormente.

### 3. Metodología basada en estándares y normas

Como ya se ha comentado en la introducción, los primeros estándares generales relacionados con el ACV son la norma ISO 14040 y 14044. Sin embargo, en este estudio se han identificado además aquellos que, basados en el ACV, se centran en las emisiones de GEI. Al tratarse únicamente de una evaluación de emisiones de CO<sub>2eq</sub> (no se busca el análisis de todas las entradas y salidas de los procesos) no es un análisis completo tal y como indican los estándares generales. Por esta razón, es importante tomar estas normas como marco de trabajo, pero como metodología a seguir conviene aquellas más específicas.

El British Standard Institute publicó recientemente la norma *PAS 2050:2008* (BSI, 2008<sup>a</sup>) y su correspondiente guía *Guide to PAS 2050* (BSI, 2008<sup>b</sup>) exclusiva de los ACV de las emisiones de GEI. Así, según esta norma, las etapas para la evaluación de emisiones del CO<sub>2eq</sub> de un producto o proyecto se basan en el esquema de la figura 2 que, como se muestra, es muy similar aunque más desarrollado y específico que aquél de la norma ISO.

**Figura 2: Etapas para el análisis de las emisiones GEI basado en BSI (2008<sup>a</sup>)**



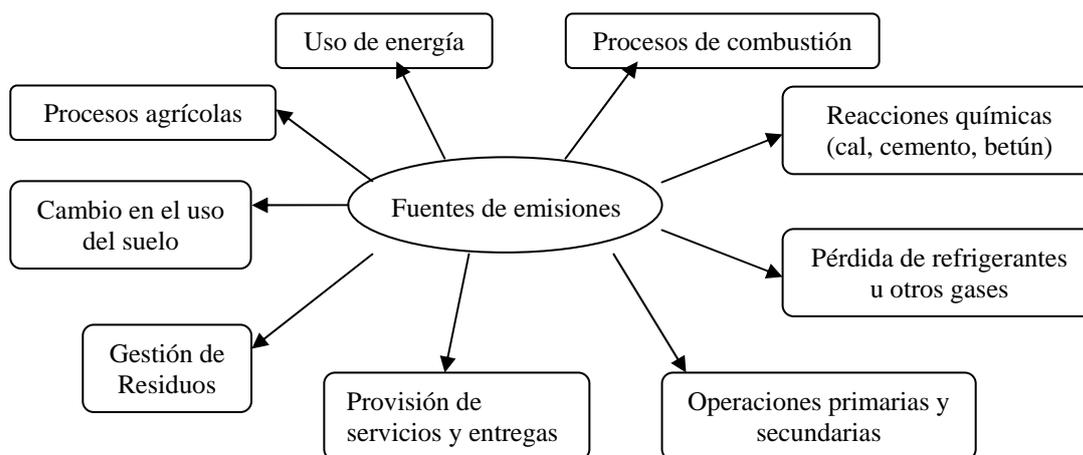
Igualmente existe otro estándar denominado *The Greenhouse Gas Protocol* del World Business Council of Sustainable Development (WBCSD) junto al World Resources Institute (WRI), que está fundamentalmente enfocado a negocios o empresas y que no resulta tan aplicable al caso de los proyectos de construcción.

Los principios que se deben seguir para todo análisis de emisiones de GEI de acuerdo con el British Standard Institute (2008<sup>b</sup>) son:

- Relevancia, se deben seleccionar todas las fuentes de emisión de GEI, los datos y métodos apropiados para el análisis de las emisiones derivadas de los productos
- Integridad: incluir todas las emisiones que proporcionan una contribución material al análisis de las emisiones derivadas de los productos
- Consistencia: permitir comparaciones significativas en informaciones relacionadas con las emisiones de CO<sub>2eq</sub>
- Exactitud: tratar de reducir el sesgo y la incertidumbre siendo lo más práctico posible
- Transparencia: citar las fuentes de referencia y comunicar los resultados a los involucrados en los distintos procesos.

Siguiendo estos principios, se deben seleccionar las fuentes de emisiones de GEI que, según el Inventario Nacional de Emisiones en España 1990-2007 (Ministerio de Medio Ambiente, 2009) se consideran las siguientes: procesos de combustión, emisiones fugitivas, procesos industriales (incluyendo las reacciones químicas), uso de disolventes y otros productos, agricultura, uso y cambio de uso de la tierra y, por último, gestión de residuos. Estas fuentes resultan ser similares a las consideradas por el BSI como se muestra en la figura 3.

