

Monografías  
**EnerTrans**



*Monografía 3*

---

**Modelos de consumo y  
emisiones en el transporte:  
Estado del Arte**

*Consumption and emission models in transport: State of the art*

---

Timoteo Martínez Aguado  
Aurora Ruiz Rúa  
Ana Isabel Muro Rodríguez

# Modelos de consumo y emisiones en el transporte: Estado del arte

## *Consumption and emission models in transport: State of the art*

Timoteo Martínez Aguado

Aurora Ruiz Rúa

Ana Isabel Muro Rodríguez

Universidad de Castilla-La Mancha

<http://www.enertrans.es>

© Timoteo Martínez Aguado, Aurora Ruiz Rúa, Ana Isabel Muro Rodríguez

© De esta edición, Grupo Gestor del Proyecto EnerTrans, 2008

ISBN: 978-84-89649-24-8

Depósito Legal: M-13482-2009

Esta monografía ha sido redactada por sus autores en el marco del Proyecto de Investigación “*Desarrollo de un modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión del sistema de transporte que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructura y de política de transporte*”(EnerTrans).

El proyecto *EnerTrans* ha sido desarrollado por los siguientes organismos: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid-INSIA; Universidad de Castilla-La Mancha; ALSA; Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid; Fundación “Agustín de Betancourt”; Fundación Universidad de Oviedo.

El proyecto *EnerTrans* contó con una ayuda económica del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) dentro de su primer programa de ayudas (2006).

El proyecto *EnerTrans* estuvo dirigido por su investigador principal Alberto García Álvarez con el apoyo de un “Comité Científico” del que formaron parte las siguientes personas: Alberto García Álvarez (Fundación de los Ferrocarriles Españoles); Ignacio Pérez Arriaga y Eduardo Pilo de la Fuente (Universidad Pontificia Comillas de Madrid); Jose María López Martínez (Universidad Politécnica de Madrid-INSIA); Alberto Cillero Hernández y Carlos Acha Ledesma (ALSA); Timoteo Martínez Aguado y Aurora Ruiz Rúa (Universidad de Castilla-La Mancha); José Miguel Rodríguez Antón y Luis Rubio Andrada (Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid); Manuel Cegarra Plané (Fundación “Agustín de Betancourt”) y Rosa Isabel Aza y José Francisco Baños Pino (Fundación Universidad de Oviedo). El coordinador del proyecto por parte del CEDEX fue Antonio Sánchez Trujillano.

*The aim of the EnerTrans research project is to obtain an accurate model to find out the energy consumption (and associated emissions) of the Spanish transport system, according to the important variables on which it depends, and thereby avoid the need to extrapolate historical data series calculated with various methodologies in the European sphere for each mode of transport. The participants include various universities and foundations linked to different modes of transport: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Universidad Politécnica de Madrid-INSIA, Universidad de Castilla-La Mancha, ALSA, Universidad Pontificia de Comillas de Madrid, Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid, Fundación Agustín de Betancourt and Fundación Universidad de Oviedo.*

*The project has involved constructing a model which can be used to explain and predict energy consumption (and associated emissions) in the Spanish transport system, using a coherent methodology for all modes, considering all energy utilizations (construction, operation, maintenance, movement) and the whole energy cycle from source to final use, thus allowing the effects of the results of infrastructure or transport policy to be anticipated and evaluated. As a secondary objective, the project will permit assessment of the impact of any type of technical or operational measure aimed at reducing this energy consumption, which will be useful for transport operators.*

*It includes innovations such as taking into consideration different routes between the same points for each one of the different modes of transport, or separating consumption from load or space utilization coefficients.*

*The published documents corresponding to the EnerTrans project fall into three categories: Monographs, Articles and Technical notes.*



Con la subvención del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Ministerio de Fomento), número de proyecto PT-2006-006-01IASM.

# ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
0. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	5
1. INTRODUCCIÓN .....	8
2. ANTECEDENTES .....	10
3. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS .....	12
3.1.Modelos Energéticos .....	13
3.1.1 Modelos tecnológicos .....	14
3.1.2 Modelos económicos .....	18
3.1.3 Características generales de los modelos agregados .....	29
3.2.Modelos de inventario de emisiones y consumos de energía.....	32
3.2.1 Modelos de movilidad y modelos de emisiones.....	34
3.2.2 Modelos de consumo basados en el contenido de carbono .....	37
3.2.3 Características generales de los modelos desagregados .....	38
3.3.Los costes externos y su cálculo .....	38
3.3.1 Costes externos en el modo ferroviario .....	43
4. MODELOS DE CONSUMO Y EMISIONES POR MODO DE TRANSPORTE .....	45
4.1.Modos carretera .....	46
4.1.1 Los agentes contaminantes y los factores de emisión.....	48
4.1.2 Modelos de emisiones en el transporte por carretera.....	50
4.1.3 Categorías de vehículos .....	55
4.1.4 Factores de emisión .....	63
4.1.5 Carburantes mejorados: Actuales y futuros .....	83
4.1.6 Conclusiones del modo de transporte por carretera .....	86
4.2.Modos de Transporte por Ferrocarril.....	87
4.2.1 Metodologías aplicadas al modo de transporte por ferrocarril .....	87
4.2.2 Metodología específica para trenes de mercancías.....	91
4.2.3 Herramientas para el cálculo y predicción de los consumos y emisiones del ferrocarril.....	94
4.2.4 Conclusiones del modo de Transporte Ferroviario.....	99
4.3.Modos de Transporte Marítimo .....	100
4.3.1 Metodologías para el modo de transporte Marítimo.....	102
4.3.2 Otras metodologías para las naves de mercancías.....	183
4.3.3 Conclusiones del modo de transporte marítimo.....	187
4.4.Modos de transporte aéreo .....	188
4.4.1 Metodologías para el modo de transporte Aéreo.....	191
4.4.2 Conclusiones del modo de Transporte Aéreo .....	196

4.5. Transporte Urbano .....	196
BIBLIOGRAFÍA .....	199
ANEXO.....	206
4.6. Fórmulas de conversión .....	206
4.7. Clasificación de los vehículos .....	206
4.8. Anexo de Resultados y Aplicaciones por modos de transporte.....	213
Modo de transporte por carretera .....	213
Modo de transporte por ferrocarril.....	229
Modo de transporte marítimo .....	232
Modo de transporte aéreo .....	243
4.9. Anexos de Tablas .....	250
Factores de emisión en caliente para coches utilitarios y de carga ligera. ....	250
Factores de emisión para vehículos de carga pesada (VCPó HGV) .....	256
Factores de emisión en caliente Ciclomotores y motocicletas .....	258
Factores de corrección de la pendiente (pág 84). .....	261
Coeficientes de corrección de la carga. (pág 86) .....	269
Coeficientes de corrección del kilometraje (pág 89) .....	270
Funciones de corrección de la temperatura (pág 90). .....	271
Factores de corrección de las emisiones de arranque (Pág 97) .....	272
Factores de emisión por evaporación (pág 104) .....	273
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	275

## 0. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El documento de estado del arte intenta recopilar y analizar los distintos estudios existentes en materia de consumos energéticos y emisiones para el transporte tanto de mercancías como de viajeros.

Diversos son los estudios analizados y diversas las metodologías encontradas; por este motivo se ha seleccionado de entre todas ellas la que más se ajusta a los objetivos del proyecto para detallarla y poder establecer un punto de comparación con los datos que se obtendrán a lo largo de la realización del proyecto.

Los estudios analizados hacen referencia principalmente al ámbito europeo, y en este sentido merecen ser destacados el informe INFRAS-IWW (2000 y actualización de 2004), el estudio MEET project (Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport) resultado de la acción Cost 319 (Estimation of pollutant emissions from transport -Estimación de las emisiones contaminantes procedentes del transporte-), este estudio tiene su continuación con la acción Cost 346 (para vehículos pesados) y los estudios ARTEMIS y PARTICULATES.

En el ámbito nacional los mayores desarrollos se han realizado en el ámbito del transporte urbano, y entre ellos destacamos el estudio llevado a cabo dentro del Plan Director de Movilidad de la Región Metropolitana de Barcelona en la que se calculan consumos y costes externos. La Comunidad de Madrid a través del Consorcio de Transportes publicó en marzo de 2003 la “Cuenta Económica y Socio-ambiental del transporte terrestre de viajeros en la Comunidad de Madrid en 1996” incluyendo metodologías de cálculo para los costes sociales y ambientales.

Actualmente en el caso español y en especial para el modo urbano debe tenerse muy en cuenta los análisis realizados por el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), aunque en la actualidad no existe una metodología estandarizada para el cálculo de emisiones o consumos de los Planes de Movilidad Urbana Sostenible. Los numerosos estudios que se están llevando a cabo para la implantación planes de movilidad no se han llevado a cabo en su totalidad por lo que las medidas en ellos reflejadas no se tendrán resultados de los ahorros reales y beneficios derivados de los mismos.

En cualquier caso se está produciendo una proliferación de dichos estudios y del análisis de los resultados existentes, apoyados por la Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo, de 11 de enero de 2006, sobre una Estrategia temática para el medio ambiente urbano COM (2005) 718 final (no publicada en el Diario Oficial) y de sus antecedentes, la Comunicación de la Comisión, de 11 de febrero de 2004 “Hacia una estrategia temática sobre el medio ambiente urbano” COM (2004) 60. El documento COM (2008) 433 final “Hacia un transporte más ecológico” en la que se menciona a la movilidad como factor clave y sobre los costes que impone a la sociedad. En concreto, se citan las medidas que deben adoptarse en los próximos dieciocho meses y que en lo que se refiere al cambio climático hace referencia a la internacionalización de los costes externos. El documento técnico que sirve de base para estos futuros desarrollos “Handbook on estimation of external cost in the transport Sector” será objeto de consideración en los capítulos siguientes.

Por último, los cálculos de consumos energéticos y emisiones son utilizados para establecer políticas de ahorros energéticos y de imposición tarifaria de los distintos modos de transporte, esto hace que algunos estudios analicen exclusivamente los costes concretos asociados a cada modo. En esta vertiente monetarizada de los

consumos energéticos y de emisiones tenemos algunos estudios a nivel europeo, tales como el PETS (1999) que contiene un análisis de los costes marginales (evitables) del transporte; el proyecto europeo UNITE (Unification of accounts and marginal costs for Transport efficiency 1999-2002) analiza las externalidades de los distintos modos de transporte en especial el ferrocarril (se considera el ferrocarril como un modo de transporte menos contaminante y por tanto con costes externos positivos), el High level group (grupos de asesoramiento a la Comisión Europea) on transport infrastructure costs, etc.

En el análisis de los diversos estudios que con un fin u otro tratan los consumos de energía y emisiones cabe distinguir dos categorías claramente diferenciadas: aquellos que aplican las metodologías existentes para obtener unos datos y los que desarrollan las metodologías en sí mismas. Debido al objeto del estudio, y tal y como se detalla en los puntos siguientes se ha seleccionado como eje del documento actual, las metodologías recogidas en el estudio MEET. La elección nos permite analizar otros estudios como el Cost 319 y la herramienta informática COPERT (versión III) y nos permite mantener la perspectiva comparada de los distintos modos de transporte.

Los resultados que se recogen en los distintos estudios pueden agruparse en dos grandes categorías:

- Resultados intermedios.
- Resultados finales o cálculos de consumos y emisiones para un caso concreto.

Entre los resultados intermedios obtenemos por ejemplo los factores de emisión, la clasificación de los vehículos o el cálculo total de flotas (para un país, por ejemplo España), etc.

Entre los resultados finales se incluye la aplicación de la metodología a casos concretos como por ejemplo.- Un corredor de mercancías, otro de viajeros, y el análisis de consumos y emisiones en una ciudad de gran tamaño.

De la documentación revisada se concluye que el análisis de los consumos de energía y emisiones y su aplicación al análisis de política de transportes tiene, en la actualidad, su mayor desarrollo debido, entre otras razones, a las políticas que se están desarrollando para intentar frenar el cambio climático. En este sentido se ha producido un cambio de tendencia ya que anteriormente su consideración era dirigida al cálculo de costes (bien para fines impositivos, bien para la eficiencia intermodal). Todo esto, que justifica la importancia del proyecto EnerTrans, reduce el abanico de metodologías y resultados que pueden ser analizados.

Por último, en lo que se refiere a los modelos existentes para el cálculo de consumos y emisiones en el transporte, se ha observado que su complejidad es un punto negativo a la hora de su difusión, los usuarios finales de dichos modelos para la toma de decisiones políticas, se ven avocados a utilizar simplificaciones de los mismos o aplicaciones en algunos casos inexactas. Tan sólo se ha desarrollado de forma continuada el programa COPERT (actualmente en su versión IV), para el modo ferroviario ahora está disponible el ECOTRANSIT (que también incluye el análisis de algún otro modo de transporte tal y como es el modo marítimo fluvial).

En los apartados siguientes hacemos un recorrido por los principios que rigen las distintas metodologías del cálculo de consumo y emisiones para el transporte y se ofrecen algunos de los resultados obtenidos.

A nivel europeo existen en la actualidad fuertes incentivos para desarrollar el cálculo de los consumos y emisiones en los distintos modos de transporte, aunque no existe una metodología estándar y así, los modelos presentados en los capítulos siguientes son considerados en muchos casos como un estándar.

Una última conclusión obtenida es que el modo de transporte que comenzó a analizar los consumos y las emisiones es el modo “carretera” (por razones principalmente económicas en el caso de los operadores y por ser el modo, en principio, con una contaminación directamente percibida por los ciudadanos), el resto de los modos han sido desarrollados a partir de lo realizado para la carretera.

Por último, en lo que respecta a los modelos, existen dos grandes grupos (como suele ser habitual en el campo de la modelística): modelos agregados y modelos desagregados. Los primeros son normalmente utilizados para la ayuda a la toma de decisiones, principalmente de carácter político. Hasta el momento actual se han encontrado importantes dificultades para realizar agregaciones sobre los modelos desagregados y al revés, resulta difícil desagregar los resultados de los modelos agregados. Esta es una ventaja importante del modelo que se intenta desarrollar en las fases sucesivas del proyecto EnerTrans. Para ello se tendrá en cuenta una serie de recomendaciones que aparecen ya investigadas y que serán mencionadas a continuación.

Además, y como se muestra a continuación, en los estudios realizados no se comparan los consumos y emisiones entre los distintos modos de transporte, a no ser que sea en los análisis de costes externos, y en este caso no se considera un trayecto o corredor concreto, sino para el conjunto del modo; con ello, por ejemplo, distintos modos con diferentes distancias entre origen y destino no quedan adecuadamente recogidas. Esta será una de los principales resultados que podrá recoger el proyecto EnerTrans a lo largo de su desarrollo.

Una ventaja de la estructura seleccionada para abordar el estudio del estado del arte es que, al tomar como punto de partida los resultados obtenidos en el proyecto MEET (el proyecto más importante a nivel europeo que incluye todos los modos de transporte), permite analizar comparativamente los distintos modos de transporte al estudiar conjuntamente todos los modos excepto el ámbito urbano. Además, y en lo que respecta al análisis de las metodologías éstas resultan en la actualidad totalmente válidas.

En los puntos siguientes se realiza una clasificación de los modelos de análisis de consumos y emisiones para pasar al análisis detallado de los distintos modelos por modo de transporte. Finalmente se recogen la bibliografía y los anexos.

---

## 2. INTRODUCCIÓN

En la Unión Europea, casi un tercio de toda la energía es consumida por el transporte, estamos hablando de 339 Mtoe respecto del total de 1083 Mtoe (2002). Además, el uso de la energía en el sector del transporte se está incrementando, mientras que en el resto de actividades permanece estable; entre 1992 y 2002, el uso de energía en el transporte se incrementa en un 7%, en el resto de los sectores industriales se reduce ligeramente (en valores cercanos al 0,5%).

La demanda de transporte está muy ligada al desarrollo económico. De esta forma, el transporte contribuye a generar prosperidad y proporciona oportunidades de participar en el comercio internacional, y como consecuencia de este desarrollo económico, los habitantes tienen mayores posibilidades para tener actividades de recreo y ocio y acceso a una gama más amplia de bienes y servicios.

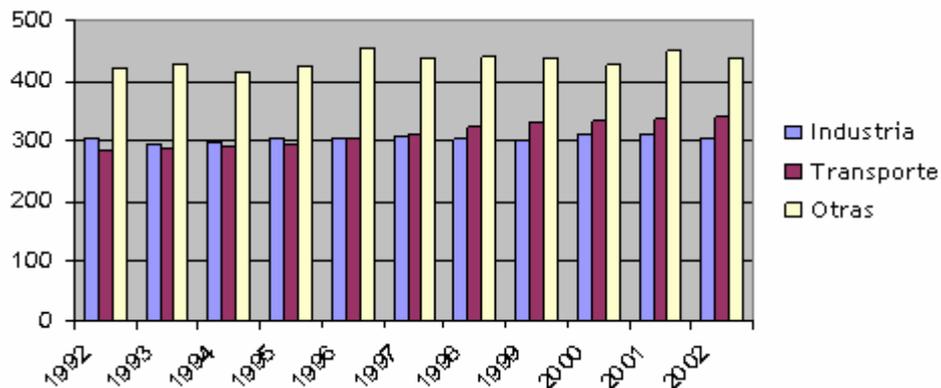
El transporte es una parte muy valorada y necesaria de la sociedad moderna pero también tiene una contribución creciente en los factores menos deseados consecuencia de este desarrollo. Las congestiones de tráfico hacen las ciudades menos agradables para vivir y reduce la eficiencia del sistema de transporte incrementando el tiempo de recorrido, el consumo de combustible y el stress de los conductores. El uso de la infraestructura por la actividad de transporte debe algunas veces, ser construida reduciendo el uso de la tierra dedicada a la agricultura o en localizaciones que son sensibles por razones, ecológicas, históricas, etc.

Resultado de lo anterior, y desde el punto de vista de las políticas medioambientales, económicas, etc, es importante que el sistema de transporte sea diseñado de la forma más efectiva para satisfacer las necesidades de transporte tanto de personas como de bienes (mercancías) y todo ello reduciendo el impacto negativo de dicha actividad. Sus costes deben ser revidados y sus efectos adversos sobre el medio natural y antropológico deben ser minimizados.

Uno de los efectos más negativos que produce el transporte puede medirse a través de su contribución a la polución atmosférica. Cada litro de gasolina quemado produce, de una forma muy aproximativa, 100 gramos de dióxido de carbono, 20 gramos de componentes orgánicos volátiles, 30 gramos de óxidos de nitrógeno, 2.5 kilogramos de dióxido de carbono y una gran variedad de otras emisiones incluyendo los compuestos del plomo y azufre y partículas finas. Todos estos componentes están asociados en mayor o menor grado a los problemas que la contaminación del aire genera de forma directa en la salud y otros más generales como el efecto invernadero.

En la Unión Europea-25, el consumo de energía final se incrementa en un 7% para el periodo 1992-2002. Un 76 % de este incremento es debido al sector del transporte, el cual creció un 19% para estos diez años. En el año 2.002 el sector transporte representa un 31% del consumo final de energía total para la Unión Europea, el sector de la industria un 28% y el resto otros sectores.

Figura 1. Consumos energéticos



Fuente: EUROSTAT

En la figura 1 se puede observar cómo el consumo de energía en el sector transporte es mayor que en la industria en 2002. Estos datos son los que se muestran de forma numérica en las tablas siguientes.

Tabla 1. Consumo energéticos por sectores

EU-25	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Industria	306	296	297	306	307	309	304	301	312	311	306
Transporte	284	289	291	295	305	311	323	331	333	336	339
Otras	420	428	416	424	456	437	441	438	426	450	438
Total	1.010	1.013	1.004	1.025	1.068	1.057	1.068	1.070	1.071	1.097	1.083

Fuente: EUROSTAT. Unidades: Mtoe

Tabla 2. Consumo energético por sectores respecto al total

EU-25	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Industria	30%	29%	30%	30%	29%	29%	28%	28%	29%	28%	28%
Transport	28%	29%	29%	29%	29%	29%	30%	31%	31%	31%	31%
Otras	42%	42%	41%	41%	43%	41%	41%	41%	40%	41%	40%

Fuente: EUROSTAT. Unidades: %

## 3. ANTECEDENTES

El grupo de trabajo CONRIANAIR (CORE Inventory of AIR emissions) es considerado la primera iniciativa a nivel Europeo en lo que se refiere al análisis de las emisiones, consiste en el desarrollo de los métodos de inventariado de emisiones y por primera vez se llevan a cabo acciones más allá del ámbito local. Comienza en 1987 con el objetivo de desarrollar una metodología que determine los factores apropiados para medir las emisiones de los vehículos. El año que se toma para los datos de referencia es 1985 (Eggleston et al (1989)). La metodología se transformó en un programa informático, COPERT, que ha sido utilizado por los distintos países Europeos.

En 1991, el mismo grupo de expertos propone la revisión de los factores de emisión para una actualización del inventario, incluyendo la revisión de la metodología (Eggleston et al (1993)). El resultado de este trabajo fue el programa de ordenador COPERT 90, (Adrias et al (1993)) y las posteriores versiones COPERT 2 (1997), COPERT III (2000) actualmente esta disponible en su versión 4.

COPERT es la base para las estimaciones de emisiones que se llevan a cabo en otras actividades internacionales, tales como el IPCC (Intergubernamental Panel on Climate Change) y el programa EMEP (European Modelling and Evaluation Program de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (ENECE)).

Otro programa utilizado para la estimación de emisiones por parte de los vehículos de vijaeros es el MODEM (de la universidad de Chile).

En 1993, en el ámbito del programa COST (European Co-operation in the Field of Scientific Research) se lleva a cabo la acción 319 “The estimation of emissions form Transport” (1993-1998) y la acción 346 “Energy and fuel consumption from heavy duty vehicles” (1999-2005).

En 1999, y como resultado de la acción COST comienza a desarrollarse dentro del 4º Programa Marco, el proyecto MEET (Methodologies to Estimate de Emissions for Transport), posteriormente y debido a la acción COST 346 se desarrolla el proyecto ARTEMIS (2000-2005) que cuenta con cerca de 40 participantes de 15 países entre los que se incluye Suizan, Polonia, Hungría e Israel (comenzó en 2000 y cuenta con un presupuesto de 9 millones de Euros) y el proyecto PARTICULATES (2000-2005) que tiene por objetivo determinar las partículas emitidas por los tubos de escape en los vehículos de carretera.

En el ámbito nacional los desarrollos llevados a cabo desde el IDAE “Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía” son también objeto de análisis, bajo las características y condiciones mencionadas en el resumen y conclusiones.

A continuación, se analiza una clasificación general de los distintos modelos y metodologías, comenzando el análisis de los distintos modos teniendo en cuenta el programa MEET, sus resultados y los resultados obtenidos en la acción COST 319, el programa COPERT y más recientemente el proyecto ARTEMIS, PARTICULATES y ECOTRANSIT.

El programa MEET tiene como finalidad el recoger una metodología común a nivel Europeo, para determinar el impacto de las emisiones y el consumo de energía del transporte en la contaminación atmosférica. Este proyecto se ha realizado conjuntamente con las actividades del COST 319<sup>1</sup>, lo que supone que para su comprensión se harán continuas referencias a este último.

El programa MEET considera que una forma básica de estimar las emisiones se puede expresar como el producto de la actividad del tráfico por un “factor de emisión” (cantidad de emisión por unidad de actividad), teniendo en cuenta que los factores de emisión dependen a su vez del modo de transporte, del tipo de combustible usado, del desarrollo tecnológico del vehículo y de las condiciones bajo las cuales está funcionando. Por ello es necesario establecer una clasificación de cada “factor de emisión” con cada una de las condiciones anteriores.

Las fuentes móviles que producen la contaminación atmosférica son clasificadas por el CORINAIR<sup>2</sup> distinguiendo las del transporte por carretera, las de otras fuentes móviles y maquinaria, las militares, las de los ferrocarriles, los canales, las actividades marítimas, el tráfico aéreo, la agricultura, la selvicultura, la industria, las del hogar y la jardinería.

Los modos de transporte considerados en este proyecto no atienden a un criterio de movilidad, sino a un criterio de actividad, por lo se incluyen solo el transporte de mercancías y viajeros, y por tanto los modos de transporte a analizar son el transporte por carretera, el aéreo, el ferrocarril y el transporte por agua (incluye los canales y algunas actividades marítimas).

Más recientemente “Ecopassenger: Environment Methodology and Data” (2008) y “Handbook on estimation of external cost in the transport sector” (2007) tratan las estimaciones de consumos energéticos y emisiones. El primero de los estudios mencionados introduce como mejora a los ya revisados, la consideración de los recorridos ferroviarios a través del programa de marchas establecido para los trenes (reflejado en la información de los horarios), hasta el momento este cálculo se realizaba a través de una aproximación geográfica de las distancias. En el mencionado estudio se trata la importancia de las diferencias entre países (distinto tipo de vehículos, del tipo de energía utilizada -existen diferencias claras en la tecnología para la producción de energía-, etc.) pero los resultados finalmente facilitados son en valores medios para el conjunto de países europeos.

El más importante de los estudios publicados recientemente es el “Handbook on estimation of external cost in the transport sector” (2007) principalmente por las repercusiones futuras que se esperan al ser utilizado como herramienta técnica en los desarrollos legislativos futuros. El objeto del estudio, los costes externos claramente no son idénticos a los objetivos de Enertrans pero al incluir en el mismo un cálculo de consumos y emisiones se ha considerado conveniente su tratamiento en el documento actual.

---

<sup>1</sup> En epígrafes siguientes lo analizaremos (Cost 319, 1999, Métodos de estimación de las emisiones atmosféricas en el transporte)

<sup>2</sup> EMEP/CORINAIR (1998) Atmospheric emission Inventory Guidebook

---

## 4. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS

Existe una gran variedad<sup>3</sup> de métodos para calcular el consumo de energía y emisiones. Estos métodos, dependen del agente contaminador, el modo del transporte y el tipo del vehículo. Cada uno de ellos ofrece formas funcionales distintas pero sin embargo las metodologías aplicadas pueden agruparse en dos:

Enfoque top-down.- Ofrece un volumen general de consumos o emisiones para todo el conjunto de la actividad de transporte o para alguno de sus modos. La forma funcional de estos modelos suele venir dada por una regresión en el que las variables independientes se alimentan de estadísticas ya elaboradas. Estos modelos se basan en datos o variables agregadas.

Enfoque botom up.- Calcula directamente las emisiones y consumos desde la fuente, el vehículo. Estos cálculos pueden realizarse bien en laboratorio, bien a través de los datos de los fabricantes o bien en pruebas específicas sobre situaciones reales.

Los primeros son normalmente utilizados para la ayuda a la toma de decisiones, principalmente de carácter político. Hasta el momento actual se han encontrado importantes dificultades para realizar agregaciones sobre los modelos desagregados y al revés, resulta difícil desagregar los resultados de los modelos agregados. Esta es una ventaja importante del modelo que se intenta desarrollar en las fases sucesivas del proyecto. Para ello se tendrá en cuenta una serie de recomendaciones que aparecen ya investigadas y que serán mencionadas a continuación.

Estos dos enfoques se pueden dividir a su vez en función del objetivo que se persiga, existen dos objetivos fundamentales:

Medir el impacto de políticas energéticas específicas mediante modelos energéticos.

Medir las emisiones mediante la elaboración de inventarios de emisiones y consumos energéticos.

A continuación se analizan los distintos modelos en función de la clasificación anterior.

---

<sup>3</sup> COST 319 (1999), considera 39 modelos de emisión que analiza y compara, para seleccionar una metodología.

## 4.1. Modelos Energéticos

---

Existen diversas metodologías para estimar de forma agregada los consumos energéticos y emisiones medioambientales. Estos modelos tienen un doble fin: mejorar la calidad ambiental y la eficiencia del sistema económico<sup>4</sup>. La necesidad de analizar las cuestiones sobre sostenibilidad económica y ambiental ha motivado el desarrollo y empleo de los llamados “modelos E3” (energy-economy-environment)<sup>5</sup>, los modelos agregados más desarrollados. El objetivo de estos modelos es intentar anticipar los posibles problemas en el futuro, facilitando en el presente la búsqueda y el análisis de soluciones mediante el estudio de las interacciones entre los sistemas energético, económico y medioambiental.

En este sentido, la clasificación más general es la realizada en Capros y otros (1991), diferenciando entre modelos tecnológicos (bottom-up en terminología anglosajona), y los modelos económicos (top-down). Otras clasificaciones distinguen cuatro grandes grupos de modelos en función de su cobertura sectorial (o de cómo se ve el sector energético en comparación con el resto de la economía):

Los modelos tecnológicos (bottom-up) del sector energético o de un sector industrial específico.

Los modelos híbridos, con un enfoque mixto económico-ingenieril, que acoplan un modelo del sector energético a uno global o parcial de la economía.

Los modelos de enfoque económico (top-down) que representan a todos los sectores de la economía.

Los modelos de evaluación integrada del cambio climático (IAM: integrated assessment models of climate change) que acoplan un modelo económico a modelos climáticos, ecológicos, e incluso sociales.

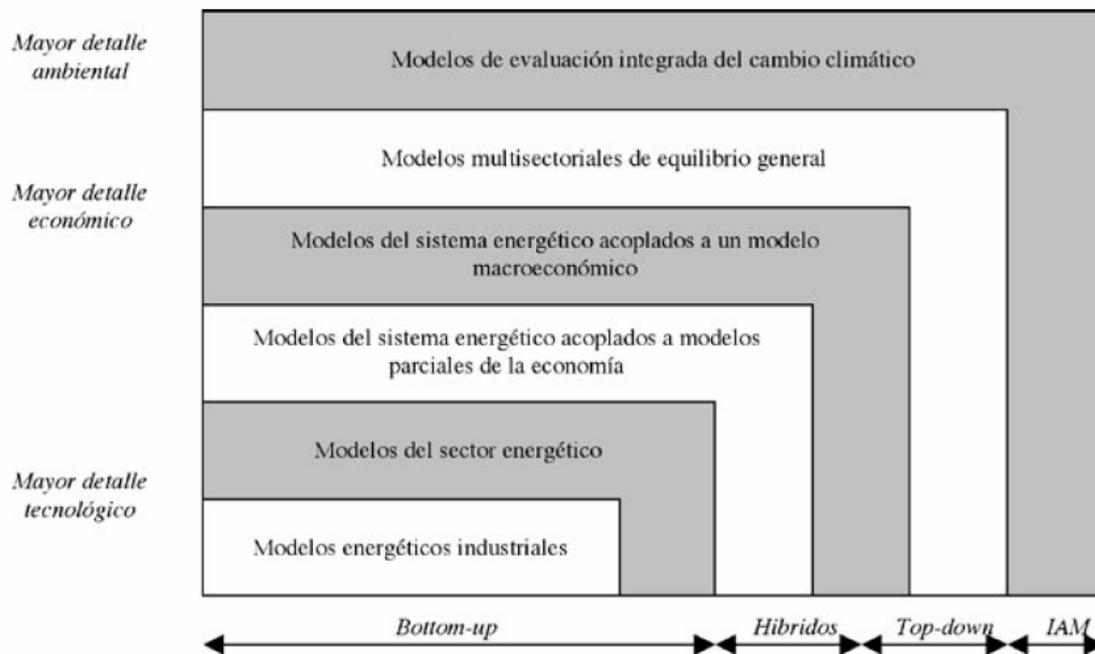
La figura siguiente muestra un esquema de esta clasificación.

---

<sup>4</sup> Rodríguez Méndez, M.E. (2002). “Reforma fiscal verde y doble dividendo. Una revisión de la evidencia empírica”.

<sup>5</sup> Hidalgo González, I. (2005) “Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medioambientales: Descripción y aplicaciones del modelo POLES”. Revista de Economía Mundial 13, pág. 33-75.

Figura 2: Tipos de modelos E3



Fuente: González, H. (2005) "Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y mediambientales: Descripción y aplicaciones del modelo POLES". Revista de Economía Mundial 13, pág. 43.

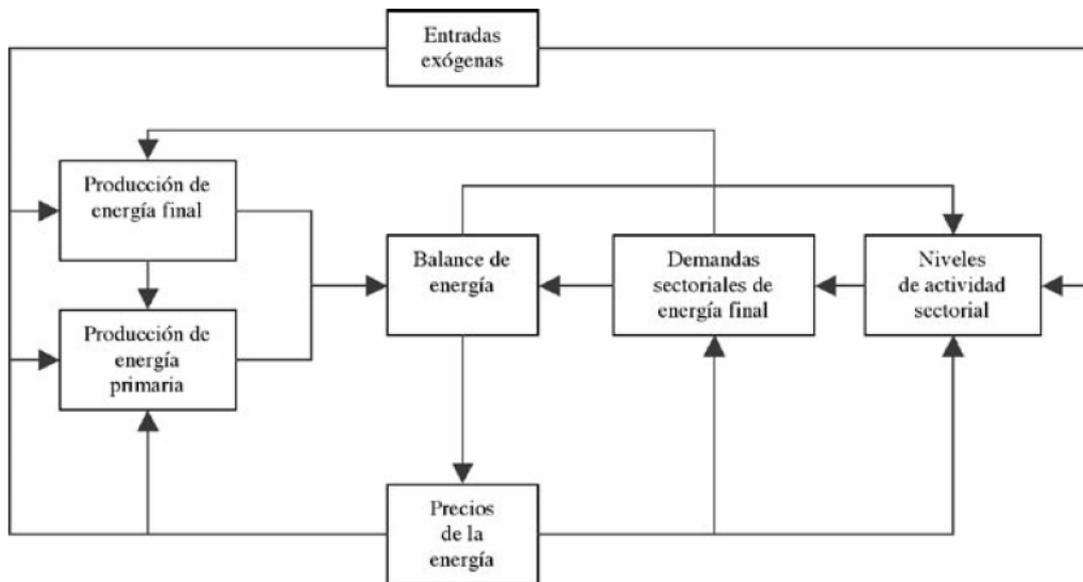
Una clasificación alternativa podría responder al enfoque de análisis del sistema económico, ya sea este parcial o general. Los enfoques de análisis parcial no permiten valorar, habitualmente, la repercusión de una medida específica sobre el conjunto de las variables macroeconómicas importantes, como el PIB, el empleo, ni tampoco sobre determinadas medidas de bienestar. Por su carácter parcial, tampoco permiten analizar, en general, todos los efectos directos e indirectos provocados por una determinada política. Pueden ofrecer, sin embargo, buenas predicciones de los efectos más inmediatos y directos sobre determinados sectores económicos.

A continuación, expondremos brevemente los distintos métodos de análisis utilizados para evaluar el impacto de una medida específica obtenidos por los modelos que siguen un enfoque de análisis de equilibrio general, lo cual incluye a los modelos aplicados de equilibrio general y a los modelos macroeconómicos.

### 4.1.1 Modelos tecnológicos

Los modelos tecnológicos (bottom-up) analizan, como su nombre indica, la tecnología utilizada tanto por productores como consumidores de energía. Representan con detalle un sistema energético, considerándolo como un conjunto de tecnologías de producción, distribución y demanda final de energía que compiten entre sí.

Figura 3. Modelos tecnológicos



Fuente: González, H.(2005) pág. 43.

En la figura anterior se muestra la estructura genérica de un modelo tecnológico: a partir de unas entradas exógenas (como pueden ser el PIB o la población), de los precios de la energía, y de su oferta, se determinan los niveles de actividad en los sectores que se consideren en el modelo (i.e., la producción industrial, la demanda de transporte, etc.). Con estos niveles de actividad se calculan las demandas de las diferentes formas de energía secundaria (electricidad, gasolina, gasóleo, etc.). La producción de energía primaria (combustibles fósiles primarios) tiene en cuenta la demanda de energía secundaria, la producción de energía a partir de fuentes renovables, y factores exógenos (como variaciones en la eficiencia tecnológica, en los costes, o en los recursos energéticos disponibles). Tanto la producción como la demanda de energía, y los niveles de actividad sectorial están influidos por los precios de las diferentes formas de energía consideradas. Los precios se calculan en base a precios históricos, y como resultado de las variaciones de la oferta y la demanda.

Dos son las estrategias de análisis que pueden ser utilizadas: estimar el valor actual neto asociado a cada alternativa tecnológica, o modelar el comportamiento de los agentes.

La primera de las estrategias consiste en valorar todas aquellas medidas tecnológicas que permitan ahorrar energía y reducir las emisiones contaminantes. Para ello es necesario disponer de una base de datos que contenga información detallada sobre la oferta y demanda de energía. Con todo ello, el analista puede valorar tanto los costes necesarios para alcanzar un determinado objetivo ambiental (costes financieros y vida útil de las distintas tecnologías necesarias), como los beneficios que reportaría (menores costes o gasto energético, menores emisiones contaminantes).

El resultado obtenido por este tipo de análisis es, en general, muy optimista. He aquí algunos ejemplos. La revisión bibliográfica realizada por Grubb y otros (1993) concluye que es posible reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en más de un 20%, incurriendo para ello en costes negativos o nulos. Otras revisiones bibliográficas han obtenido similares resultados, como por ejemplo Jaccard y Montgomery (1996), quienes

consideran que reducir en un 20% las emisiones de CO<sub>2</sub> en USA podría ocasionar costes económicos que van desde -1.2% al +0.6% del PIB, según los modelos, aun cuando la mayor parte de ellos ofrecen costes negativos o nulos. Estos resultados han creado cierto interés en torno a la que ha dado en llamarse “paradoja de la eficiencia” (véase por ejemplo DeCanio, 1998).

La segunda de las estrategias de análisis seguida por los modelos tecnológicos es aquella que modela explícitamente el comportamiento de los agentes. Son modelos aplicados principalmente al sector eléctrico, y que permiten caracterizar el sistema de generación y la formación de precios. El objetivo es determinar las condiciones para una gestión óptima del sistema eléctrico.

La tabla siguiente presenta algunos trabajos que han utilizado este método de investigación para analizar los resultados de las políticas impositivas sobre emisiones contaminantes.

Tabla 3. Modelos tecnológicos

Modelo	Referencia	Cobertura geográfica (nº de regiones)	Horizonte temporal	Nivel de detalle			Hipótesis de precios	de	Técnica de resolución
				Producción de energía	Demanda de energía	Sectores energéticos no			
ERN	(Barns et al., 1992)	Global (9)	Largo (2095)	Medio	Medio	Bajo	Miipe		Simulación
ENPEP	(Buehring et al., 1991)	Nacional (plantilla)	Medio (2020)	Medio	Medio	Bajo	Miipe		Simulación
ETA	(Manne, 1976)	Nacional (USA)	Medio (2050)	Medio	Medio	Bajo	Perfecto		Optimización
Global-Macro	(Environmental Protection Agency, 1990)	Global (9)	Largo (2100)	Medio	Medio	Bajo	Miipe		Simulación
GBWINI	(Scheraga, 1990)	Nacional (USA)	Medio (2030)	Alto	Alto	Bajo	Perfecto		Simulación
IDEAS	(AES Corporation, 1993)	Nacional (USA)	Medio (2030)	Alto	Alto	Bajo	Miipe		Simulación
MARKAL	(Rath-Nagel y Stocks, 1982)	Nacional (plantilla)	Medio (2050)	Alto	Alto	Nulo	Perfecto		Optimización
POLES	(Criqui, 1996)	Global (38)	Medio (2030)	Medio	Medio	Bajo	Miipe		Simulación
CO2DB	(Messner y Nakicenovic, 1992)	Nacional (plantilla)	Corto	Alto	Alto	Bajo	No aplicable		Simulación
DECADES	(IAEA, 1995)	Nacional (plantilla)	Medio (2020)	Medio	Medio	Bajo	No aplicable		Simulación
Energy 2020	(Backus et al., 1993)	Nacional (plantilla)	Medio (2020)	Medio	Medio	Bajo	Perfecta		Simulación
DNE21	(Fujii y Yamaji, 1998)	Global (10)	Largo (2100)	Alto	Alto	Bajo	Perfecta		Optimización
MIDAS	(Capros et al., 1991)	Regional (UE)	Medio (2020)	Medio	Medio	Bajo	Miipe		Simulación
MESAP	(Voss, 1998)	Nacional (plantilla)	Variable	Alto	Alto	Bajo	Miipe		Simulación
LEAP	(Stockholm Environment Institute, 2002)	Nacional (plantilla)	Medio	Medio	Medio	Bajo	No aplicable		Simulación
ISIM	(Hidalgo et al., 2005)	Global (47)	Medio (2050)	Bajo	Medio	Alto	Miipe		Simulación
CEMSIM	(Szabo et al., 2006)	Global (47)	Medio (2050)	Bajo	Medio	Alto	Miipe		Simulación

Fuente: González, H. (2005) pág. 46.

Si el modelo anterior lo aplicamos para evaluar una medida específica referente a la imposición medioambiental, los resultados que obtenemos son los que se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 4. Resultados obtenidos con modelos tecnológicos

Trabajo	País o región (período)	Modelo	Tipo impositivo	Variación emisiones	Efectos económicos
Joosen y otros (2001)	UE-15	Demanda energía		-10% CO <sub>2</sub>	60% reducción CO <sub>2</sub> con costes negativos
Bernow y otros (1998)	USA (2010)	Sector eléctrico	27.5 US\$/tonCO <sub>2</sub>	-13% CO <sub>2</sub> ; -15% SO <sub>2</sub> ; -13% NO <sub>x</sub>	14\$/ton CO <sub>2</sub> emitida
Shrestha y otros (1999)	Indonesia (2004)	Sector eléctrico	50 US\$/tonCO <sub>2</sub>	-54.1% CO <sub>2</sub>	
Gusbin y otros (2000)	Mundial (2010)	POLES	90-110 US\$/tonCO <sub>2</sub>	Kyoto -5.6%	-0.3% PIB (USA) -0.1% PIB (UE)
Capros (1998)	UE-14 (2010)	MIDAS	350 ECU/tonCO <sub>2</sub>	(-26%, +39%) CO <sub>2</sub> positivo (7); negativo (6)	
	UE-8 (2010)	PRIMES		(-26.7%, +12.8%) CO <sub>2</sub> positivo (2); negativo (6)	
Capros y otros (2000)	UE-14 (2000-2010)	PRIMES		Kyoto -8% CO <sub>2</sub>	(-25, -20) ECU/ton CO <sub>2</sub>

Nota: Variación de emisiones es la diferencia entre las emisiones estimadas con y sin política ambiental (impuesto ambiental, etc.) para un determinado año.