**Figura 3: Fuentes de emisiones basado en British Standard Institute (BSI, 2008<sup>a</sup>)**



Tratando estas normas como marco de referencia, se desarrollan las dos primeras etapas mencionadas en la figura 1 consistentes en: “Definición de Objetivo y Alcance” y “Análisis del Inventario”.

#### **4. Fase I: Definición de objetivos, justificación y alcance del Indicador. Estado del arte**

El objetivo fundamental del indicador de emisiones de CO<sub>2eq</sub> es cuantificar y reducir en lo posible las emisiones de GEI, identificar las oportunidades de reducción de emisiones, incorporar estas emisiones como indicador en la toma de decisiones de los agentes intervinientes de un proyecto de carreteras, demostrar la responsabilidad ambiental tanto del proyecto como de la empresa y, por último, satisfacer la demanda de los clientes sobre información de las emisiones de carbono.

Actualmente existen otros estudios que han intentado cuantificar las emisiones de CO<sub>2</sub> y de GEI en proyectos de carreteras. Así, los proyectos existentes en esta dirección suelen establecer la Unidad Funcional como 1 kilómetro de carretera con un ancho y una sección tipo, así como una serie de excavaciones y demoliciones tipo (FNRA, 1999; Gerilla et al, 2000; Stripple, 2001; Park et al, 2003; SUSCON, 2006). Además, en los lugares donde se han hecho estos estudios (Korea, Japón, Grecia, Chipre o Finlandia) tienen inventarios que varían mucho según las fuentes de energía, las materias primas o los procesos y actividades necesarios para la ejecución de una carretera. El modo de concebir la unidad funcional en un proyecto de carreteras como 1 kilómetro tipo simplifica el problema, pero no permite generalizar, puesto que cada proyecto de infraestructura lineal tiene una serie de desmontes y terraplenes distintos, una sección y ancho dependiente del tipo de carretera y distintos materiales y procesos constructivos; por lo que estos estudios servirán de base o comparación pero no para su aplicación directa a España. Además, el inventario debe hacerse con información y datos nacionales o europeos (en su defecto) de acuerdo a los estándares comentados.

También existen herramientas de ACV de diferentes productos y servicios. Caben mencionar las siguientes: GaBi, GEMIS, KCL ECO, LCA Evaluator, LEGEP, Modular MSWI, REGIS, Sabento, SALCA, SimaPro, Stan, TEAM, Umberto, USES-LCA, Verdee, WAMPS, WRATE, WISARD, EIME, EcoScan, Eco-Quantum, EcoBat y BEES (las existentes según EC, 2009). La mayoría son de pago, aunque existen versiones reducidas gratuitas. Pueden ser interesantes para comparar bases de datos o utilizar en caso de vacío de información, pero suelen carecer de datos españoles.

Sin embargo, a pesar de la información existente en relación a los ACV y, en concreto, en los proyectos de carreteras, algunos expertos (Huang et al, 2009) reivindican actualmente la necesidad de modificar los inventarios y estudios actuales. Las críticas se basan en los siguientes puntos:

- La poca relevancia de las herramientas en el diseño y construcción de las carreteras y en la industria del asfalto. Problema que se solucionaría con la implicación de los agentes de la construcción en el desarrollo de las mismas.
- El uso de datos que no son nacionales y que no representan promedios del país.
- La información que es, generalmente, demasiado anticuada con hipótesis y fórmulas totalmente desconocidas y, además, muchos datos son mezcla de otros materiales y fuentes.
- Muchos modelos y bases de datos han sido desarrolladas antes de la ISO 14040 publicada en 1997 pero revisada en 2006 y puede que no cumplan con ella.
- La inclusión de materiales reciclados es variable pero generalmente limitada. Esto es en ocasiones una auténtica limitación al no existir información suficiente en los materiales tratados como residuos (valorizados, reciclados, reutilizados o llevados a vertedero).
- Los modelos prácticos no son accesibles, debido a la restricción comercial, como es el caso de las herramientas comentadas anteriormente.
- Por último, se subraya la característica que debiera tener toda herramienta y es que no debe reflejar un único caso (como ocurre en la mayoría de estudios mencionados) sino que tiene que poder adaptarse a cada tipología.

Siendo ésta la situación de los ACV de las emisiones de GEI en el ámbito de proyectos de carretera, queda justificado cuantificar estas emisiones a nivel nacional para lograr un indicador válido en la toma de decisiones futuras y alcanzar un mayor compromiso con la construcción sostenible (eficiente y amigable con el entorno). Además, autores como Sampedro (2007) ya han sugerido la necesidad de un modelo de evaluación de emisiones

de GEI en los proyectos de infraestructuras, que actualmente faltan o son bastante imprecisos. De hecho en Japón ya se están tratando de incluir las emisiones de dióxido de carbono como un indicador más en la selección de alternativas en proyectos de ingeniería civil como los puentes o viaductos (Itoh, 2003).

Los gases principales considerados causantes del efecto invernadero van a ser el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ , pues son los tres compuestos con mayor incidencia en el cambio climático y son los sugeridos por las distintas normas y organizaciones (IPCC, 2006; BSI, 2008<sup>b</sup>). En aquellas ocasiones en las que las emisiones de otros GEI sean considerables también deben ser tenidos en cuenta (como por ejemplo las de  $\text{CF}_4$  y  $\text{C}_2\text{F}_6$  en la producción del aluminio). Los valores de equivalencia tomando como referencia las emisiones en  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  y como periodo  $T = 100$  años, aparecen reflejados en la siguiente tabla 1.

**Tabla 1. Global Warming Potentials (GWP) relativos al  $\text{CO}_2$  (IPCC, 2006)**

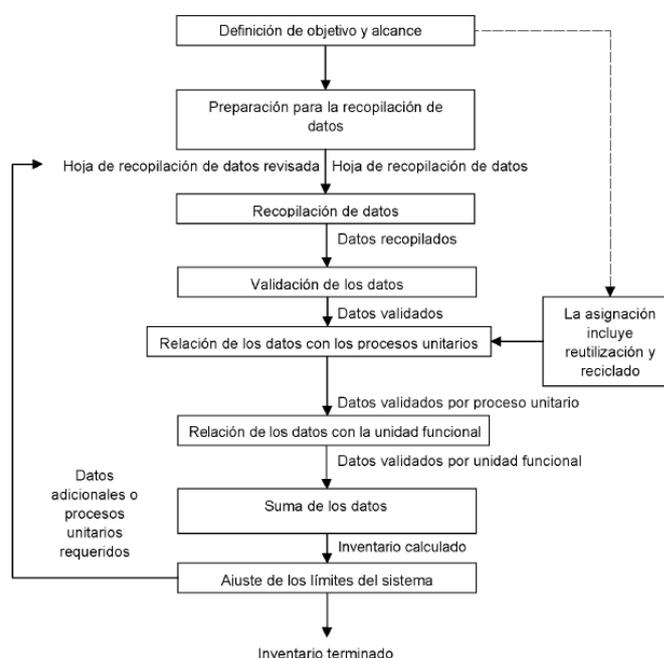
Designación	Fórmula Química	Potencial de Calentamiento Global T=100 años
Dióxido de Carbono	$\text{CO}_2$	1 - $\text{CO}_{2\text{eq}}$
Metano	$\text{CH}_4$	25 - $\text{CO}_{2\text{eq}}$
Óxido nitroso	$\text{N}_2\text{O}$	298 - $\text{CO}_{2\text{eq}}$

El consumo de energía va a ser un elemento transversal con especial importancia en las emisiones de GEI en su utilización tanto como energía eléctrica o como combustible. Además, existen otras fuentes de emisiones como son aquellas independientes de la energía debido a las reacciones químicas en el procesamiento de los materiales (cemento, betún, cal) denominadas *descarbonatación*, en la gestión de residuos o también en la degradación/restauración de sistemas naturales. Todas estas fuentes de emisiones deben ser consideradas desde una perspectiva de ciclo de vida.

## 5. Fase II: Análisis de la información

De acuerdo con la norma ISO 14044:2006 los procedimientos para la elaboración y el análisis de un inventario son los reflejados en la siguiente figura 4.