Abreviaturas: ton = toneladas; C = Carbono; boe = barriles de petróleo equivalente; toe = toneladas de petróleo equivalente; EV = variación equivalente; CC.SS = Cotizaciones Sociales; M = Millones; n.d. = dato no disponible.

M.E. (2002). "REFORMA FISCAL VERDE Y DOBLE DIVIDENDO. UNA REVISIÓN DE LA EVIDENCIA EMPÍRICA."

Fuente: Rodríguez Méndez, M.E. (2002). "REFORMA FISCAL VERDE Y DOBLE DIVIDENDO. UNA REVISIÓN DE LA EVIDENCIA EMPÍRICA."

Gusbin y Kouvaritakis (2000) estiman, por ejemplo, que para cumplir con los compromisos ambientales establecidos en el acuerdo de Kyoto es necesario un tipo impositivo de aproximadamente 100 US\$/tCO<sub>2</sub>, lo cual repercutiría en una pérdida del -0.3% del PIB estadounidense y del -0.1% del PIB europeo en el año 2010. Capros y Mantzos (2000) estiman, por otra parte, que la Unión Europea habrá de soportar un coste de 20 a 25 ECU por tonelada de CO<sub>2</sub> emitida, para cumplir el protocolo de Kyoto. En un trabajo anterior, Capros (1998) estimó que un tipo impositivo de 350 ECU/tonCO<sub>2</sub> provocaría una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> en seis países europeos.

## 4.1.2 Modelos económicos

---

El objetivo principal de los modelos económicos es simular el comportamiento económico y la toma de decisiones de los agentes. La tecnología es caracterizada, en general, como un bien genérico denominado capital. Por tanto, no consideran habitualmente cuáles son las posibilidades para mejorar la eficiencia energética de las tecnologías actuales, ni es siempre satisfactorio el tratamiento dispensado a las tecnologías que estarán disponibles en el futuro.

Dentro de los modelos económicos podemos encontrar una gran variedad de metodologías.

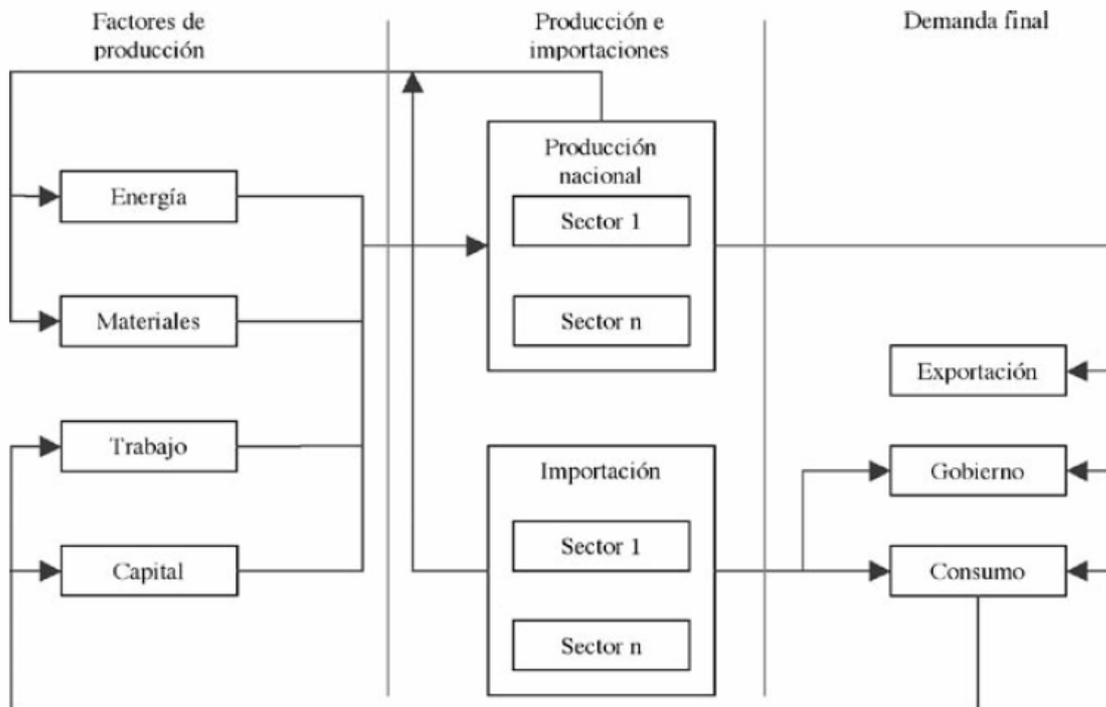
### Modelos de equilibrio general (modelos de equilibrio general computable)

La necesidad de mejorar la representación de la economía provocó la aparición de los primeros modelos con un enfoque económico explícito (top-down) basados en la teoría del equilibrio general. Los modelos de equilibrio general computable (CGE: computable general equilibrium) consideran el equilibrio simultáneo de todos los mercados, tanto de bienes y servicios como de factores productivos (Jorgenson y Wilcoxon, 1990).

Un enfoque complementario a este, que permite análisis más detallados, es el de los modelos de equilibrio parcial. En estos sólo se tiene en cuenta el equilibrio de un único mercado mientras el comportamiento del resto de la economía es dado (European Commission, 1995b).

En estos modelos, las empresas y los consumidores optimizan su comportamiento. Las empresas minimizan sus costes y los consumidores maximizan su utilidad. Se considera un número limitado de fuentes de energía en vez de tecnologías detalladas de producción o demanda de energía. La demanda de energía se deriva de la demanda de otros bienes y servicios, mientras que su producción requiere el uso de factores primarios y de bienes intermedios.

Figura 4. Estructura genérica de un modelo de equilibrio general



Fuente: González, H.(2005), pág. 43.

La figura anterior, muestra la estructura típica de un modelo de equilibrio general. Los agentes económicos que intervienen en un modelo de equilibrio general son: el sector productivo (encargado de la producción doméstica y de las importaciones), los consumidores, el gobierno y un sector que representa al resto del mundo (exportaciones e importaciones). El sector productivo se divide por sectores (grupos de bienes). Esta desagregación permite usar mecanismos de sustitución entre bienes basados en cambios en los precios. La demanda de cada sector productivo está formada por las demandas intermedias de otros sectores y por la demanda final de consumidores, gobierno e importaciones. Los productores determinan su combinación de entrada de factores primarios, bienes intermedios e inversión de manera que minimizan sus costes. Entre los factores de producción se encuentran varias fuentes primarias y secundarias de energía. Los consumidores maximizan una función de utilidad que define la evolución temporal de su gasto en consumo, su ahorro y su oferta de trabajo. El gobierno recibe impuestos, distribuye transferencias, y compra bienes y servicios.

Las variables económicas de cada región y de cada sector se calculan endógenamente a partir de las decisiones de producción y consumo de los agentes económicos. Las ecuaciones que modelan estas decisiones se basan en parámetros tecnológicos, preferencias, y restricciones sobre las políticas y los recursos. Lo más importante de estos modelos es que representan los ajustes de los mercados inducidos por cambios en los precios. Los modelos de equilibrio general calculan endógenamente el PIB, lo cual establece un vínculo directo entre las actividades energéticas y las económicas. El efecto que tiene una política determinada sobre el bienestar general puede estimarse a partir del cambio que produce en el PIB. En los modelos de equilibrio general el capital se reparte entre todos los sectores. El capital disponible en cada periodo es el resultado de la acumulación y la depreciación de las inversiones pasadas. Los precios de los bienes producidos y de los factores de producción varían de modo que los niveles de actividad satisfacen las condiciones de equilibrio de cada mercado:

Los precios se ajustan de modo que la demanda total de cada bien es igual a su oferta.

Los salarios se ajustan de manera que la demanda total de trabajo de los sectores productivos iguala a la oferta de trabajo generada por los consumidores.

Los tipos de interés alcanzan un nivel donde el capital usado por el sector productivo (la inversión) se iguala con el capital ofertado por los consumidores (el ahorro).

La demanda final del gobierno se determina equilibrando los ingresos y los gastos del sector público (los ingresos más el déficit son iguales al gasto).

Los modelos de equilibrio general se distinguen entre sí por su cobertura geográfica y sectorial, por su horizonte temporal, y por su detalle de representación del sector energético. Además, se distinguen por las especificaciones de sus funciones de producción y de utilidad (CES, Cobb-Douglas, Leontieff, etc.), y por sus hipótesis sobre comercio y gasto público. La literatura científica proporciona algunas revisiones y comparaciones de modelos de equilibrio general aplicados al análisis de problemas energéticos y medioambientales (Bergman, 1988; Bhattacharyya, 1996; Diesendorf, 1998; Loschel, 2002; Smith y Hill, 1982).

Algunos ejemplos de modelos de equilibrio general son los que aparecen en la tabla siguiente.

Tabla 5. Modelos de equilibrio general

Modelo	Referencia	Cobertura geográfica (nº de regiones)	Horizonte temporal	Nivel de detalle			Hipótesis de previsión de precios	Técnica de resolución
				Producción de energía	Demanda de energía	Sectores no energéticos		
DGEM	(Jorgenson y Wilcoxon, 1990)	Nacional (USA)	Largo (2050)	Bajo	Medio	Alto	Perfecta	Optimización
Goulder	(Goulder, 1995)	Nacional (USA)	Largo (2070)	Bajo	Bajo	Medio	Perfecta	Optimización
GREEN	(Burniaux et al., 1991)	Global (12)	Largo (2050)	Medio	Medio	Medio	Miope	Optimización
PNL SGW	(Edmonds et al., 1992)	Global (20)	Largo (2100)	Medio	Bajo	Bajo	Intermedio	Optimización
Whalley-Wigle	(Whalley y Wigle, 1992)	Global (6)	Largo (2100)	Bajo	Bajo	Medio	Miope	Optimización
GEM-E3	(European Commission, 1995a)	EU (11)	Medio (2010)	Medio	Alto	Alto	Perfecta	Optimización
PRIMES	(European Commission, 1995b)	Regional (UE)	Medio (2030)	Alto	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
E3ME	(Barker, 1998)	EU (14)	Medio (2010)	Medio	Medio	Medio	Miope	Optimización
EPPA	(Babiker et al., 2001)	Global (12)	Largo (2100)	Medio	Medio	Medio	Perfecta	Optimización
G-Cubed	(McKibbin y Wilcoxon, 1998)	Global (12)	Largo (2100)	Bajo	Bajo	Bajo	Perfecta	Optimización

Fuente: González, H. (2005), pág. 52.

**Modelos económicos de equilibrio parcial**

Los modelos económicos de equilibrio parcial pretenden, igual que los modelos tecnológicos, analizar los efectos provocados por una medida concreta sobre determinados sectores económicos. Por ejemplo, valorando los efectos que un impuesto sobre la energía provocaría sobre su producción y consumo.

Quizás la forma más sencilla de realizar este tipo de análisis sea utilizando datos agregados para distintas industrias, consumidores, o para el conjunto de la economía.

La tabla siguiente presenta los resultados obtenidos por algunos de estos modelos. Como se puede apreciar, los resultados son muy dispares, de tal manera que para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 14%, aproximadamente, es necesario un tipo impositivo de 321US\$/tCO<sub>2</sub> en la OCDE -excepto Norteamérica- en Vouyoukas (1992), o de 55US\$/tCO<sub>2</sub> en Barns y otros (1992).

Otra alternativa consiste en utilizar observaciones individuales, a través de modelos microeconómicos. Estos modelos, además de estudiar el comportamiento de un grupo de agentes frente a la introducción de una medida específica, permiten analizar la incidencia de la misma mediante diversos indicadores de bienestar. Como muestra la tabla siguiente, para el ejemplo de los efectos distributivos de los impuestos ambientales, estos no son necesariamente regresivos, tal y como se señala en la revisión bibliográfica realizada por Speck (1999). En la tabla siguiente se analiza cómo sería la aplicación de este tipo de modelos para el caso concreto de una medida de imposición fiscal medioambiental.

**Tabla 6. Resultados de algunos modelos de equilibrio parcial**

Trabajo	País o región (período)	Modelo	Efecto reciclaje	Tipo impositivo	Variación emisiones	Variación empleo	Variación PIB	Variación bienestar
Alfsen y otros (1995)	UE9 (2000)	Demanda y oferta de energía + RAINS (1993-2000)		10 US\$/boe	-9% CO2 -8% SO2 -6.3% NOx			
Vouyoukas (1992)	Mundial (2005)	IEA (1991-2005) sector energético		123 US\$/ton C (Norteamérica)	-14.6% CO2			
				321 US\$/ton C (resto OCDE)				
Barns y otros (1992)	Mundial (2005)	ERM (1990-2100) sector energético		55 US\$/ton C	-13.8% CO2		-0.37%	
Manne (1992)	Mundial (2010)	GLOBAL 2100 + ETA-MACRO (2000-2100)		58-133 US\$/ton C	-18% CO2		(-1.2, -0.3)%	
Symons y otros (1994)	UK (1990)	Microeconómico	No neutral	411 US\$/ton C	-20% CO2	Incidencia: Regresivo		
			IVA	474 US\$/ton C	-14% CO2			
Labandera y Labeaga (1999)	España (1994)	Microeconómico	Tanto alzado	800 pts./ton C	-3% CO2 sector eléctrico	Incidencia: Proporcional		

Nota: Variación de emisiones es la diferencia entre las emisiones estimadas con y sin política ambiental (impuesto ambiental, etc.) para un determinado año.

Abreviaturas: ton = toneladas; C = Carbono; boe = barriles de petróleo equivalente; toe = toneladas de petróleo equivalente; EV = variación equivalente; CC.SS = Cotizaciones Sociales; M = Millones; n.d. = dato no disponible.

Fuente: Rodríguez Méndez, M.E. (2002). "REFORMA FISCAL VERDE Y DOBLE DIVIDENDO. UNA REVISIÓN DE LA EVIDENCIA EMPÍRICA."

**Modelos Macroeconómicos (modelos híbridos)**

Los modelos macroeconómicos representan el tipo de modelos utilizados tradicionalmente en el análisis económico tras la Segunda Guerra Mundial.

Estos modelos servían para predecir la evolución de los principales agregados de la contabilidad nacional en el corto y medio plazo. Se dicen econométricos puesto que son modelos estimados econométricamente mediante técnicas de cointegración, principalmente, a partir de series de datos temporales de la contabilidad nacional. Construidos en la tradición del análisis keynesiano, consideran habitualmente la existencia de mercados en desequilibrio en el corto y medio plazo, de tal manera que permiten fluctuaciones en el nivel de empleo, en la capacidad productiva utilizada por las empresas, etc. Sin embargo, han estado sujetos a fuertes controversias tras la crítica realizada por Lucas (1976), quien pone en duda la utilidad de estos modelos para simular los efectos de las políticas públicas. Pese a todo, son modelos que pueden ofrecer buenas predicciones acerca de los efectos más inmediatos en el corto plazo.

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos por algunos de los trabajos empíricos que han utilizado este método de análisis. Queremos destacar el trabajo de Beaumais y Bréchet (1995), quienes utilizan un modelo híbrido formado por HERMES y el modelo tecnológico MIDAS. Los modelos anteriores de equilibrio parcial y general pueden ser también modelos macroeconómicos.

A continuación se incluyen algunos resultados que pueden obtenerse con dichos modelos si son aplicados a la introducción de una medida de imposición fiscal para reducir los impactos medioambientales.

**Tabla 7. Resultados de algunos modelos macroeconómicos**

Trabajo	País o región (período)	Modelo	Efecto reciclaje	Tipo impositivo	Variación emisiones	Variación empleo		Variación PIB		Variación bienestar
Barker y Köhler (1998)	UE11 (2010)	E3ME (1999-2010)	CC.S5	16 US\$/boe	-10% CO2	+1.2%	Positivo (11)	+1.4%	Positivo (10) Negativo (1)	Menos regresivo
			Déficit		-10.6% CO2	-0.3%	Positivo (5) Negativo (6)	+0.1%	Positivo (6) Negativo (5)	Más regresivo
Standaert (1992)	UK Alemania Francia Italia (2005)	HERMES (1993-2005)	CC.S5	10 US\$/boe	-4.5% CO2	(+0.1, +0.7)%		(-0.3, 0.2)% positivo (1); negativo (3)		
			Renta personal			(-0.6, +0.3)% positivo (3); negativo (1)		(-0.7, 0)% negativo (3)		
European Commission (1994)	UE12 (2000)	QUEST (1993-2000)	CC.S5 (general)	10 US\$/boe		+1%		+1% PIB		
			CC.S5 (no cuantificados)			+2.2%		+0.4%		
Shackleton y otros (1992)	USA (2010)	DRI LINK (1990-2010)	Tanto alzado	39,8 US\$/ton C	-6.5%(DRI) n.d.(LINK)			-0.7%(DRI) -0.3%(LINK)		
			Déficit		-6.3%(DRI) -7%(LINK)			-0.2%(DRI) -1.1%(LINK)		
			Renta personal		-6.5%(DRI) -3%(LINK)			-0.7%(DRI) -0.4%(LINK)		

Fuente: Rodríguez Méndez, M.E. (2002).” REFORMA FISCAL VERDE Y DOBLE DIVIDENDO. UNA REVISIÓN DE LA EVIDENCIA EMPÍRICA.

**Modelos generales estáticos**

Los modelos de equilibrio general estático representan la versión aplicada de los modelos teóricos de equilibrio general de Walras. Los fundamentos microeconómicos son, por tanto, muy importantes en este tipo de metodologías. La segunda característica de este método de análisis es la forma en la cual son determinados los parámetros fundamentales del modelo. Algunos de ellos, principalmente las elasticidades de sustitución, son fijados a priori -tomados habitualmente de la literatura empírica-. Los restantes parámetros son ajustados mediante calibración, de tal manera que el modelo teórico es capaz de reproducir los datos económicos de un determinado año.

En tercer lugar, no permiten analizar la evolución o la senda económica entre el viejo y el nuevo equilibrio tras una reforma fiscal verde. Por tanto, no es posible conocer los costes de transición entre ambos. Son, en definitiva, modelos de análisis que nos permiten comparar una situación de equilibrio ex-ante, o actual, con otra situación hipotética, ex-post, posterior a una reforma.

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos por algunos de los trabajos más relevantes. El trabajo de Hakonsen y otros (1997), incluye entre las medidas de bienestar los efectos externos evitados por una medida específica referente a la imposición ambiental.

**Tabla 8. Resultados obtenidos de algunos modelos de equilibrio general estáticos**

Trabajo	País o región (período)		Modelo	Efecto reciclaje	Tipo Impositivo	Variación emisiones	Variación empleo	Variación PIB	Variación bienestar		
Hakonsen y Mathiesen (1997)	Noruega (1991)			Tanto alzado	107 US\$/ton C	-20% CO2			-1%		
				CC.SS	157 US\$/ton C				-0.3%		
				+ Externalidades	CC.SS				n.d.	+0.7%	
Frandsen y otros (1996)	Dinamarca (1989)		GESMEC	Tanto alzado	173 US\$/t C	-25	0	-0.4			
Bergman (1991)	Suecia (2000)			Tanto alzado	40 US\$/t C	-10		0			
					86.6 US\$/t C	-20		-1.4			
Whalley y Wigle (1991b)	Mundial (1990-2030)			Tanto alzado	450 US\$/ton C	-50		-1 EU -2.5 OECD	Negativo		
Edwards y Hutton (1999)	(1992)	UK	FRW + RAINS	IVA	30 ECU/ton C	-17.15% CO2		0%	+0.01% EV		
		Alemania							-20.44% CO2	-0.06%	-0.04% EV
		UE12							-20.23% CO2	+0.02%	+0.01% EV
Bhringer y Rutherford (1997b)	Alemania (1990)			Tanto alzado	37 US\$/ton C	-20% CO2			-10000M US\$		

Nota: Variación de emisiones es la diferencia entre las emisiones estimadas con y sin política ambiental (impuesto ambiental, etc.) para un determinado año.

Abreviaturas: ton = toneladas; C = Carbono; boe = barriles de petróleo equivalente; toe = toneladas de petróleo equivalente; EV = variación equivalente; CC.SS = Cotizaciones Sociales; M = Millones; n.d. = dato no disponible.

Fuente: Rodríguez Méndez, M.E. (2002).” REFORMA FISCAL VERDE Y DOBLE DIVIDENDO. UNA REVISIÓN DE LA EVIDENCIA EMPÍRICA.

### Modelos de equilibrio general dinámicos

Los modelos dinámicos de equilibrio general, al contrario de su versión estática, permiten analizar la evolución de una economía a lo largo del tiempo, ofreciendo los efectos de una hipotética medida específica tanto en el corto, el medio, como en el largo plazo. Son, por tanto, un método de análisis más completo, y que requiere un elevado nivel de información y complejidad. Por esta razón, la principal característica de los modelos dinámicos de equilibrio general frente a los modelos estáticos es que habitualmente representan una economía más agregada (un único consumidor, pocos sectores económicos).