**Figura 4: Procedimiento para el análisis del inventario (ISO 14044, 2006)**



Como primer paso, se ha realizado un estudio de las bases de datos internacionales existentes y consideradas de gran fiabilidad:

- Life Cycle Assessment Tools, Services and Data, European Commission – Joint Research Center (actualizado en Junio de 2009). La base de datos de productos y actividades se denomina ILCD (*International Reference Life Cycle Data System*) gestionada por la Comisión Europea, con información fiable para la región europea.
- Base de datos del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) denominada EFDP (*Emission Factor Data Base*), donde se dan factores de emisión de CO<sub>2</sub> de los distintos productos y actividades de todo el mundo. Existen pocos valores aplicables a España, pero existe la fiabilidad requerida por el IPCC.
- U.S. Life-Cycle Inventory Database, creado por *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) es una base de datos para los inventarios de los ACV con el problema que la mayor parte de información es referente a los Estados Unidos.
- Technology Transfer Network. Clearing House for Inventories & Emissions Factors, creado por *Environmental Protection Agency* (EPA) de los Estados Unidos, es una base de datos de inventarios existentes y de factores de emisión empleados en este país y con una alta fiabilidad, pero no será siempre aplicable en otros países con procesos y condiciones totalmente diferentes, como es el caso español.

Además de estas bases de datos, en busca de información más concreta, en la guía *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006) y en las sucesivas publicaciones del Inventario Nacional de Emisiones (Ministerio de Medio Ambiente, 2008 y 2009), se han tratado de identificar datos de ámbito nacional debido al contexto especial español (alta dependencia energética exterior, mix eléctrico, mayor uso del hormigón y menor del acero que en otros países europeos, etc.).

El análisis de los datos existentes se ha realizado de acuerdo a las fuentes de las emisiones identificadas mediante los estándares comentados. De este modo, el inventario se puede dividir en las siguientes operaciones principales.

## 5.1 Energía

Es uno de los aspectos más íntimamente relacionados con las emisiones de GEI que afecta transversalmente a todas las actividades del proyecto. Por un lado se encuentra el consumo eléctrico, cuyo factor de emisión del mix eléctrico nacional (las emisiones debidas al consumo de 1 MJ de energía eléctrica de la red) dependerá de las fuentes de energía empleadas (carbón, gas natural, fuel/gas, nuclear y renovables). Para ello se ha consultado la metodología propuesta por la Comisión Nacional de Energía recogida en la Circular 1/2008, donde se tienen en cuenta los factores de emisión en la combustión de las distintas fuentes existentes. Por otro lado, se encuentran las fuentes energéticas empleadas como combustibles (fines térmicos) como la gasolina, carbón, gas natural, gasóleo, fueloil o renovables, con sus respectivos factores de emisión recogidos en diferentes fuentes (Ministerio de Industria, 2009; Ministerio de Medio Ambiente, 2009; Red Eléctrica Española, 2009). Es interesante observar que, aunque se aportan valores diferentes como factores de emisión, son del mismo orden de magnitud lo cual aporta una mayor fiabilidad. A modo de ejemplo se muestran en la tabla 2 algunos de estos factores de emisión.

Estos factores de emisión (g CO<sub>2</sub>/MJ, g CH<sub>4</sub>/MJ y g N<sub>2</sub>O/MJ) debido a la combustión no contemplan el ciclo de vida de la fuente energética. Para el correcto ACV, se deben considerar también los factores de emisión de precombustión de cada fuente energética

(extracción, transporte, fabricación/construcción, distribución), con lo que las energías renovables no aportarían valores cero de emisión en el ciclo de vida. Existen estudios que aportan los factores de emisión en la precombustión o ciclo de vida de las fuentes energéticas (Hondo, 2000; White, 2000; Meier, 2002), con lo que una vez se tenga el consumo energético (térmico y eléctrico) en cada fase, se puede lograr conocer las emisiones de GEI relacionados con la energía en su ciclo de vida.