De los trabajos recogidos en la tabla siguiente debemos destacar, en primer lugar, los realizados por Jorgenson y otros (1993), Bye (1996), y Carraro y otros (1996). En dichos trabajos las funciones de demanda, tanto de factores para las empresas como de bienes para los consumidores, han sido estimadas econométricamente. Por esta razón, estos modelos reciben el calificativo de modelos econométricos de equilibrio general. En segundo lugar, algunos autores han tratado de integrar elementos económicos y ambientales que interaccionan entre ellos. Son los denominados modelos económicos y del clima integrados o modelos de análisis integrado (Integrated Assessment Models en terminología anglosajona). Un buen ejemplo de un modelo de análisis integrado es RICE. Nordhaus (1996) estima con este modelo, por ejemplo, que la política ambiental óptima de ámbito mundial supondría reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 10% en el año 2010, utilizando para ello un tipo impositivo del 8US\$/tCO<sub>2</sub>. Dicha política permitiría mejorar el bienestar social, aunque reduciría de manera no significativa el ritmo de crecimiento del PIB mundial. Por su importancia y actualidad, en el apartado siguiente se tratan los modelos anteriores de evaluación integrada del cambio climático.

Tabla 9. Resultados obtenidos de algunos modelos de equilibrio general dinámico

Trabajo	País o región (período)	Modelo	Efecto reciclaje	Tipo impositivo	Variación emisiones	Variación empleo	Variación PIB	Variación bienestar	
Welsch (1996)	UE9 (20020)	LEAN-TCM (1996-2020) salarios:	Inelástico	CC.SS	20 US\$/boe EC tax	-6.47% CO2	+2.78%	+1.85%	
			Elástico			-7.8% CO2	+0.71%	+0.2%	
	Alemania (2020)		Inelástico			-8.32% CO2	+2.97%	+1.86%	
			Elástico			-9.45% CO2	+0.75%	+0.14%	
Bye (1996)	Noruega (2000)	MSG-6 (1992-2050)	CC.SS	100 US\$/ton CO2	-13.5% CO2	Positivo poco significativo	Positivo poco significativo	Positivo poco significativo	
Nordhaus (1996)	Mundial (2010)	RICE (1990-2100)	Tanto alzado	8 US\$/ton CO2	-10% CO2			Positivo	
Carraro y otros (1996)	UE12 (2010)	WARM (1995-2010)	CC.SS	10 ECU/toe	n.d.	Positivo	Positivo no significativo		
	6 mayores países (2010)				(-4%, +4%) positivo negativo (2)	(4); (0%, +1%)	Positivo no significativo		
Proost y Regemorter (1996)	Bélgica (1998)	salarios flexibles (1991-2005)	CC.SS	10 US\$/boe EC tax	-13.3% CO2	0	+0.2%	Negativo	
			IRPF		-13.3% CO2		+0.2%		
			No neutral		-12.2% CO2		+0.2%		
		salarios fijos (1991-2005)	CC.SS	-17% CO2	-176000	-5.1%			
			IRPF	-18.6% CO2	-243000	-7.1%			

Fuente: Rodríguez Méndez, M.E. (2002). "REFORMA FISCAL VERDE Y DOBLE DIVIDENDO. UNA REVISIÓN DE LA EVIDENCIA EMPÍRICA."

### Modelos de evaluación integrada del cambio climático

Como ponen de manifiesto diversos estudios, (IPCC, 1996; Nierenberg, 1995; US National Research Council, 1983), el desarrollo económico influye sobre el clima, mediante la contaminación, y viceversa, a través del coste de reducción de la contaminación y de los efectos de los cambios de los patrones climáticos. (Nordhaus, 1995) ofrece una descripción de la relación entre el clima y el desarrollo económico. (Fernández-Armesto, 2002) explica desde un punto de vista más general la relación entre clima, medio ambiente y desarrollo humano. De acuerdo con (Rotmans y Dowlatabadi, 1998) “la evaluación integrada del cambio climático es un proceso interdisciplinario que combina, interpreta, y comunica conocimientos entre diferentes disciplinas científicas de un modo tal que el conjunto completo de interacciones causa-efecto de un problema puede evaluarse desde una perspectiva sinóptica que tiene dos características;

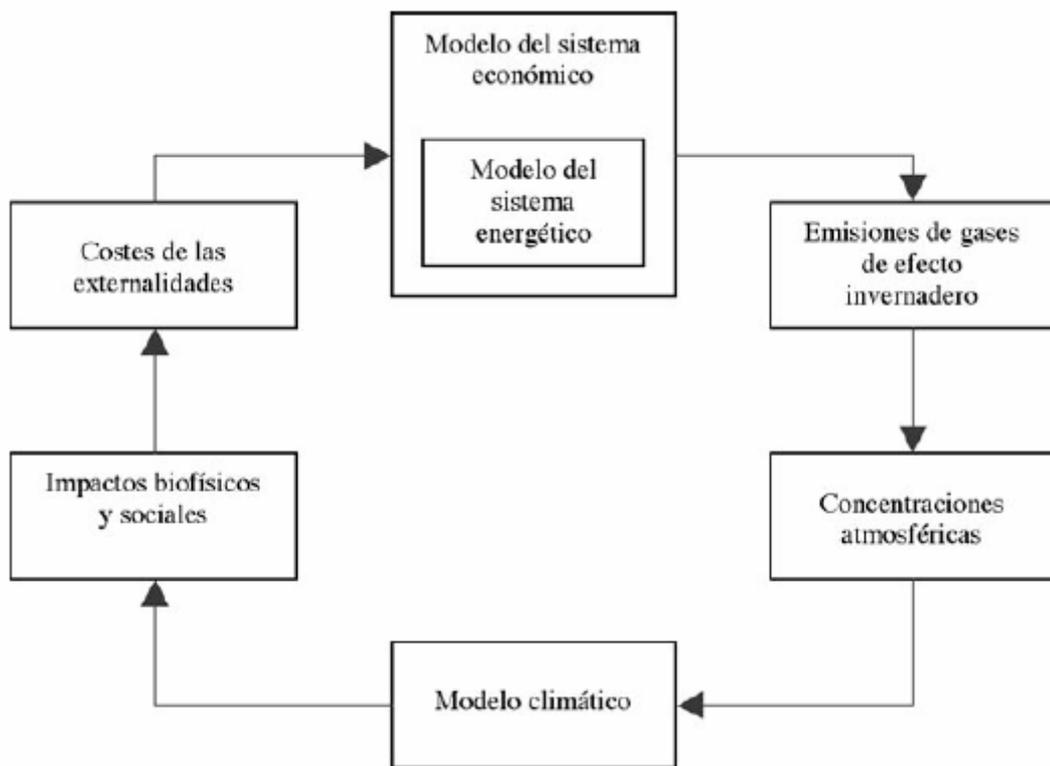
Debe tener un valor añadido en comparación con una evaluación unidisciplinar,

Debe proporcionar información útil como apoyo para la toma de decisiones

Esta definición de evaluación integrada requiere que toda la variedad de causas, mecanismos e impactos del cambio climático sean abordadas”. Los modelos de evaluación integrada del cambio climático (IAM: integrated assessment models of climate change) son por tanto los que combinan modelos del sistema económico y energético con modelos climáticos, ecológicos, oceanográficos y, en algunos casos, sociológicos. Los modelos IAM pueden usarse para evaluar políticas o para optimizarlas (IPCC, 1996). Debido a la amplitud de los sistemas que modelan, al horizonte de tiempo que consideran, y a su alto nivel de agregación, estos modelos no suelen ser aptos para analizar el impacto de tecnologías específicas en el cambio climático. Lo que sí se puede estudiar con ellos son los impactos no representados en los modelos puramente energéticos o económicos como los cambios en la composición de la atmósfera o en el nivel del mar.

La figura siguiente muestra la estructura genérica de un modelo de evaluación integrada. A partir de un modelo económico, o de unas proyecciones totalmente exógenas, se estiman las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del crecimiento económico y de los patrones de uso energético. Las emisiones de gases de efecto invernadero producen cambios en la composición atmosférica, que un modelo climático traduce en impactos biofísicos e incluso sociales. El ciclo se completa introduciendo la valoración económica de estos daños en el módulo económico inicial.

Figura 5. Estructura genérica de un modelo de evaluación integrada



Fuente: Hidalgo González, I. (2005) “Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y medioambientales: Descripción y aplicaciones del modelo POLES”. Revista de Economía Mundial 13, pág. 43.

Los modelos IAM pueden ser completos o parciales. Los primeros son aquellos que modelan todo el ciclo completo representado en la figura anterior. Los modelos parciales suelen tomar como exógenas las proyecciones sobre emisiones, prescindiendo de un módulo del sistema económico. La literatura científica proporciona algunas revisiones y comparaciones de modelos IAM (Foell, 1980; Grubb, 1993; Idso, 1984; Kickert et al., 1999; Mohnen et al., 1991; Rotmans y Dowlatabadi, 1998). La tabla siguiente resume las características generales, los determinantes fundamentales de la oferta y demanda de energía, y los mecanismos para representar el cambio tecnológico de cada grupo de modelos.

Tabla 10. Modelos de evaluación integrada

Modelo	Referencia	Cobertura geográfica de regiones)	Horizonte temporal	Nivel de detalle			Hipótesis de precios	Técnica de resolución
				Clima	Economía	Atmósfera		
CETA	(Peck y Teisberg, 1992)	Global (1)	Largo (2100)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
MERGE	(Manne et al., 1995)	Global (5)	Largo (2250)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
IMAGE	(Alcamo, 1994)	Global (13)	Largo (2100)	Alto	Bajo	Alto	Miope	Simulación
TARGETS	(Rotmans et al., 1994)	Global (2)	Largo (2100)	Alto	Bajo	Alto	Miope	Simulación
AIM	(Kainuma et al., 2000)	Regional (Pacífico)	Largo (2100)	Alto	Bajo	Alto	Miope	Simulación
Connecticut	(Yohe y Wallace, 1995)	Global (1)	Largo (2100)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
CRAPS	(Hammit y Adams, 1996)	Global (2)	Medio (2020)	Bajo	Bajo	Bajo	Miope	Optimización
CSERGE	(Maddison, 1995)	Global (1)	Largo (2250)	Bajo	Bajo	Bajo	Miope	Optimización
DICE	(Nordhaus, 1994)	Global (1)	Largo (2105)	Bajo	Bajo	Bajo	Perfecta	Optimización
CFUND	(Tol et al., 1995)	Global (9)	Largo (2100)	Bajo	Bajo	Bajo	Miope	Optimización
DIAM	(Chapuis et al., 1995)	Global (1)	Largo (2100)	Bajo	Bajo	Bajo	Miope	Optimización
ICAM	(Dowlatabadi y Morgan, 1993)	Global (7)	Largo (2100)	Alto	Bajo	Alto	Miope	Simulación
IGSM	(Prinn et al., 1998)	Global (12)	Largo (2100)	Alto	Alto	Alto	Miope	Simulación
MARIA	(Mori, 1995)	Global (7)	Largo (2105)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
ProCAM/ MiniCAM	(Edmonds et al., 1997)	Global (11, 16)	Largo (2200)	Alto	Alto	Alto	Miope	Simulación
PAGE	(Hope et al., 1993)	Global (2)	Largo (2100)	Alto	Alto	Bajo	Miope	Simulación
PEF	(Cohan et al., 1994)	Global (12)	Largo (2100)	Alto	Bajo	Bajo	Miope	Simulación
RICE	(Nordhaus y Yang, 1996)	Global (6, 10)	Largo (2105)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
SLICE	(Kolstad, 1996)	Global (1)	Largo (2105)	Bajo	Alto	Bajo	Perfecta	Optimización
FUGI	(Onishi, 2001)	Regional (200, 80)	Medio (2015)	Medio	Bajo	Medio	Miope	Simulación
MAGICC	(Wigley, 1994)	Global (1)	Largo (2100)	Alto	Alto	Alto	Miope	Simulación

Fuente: González, H.(2005), pág. 50.

### 4.1.3 Características generales de los modelos agregados

A continuación se incluye una tabla resumen de las principales características que reúnen los modelos anteriores.

En la tabla siguiente aparecen recogidos cuatro grupos principales de entre todas las categorías anteriores:

- Modelos energéticos: también denominados a lo largo del documento como modelos tecnológicos y que algunos autores denominan también, modelos ingenieriles o de bottom-up.
- Respecto de los modelos económicos (modelos de top-down) destacamos algunos grupos de los más utilizados en la actualidad. La clasificación siguiente muestra su relación con los modelos anteriores y como han mejorado su representación de las variables económicas hasta convertirse en una herramienta actual para la toma de decisiones al más alto nivel.
- Modelos híbridos: Denominados así por algunos autores porque nos permiten representar las interacciones entre el sistema energético y el resto de la economía. En el documento actual han sido denominados también como modelos macroeconómicos. En ellos el crecimiento económico se describe mediante una función agregada de producción en la que las diferentes formas de energía se agregan como un factor primario de producción más. Las actividades de producción de energía no pueden describirse separadamente según esta formulación, por lo cual la función agregada de producción se acopla a un modelo tecnológico detallado que represente adecuadamente el funcionamiento del sistema energético.
- Modelos de equilibrio general: Modelos que mejoran la representación económica. En este grupo se encuentran los modelos de equilibrio general computable, los modelos estáticos y dinámicos, etc.
- Modelos de evaluación integrada: cuya característica principal es la de combinar los modelos del sistema económico y energético con los modelos climáticos, ecológicos, oceanográficos y en algún caso sociológicos.

Todos ellos se basan en un conjunto dado de datos e hipótesis que conforman un escenario.

Entre las variables de mayor interés de un modelo energético se encuentran: el consumo total de energía, los precios y las cantidades de cada fuente de energía, y la asignación de los recursos entre las diferentes demandas de energía que compiten entre si. Otros resultados típicos de los modelos E3 son las emisiones de gases de efecto invernadero, y los costes de control y reducción de las emisiones. En cuanto a las tecnologías, se obtiene la evolución de sus costes, sus cuotas de mercado y su grado de difusión. Los resultados específicos de un modelo dependen mucho de su estructura.

Un ejemplo de los resultados que puede proporcionar un modelo E3 como POLES puede encontrarse en el informe World energy, technology and climate policy Outlook 2030 (European Commission, 2003)<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> El informe puede obtenerse en <http://energy.jrc.es/Pages/EnergyOutlooks.htm>

Por último, destacar a modo de conclusión que el grado de incertidumbre en los resultados es muy difícil de cuantificar puesto que proviene de una combinación muy compleja de datos, hipótesis y ecuaciones (Cocks et al., 1998; Craig et al., 1980; Shlyakhter et al., 1994). El hecho de que un modelo sea capaz de reproducir muy bien la evolución pasada de un sistema no implica que sus proyecciones sean menos inciertas que las de otros modelos que no replican tan bien el pasado. Puesto que los métodos de modelado y los datos disponibles son limitados, los resultados de los modelos E3 deben ser vistos más bien como indicadores de hacia dónde pueden conducir las hipótesis que los fundamentan, en vez de ser interpretados como predicciones exactas del futuro.

Estos modelos nos ofrecen cálculos generales, agregaciones globales o datos altamente agregados que en mayor o menor medida representan un sesgo para el conocimiento concreto de los efectos negativos que conlleva la actividad de transporte por eso resulta de gran importancia los desarrollos que se llevan a cabo dentro del proyecto EnerTrans.

Tabla 11. Características generales de los modelos agregados

Tipo de modelo	Características generales	Demanda de energía		Producción de energía		Medio ambiente	
		Factores determinantes	Eficiencia energética	Combinación de oferta	Cambio tecnológico	Atmósfera y clima	Impactos y externalidades
Sector energético	No se modelan explícitamente bienes energéticos. Las tecnologías de producción y demanda de energía se representan con detalle.	La demanda se calcula en función de las proyecciones económicas y demográficas, y es sensible a los precios de la energía.	Hay una rotación explícita del capital y una mejora implícita de los patrones de demanda.	Las ofertas compiten en función de los costes y de otros factores dependientes del uso final.	Los agentes expanden su capacidad y modifican su tecnología optimizando su comportamiento.	Se calculan las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del consumo de combustibles y de sus características físicas.	No se consideran.
Híbridos	El PIB es endógeno, pero la economía produce un único bien agregado. Se calcula el equilibrio para el bien agregado, los factores primarios y los bienes energéticos agregados. La producción de energía se modela con detalle.	A partir de una función agregada de producción. La maximización de una utilidad determina la evolución del consumo.	La intensidad energética baja por una mejora exógena de la eficiencia energética, y por mecanismos de sustitución entre combustibles y factores inducidos por cambios en los precios.	Se escoge la combinación de coste mínimo para maximizar la utilidad del consumo.	Determinado por los límites de penetración en el mercado, el agotamiento de los recursos, y por costes específicos.	Se calculan las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del consumo de combustibles y de sus características físicas.	No se consideran.
Equilibrio general	El PIB es endógeno, y se distingue la producción de cada sector. Se calcula el equilibrio del mercado energético, de los demás factores primarios de producción y todos los bienes considerados. La tecnología no se representa explícitamente.	Las empresas minimizan sus costes para satisfacer la demanda. Los consumidores se comportan de modo que maximizan una utilidad.	El crecimiento de la productividad viene dado por los precios y la sustitución entre factores.	Los agentes optimizan una demanda endógena precios endógenos.	Se representa implícitamente en las funciones de coste estimadas para el sector energético.	Se calculan las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del consumo de combustibles y de sus características físicas.	En algunos modelos se tienen en cuenta los costes de algunas externalidades, y los costes de las medidas de reducción de emisiones.

Fuente: González, H. (2005), pág. 56.

## 4.2. Modelos de inventario de emisiones y consumos de energía.

Basan sus cálculos en datos fundamentalmente desagregados. Los modelos desagregados permiten dar una mayor relevancia al cálculo del consumo de energía y las emisiones. Todos ellos suelen estar basados en la relación existente entre la actividad desarrollada y los contaminantes producidos. De esta forma, resulta fundamental obtener un conocimiento adecuado de dicha actividad de transporte y la elección de unos factores que recojan adecuadamente los contaminantes emitidos. Este último cálculo puede realizarse de forma inmediata (como toma de datos desde el mismo vehículo) o de forma indirecta a través del consumo energético.

Existe una gran variedad de métodos de cálculo de consumos y emisiones pero todos ellos pueden ser agrupados en cuatro grandes categorías<sup>7</sup>.

### 1. Cálculo basado en la actividad de transporte

Éste es el método básico y común para calcular las emisiones de los vehículos por carretera y para el consumo de energía para los modos del no-carretera; las emisiones calculadas de esta manera pueden incluir las emisiones calientes, emisiones del comienzo del viaje cuando el motor no se calienta completamente, y las emisiones de evaporación.

### 2. Cálculo basado en el consumo de energía

Éste es el método estándar para las emisiones de modos del no-carretera, y también para las emisiones de la SO<sub>2</sub> y del Pb de los vehículos de carretera. Los tipos de la emisión incluida (caliente, comienzo y de evaporación) dependen de la estimación de la energía consumida.

### 3. Cálculos basados en el contenido de carbono del combustible -hidrocarburos (fija el punto de interés en las emisiones):

Éste método calcula las emisiones del consumo de combustible o del dióxido de carbono basándose en la ecuación que representa el equilibrio total del carbono en el combustible y sus productos de la combustión. Por ejemplo, para los vehículos de carretera (con los motores de combustión), el método se aplica para calcular el consumo de combustible, para otros modos se utiliza en el cálculo del CO<sub>2</sub>. Para el análisis se puede diferenciar entre emisiones en caliente, en frío y emisiones de evaporación.

### 4. Cálculos específicos del agente contaminador

Algunos agentes contaminadores son subcategorías de otras la clasificación de los compuestos orgánicos volátiles (VOC spec) son parte de los VOC totales y las fracciones del tamaño de partícula son parte del total de las partículas en suspensión (P.M.). Las estimaciones pueden hacerse a través del agente contaminador y de los detalles principales que participan en la distribución y tamaño del mismo, y entre otros pueden dividirse en: emisión en caliente (estado óptimo de funcionamiento del motor), en frío (momento de puesta en marcha del motor) y las emisiones por evaporación (al llenar el depósito de combustible).

---

<sup>7</sup> TRL (1999) Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. Edited by A.J.Hickman in conjunction with COST Action 319.

Dependiendo del modo de transporte, del agente contaminador a calcular y del motor que se utilice se aplicará un método u otro.

Los métodos de cálculo de emisiones contaminantes pueden resumirse en la tabla siguiente.

Tabla 12. Métodos para el cálculo de emisiones contaminantes según modo de transporte y tipología del motor.