**Tabla 2. Factores de Emisión (FE) en Combustión de algunas fuentes energéticas según Ministerio de Medio Ambiente (2009)**

Fuente energética	g CO <sub>2</sub> /MJ	mg CH <sub>4</sub> /MJ	mg N <sub>2</sub> O/MJ
Gasóleo	73	0,03	0,7
Fuelóleo	76	0,7	1,5
Gas natural	56	0,1	0,9
Hulla y antracita	101	0,6	0,8
Coque	99,8	0,3	2,5
Crudo de petróleo	72,6	5	1,75
GLP	65	0,95	2,5
Energías renovables	0	0	0

## 5.2 Actividades: Unidades de Obra y Mantenimiento

Como elemento global se deben considerar las operaciones de construcción y mantenimiento que tienen lugar en los proyectos de carreteras. Se consideran por un lado los materiales y por otro la maquinaria. Los materiales de construcción, al igual que las fuentes energéticas, se consideran en su ciclo de vida: fase de extracción, transporte a fábrica, fabricación y transporte a obra. Las emisiones y el consumo energético de la puesta en obra se suponen ligados a la maquinaria.

Para el cálculo de los factores de consumo de la maquinaria y de sus respectivos factores de emisión se ha identificado la información publicada en el Inventario Nacional de Emisiones (Ministerio de Medio Ambiente, 2009) y en la guía *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook* del European Environment Agency (EEA, 2009), donde existen datos específicos por vehículo y máquina. Otra alternativa posible es utilizar valores genéricos para la maquinaria de construcción, con valores medios de consumo específico de 0,18 litros diesel/CV h +/- 0,02 l/CVh y 0,24 litros gasolina/CV h +/- 0,04 l/CVh (Díaz del Río, 2007: 36).

Los factores de emisión de los materiales de construcción (g GEI/t de material) tanto en la fase de procesamiento como en la fase de pre-procesamiento es una de las labores más extensas debido a la cantidad de información existente y la diversidad de formatos. Cabe destacar la publicación del Ministerio de Fomento (1999) de energía embebida en los materiales (MJ/t de material) en su ciclo de vida. En esta publicación no se proporcionan las fuentes energéticas, por lo que no es posible traducir los datos de energía en emisiones de CO<sub>2eq</sub>. En los materiales típicos de los proyectos de infraestructuras como las mezclas bituminosas, el cemento, la cal, el acero y demás elementos, se pueden lograr factores de emisión no sólo relacionados con el consumo energético, sino también emisiones independientes de la energía.

En el caso de las mezclas bituminosas, se emiten gases de CO<sub>2</sub> de las fracciones más volátiles de los ligantes bituminosos que, al someterse a temperaturas elevadas, se

constituyen gases formados por hidrocarburos aunque en concentraciones muy bajas (Ortiz, 2006). En las emisiones relacionadas con la energía, es claro que las Mezclas Bituminosas Calientes –MBC- tendrán un mayor consumo energético (entre 6-8 litros fuel/ton) que las Mezclas Bituminosas Frías –MBF- (unas diez veces menor que las MBC) o Templadas –MBT- (entre 4-6 litros fuel/ton), en gran parte debido a las altas temperaturas necesarias en las MBC que se encuentran entre 155 y 175°C. Sin embargo, a nivel global el uso de las MBC es muy superior, en parte por razones logísticas y técnicas. Por un lado, hay pocas plantas de mezclas en frío en comparación con las de caliente y, por otro, existe todavía un déficit de calidad (no ofrecen suficientes garantías de fiabilidad en cuanto a la dosificación y el proceso de mezclado) y una falta de resistencia durante las primeras semanas de puesta en servicio. El punto medio entre ambas y la posible solución puede ser la MBT, siendo posible además la utilización de las centrales de MBC pero con menores temperaturas de cocción.

El cemento es uno de los materiales más empleados y de mayor repercusión en las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo. El cemento supone más del 5 % de las emisiones globales (Batelle, 2002). En España (uno de los países con mayor producción) más del 20 % del cemento producido se destina a la construcción y mantenimiento de carreteras y viales (Oficemen, 2008). En el proceso de fabricación del cemento, además de las emisiones producidas por el consumo energético (de diferentes fuentes según fábrica) más del 50 % se produce en la descarbonatación (aproximadamente 0,43 t de CO<sub>2</sub>/t de cemento producido) según el contenido de CaO y MgO existente en el material de entrada; otro 40 % en la combustión de combustibles fósiles (aproximadamente 0,29 t de CO<sub>2</sub>/t de cemento); y un 10 % en actividades auxiliares (0,09 t de CO<sub>2</sub>/t de cemento) como el uso de electricidad y el transporte (WBCSD, 2005). Existen también estudios de fábricas de clínker y cemento a nivel nacional (Cardim de Carvalho, 2001). En el caso del cemento y el hormigón, se puede considerar además que durante la fase de uso se puede producir una recarbonatación (proceso contrario al mencionado antes como descarbonatación) donde se han llegado a valores medios de entre 2,9 y 5,1 kg de CO<sub>2</sub> reabsorbidos / m<sup>3</sup> de hormigón en obra civil (Galán et al, 2009), que reduciría el impacto producido por estos materiales en su fase de fabricación.