		Motores de combustión				Motores eléctricos
		Carretera	Ferrocarril	Marítimo	Aéreo	Carretera, Ferrocarril
Consumo combustible		1	2	2	2	2
Emisiones derivadas del funcionamiento del motor y emisiones evaporativas	CO <sub>2</sub>	2, 3	5	5	5	
	CO	2, 3	4	4	4	
	VOC	2, 7	4	4	4	
	NO <sub>x</sub>	2, 3	4	4	4	
	PM	2, 3				
	SO <sub>2</sub>	4				
	Ph	4				
	N <sub>2</sub> O	2, 3				
	CH <sub>4</sub>	2, 6				
	NMVOG	2, 6				
	VOC spec.	7				
	PM size	8				
	NH <sub>3</sub>	2				
	H <sub>2</sub> S	2				
NO <sub>2</sub>	2					
HM	7					
Emisiones en la producción de energía	CO <sub>2</sub>	4	4	4	4	4
	CO	4	4	4	4	4
	VOC	4	4	4	4	4
	NO <sub>x</sub>	4	4	4	4	4
	PM	4	4	4	4	4
	SO <sub>2</sub>	4	4	4	4	4
	CH <sub>4</sub>	4	4	4	4	4
NMVOG	4	4	4	4	4	

Fuente: TRL (1999) Methodology for calculating transport emissions and energy consumption.

Donde:

1. Indica el consumo de combustible es una función de f (CO, CO<sub>2</sub>, VOC, PM) que incluye el mencionado cálculo del equilibrio del carbono.
2. Calculado de acuerdo con la actividad que se realice en cada uno de los modos.
3. Factores de emisión calculados como la suma de las emisiones del motor en caliente y en frío.  
(Emisiones = Emisiones en caliente + Emisiones en frío).
4. Emisiones = f (consumo de energía) teniendo en cuenta los factores específicos de para las distintas emisiones.
5. Emisiones =f (consumo de combustible, CO, VOC, PM) (teniendo en cuenta el cálculo de los niveles del carbono).
6. NMVOG + CH<sub>4</sub> = VOC
7. VOCespecies = f (VOC gases de combustión, VOC evaporativas, VOC composición).

8. PM tamaño = f (PM, PM distribución tamaño).

9. Emisiones Totales = Emisiones en caliente + Emisiones en frío + Emisiones de evaporación.

En los párrafos anteriores se destacaba la importancia de la relación existente entre actividad de transporte y consumos energéticos (emisiones). En el apartado siguiente se analiza dicha relación y se muestra además cómo las políticas europeas en defensa de un crecimiento basado en el desarrollo sostenible han ido produciendo que los modelos de movilidad evolucionen para poder ofrecer al menos un cálculo aproximado de las emisiones.

## 4.2.1 Modelos de movilidad y modelos de emisiones

Una cuestión que resulta siempre de gran interés a la hora de la modelización de realidades es la selección del modelo, y para ello debemos contar no sólo con los datos disponibles sino con el objetivo del modelo en sí mismo.

Las emisiones y el consumo de energía están asociados a la actividad del vehículo (para cada modo de transporte) por lo que tendremos que tener en cuenta el vínculo entre los modelos de movilidad y los modelos de emisión y consumo de energía. Ambos representan dos componentes del mismo proceso de modelización y no deben ser considerados de forma independiente pero sólo algunos autores los consideran de forma vinculada (Hammarström, 1996<sup>8</sup>) y este es el motivo por el que los modelos de movilidad no ofrecen (pese a los esfuerzos actuales) de forma directa unos datos adecuados y apropiados para los modelos de emisiones. Algunos programas de modelización de transporte, si se programan a través de macros ofrecen datos de consumo de energía pero no proceden de modelos de emisiones sino de aplicación de factores sobre los datos resultantes del modelo de movilidad.

### Modelos de movilidad

Los modelos de demanda de transporte vienen inducidos por factores tales como el desarrollo económico, la evolución demográfica, las cuestiones de política de transportes y los factores sociales. Para explicar esta demanda existen distintos modelos disponibles entre los que destacan los modelos econométricos que explican la variable relativa a la movilidad como función de las variables socio-económicas más importantes. Por otra parte los modelos de movilidad (también denominados como modelos de tráfico) son utilizados para modelizar los flujos de transporte en una red.

Estos modelos son modelos econométricos y por lo tanto estocásticos, es decir, explican la variable de interés (variable dependiente) como función de las variables socio-económicas (variables explicativas) que se presentan en Series Temporales (anuales, cuatrimestrales o mensuales). Por tanto, el objetivo de los modelos es entender los principales determinantes de la variable dependiente para el periodo de tiempo considerado. En este ámbito, Gilson B. et al. (1997)<sup>9</sup> distinguen tres modelos diferentes

---

<sup>8</sup> Hammarström U. (1996): Exhaust Emissions from Road Traffic - Description of Driving Patterns by Means of Simulation Models. In Estimation of pollutant emissions from transport, proceedings of the workshop on 27-28 Nov. 1995, European Commission, DG VII, Brussels, p. 87-97.

<sup>9</sup> Gilson B., V. Favrel & W. Hecq (1997): Overview and Analysis of the links between "Models of Mobility" and "Models of Pollutant Emissions from Transport". Centre for Economic and Social Studies on the Environment, Université Libre de Bruxelles, Brussels, 48p.

según la variable dependiente objeto del estudio: indicadores de movilidad (Greene, 1992)<sup>10</sup>, consumo de combustible (Epsey, 1996)<sup>11</sup>, o una variable relacionada con la flota de vehículos (Madre, 1995)<sup>12</sup>.

Todos estos modelos consideran los ingresos y los precios/costes como variables explicativas y son introducidas como inputs exógenos, sólo algunas variables socio-económicas son tenidas en cuenta en estos modelos pero se muestran como poco significativas. Los datos referentes a las variables explicativas y dependientes son en general relativamente accesibles pero sólo a niveles agregados (al nivel nacional).

Los modelos de tráfico frente a los modelos econométricos anteriores utilizan unos datos mas desagregados. Estos modelos de demanda de transporte tienen en cuenta la red de transporte predefinida y nos ofrecen la estimación de matrices origen-destino. Los modelos clásicos son los modelos de cuatro etapas: generación, distribución, elección modal y asignación.

Un elemento fundamental de estos modelos es que pueden ofrecer datos sobre las velocidades medias en relación a los flujos de tráfico (diferenciando vehículo privado y furgonetas por hora). La velocidad del tráfico es una función que depende de diversas características: capacidad, número de carriles, características de la red (pendientes, etc), ciclo semafórico, etc.

### Modelos de emisiones y consumos energéticos

Los modelos de emisiones, y como punto inicial de consumos energéticos, se elaboran a través de los datos de transporte en función de variables explicativas. Los modelos de emisiones se centran principalmente en las “hot emissions” pero algunos programas ya incluyen metodologías para tener en cuenta las emisiones de aceleración y las emisiones de evaporación teniendo en cuenta, entre otros, la pendiente y el factor de carga. El programa COPERT y en especial a partir de su versión II incluye este tipo de elementos.

### Vínculos entre los modelos econométricos de demanda de transporte y los modelos de transporte por carretera (modelos de movilidad).

En primer lugar los datos necesarios para una perspectiva común hacen referencia (al menos para las emisiones en caliente) a los siguientes datos: número de vehículos por categoría, kilómetros de conducción realizados por categoría de vehículos para cada una de las distintas secciones de la carretera (no hablamos en este caso de otros modos de transporte), y velocidad media por tipo de carretera que se incluye en el estudio (estos datos ya los incluye COPERT) o en su defecto situaciones de tráfico típicas para la red de carreteras en relación a los distintos tipos de las mismas (modelo desarrollado para el caso Alemán y aplicado también en Suiza)<sup>13</sup>

---

<sup>10</sup> Greene D.L. (1992): Vehicle Use and Fuel Economy: How Big is the 'Rebound' Effect. *The Energy J.*, 13(1), p. 117-143.

<sup>11</sup> Epsey M. (1996): Explaining the variation in Elasticity Estimates of Gasoline Demand in the U.S.: A Meta-Analysis. *The Energy J.*, 17(3), p. 49-60.

<sup>12</sup> Madre J. L., Y. Bussière & J. Armoogum (1995): Demographic dynamics of mobility in urban areas: a case study of Paris and Grenoble. *World Congress on Transport Research*, 16-21 July 1995, Sydney, Australia.

<sup>13</sup> INFRAS (1995): Workbook / Handbook on emission factors for road transport, version 1.1. INFRAS, Bern, Umweltbundesamt, Berlin, and Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

Si tenemos en cuenta el resto de emisiones, caracterizadas en los párrafos anteriores, los requisitos de información necesarios serán mayores para llevar a cabo la modelización.

En segundo lugar, si queremos considerar la evolución futura de la contaminación atmosférica y el posible impacto de políticas que lleven a su reducción, deberán tenerse en cuenta los modelos que antes denominábamos como modelos econométricos. Estos modelos permiten predecir los posibles cambios en el consumo de combustible, los vehículos kilómetro, o la composición de la flota de vehículos. A la hora de establecer el vínculo con los modelos de consumos surgen los problemas debido al carácter agregado de los datos (la movilidad se modeliza a través de datos globales) y estos modelos pueden no guardar relación con la velocidad media (variable que es completamente exógena).

Los valores agregados significan que no ofrecen valores sobre la evolución futura de la movilidad por modo de transporte, categoría de vehículo, etc. Para solucionar este problema se han aplicado otros modelos econométricos que separan entre los distintos modos en concreto urbano y no urbano para luego agregarlos aunque hasta el momento no han tenido mayores desarrollos. En este ámbito tenemos que mencionar los programas estándar de modelística de transporte (EMME/2, Trips, etc.) que proporcionan resultados sobre consumos de energía y emisiones a través de una simplificación por medio de la aplicación de ratios de consumo y emisiones.

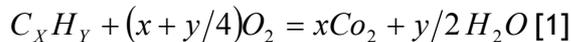
Cuando hablamos de consumos de combustible, los modelos no hacen diferencias entre los distintos tipos de combustible. Una vez más si dispusiéramos del consumo anual total para cada tipo de combustible, se podrían establecer los modelos basados en dichos datos de series temporales. COPERT II ya permitía este tipo de cálculos.

Los modelos econométricos nos ofrecen además información sobre la composición del coche o sobre la tasa de motorización que son de gran interés para todos los tipos de emisiones incluso pudiendo diferenciar los modelos según la antigüedad del vehículo. Estos modelos nos ofrecen una vez más información agregada sobre la flota de vehículos en su conjunto. En realidad, los modelos de emisiones requieren no sólo el número total de coches por país/ región sino también la estructura de la flota de coches (clasificada por tipo de combustible o por capacidades o por edad del vehículo).

Más allá de este tipo de modelos existen otros cuya complejidad debe ser alimentada a través de los datos que el propio modelo requiere. Dicha complejidad que se produce por el intento de profundizar en las cuestiones anteriores en cualquier caso no cubre, ni cubrirá totalmente la casuística que se produce en la realidad presente y futura.

## 4.2.2 Modelos de consumo basados en el contenido de carbono

La combustión de un hidrocarburo (como la gasolina, el diesel y el gas natural comprimido) en el aire, cuando se produce bajo condiciones ideales, sigue una sencilla ecuación química:



Donde:

$C_xH_y$ , es el hidrocarburo (un compuesto formado por carbono e hidrógeno);

$O_2$ , es el oxígeno del aire;

$CO_2$ , es el dióxido de carbono;

$H_2O$ , es el agua

En la realidad, la combustión del carburante no se produce según esta ecuación ideal, parte del carbono se oxida de forma incompleta y se convierte en CO o partículas de carbono (PS), otra parte escapa a la combustión y se emite a la atmósfera en forma de VOC, y los NOX se producen debido a la oxidación del nitrógeno en el aire y a los restos que quedan en el propio carburante. Sin embargo, este mismo principio se puede usar para calcular qué cantidad de carburante puede producir una determinada combinación de  $CO_2$ , CO, VOC y PS puesto que debe existir un equilibrio entre la cantidad total de carbono existente en el carburante y la existente en todos los productos que participan del proceso de combustión.

De igual forma, la masa de cualquiera de las sustancias contaminantes que contienen carbono se puede calcular a partir de la masa del carburante y de la cantidad de otros productos. Sin embargo, éste sería un cálculo impreciso, excepto para calcular las emisiones de  $CO_2$ , porque el resto de los componentes se producen en cantidades relativamente pequeñas.

Los tests de emisión normalmente incluyen la medición de  $CO_2$  así como de otras sustancias contaminantes, aunque es menos frecuente que el consumo de carburante se mida directamente. Por esta razón, los factores de emisión del tráfico se presentan de forma exhaustiva para cada componente, incluido el  $CO_2$ , y el consumo de carburante se puede averiguar a través del método del 'balance del carbono', usando la siguiente ecuación:

$$[CARBURANTE] = (12 + r_1) \times \{ [CO_2]/44 + [CO]/28 + [HC]/(12 + r_2) + a[PS]/12 \} \quad [2]$$

Donde:

$[CARBURANTE]$ , es la masa de carburante,

$[CO_2]$ ,  $[CO]$ ,  $[HC]$  y  $[PS]$ , son las masas de los respectivos contaminantes emitidos,

$r_1$  y  $r_2$ , son la cantidad de hidrógeno en proporción a la cantidad de carbono del carburante y emisiones de HC respectivamente. Se puede considerar que  $r_1$  y  $r_2$  son iguales, y sus valores normales son de 1.8 para la gasolina y 2.0 para el gasoil,

$a$ , es la proporción de carbono existente en la emisión de PS (Partículas de Carbono).

En caso de no conocer este dato, se asigna el valor 1.

Este método se utiliza para calcular el consumo de combustible en el modo de transporte de carretera para los vehículos con motor de combustión interna y para calcular las emisiones de  $CO_2$  en los modos no carretera a partir de los datos del consumo de carburante.

### 4.2.3 Características generales de los modelos desagregados

---

La definición de modelo incluida en el diccionario de la Real Academia Española: “Esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja,....., que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento”, nos indica dos elementos fundamentales, por una parte que se intenta mostrar una realidad compleja, y por otra que debe elaborarse para facilitar su comprensión y estudio.

Podemos decir que la complejidad de la realidad que se intenta modelizar sobre consumos energéticos y emisiones hace necesario concentrar la mayor cantidad de esfuerzos disponibles en el conocimiento detallado del proceso por el cual la actividad que genera dichos consumos energéticos y emisiones y por ello resultan mas adecuados los modelos desagregados. El problema en este caso surgirá cuando se intente utilizar estos desarrollos para la toma de decisiones en materia de política económica, medioambiental, etc.

El mayor detalle que se puede ofrecer para dichos modelos es aproximarlos más si cabe a la actividad específica de transporte y por esto en el apartado siguiente se analiza con detalle los desarrollos y resultados obtenidos por los proyectos COST 319, MEET y COPERT para los distintos modos de transporte.

---

### 4.3. Los costes externos y su cálculo

---

La definición de los costes externos nos indica que son aquellos costes impuestos a la sociedad que sin actuación o intervención política no son tenidos en cuenta por los distintos usuarios, en este caso, del transporte. Los componentes de los costes externos principalmente son:

Relativos a la escasez de infraestructuras (costes de congestión y las derivadas directamente de esta escasez).

Relativos a los accidentes. Incluye los costes directos e indirectos del accidente en sus distintas tipologías (costes materiales, médicos, perdidas de producción y pérdidas producidas por las muertes).

Relativos a los costes medioambientales incluyendo los costes relativos a la salud, costes materiales, daños en la biosfera y riesgos a largo plazo.

Los estudios de costes externos del transporte intentan medir los distintos impactos sobre cada uno de los tres capítulos anteriores puedan producirse al realizarse una operación de transporte de viajeros o de mercancías. En concreto los que hacen referencia al cambio climático intentan medir el impacto del transporte, que son principalmente causados por las emisiones de gases contaminantes: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nítrico (N<sub>2</sub>O) y gas metano (CH<sub>4</sub>). Los sistemas de refrigeración también producen emisiones contaminantes que afectan al cambio climático, estas emisiones son especialmente importantes en el modo aéreo cuando se sitúa en posición de crucero debido a la altitud en la que se producen.

La metodología comúnmente adoptada para el cálculo de los costes externos referentes al cambio climático recorre cuatro pasos principalmente:

1. Recopilación de datos o cálculo de de la producción de vehículos kilómetro para las distintas categorías por área, región o país.

2. Multiplicar dichos valores (los vehículos kilómetro) por el factor de emisión medios en g/Km para los distintos tipos de gases contaminantes.

Sumatorio de los distintos gases contaminantes con las equivalencias correspondientes para obtener su equivalente en CO<sub>2</sub> siguiendo los datos de “Global Warming Potentials”. Esta metodología según Watkiss ( 2005) es incorrecta en tanto que por ejemplo el ratio de equivalencia entre CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> no es correcto y que además los ratios de equivalencia no son constantes a lo largo del tiempo.

Multiplicar el total de toneladas de gases contaminantes medidos en unidades de CO<sub>2</sub> equivalentes por un factor externo expresado en €/tonelada de CO<sub>2</sub> para estimar los costes externos relativos al cambio climático.

En el caso del modo aéreo y tal y como se ha mencionado anteriormente, los cálculos pueden ser diferentes ya que se deben incluir los impactos relativos a otras emisiones producidas por la altitud a la que operan dichos servicios.

Entre los principales estudios llevados en los últimos años a cabo en el marco de la Unión Europea se destacan los siguientes:

**Tabla 13: Estudios Europeos de relevancia en el ámbito de los costes externos (cambio climático)**

Trabajo	Año base para los resultados	Países considerados	categorías de Costes recogidas	Modos de transporte considerados	Resultados	Relevancia para la UE
UNITE (Unification of accounts and marginal costs for transport efficiency), 2003 Coordinador : ITS, Leeds	1998 (1996,2005)	EU-15, Hungría, Estonia, Suiza	Infraestructura, accidentes, medioambiente (contaminación del aire, cambio climático, ruido, naturaleza, contaminación de suelos y agua, riesgos nucleares), congestión	Carretera, ferrocarril, transporte público urbano, aéreo, navegación en canales, transporte marítimo	Metodos y resultados: Coste total y coste medio (cuentas piloto), costes marginales (en los casos de estudio), ratios de costes (valores acordados)	Muy relevante
CAPRI (Concerte Action on Transport Pricing Research Integration) 1999 Coordinador: ITS, Leeds	1995	Unión Europea	Congestión, accidentes, contaminación del aire, contaminación acústica y del agua, cambio climático	Carretera, ferrocarril, aéreo	Resultados: costes medios (recopilación de los resultados de otros proyectos y estudios de alcance europeo)	Relevante
HEATCO (Developing harmonised European approaches for transport costing and project assessment), actualmente en proceso de finalización. Coordinador: IER, Stuttgart	2002	Unión Europea-25	Infraestructura (inversiones, mantenimiento, operación, administración) congestión, accidentes, contaminación del aire, ruido.	Carretera, ferrocarril, aéreo, marítimo	Metodología: ratios de costes, y guía para incluir los costes externos en los análisis de coste-beneficio	Muy relevante
GRACE (Generalisation of research on accounts and cost estimation) actualmente en proceso de finalización. Coordinador: ITS, Leeds		Unión Europea-25	Infraestructura congestión, accidentes, cambio climático, medioambiente, ruido.	Carretera, ferrocarril, aéreo, marítimo	Metodología y resultados: costes marginales (en los casos de estudio) y costes medios totales	Muy relevante
CAFÉ CBA	2002/2020	Union Europea	Contaminación del aire		Costes para la contaminación del aire (análisis coste beneficio)	

COPERT	2000/2020	Unión Europea-25	Contaminación del aire	Todos los modos	Bases de datos de emisiones	Muy relevante
TREMOVE	200/2020	Unión Europea-25	Costes externos mas relevantes	Todos los modos	Políticas para establecer controles y tarifas	Muy relevante
iTREN-2030	2007/2030	Unión Europea-25	Costes externos mas relevantes	Todos los modos	Ha comenzado en 2007. Análisis de la red de tarificaciones para los transportes en la UE, el escenario de previsiones es 2030. Recoge transporte, medioambiente y economía	Muy relevante
Hadndbook on estimation of external costs in the transport sector Coordinador: Instituto INFRAS	2005	UE-15	Accidentes, contaminación del aire, ruido, cambio climatico, congestión	Carretera, ferrocarril, aereo, y transporte marítimo interior	Metodología para el cálculo de costes externos en la Unión Europea	Muy Relevante
INFRAS/External cost of transport, Actualización Coordinador: Instituto INFRAS	2000	UE-15, Suiza y Noruega	Accidentes, contaminación del aire, ruido, cambio climatico, naturaleza, efectos urbanos, congestión	Carretera, ferrocarril, aereo, y transporte marítimo interior	Métodos y resultados: Costes totales medios, costes marginales aplicando la nueva metodología adoptada	Relevante
INFRAS/External cost of transport, Actualización Coordinador: Instituto INFRAS	2000	UE-15, Suiza y Noruega	Accidentes, contaminación del aire, ruido, cambio climatico, naturaleza, efectos urbanos, congestión	Carretera, ferrocarril, aereo, y transporte marítimo interior	Métodos y resultados: Costes totales medios, costes marginales aplicando la nueva metodología adoptada	Relevante

Fuente: Elaboración propia a partir de la información contenida en Infrass (2007).” Hadndbook on estimation of external costs in the transport sector”.