Cabe destacar también el caso del aluminio en el que, además del consumo energético en la fase de extracción, transporte y fabricación, se producen una serie de reacciones químicas durante su producción que dan lugar a emisiones de CF<sub>4</sub> y C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> (Ministerio de Medio Ambiente, 2009). La necesidad de considerar estos dos gases se basa principalmente en la cantidad de emisiones y en su Potencial de Calentamiento Global (GWP) que son, respectivamente, 7.390 CO<sub>2eq</sub> y 12.200 CO<sub>2eq</sub>. En el resto de materiales se deberán considerar sus consumos energéticos en las distintas etapas de su ciclo de vida.

Con objeto de estimar también las emisiones teniendo en cuenta la gestión de residuos, el estándar británico (BSI, 2008<sup>b</sup>) en su *anexo D* ofrece una formulación para el cálculo del factor de emisión de un producto y su residuo según la ecuación [1] donde el límite vendrá impuesto por la existencia de información en las emisiones de los procesos de reciclaje y tratamiento de residuos.

$$\text{Emisiones / unidad} = (1-R1) \times E_v + (R1 \times ER) + (1-R2) \times ED \quad [1]$$

Donde: R1: proporción de material reciclado input; R2 = proporción del material que es reciclado al finalizar su vida útil; ER = emisiones del material reciclado input por unidad de material; E<sub>v</sub> = emisiones del material virgen input por unidad de material; ED = emisiones del tratamiento del residuo por unidad de material.

En cuanto a las labores de conservación y explotación de un proyecto de carreteras se sugiere la consideración de las siguientes operaciones: actuaciones en el entorno de la carretera; actuaciones en los elementos de señalización y seguridad; actuaciones en obras de fábrica, tierra y drenaje; actuaciones ordinarias en firmes y pavimentos; y, por último,

rehabilitaciones de firmes y pavimentos. Las emisiones relacionadas con estas actividades irán relacionadas, al igual que lo comentado en la fase de construcción, con el consumo y las emisiones de la maquinaria y los materiales empleados (se pueden tratar como unidades de obra).

### 5.3 Afectación/Restauración de sistemas naturales

La degradación de los sistemas naturales (suelos y vegetación) tienen un efecto importante sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>, especialmente en los proyectos de infraestructuras lineales, en los que el área afectada, incluyendo tanto la superficie habilitada temporalmente para la ejecución de la obra, como aquella finalmente ocupada de modo permanente por la infraestructura, puede resultar muy extensa. Siguiendo el criterio del Inventario Nacional de Emisiones (Ministerio de Medio Ambiente, 2008 y 2009), las emisiones generadas se evalúan en primera instancia como pérdida –o incremento, en el caso de creación o mejora de los sistemas naturales– de sumideros de CO<sub>2</sub> por cambios de uso de la tierra (sector UTCUTS). Para dicha evaluación se establece previamente una tipificación de los sistemas naturales interpretados como usos del suelo, y de una caracterización de los mismos en términos de CO<sub>2</sub> (a partir del carbono fijado en los diferentes compartimentos identificados para la vegetación y el suelo). Las fuentes consultadas para lograr una tipología normalizada de los usos del suelo existentes son: el propio Inventario Nacional de Emisiones, la Guía de buenas prácticas para usos de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (IPCC, 2003), los mapas de cultivos y aprovechamientos (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1985), el Inventario Forestal Nacional (Ministerio de Medio Ambiente, 1998), el Mapa Forestal de España (Ruiz de la Torre, 1990) y el Anuario de Estadísticas Agroalimentarias y Pesqueras (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008), además de otros informes y publicaciones científicos específicos sobre el contenido en carbono de los elementos vegetales y edáficos. Este procedimiento permite obtener así, según la tipología de uso que se tenga en cada caso y su contenido en carbono, el grado de impacto en emisiones que tendrá lugar en el caso de la degradación o pérdida de un sistema natural, así como determinar el efecto de recuperar tales sistemas en la zona de dominio público de la carretera, para paliar el impacto mediante la consiguiente captura del CO<sub>2</sub>.

## 6. Discusión y conclusiones

En este artículo se han mostrado las debilidades y fortalezas de los estudios y normas existentes en la cuantificación de emisiones de GEI en los proyectos de carreteras para ser aplicados al caso español. Además se ha tratado de justificar la necesidad de desarrollar un indicador de emisiones de CO<sub>2eq</sub> como variable importante para la toma de decisiones en la búsqueda de una construcción más sostenible. Es fundamental para ello los datos más fiables posibles y de ámbito nacional o europeo. Se han identificado los estándares, las bases de datos y las herramientas existentes internacionalmente en relación a los factores de emisión de GEI y los consumos energéticos, pero parece necesaria una creación y un desarrollo de una base de datos de ACV a nivel nacional para materiales, actividades y procesos relacionados con la industria en general y con la construcción en particular. Esta información resulta necesaria para el cálculo de la huella ecológica de carbono de cualquier proyecto o entidad. Algunos países europeos, como Dinamarca y Alemania, y EEUU disponen de amplias bases de datos y herramientas con información nacional para el estudio de sus propios ACV.

Dando prioridad a la información identificada a nivel nacional y europea, se está desarrollando actualmente un modelo de cuantificación del CO<sub>2eq</sub> de los proyectos de carreteras teniendo en cuenta el alcance y las incertidumbres mencionadas y las sensibilidad de la información. El desarrollo y uso de este indicador en la toma de decisiones

de los proyectos de infraestructuras lineales supone un paso hacia delante en el compromiso medioambiental hacia una construcción más sostenible. Cabe mencionar, como límites de este análisis, que no se está considerando la fase de deconstrucción debido, por un lado, a la falta de información y, por otro, a que generalmente las infraestructuras permanecen en su lugar después de ser retiradas de su servicio (FNRA, 1999). Tampoco se ha mencionado la parte proporcional a la construcción de la maquinaria de obra ni su mantenimiento, considerando únicamente su consumo en las actividades de operación con sus respectivas emisiones relacionadas, al igual que han hecho los estudios similares citados en el texto.

La información que se expone en la presente comunicación es fruto de los trabajos de investigación que se están realizando en el marco del proyecto CLEAM, subvencionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) dentro del programa CENIT. Dichos resultados son, pues, propiedad exclusiva de las empresas que promueven dicho proyecto y que constituyen la A.I.E. (Asociación de Interés Económico) CLEAM-CENIT.

### Referencias

- BSI, 2008<sup>a</sup>. PAS 2050:2008. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. British Standards, October 2008.
- BSI, 2008<sup>b</sup>. Guide to PAS 2050. How to assess the carbon footprint of goods and services. British Standards.
- Cardim de Carvalho Filho, A., 2001. Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento – Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento. Tesis Doctoral. ETSICCP, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, Julio 2001.
- Díaz del Río, M., 2007. Manual de Maquinaria de Construcción. Editorial Mc Graw Hill. Segunda edición, 2007.
- EEA, 2009. EMEP-EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009. Technical guidance to prepare national emission inventories. European Environmental Agency Technical Report. Luxembourg, 2009.
- European Commission, 2009. Life Cycle Assessment Tools, Services and Data. Joint Research Center.
- Fernández, G. and Rodríguez, F., 2010. Conception of Sustainable Construction in civil engineering projects. Dimensions and Indicators of Sustainability. Sustainable Building SB'10 International Congress, Sustainable Building Affordable to All. Portugal, 17-19 March 2010.
- Finish National Road Administration, 1999. Life cycle assessment of road construction. Finnra reports 17/2000. Helsinki, 1999.
- Galán, I., Andrade, C., Prieto, M., Mora, P., López, J.C. y San Juan, M.A., 2009. Estudio del efecto sumidero de CO<sub>2</sub> de los materiales de base cemento. IETcc, IECA y Oficemen, 2009.
- Gerilla, G.P., Takeyama, Y. and Inamura, H., 2000. Environmental Impacts of the Road and Building Construction Industry in Japan. Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology. Saga, Japan, October 4-6, 2000.
- Hondo, H., 2000. Finding life cycle CO<sub>2</sub> emissions by power generation type. Central Research Institute of Electric Power Industry. Japan, 2000.
- Huang, Y., Bird, R. and Heidrich, O., 2009. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. J. Clean. Prod. 17 (2), 283-296.
- IPCC, Ed. (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Methodology reports, Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Edited by Simon Eggleston, Leandro Buendia, Kyoko Miwa, Todd Ngara y Kiyoto Tanabe. Institute for Global Environment Strategies, IPCC. Hayama, Japón, 2006.