Del último estudio publicado las recomendaciones para considerar los costes externos en la categoría de cambio climático son las siguientes, teniendo en cuenta las recomendaciones realizadas en el estudio:

Tabla 14. Valores recomendados para los costes externos en el capítulo de cambio climático (en €/tonelada de CO<sub>2</sub>).

Año de aplicación	Valores centrales (€/toneladas CO <sub>2</sub> )		
	Límite inferior	Valor central	Valor máximo
2010	7	25	45
2020	17	40	70
2030	22	55	100
2040	22	70	135
2050	20	85	180

Fuente: Infrass (2007).” Hadndbook on estimation of external costs in the transport sector”. Pág.80  
 Los valores correspondientes a cada modo son los recopilados del studio TREMOVE y del caso alemán.

El Estudio INFRAS/WWW 2004 es una actualización en profundidad de un estudio anterior de la UIC sobre efectos externos (INFRAS/IWW 2000).

El objetivo del estudio es el de mejorar las bases empíricas de los costes externos del transporte, apoyándose en el estado actual de las metodologías de estimación de costes, reflejando también estudios recientes sobre los costes externos del transporte a nivel europeo (especialmente UNITE).

Los conceptos que se analizan son:

Componentes de coste: accidentes, ruido, contaminación atmosférica (daños a la salud, daños materiales y daños a la biosfera), riesgos de cambio climático, costes para la naturaleza y el paisaje, costes adicionales en áreas urbanas, procesos aguas arriba y aguas abajo, congestión.

Países: UE 17 (Estados miembros de la UE, Suiza y Noruega).

Año base: Resultados detallados para el año 2.000.

Diferenciación por modos de transporte:

- Transporte por carretera: automóvil particular; motocicletas; autobús; camiones ligeros, furgonetas y asimilados; camiones pesados.
- Transporte por ferrocarril: Viajeros y Mercancías.
- Transporte aéreo: Viajeros y Mercancías.
- Transporte en barco: Navegación interior (mercancías).

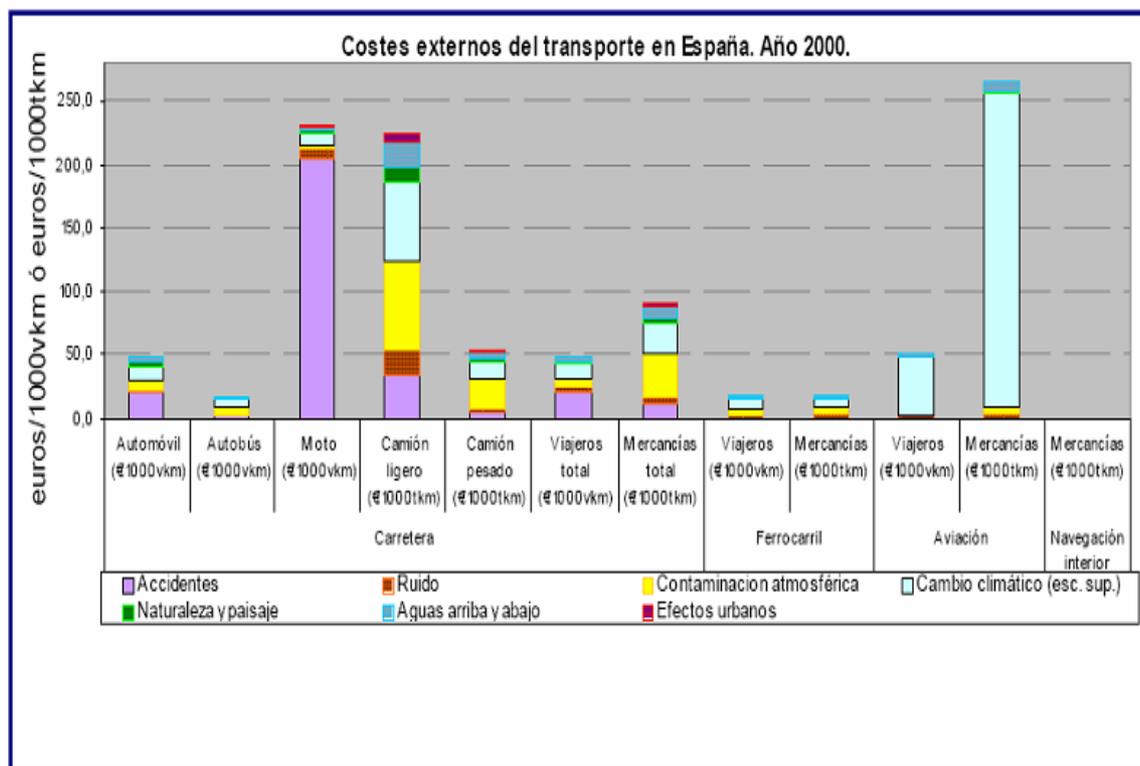
Los resultados que se obtienen son:

Costes totales y medios para UE 17, diferenciados por modo de transporte.

Costes marginales por modos de transporte y situación del tráfico, que reflejan los costes generados por unidad adicional de transporte. Representan un valor medio europeo que podría utilizarse como base para dimensionar instrumentos de tarificación, de acuerdo con el planteamiento de formación de los precios mediante el coste marginal social.

Estos cálculos aplicados al caso español son los datos que se muestran en los gráficos y tablas siguientes:

Gráfico 1. Consumos externos del transporte en España. Año 2000.



Fuente: Informe INFRAS 2000 y SISTIA (CEDEX).

Tabla 15. Costes medios €/viajero-km y €/tonelada-km. Año 2000.

Costes medios del transporte, en €/viajero-km (transporte de viajeros) ó €/tonelada-km (transporte de mercancías). Año 2000.												
	Carretera							Ferrocarril		Aviación		Navegación
	Automóvil (€/1000 vkm)	Autobús (€/1000 vkm)	Moto (€/1000 vkm)	Camión ligero (€/1000 tkm)	Camión pesado (€/1000 tkm)	Viajeros total (€/1000 vkm)	Mercancías total (€/1000 tkm)	Viajeros (€/1000 vkm)	Mercancías (€/1000 tkm)	Viajeros (€/1000 vkm)	Mercancías (€/1000 tkm)	Mercancías (€/1000 tkm)
Accidentes	20,2	1,7	204,2	34,0	5,1	21,4	11,2	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0
Ruido	2,7	0,5	7,4	20,4	2,9	2,6	6,6	2,4	3,0	1,1	4,1	0,0
Contaminación atmosférica	7,3	7,2	2,1	69,1	24,2	7,2	33,7	4,3	7,2	0,9	5,1	0,0
Cambio climático (esc. sup.)	12,0	5,1	10,8	62,3	13,1	11,5	23,4	7,2	4,8	46,7	245,7	0,0
Naturaleza y paisaje	2,3	0,6	2,5	11,4	2,6	2,1	4,4	0,7	0,4	0,4	1,9	0,0
Aguas arriba y abajo	3,5	1,8	2,6	21,2	5,6	3,4	8,9	3,5	2,8	1,0	7,6	0,0
Efectos urbanos	1,2	0,3	1,3	6,0	1,4	1,1	2,3	1,0	0,4	0,0	0,0	0,0

Fuente: Informe INFRAS 2000 y SISTIA (CEDEX).

### 4.3.1 Costes externos en el modo ferroviario

Aplicando la metodología anterior al caso de RENFE Operadora se obtienen los siguientes resultados.

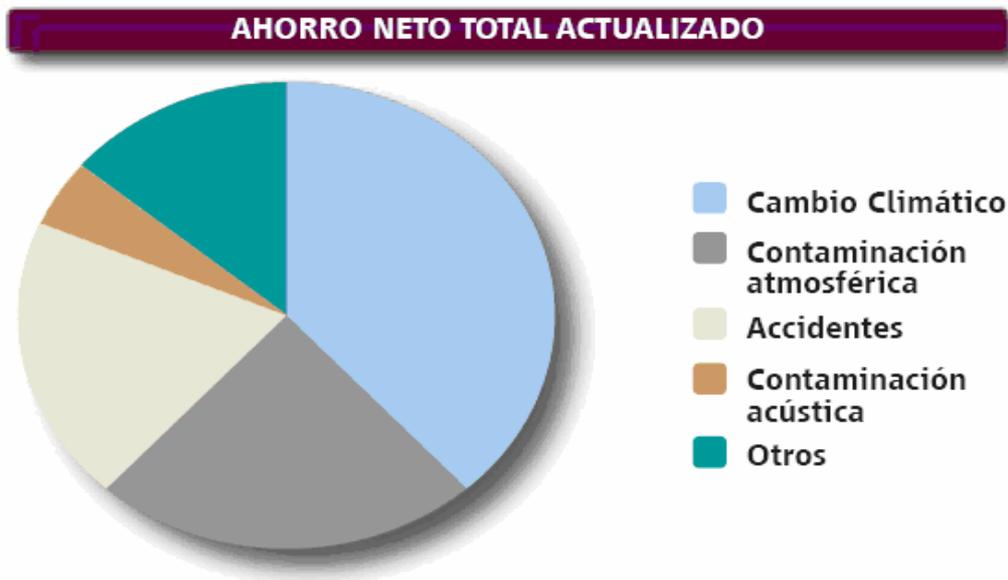
Tabla 16. Ahorros de costes externos generados por RENFE Operadora

AHORROS NETOS ACTUALIZADOS POR COSTES EXTERNOS GENERADOS POR RENFE OPERADORA, POR ORIGEN (Datos provisionales 2006) En millones de euros, sin incluir costes por congestión						
	Cambio Climático	Contaminac. Atmosférica	Accidentes	Contaminac. Acústica	Otros*	Total
Ahorro Neto total actualizado	767,5	469,0	490,4	127,9	277,3	2.132,1

(\*) Efectos urbanos, efectos sobre el paisaje y la naturaleza, ocupación y fragmentación del suelo, otros efectos inducidos.

Fuente: RENFE Operadora

Gráfico 2. Detalle por conceptos



Fuente: RENFE Operadora

Gráfico 3. Consumos externos del transporte en España. Año 2000.

<b>AHORROS NETOS ACTUALIZADOS POR COSTES EXTERNOS GENERADOS POR RENFE OPERADORA, POR AREAS DE ACTIVIDAD</b> (en millones de euros, sin incluir costes por congestión) ESTIMACIÓN SEGÚN DATOS PROVISIONALES 2006						
	Cercanías	Media Distancia	DG Serv. Cercanías y Media Distancia	DG Serv. Alta Velocidad-Larga Distancia	DG Mercancías y Logística	TOTAL
Millones VKm	8.566	3.236	11.792	8.468		20.260
Millones TKm					11.012	11.012
% Sustitución	Automóvil zona urbana	80				
	Automóvil zona interurbana		80	50		
	Bus	20	20	10		
	Avión			40		
	Camión					100
Ahorro por externalidades según INFRAS-IWW año 2000	695,1	146,7	841,7	336,7	770,8	1.949,2
AHORRO ACTUALIZADO A 2006	867,5	183,0	1.050,5	420,2	962,0	2.432,7
Compensaciones por Obligaciones de Servicio Público	207,2	93,4	300,5	0,0	0,0	300,5
<b>AHORRO NETO TOTAL ACTUALIZADO</b>	<b>660,3</b>	<b>89,6</b>	<b>749,9</b>	<b>420,2</b>	<b>962,0</b>	<b>2.132,1</b>

Fuente: RENFE Operadora

---

## 5. MODELOS DE CONSUMO Y EMISIONES POR MODO DE TRANSPORTE

Para abordar el análisis del estado del arte de los modelos de consumos y emisiones por modos de transporte, en la presentación Workshop de los proyectos COST 346/ARTEMIS/PARTICULATES<sup>14</sup> sobre “nuevos desarrollos en la estimación de las emisiones para el transporte” se muestra una metodología sintética y aplicable a todos los modos de transporte y que nos permite introducir los tres elementos fundamentales de análisis en los modelos sobre emisiones y consumos:

Emisiones = Actividad de Tráfico x Factor de Emisión

Las tres variables que se incluyen, normalmente son el objetivo de los cálculos realizados para los modelos desagregados (y en la mayoría de los casos son la base de los datos presentados en los modelos agregados) y por este motivo permiten entender la problemática de la información que deben contener los modelos de consumo de energía y emisiones independientemente del modo al que nos estemos refiriendo.

Respecto de las “emisiones”, se distingue entre los distintos tipos y se calculan de forma independiente las denominadas “hot emissions” y “start emissions”. Las primeras se producen cuando el motor está en pleno funcionamiento, y las segundas, en el momento de puesta en marcha del motor. A estos dos tipos de emisiones se les añade lo que se denomina “gases por evaporación” que se producen en el momento de llenar el depósito de los vehículos.

El otro concepto incluido en la forma funcional anterior es la “Actividad de tráfico” medida de forma general en Veh.km, incluyendo: aceleraciones, paradas y número de vehículos (en algunos modelos el cálculo se agrega a nivel de flotas). Esta actividad es distinta según el vehículo y por tanto se incluye lo que se denomina segmentación de la flota: por categoría, tipo de combustible, tamaño y tecnología / antigüedad. En lo que se refiere a los datos, en los modelos de consumos y emisiones ligados a modelos de movilidad puede ofrecerse además el resultado por viajero.km o tonelada.km ya que puede calcularse un grado de ocupación de los distintos vehículos.

En lo que se refiere a los factores de emisión: g/vehkm, g/aceleración, g/parada, g/unidad de tiempo.

Este modelo permite mantener una metodología para todos los modos de transporte que se adapta a las características de cada uno de ellos pero manteniendo los mismos principios. De esta forma y a pesar de que los vehículos pesados sean los responsables de forma global del 75% de todas las partículas suspendidas (emisiones de los tubos de escape) y sean culpables del 60% aproximadamente de las emisiones de óxido de nitrógeno (NOx), la extensión del estudio a otros modos de transporte, permite abordar la cuestión de una forma más completa superando el sesgo que produce que aproximadamente el 90% de los estudios realizados hasta la época actual se centraran en la carretera.

---

<sup>14</sup> Workshop New developments in emission estimation from transport” Antwerp 24/5/2004

## 5.1. Modo carretera

El programa MEET hace especial referencia al modo de transporte por carretera, debido a que este modo ha recibido especial atención por su importancia como medio de transporte de pasajeros y de mercancías por excelencia. El transporte por carretera por su naturaleza descentralizada, tiene una proximidad para su utilización por la gente mayor que los otros modos de transporte y por tanto acapara gran parte de la actividad del transporte total. Por todo esto, existe gran cantidad de información disponible sobre las emisiones del transporte por carretera y ha sido posible proponer una metodología relativamente detallada.

En términos generales, la estimación de las emisiones ocasionadas por el tráfico se puede basar en la ecuación

$$E = e \times a \quad [3]$$

Donde:

$E$ , es la cantidad de emisión,

$e$ , es el índice de emisión por unidad de actividad, y

$A$ , es la cantidad de actividad del transporte.

La ecuación es aplicable a cualquier nivel, desde un solo motor hasta toda una flota de vehículos, y desde una única carretera a hasta la totalidad del territorio europeo.

Las fuentes principales de la emisión de los vehículos de carretera son los gases de combustión y los hidrocarburos producidos por la evaporación del combustible. Cuando un motor trabaja por debajo de su temperatura normal de funcionamiento, el combustible no se usa de forma eficaz, y la cantidad de sustancias contaminantes que produce es mayor que cuando trabaja a una temperatura adecuada. Por tanto, se distinguen tres tipos de emisiones<sup>15</sup>, las emisiones calientes, las emisiones de arranque en frío y las emisiones de evaporación. La emisión total de un vehículo se calculará de la siguiente manera:

$$E = E_{CALIENTE} + E_{ARRANQUE} + E_{EVAPORATIVA} \quad [4]$$

Donde:

$E$ , es la emisión total

$E_{caliente}$ , es la emisión producida cuando el motor esta caliente.

$E_{arranque}$ , es la emisión cuando el motor está frío.

$E_{evaporativa}$ , es la emisión por la evaporación (solamente para VOC).

---

<sup>15</sup> MEET, 1999, estudia los modelos de consumos y emisiones en función de la tipología de las emisiones (emisiones calientes, en frío y de evaporación)

Cada una de estas contribuciones a la emisión total depende de un factor de la emisión y de uno o más parámetros referentes a la actividad del vehículo, de modo que, en general:

$$E_x = e_x \times a \text{ [5]}$$

Donde:

$E_x$ , es una de las contribuciones al total emisiones

$e_x$ , es una actividad relacionada con el factor de emisión

$a$ , es la cantidad de actividad del tráfico relevante para este tipo de emisión.

Los parámetros  $e_x$  y  $a$  son función de otras variables.

Para las *emisiones calientes*, la actividad relacionada con el factor de la emisión,  $e_{calientes}$ , se expresa sobre todo como una función de la velocidad media del vehículo. Los factores de modificación (los cuales pueden ser, ellos mismos, funciones de otras variables) permiten correcciones para características como por ejemplo el gradiente del camino, la carga llevada por un vehículo, la degradación de los controles de la contaminación con el aumento del kilometraje del vehículo, y la temperatura ambiente. La actividad,  $a$ , es entonces la cantidad de actividad (vehículos.kilómetro) realizada a una velocidad media determinada, en los caminos con un gradiente determinado, para los vehículos con una cierta carga y kilometraje, y a una temperatura ambiente determinada. En la práctica, las condiciones de funcionamiento necesarias del vehículo (velocidad, carga, etc.) se basan en distribuciones estadísticas de los diversos parámetros, ya que los movimientos y las características específicas de los vehículos individuales no se conocen.

- *Las emisiones de arranque*, puesto que ocurren solamente al comienzo de un viaje, se expresan como “cantidad por trayecto”, y no sobre la distancia total recorrida. El factor de la emisión,  $e_{arranque}$ , se calcula en función de la velocidad media del vehículo, de la temperatura del motor, de la longitud del viaje y de la longitud en frío del viaje. La actividad,  $a$ , es el número de trayectos realizados. Este procedimiento se utiliza solamente para los vehículos de carga ligera. Puesto que los datos disponibles sobre otros tipos de vehículos son muy limitados, este detalle no se puede incluir en otros casos, y las emisiones de arranque en frío se estiman simplemente como constantes. (Exceso de emisiones por arranque en frío).
- *Las emisiones por evaporación* tienen lugar de diferentes maneras: Cada vez que se le echa combustible al coche, del depósito se escapa combustible en forma de vapor; las temperaturas diurnas (más altas en comparación de las nocturnas) hacen que el este combustible evaporado se expanda y se libere a través del depósito; además, el combustible se evapora cada vez que entra en contacto con el aire, sobre todo cuando la temperatura del vehículo es elevada durante o después de su uso. Existen, por tanto, diferentes factores de emisión,  $e_{evaporativa}$ , dependiendo del tipo de evaporación que tenga lugar. Generalmente, estos factores son una función de la temperatura ambiente y la volatilidad del combustible. Igualmente, se necesitan datos sobre la actividad que se desarrolla, incluyendo distancia total recorrida y el número de viajes según la temperatura del motor al final del viaje.

Estos principios se aplican a todos los agentes contaminadores y a todos los tipos del vehículo, pero teniendo en cuenta que los diferentes tipos de vehículos se comportan de manera diferente y la relación entre las emisiones y las características de funcionamiento varían para cada agente contaminador. Por esa razón, se debe realizar una estimación de las emisiones del tráfico para cada tipo de emisión en particular, cada clase de vehículo y en función del comportamiento del tráfico

(distintos tipos de carreteras). Y, por supuesto, esto se debe hacer por separado para cada agente contaminador.

Los modelos de emisiones y consumos para el modo carretera han recibido mayor atención que el resto de modos, esto es debido principalmente a que el transporte por carretera es el principal modo tanto en transporte de mercancías (medido en toneladas.km) como en transporte de viajeros (viajeros.km).

Estos modelos son distintos de los desarrollados para el análisis de los costes externos (informe INFRAS 2000 y 2004) también aplicables al ámbito europeo.

A continuación se analizan las cuestiones recogidas en el programa MEET, resultado y avance de la acción COST 319 (también incluida en el análisis) y los cálculos contenidos en el programa COPERT.

Una vez establecido el modelo, para poder aplicar la ecuación básica para el cálculo de las emisiones y consumos energéticos es necesario conocer los siguientes parámetros:

- Los agentes contaminantes y los factores de emisión.
- Los modelos de emisiones para el modo concreto.
- La tipología de los vehículos y su actividad.

### 5.1.1 Los agentes contaminantes y los factores de emisión

---

Existe una gran diversidad de tipos de emisiones que se producen por actividades del transporte (son las que producen los agentes contaminantes, detallados a continuación). Los niveles de producción, clasificados en los distintos factores de emisión, presentan diferentes grados de detalle y por tanto de conocimiento. De esta forma, algunos están bien definidos y por tanto presentan series históricas con los datos de seguimiento y otros sólo se conocen de forma limitada, o demasiado escasa como para ser representativos de actividades relevantes.