- ISO 14040, 2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marcos de referencia ISO 14040:2006. European Committee for Standardization, 2006.
- ISO 14044, 2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices ISO 14044:2006. European Committee for Standardization, Diciembre 2006.
- Itoh, Y. And Kitagawa, T., 2003. Using CO<sub>2</sub> Emission Quantities in Bridge Lifecycle Analysis. Eng. Struct., 25 (5), 565-577.
- Meier, P., 2002. Life-cycle assessment of electricity generation systems and applications for climate change policy analysis. PhD dissertation. University of Wisconsin, Madison, 2002.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1985. Mapa de Cultivos y Aprovechamientos a escala 1:50.000.
- Ministerio de Fomento, IDAE e Institut Cerdà, 1999. Guía de la edificación sostenible. Madrid, 1999.
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2009. La energía en España 2008. MITC, Julio 2009.
- Ministerio de Medio Ambiente, 1998. Segundo Inventario Forestal Nacional 1986-1996. Madrid, Dirección General de Conservación de la Naturaleza.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008. Anuario de Estadística Agroalimentaria y Pesquera 2007.
- Ministerio de Medio Ambiente, 2008. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de España años 1990-2006. Comunicación a la CE. Decisiones 280/2004/CE y 2005/166/CE.
- Ministerio de Medio Ambiente, 2009. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de España años 1990-2007. Comunicación a la CE. Decisiones 280/2004/CE y 2005/166/CE.
- Oficemen, 2008. Anuario 2008. Agrupación de fabricantes de cemento de España.
- Ortiz, J., 2006. Reducción de emisiones en la producción de mezclas bituminosas en caliente. Jornada de ASEFMA. Madrid, 2006.
- Park, K., Hwang, Y., Seo, S. and Seo, H., 2003. Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Highways. J. Constr. Eng. Manag.. 129 (1), 25- 31.
- Red Eléctrica Española, 2009. El sistema eléctrico español. REE, Julio 2009.
- Ruiz de la Torre, J., 1990. Memoria General del Mapa Forestal de España a escala 1:200.000. Madrid, MAPA-ICONA.
- Sampedro, A., 2007. Las implicaciones del protocolo de Kioto en la ingeniería civil. V Congreso Nacional de Ingeniería Civil: Desarrollo y sostenibilidad en el marco de la ingeniería. Sevilla, 2007.
- Stripple, H., 2001. Life Cycle Assessment of Road. A Pylot Study for Inventory Analysis. IVL Swedish Environmental Research Institute. Second Revised Edition. March 2001, Gothenburg, Sweden.
- SUSCON, 2006. Life Cycle Assessment of Road Paviment. Programme: Sustainable Construction in Public and Private Works through IPP approach (SUSCON). Project No: LIFE 05 ENV/GR/000235.
- WBCSD, 2005. CO<sub>2</sub> accounting and reporting for the cement industry. The cement CO<sub>2</sub> protocol. World Business Council for Sustainable Development. Version 2.0. June 2005.
- White, S. and K.G., 2000. Birth to death analysis of the energy payback ration and CO<sub>2</sub> emission rates from coal, fission, wind and DT-fusion electrical power plants. Fusion Eng. Des. 48, 473-484.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Nombre: Gonzalo Fernández Sánchez  
Phone: +0034 913365378  
E-mail: [gonzalofe@caminos.upm.es](mailto:gonzalofe@caminos.upm.es)