Actualmente se puede conocer con exactitud los factores de emisión denominados como básicos pero sólo para algunos agentes contaminadores y para algunas categorías de vehículos. Para el resto de factores de emisión sólo es posible (al menos en el ámbito europeo) proporcionar una parte muy pequeña de información. Por esta razón en todos los estudios analizados y en especial el MEET (1999) se clasifican los factores de emisión en tres niveles, según el grado de confianza de los datos disponibles sobre factores de emisión:

- Nivel 1: incluye los agentes contaminadores para los cuales existen datos para la definición de los factores de emisión representativos con un alto grado de certeza<sup>16</sup>.
- Nivel 2<sup>17</sup>: este nivel incluye los agentes contaminadores para los cuales, los datos existentes sobre los factores de emisión no pueden considerarse representativos: los factores de la emisión dados por los agentes

---

<sup>16</sup> No se sabe ninguno de los factores de la emisión con certeza absoluta.

<sup>17</sup> La distinción entre los niveles 2 y 3 no está bien definida.

contaminadores del nivel 2 son considerados solamente como una indicación de orden de la magnitud.

- Nivel 3: incluye los agentes contaminadores para los cuales hay muy pocos datos, y los factores de emisión no deben ser facilitados por su poca representatividad.

Por su parte la lista general de los agentes contaminantes incluye:

- Dióxido de carbono- CO<sub>2</sub> (no definido como agente contaminador todavía por la legislación, considerado aquí debido a su contribución al efecto del invernadero)
- Monóxido de carbono- CO
- Compuestos orgánicos volátiles (también designados como hidrocarburos) - VOC (HC)
- Óxidos del nitrógeno - NO<sub>x</sub>
- Materia de partículas - P.M.
- Dióxido de sulfuro- SO<sub>2</sub>
- Compuestos de plomo- Pb
- Dióxido del nitrógeno- NO<sub>2</sub>
- Amoníaco- NH<sub>3</sub>
- Óxido nitroso- N<sub>2</sub>O
- Otros metales pesados - HM (cadmio - Cd, cinc - Zn, cobre - Cu, cromo - Cr, níquel - Ni, selenio - SE).
- Sulfuro del hidrógeno - H<sub>2</sub>S.
- Los VOCs incluyen una gran cantidad de compuestos orgánicos, con impactos que varían en el medio ambiente y en la salud humana, por lo tanto es interesante subdividir más este agente contaminador en dos categorías:
  - metano - CH<sub>4</sub>
  - hidrocarburos del no-metano (NMVOC).

Algunos de los hidrocarburos del no-metano son compuestos mutágenos bien conocidos. Una subcategoría conocida de NMVOC son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), y los compuestos individuales del benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) y del 1,3-butadieno (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>).

La materia de partículas en suspensión (P.M) también tiene diversos efectos dependiendo del tamaño de las partículas. Es por lo tanto importante saber la distribución de tamaño de las P.M.

Además, el consumo de energía también se considera; ya sea por el cálculo de carbono contenido en los agentes contaminadores en el caso de transporte de carretera, o para los modos del no-carretera, como el parámetro principal del cual se estiman otras emisiones.

La siguiente tabla muestra la distribución de los agentes contaminadores en los tres niveles de clasificación:

Tabla 17. Agentes contaminantes para el modo carretera

Agentes contaminantes	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Consumo de Energía	T		
CO <sub>2</sub>	T		
CO	T		
VOC	T		
NO <sub>x</sub>	T		
PM	T		
SO <sub>2</sub>	T		
Pb	T		
N <sub>2</sub> O		T	
CH <sub>4</sub>		T	
NMVOG		T	
VOC especies (PAH, benceno, etc)		T	
PM distribución tamaño			T
NH <sub>3</sub>			T
H <sub>2</sub> S			T
NO <sub>2</sub>			T
HM			T

Fuente: Documento de trabajo del proyecto MEET (Transport Research Laboratory) 1.999

## 5.1.2 Modelos de emisiones en el transporte por carretera

Desde la década de los 70 se llevan realizando en algunos países europeos estimaciones de las emisiones contaminantes ocasionadas por el transporte por carretera a nivel nacional y, a un nivel más local, como parte de los diversos estudios de los efectos ocasionados por la contaminación. Los métodos utilizados para ello, se han perfeccionado y desarrollado desde entonces, debido principalmente a la cantidad, tipo y calidad de los datos de los que se dispone. Actualmente se utilizan principalmente tres métodos que pueden variar fundamentalmente en la forma en que cada uno de ellos trata la interacción entre funcionamiento del vehículo y las correspondientes emisiones que ocasiona.

Existen tres modelos de emisión del modo carretera que se diferencian en la forma de relacionar las operaciones del vehículo con sus emisiones correspondiente:

Modelos de emisión en función de la velocidad media del vehículo

Modelo Suizo/Alemania, el cual asocia un factor de emisión a cada situación del tráfico y cada tipo de vehículo.

Modelo incluyendo como segunda variable el índice de aceleración.

De ellos, el método más básico se basa en el hecho de que las emisiones medias que tienen lugar durante un trayecto determinado, varían dependiendo de la velocidad media con la que se realice dicho trayecto. El perfil de los gráficos de velocidad-emisión se conoce, y aunque este perfil se conoce, hay que tener en cuenta que varía algo en función del tipo de vehículo y de la sustancia contaminante que se esté analizando.

Normalmente se obtienen, emisiones elevadas a una velocidad media baja, (cuando el rendimiento del vehículo no es lo suficientemente eficiente debido a las paradas y arranques intermitentes que realiza el vehículo y a las paradas que puedan surgir durante el trayecto), una tendencia a las emisiones elevadas a velocidades altas (debido a la gran potencia que necesita el motor en esas ocasiones), y emisiones mínimas a velocidad media.

Las mediciones de las que se derivan los gráficos de velocidad - emisión casi siempre se llevan a cabo gracias a un dinamómetro colocado en el chasis del vehículo, desde donde se realiza el test al vehículo tras un determinado ciclo de conducción, al mismo tiempo que se recogen y analizan las emisiones ocasionadas que han tenido lugar durante dicho ciclo. La relación que guardan tales emisiones con la velocidad media del vehículo se determina combinando los resultados de los tests realizados durante los distintos ciclos de conducción a distintas velocidades medias. La precisión de los datos revelados por dicha relación 'emisión - velocidad media' depende, en gran medida, de hasta qué punto tanto el vehículo testado como los ciclos de conducción analizados son representativos del parque automovilístico del momento y del funcionamiento de dicho parque.

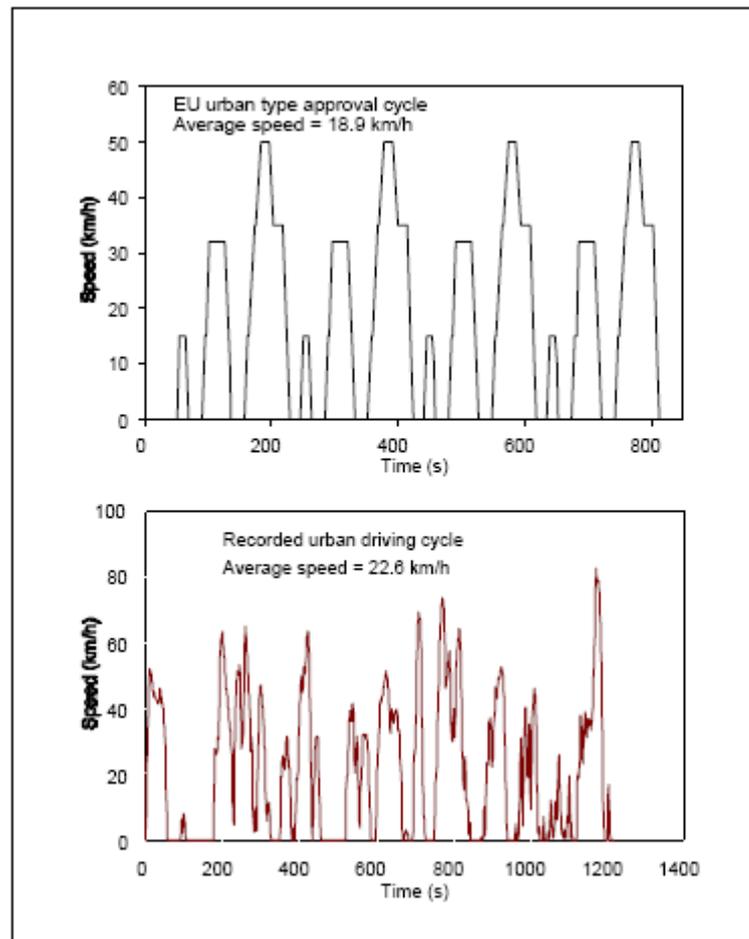
Los ciclos de conducción están, a menudo, demasiado estereotipados y no guardan demasiada relación con los patrones de conducción que encontramos realmente en la carretera.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de un ciclo de conducción típico en zona urbana, y lo que sería el ciclo de conducción aprobado por la UE para las zonas urbanas<sup>18</sup>. Se puede comprobar claramente que la cantidad y frecuencia del funcionamiento de un mismo vehículo varía sustancialmente de uno a otro.

---

<sup>18</sup> Samaras Z and L Ntziachristos L (1998) Average hot emission factors for passenger cars and light duty trucks. Deliverable 7 of the MEET project. LAT Report 9811. Aristotle University Thessaloniki, Thessaloniki, Greece.

Figura 6. Comparación de la velocidad de un vehículo con un ciclo urbano tipo de la EU y un ciclo de conducción urbana real.



Fuente: Meet 1999

Además hay que añadir que dos vehículos distintos pueden viajar a una misma velocidad media, lo cual no indica que sus ciclos de conducción sean iguales, sino que para lograr esa velocidad media cualquier combinación de tiempo y velocidad que tenga como resultado la misma velocidad media sería válido.

Así por ejemplo, una velocidad media de 50 km/h se podría alcanzar en un trayecto de diez minutos a una velocidad constante de 50 km/h o con una velocidad de 100 km/h constante durante cinco minutos con una parada de otros cinco minutos.

Debido a las posibles diferencias de funcionamiento de diferentes vehículos viajando a idéntica velocidad media, otros métodos han intentado clasificar el funcionamiento del vehículo con el fin de tener en cuenta tales diferencias. Los trayectos vienen definidos por la velocidad del vehículo, pero también por otra variable que define el índice de variación de la velocidad.

El segundo tipo de modelos de emisión, es el que está contenido en el 'Handbuch der Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs' de origen suizo/alemán. En este modelo, la segunda variable es un parámetro que describe el tipo de tráfico al que un factor de emisión es aplicable. Para cada situación del tráfico, sustancia contaminante y tipo

de vehículo<sup>19</sup> se da un único factor de emisión. Puesto que cada situación del tráfico se asocia a una determinada velocidad media, los datos que aparecen en el Manual (Handbuch) se pueden mostrar en relación a la velocidad media con el fin de compararlos con los gráficos de carácter más convencional que muestran la relación entre velocidad y la emisión.

Si se comparan los factores de emisión utilizados en el Handbuch con los factores del primer modelo, se observa un patrón similar a los derivados de la curva reflejada en los gráficos que ilustran la relación entre velocidad-emisión, pero no se ajustan a esa función tan uniforme. Esto se debe a que cada factor en particular representa un tipo determinado de funcionamiento del vehículo en lugar de un funcionamiento medio a una determinada velocidad media.

El tercer tipo de los modelos de emisión utiliza una segunda variable numérica, con la velocidad del vehículo, con el fin de describir el funcionamiento del vehículo más detalladamente. Esta segunda variable suele ser el índice de aceleración (que indica, más claramente que la aceleración por sí sola, la potencia que necesita el motor de un vehículo). Este tipo de modelo ya no pretende calcular las emisiones medias producidas durante un desplazamiento, sino que asigna un índice de emisión a cada combinación instantánea de las dos variables elegidas (la unidad de tiempo suele ser de un segundo). Los datos utilizados en estos modelos instantáneos proceden de las continuas mediciones de la velocidad (de donde se puede calcular la segunda variable de funcionamiento, el índice de aceleración) y de las emisiones producidas. Los índices de emisión que se corresponden a las condiciones de funcionamiento en determinadas bandas se combinan con el fin de formar una matriz bidimensional con los factores de emisión, clasificados a partir de las dos variables de funcionamiento.

La aplicación de este tipo de modelo requiere la especificación del perfil de la velocidad desarrollada durante un desplazamiento, y la integración de los factores de emisión correspondientes a cada uno de los pares velocidad - aceleración recogidos cada segundo. Utilizando una distribución de pares velocidad - aceleración que recoja los datos sobre el funcionamiento del vehículo durante más de un único desplazamiento, se pueden obtener resultados de carácter más general.

Dentro de tercera generación de modelos, se han desallorado diversos estudios. Uno de los primeros modelos instantáneos que se desarrolló fue el modelo Graz (DGV)<sup>20</sup>. Este modelo es un método para estimar las emisiones contaminantes producidas por el tráfico en combinación directa con el registro de los patrones de conducción y se ha utilizado para evaluar aquellas medidas de tráfico calmado<sup>21</sup>. Un método parecido era el que se basaba en medidas que utilizaban el FTP 75 de los Estados Unidos y los

---

<sup>19</sup> Similar a la Tabla A2 (ver anexos)

<sup>20</sup> Pischinger R and J Haghofner (1984) Eine Methode zur Berechnung des Kraftstoffverbrauches und der Schadstoffemissionen von Kraftfahrzeugen aus dem Geschwindigkeitsverlauf. SAE Paper 845114. Society of Automotive Engineers, Warrendale, USA.

<sup>21</sup> Sturm P J, K Pucher and R A Almbauer (1994) Determination of motor vehicle emissions as a function of the driving behaviour. Proceedings of the Conference "The emissions inventory: perception and reality", pp 483 - 494. Air and Waste Management Association, Pittsburgh, USA.

ciclos de conducción propios de las autopistas<sup>22</sup>. Otro modelo era el creado dentro del proyecto Drive/Modem<sup>23</sup>. En ese documento se desarrollaban 14 ciclos de conducción distintos a partir de los patrones de conducción registrados en varias ciudades europeas. Más tarde, estos ciclos sirvieron de base para realizar tests a 150 vehículos utilizando el método del dinamómetro en el chasis. Los datos de las emisiones producidas eran recogidos de forma ininterrumpida, y a continuación se determinaban las matrices de emisión, con la velocidad y los tiempos de aceleración como parámetros.

Un programa conjunto sobre el factor de emisión llevado a cabo en Alemania<sup>24</sup> y Suiza<sup>25</sup> utilizaba datos instantáneos de las emisiones producidas para crear los factores de emisión correspondientes a los coches. La base de estas matrices de emisión eran tests del dinamómetro en el chasis realizados a alrededor de 300 vehículos, y utilizando como patrones de conducción el ciclo FTP 75, el NEDC, el de las Autopistas en los EEUU y el de la llamada Autobahn alemana.

En los últimos años es este tercer tipo de modelo de emisión el que ha recibido más atención por parte de la comunidad de investigación, y podría ser considerado el estado del arte de la metodología<sup>26</sup>.

En Suiza se llevaron a cabo una serie de investigaciones<sup>27</sup> con el fin de definir el alcance de la aplicación de esta metodología y los requisitos necesarios para elaborar las matrices de emisión, de igual forma que la Universidad Técnica de Graz, el INRETS<sup>28</sup> y el TRL investigaron el uso de estos modelos para analizar los programas de

---

<sup>22</sup> Sorenson S C and J Schramm (1992) Individual and public transportation emissions and energy consumption models. Report RE 91-5, Technical University of Denmark, Lingby, Denmark

<sup>23</sup> Joumard R, P Jost, J Hickman and D Hassel (1995) Hot passenger car emissions as a function of instantaneous speed and acceleration. *Science of the Total Environment*, 169, pp 167 - 174. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands

<sup>24</sup> Hassel D, P Jost, F J Weber, F Dursbeck, K S Sonnborn and D Plettau (1994) Das Emissionsverhalten von Personenkraftwagen in der BRD im Bezugsjahr 1990. Berichte 8/94. Erich Schmidt Verlag, Berlin, Germany.

<sup>25</sup> Keller M, R Evequoz, J Heldstab and H Kessler (1995) Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950 - 2010. Schriftenreihe Umwelt Nr. 255. BUWAL, Bern, Switzerland.

<sup>26</sup> Sturm P J, P Boulter, P de Haan, R Joumard, S Hausberger, J Hickman, M Keller, R Niederle, L Ntziachristos, C Reiter, Z Samaras, G Schinagl, T Schweizer and R Pischinger (1998) Instantaneous emission data and their use in estimating passenger car emissions. Deliverable 6 of the MEET project. VKM-THD Vol. 94, Technical University of Graz, Graz, Austria.

<sup>27</sup> EMPA (1997) Nachführung der Emissionsgrundlagen Strassenverkehr: Anwendungsgrenzen von Emissionsfunktionen, Analyse der Messdatenstreuung. EMPA Bericht 166,558. BUWAL-Arbeitsunterlage 4, Dübendorf, Switzerland.

INFRAS (1998) Anwendungsgrenzen von Emissionsfunktionen: Ergänzende Analysen zum EMPA Messprogramm 1997. BUWAL- Arbeitsunterlage 6, Bern, Switzerland

<sup>28</sup> Joumard R, F Philippe and R Vidon (1998) Reliability of the current models of instantaneous pollutant emissions. 6th International Highway and Urban Pollution Conference, Ispra, Italy.

tráfico calmado y otras medidas de gestión del tráfico, y la Universidad de Lund, en Suecia, estudió los patrones de conducción urbana<sup>29</sup>.

Sin embargo, por una serie de razones, el método más arraigado, que toma como base las emisiones producidas en función de la velocidad media del vehículo, es el que se recomienda todavía para su aplicación a nivel estratégico.

Los proyectos de investigación europeos llevados a cabo en esta área durante los últimos años han obtenido las siguientes conclusiones:

La calidad de la matriz de emisión utilizada (es decir, qué patrones se utilizan para generar los datos acerca de la emisión) desempeña un papel importante. Existen dos tipos de ciclos para proporcionar datos en la matriz de emisión. El primero es el llamado ciclo de conducción legislativo (FPT-75, US Highway y NEDC30) y el segundo es el modelo de conducción del mundo real ;

Es recomendable la utilización de métodos de emisión instantánea en aquellos casos en los que la dinámica de conducción y el comportamiento ante el volante tienen mayor interés (los modelos de velocidad media no son apropiados en estos casos);

Elegir el método de cálculo más apropiado en cada caso depende de la aplicación que se le vaya a dar. Para la mayoría de las aplicaciones (ej. para aplicaciones a nivel estratégico) los factores de emisión basados en la velocidad media del vehículo y en una serie de situaciones típicas del tráfico permitirán realizar estimaciones de las emisiones producidas con bastante exactitud. Pero existen ciertas áreas en las que los cambios en las emisiones debidos a cambios en la dinámica de conducción han de ser estimados (ej. tráfico calmado), para los que es necesario usar los modelos de emisión instantánea con el fin de obtener resultados más fiables.

### 5.1.3 Categorías de vehículos

Las emisiones de diversos tipos de vehículo varían considerablemente, así que es necesario establecer una clasificación en la cual los vehículos de cada clase homogénea se analizarán como un grupo independiente. Se definen cuatro categorías principales de la siguiente forma, con su correspondiente clasificación según el UN-ECE<sup>31</sup>:

- |                                   |                |
|-----------------------------------|----------------|
| - Coches de pasajeros (PC)        | M1             |
| - Vehículos de carga ligera (LDV) | N1             |
| - Vehículos de carga pesada (HDV) | M2,M3, N2,N3   |
| - Vehículos de dos ruedas (2W)    | L1,L2,L3,L4,L5 |

Dentro de cada uno de estas categorías principales todavía hay una diversidad de tipos de vehículos y es necesario definir otra clasificación de los vehículos de modo

---

<sup>29</sup> Eva Ericsson (2000) Urban driving patterns - characterization, variability and environmental implications, Bulletin 186, LUND University, Lund institute of technology, Department of technology and society, Traffic planning - Lund

<sup>30</sup> Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (NEDC)

<sup>31</sup> Ver anexos Epígrafe 6.2

que cada grupo tenga un funcionamiento razonablemente uniforme de las emisiones. Los parámetros en los cuales se basa esta clasificación secundaria son:

- El tamaño del vehículo (capacidad del motor o peso bruto)
- El nivel del control de emisión (según etapas de la legislación del control de emisión del EU)
- El combustible (gasolina, diesel, LPG o, para el futuro, alternativas tales como CNG y electricidad)
- El motor (para los PC y 2W, motores de 4 o 2 tiempos)
- El propósito operacional (para HDV, si el vehículo es de mercancías, autobús urbano o coche)

Uno de los criterios más importantes utilizados para definir las categorías es el ‘nivel de control’, que se define como el estándar de control de las emisiones según el cual un vehículo se clasifica dentro de una determinada categoría.

Con el fin de identificar el nivel de control de las emisiones, los años en los que se lleva a cabo la entrada en vigor de las acciones legislativas de la UE deberían coincidir con aquellos años en los que se incorporan al parque móvil de la UE vehículos con los avances tecnológicos adecuados. Esta correspondencia debería ser considerada simplemente como una referencia, puesto que existen ligeras diferencias en cuanto a la forma de proceder en los diferentes estados miembros de la UE.

Otra forma de hacer la clasificación de los vehículos es dependiendo de la tecnología de sus motores y sus sistemas de control de emisiones. Para los utilitarios con motor de gasolina, por ejemplo, la clasificación sería ‘vehículos que ocasionan emisiones no controladas’, ‘vehículos con catalizador de circuito abierto’ y ‘vehículos con catalizador de circuito cerrado’. Algunas de las categorías de la clasificación hacen referencia a los vehículos del futuro: bien sean vehículos estándar que se introducirán en el mercado después de realizar los cambios legislativos propuestos para un futuro en cuanto al control de las emisiones, o vehículos que utilizan nuevos carburantes y motores de nueva tecnología.

Ambos criterios de clasificación, según el nivel de control y en función de la tecnología, tienen una gran relación ya que los límites establecidos por la ley normalmente dictan qué tipo de tecnología es necesaria para no sobrepasar los valores fijados, a pesar de que tales tecnologías no están legalmente especificadas.

### Nuevas categorías de vehículos

#### Coches Utilitarios (PC) y vehículos de carga ligera (LDV)

Los datos recogidos por MEET sobre las emisiones producidas por los PC y los LDV no tienen en cuenta las nuevas tecnologías introducidas en el mundo del vehículo tras la entrada en vigor en la UE de la Orden 91/441/CEE (EURO I). Sin embargo, en el proyecto MEET se propuso introducir los factores de reducción con el fin de adaptar los factores de emisión de las diferentes categorías de vehículo a los avances tecnológicos incorporados a los motores. Esta adaptación se basaba en los nuevos estándares de emisión propuestos para los vehículos.

En las siguientes tablas se indican los índices de reducción MEET para vehículos de gasolina y gasoil, que derivaron después en el EURO II y en otras acciones legislativas.

El establecimiento de índices de reducción para los nuevos vehículos se apoyó en la legislación sobre emisiones de la UE y se utilizaron, además, las bases de datos del Programa Suizo/Alemania sobre el Factor de Emisión y del proyecto I/M de la Comisión Europea. Para realizar la estimación de los índices de emisión se asumió:

La reducción total sobre todo el New European Driving Cycle (NEDC) - o Nuevo Ciclo de Conducción Europeo se consigue mediante la reducción de los estándares en cada etapa legislativa;

Para el EURO II y otros niveles de emisión posteriores, las diferencias entre los estándares establecidos y los niveles reales de emisión se pueden comparar a las de los vehículos del EURO I.

Para calcular los índices de reducción de las emisiones se utilizó un procedimiento de carácter reiterativo, y se realizaron los cálculos para cada una de las sustancias contaminantes reguladas y para los estándares establecidos para el EURO II, III y IV.

En el establecimiento de los factores de reducción, también se tuvo en cuenta el hecho de que el modo de realizar el test será modificado con la entrada en vigor del EURO III (no se tendrán en cuenta los 40 segundos anteriores al encendido del motor y las mediciones comenzarán a efectuarse coincidiendo con el momento de arranque del motor), y que este cambio en el modo de proceder tendrá como resultado un incremento de las emisiones durante la realización del test; por lo tanto, las reducciones efectivas de los estándares de emisión son en realidad mayores de lo que el cambio numérico indica.

Tabla 18. Índices de reducción de las emisiones para vehículos de gasolina de EURO II a EURO IV.

Índices de reducción de emisiones extra en frío en relación a los niveles de emisión de EURO I (%)			
	CO	VOC	NOx
EURO II	30	40	55
EURO III	51	67	73
EURO IV	80	84	88
Índices de reducción de las emisiones en caliente en relación a los niveles de emisión de EURO I (%)			
	CO	VOC	NOx
EURO II	5	40	55
EURO III	24	61	73
EURO IV	62	79	87

Fuente: MEET (1999), informe final

La tabla anterior presenta los índices de reducción establecidos por el proyecto MEET en relación a los niveles de emisión de la gasolina EURO I. Mientras que los índices de reducción para las emisiones extra del arranque en frío y las emisiones en caliente de NOx y VOC son iguales o muy similares, los índices de reducción para las emisiones en caliente de CO son mucho más bajos que los establecidos para las emisiones extra en frío.

Para los vehículos diesel, y en el caso de vehículos nuevos, se utilizó el mismo método para establecer los índices de reducción, utilizando, de nuevo, los datos recopilados por el Programa Suizo/Alemán sobre el Factor de Emisión y el proyecto I/M de la Comisión. Los índices de reducción correspondientes establecidos por el proyecto MEET se muestran a continuación en la tabla 17.

En contraste con los vehículos de gasolina, las diferencias entre los índices de reducción para las emisiones extra en frío y los de las emisiones en caliente son pequeñas. Los vehículos que utilizan EURO I ya están capacitados para alcanzar el

estándar de emisión de CO establecido para la EURO II, por lo tanto, en este caso no se aplicó reducción de ningún tipo a pesar de que el estándar se redujo de manera significativa.

Tabla 19. Índices de reducción de las emisiones para vehículos diesel EURO II a EURO IV.

Índices de reducción de las emisiones extra en frío en relación a los niveles de emisión de EURO I (%)				
	CO	VOC	NOX	PM
EURO II	0	30	40	30
EURO III	35	51	58	51
EURO IV	55	76	79	76
Índices de reducción de las emisiones en caliente en relación a los niveles de emisión de EURO I (%)				
	CO	VOC	NOX	PM
EURO II	0	30	30	40
EURO III	45	51	51	64
EURO IV	56	76	76	84

Fuente: MEET (1999), informe final

**Vehículos de carga pesada**

En el momento en el que el proyecto MEET estaba siendo desarrollado, no existían datos suficientes sobre los vehículos que utilizaban EURO I que sirvieran de base a este nuevo tipo de vehículos (introducido en 1992 para los motores de nueva generación y en 1993 para todo tipo de motores). En lugar de estos datos, se tomó como referencia una serie de vehículos en buen estado representantes de los modelos existentes en el año 1990 y, teniendo en cuenta los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas utilizando para ello 13 tipos de tests distintos, se establecieron los valores medios para esta categoría de vehículos.

Los índices de reducción para los vehículos del tipo EURO I, II, y III se han estimado tomando como base estos valores y teniendo en cuenta los requisitos establecidos a través de distintas acciones legislativas.

Así, se propone:

- Un índice de reducción del 40% de las emisiones de NO<sub>x</sub> para motores del tipo EURO II: este índice se corresponde con el cambio efectuado previamente para las emisiones anteriores al tipo EURO I (11 g/kW.h) y el requisito exigido por el tipo EURO II (7 g/kW.h).
- Los VOC y el CO los estándares existentes tienen poco o ningún efecto restrictivo. Los datos aprobados sobre el tipo medio de VOC para motores anteriores al tipo EURO I es de alrededor de 0.6 g/kWh en el test 13, por debajo incluso del estándar establecido para el tipo EURO III (0.66 g/kW.h). Sin embargo, se da por hecho que las emisiones de VOC y de CO se reducirán aún más, incluso aunque no lo exija la legislación, debido a que para cumplir los otros estándares es necesaria la aplicación de nuevos avances tecnológicos en el mundo del motor.

### Avances tecnológicos en el automóvil

En el mundo del automóvil están surgiendo una serie de avances tecnológicos cuya entrada en el mercado podría resultar significativa durante los próximos años. Dentro del proyecto MEET, se llevó a cabo un estudio para evaluar las nuevas tecnologías que posiblemente estarán en uso para el año 2020, y para hacer una estimación de las emisiones que ocasionarán. Se analizaron detalladamente los siguientes avances tecnológicos:

- Los vehículos eléctricos.
- Los vehículos eléctricos híbridos.
- Los vehículos eléctricos con célula de combustible.

#### Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos tienen una larga historia y, hasta la década de los 20, han competido en términos de igualdad con los vehículos con motor de combustión interna. Sin embargo, mientras que los motores de combustión interna iban evolucionando, los vehículos eléctricos no fueron capaces de seguir el ritmo de esta evolución, y su popularidad decayó. Los vehículos desarrollados recientemente han perfeccionado su funcionamiento (los prototipos han llegado a los 150 km/h y tienen un tiempo de aceleración inferior a 8 segundos de 0 a 100 km/h), pero aún está limitada su autonomía.

Uno de los principales estímulos para la investigación llevada a cabo recientemente es el requisito exigido por la California Air Resources Board (CARB) consistente en que el incremento en las ventas de coches debería corresponderse con ventas de vehículos de 'emisión cero' (VEC). En un principio, la proporción de VEC exigida era de un 2% de las ventas en el año 1998, de un 5% para el 2003 y de un 10% para el 2007. Con posterioridad, el 2% exigido para el año 1998 bajó, pero el porcentaje fijado para el año 2003 se incrementó hasta llegar al 10%. Más de una docena de estados han seguido las pautas marcadas por California, y la mayoría de los fabricantes están desarrollando prototipos de vehículos eléctricos para su posterior producción.

Algunas de las características de los vehículos eléctricos superan a las de los vehículos con motor de combustión interna. Son silenciosos, no producen emisiones durante su funcionamiento, no utilizan energía cuando están parados y no ocasionan pérdidas durante el calentamiento. Los motores eléctricos consiguen un par motor muy alto a bajas revoluciones, grandes velocidades, y tienen un rendimiento eficiente y constante.

Sin embargo, el rendimiento de los vehículos eléctricos se ve limitado por la batería, que supone una cuarta parte del peso total del vehículo. En la actualidad, numerosas organizaciones están llevando a cabo una considerable labor de investigación y desarrollo de la tecnología aplicable a las baterías. Las casas Chrysler, Ford y General Motors, por ejemplo, formaron el llamado US Advanced Battery Consortium con el fin de crear baterías apropiadas para los vehículos eléctricos.

Los objetivos fijados por esta organización en cuanto a los requisitos de funcionamiento de una batería se comparan con la situación actual en la tabla siguiente.

Tabla 20. Objetivos y situación actual de las características de la batería para vehículos.

	Potencia específica (W/kg)	Densidad de energía (Wh/l)	Energía específica (Wh/kg)	Vida (y)	Ciclos de vida (ciclos)	Coste (\$/kWh)
<b>Objetivos del US Advanced Battery Consortium</b>						
Medio plazo	150	135	80	5	600	<150
Largo plazo	400	300	200	10	1000	<100
<b>Situación actual</b>						
Plomo-ácido	67 - 183	50 - 82	18 - 56	2 - 3	450-1000	70 - 100
Níquel-hierro	70 - 132	60 - 115	39 - 70	n/a	440-2000	160 - 300
Níquel-cadmio	100 - 200	60 - 115	33 - 70	n/a	1500-2000	300
Níquel-hidruro metálico	200	152 - 215	54 - 80	10	1000	200
Sodio-azufre	90 - 130	76 - 120	80 - 140	n/a	250 - 600	>100
Sodio-cloruro de níquel	150	160	100	5	600	>350

Fuente: MEET (1999), informe final

En la actualidad, la mayoría de los vehículos eléctricos utilizan baterías de plomo y ácido o níquel y cadmio, que son las que se llevan utilizando durante más tiempo. Las baterías de plomo y ácido son baratas y duran bastante, sin embargo, tienen poca potencia y densidad de energía. Las baterías de níquel y cadmio tienen mayor densidad de energía y los ciclos de vida son mayores, pero tienen un precio tres veces mayor que la de plomo y ácido, y tienen el inconveniente de que, con su uso, el cadmio podría llegar al medio ambiente en grandes cantidades. La batería más apropiada para los vehículos eléctricos del futuro es la de níquel - hidruro metálico. Tiene mayor potencia y densidad de la energía, además de ser de más larga duración, pero es cara en comparación con la batería de plomo - ácido.

Aunque la potencia media requerida por un vehículo eléctrico puede variar entre 10 y 20 kW, la potencia máxima necesaria durante la aceleración y para las pendientes ascendentes puede llegar a ser 10 veces mayor. Una batería capaz de producir dicha potencia resultaría demasiado grande y pesada. Por lo tanto, el uso adicional de una fuente de potencia de alta densidad como es el volante de inercia es una buena opción.

### Vehículos eléctricos híbridos

Los vehículos eléctricos híbridos combinan un motor eléctrico con un motor de combustión. Estos cuentan con dos configuraciones generadoras de potencia principales: configuración de serie y configuración paralela. La configuración de serie consiste en un motor que pone en movimiento un generador, el cual produce la energía que mueve al automóvil. En este sistema, un pequeño motor trabaja a máximo rendimiento, lo que tiene como resultado un ahorro considerable de combustible y bajos índices de emisión. La configuración paralela permite el uso tanto del motor de combustión como del motor eléctrico. Estos sistemas han sido

diseñados para que el motor trabaje con el vehículo cargado, que es cuando su rendimiento será mayor. Un vehículo de este tipo podría con la batería eléctrica en las áreas urbanas o a baja velocidad, mientras que, en autopista, el motor de combustión podría ser la principal fuente de energía, ayudándose de la energía eléctrica para acelerar. El motor puede actuar también como un generador y se puede utilizar para alimentar la batería, bien sea durante el frenado o en aquellos casos en los que no toda la potencia del motor está siendo utilizada para poner en movimiento el vehículo.

### **Vehículos eléctricos con célula de combustible**

Las células de combustible generan electricidad directamente a partir de la reacción química que se produce entre el hidrógeno y el oxígeno, y evitan las ineficiencias de la producción de electricidad por métodos tradicionales. En la actualidad, muchos fabricantes de vehículos están interesados en el desarrollo de los sistemas de células de combustible para poder aplicarlos al mundo de la automoción. Los tipos más adecuados para este fin son el ácido fosfórico y la membrana de cambio de protones (MCP); actualmente, la mayoría de las investigaciones se están centrando en este tipo de sistemas.

Aunque la reacción responsable de la generación de electricidad es la que tiene lugar entre el hidrógeno y el oxígeno, se pueden utilizar varios carburantes para producir el hidrógeno necesario. De igual forma se puede emplear directamente hidrógeno, pero no es conveniente almacenarlo dentro del vehículo y tampoco existe la apropiada infraestructura para su correcta distribución. La mayoría de las investigaciones centran su atención en los combustibles orgánicos líquidos, llevando a bordo del vehículo un convertidor de gases para extraer el hidrógeno. El metanol y la gasolina serían los carburantes más apropiados, pero también se podrían utilizar otros (en teoría, se podría usar cualquier combustible que pueda ser transformado para producir hidrógeno).

#### **- Composición prevista del parque móvil europeo**

Prever la aparición de nuevas tecnologías en los próximos 20 años es una tarea difícil. A lo largo de los años, muchas de las nuevas tecnologías han intentado, sin éxito, romper el monopolio de los motores de combustión interna. Sin embargo, la creciente presión que existe en el sector del transporte para mitigar el impacto que produce sobre el medio ambiente está, sin duda, provocando la necesidad de un cambio. La estimación de la entrada de las nuevas tecnologías en el mercado de la automoción se muestra a continuación en la tabla siguiente y se puede aplicar a todas las categorías de vehículos.

Se da por hecho que para el año 2020 cada uno de los avances tecnológicos se habrá abierto un hueco importante en el mercado. Sin embargo, también es posible que uno de ellos prevalezca sobre los demás y domine el mercado. De nuevo, esto resulta imprevisible, por lo que en la estimación se han incluido todos los avances tecnológicos.

Para calcular el número de vehículos de nueva tecnología que componen el parque móvil europeo es necesario hacer una estimación del número de vehículos que se incorporan cada año. Se entiende que la vida media de un coche es de 15 años y que, después de esos 15 años, el vehículo abandona el parque móvil.

Tabla 21. Porcentajes estimados del reparto del mercado para los vehículos de nueva tecnología para el 2010 y el 2020.

Tipo de vehículo	% Reparto del mercado			
	Estimación pesimista		Estimación optimista	
	2010	2020	2010	2020
VE	0.5	5	1	10
VEH	1	10	2	20
VECC	0	5	0	10

Fuente: MEET (1999), informe final

## 5.1.4 Factores de emisión

Una vez introducido el transporte por carretera pasamos a analizar los modelos de emisiones y consumos de energía en función de los tipos de emisiones:

### Emisiones en caliente

Las emisiones en caliente son aquellas que se producen cuando el motor y los sistemas de control de las emisiones del vehículo (ej. el catalizador) han alcanzado la temperatura normal de funcionamiento. Este tipo de emisiones se pueden calcular, si se conoce la emisión producida por unidad de actividad, así como la actividad total a lo largo del tiempo, utilizando la siguiente fórmula:

$$E_{caliente} = e \times m \quad [6]$$

Donde:

$E_{caliente}$ , es la emisión en unidades de masa por unidad de tiempo (normalmente en t.a),

$E$ , es el factor de emisión en caliente en g/km,

$M$ , es la actividad en distancia recorrida por unidad de tiempo (normalmente en km.a).

La actividad  $m$  requerida para poder calcular la emisión producida según la ecuación anterior se define de la siguiente manera:

$$m = n \times l \quad [7]$$

donde:

$n$ , es el número de vehículos de cada una de las categorías definidas en el anexo 6.2, tabla A2,

$l$ , es la distancia media recorrida por los vehículos de cada categoría durante la unidad de tiempo dada, en km.a.

Esta ecuación se aplica a cada categoría de vehículo por separado, puesto que los factores de emisión y la actividad desarrollada son distintos en cada caso.

Es necesario señalar también que la distancia anual media recorrida por un tipo de vehículo varía de un país a otro y, en cualquier caso, esta distancia se distribuye entre los distintos tipos de carretera. Parte de dicha distancia se recorre en áreas urbanas, parte en carreteras comarcales y el resto en autopistas, teniendo cada tipo de carretera una velocidad media distinta, y afectando todos estos hechos a los factores de emisión.

Por lo tanto, para poder aplicar la ecuación se requieren los siguientes datos:

- El número de vehículos de cada categoría
- La distancia total recorrida al año por cada categoría de vehículo
- El porcentaje de distancia recorrida en carreteras urbanas, en carreteras comárcales y en autopistas
- La velocidad media empleada en cada tipo de carretera
- La relación existente entre factor de emisión y velocidad media.

Combinando las dos ecuaciones anteriores, y teniendo en cuenta las diferentes categorías de los vehículos, es posible formular la ecuación final para el cálculo de emisiones en caliente:

$$E_k = \sum_{i=1} n_i * l_i * \sum_{j=1} p_{i,j} * e_{i,j,k} \quad [7]$$

Donde:

$K$ , identifica a las sustancias contaminantes,

$i$ , es la categoría del vehículo,

$j$ , es el tipo de carretera,

$n_i$ , es el número de vehículos de cada categoría  $i$ ,

$l_i$ , es la distancia anual media recorrida por los vehículos de la categoría  $i$ ,

$p_{i,j}$ , es el porcentaje de la distancia anual recorrida en el tipo de carretera  $j$  por el tipo de vehículo  $i$ ,

$e_{i,j,k}$ , es el factor de emisión de la sustancia contaminante  $k$  correspondiente a la velocidad media empleada en el tipo de carretera  $j$ , por la categoría de vehículo  $i$ .

### Factores de emisión en caliente para coches utilitarios y vehículos de carga ligera

En el proyecto COST, Acción 319, aparecen gran cantidad de datos obtenidos de coches actualmente en uso, recopilados a su vez por varios países y laboratorios. Estos datos fueron analizados y después se definieron una serie de factores de emisión y de variables para cada una de las clases de utilitarios y vehículos de carga ligera más importantes tecnológicamente hablando, gracias todo ello a la adopción de un método según el cual los resultados obtenidos dependen de la velocidad media de los vehículos<sup>32</sup>. Se adoptaron algunas variables de emisión, desarrolladas en un primer momento para el proyecto COPERT I<sup>33</sup>, con el fin de poder abarcar todas las combinaciones posibles entre las diferentes tecnologías y carburantes existentes. Teniendo en cuenta los datos obtenidos de cada uno de los participantes, se trataron las siguientes categorías:

- Coches de gasolina que cumplen con los estándares de emisión establecidos para la EURO I (91/441/CEE )

---

<sup>32</sup>Samaras Z and L Ntziachristos (1998) Average hot emission factors for passenger cars and light duty trucks. Deliverable 7 of MEET project. LAT Report 9811.

<sup>33</sup>Eggleston S, D Gaudioso, N Gorissen, R Joumard, R C Rijkeboer, Z Samaras and K H Zierock (1993) CORINAIR Working Group on Emission Factors for Calculating 1990 Emissions from Road Traffic. Volume 1: Methodology and emission factors. Final Report. Document of the European Commission ISBN 92-826-5571-x.

- Coches diesel que cumplen con los estándares de emisión establecidos para la EURO I (91/441/CEE, 88/436/CEE y USA 83)
- LDV que utilizan la gasolina convencional
- LDV que utilizan el diesel convencional
- LDV gasolina que cumplen con los estándares de emisión establecidos para la EURO I (93/59/CEE)
- LDV diesel que cumplen con los estándares de emisión establecidos para la EURO I (93/59/CEE)

Las otras categorías tecnológicas de mayor antigüedad quedan cubiertas por las ecuaciones del método CORINAIR/COPERT. Como se puede observar, existe un completo conjunto de ecuaciones para el cálculo de las emisiones, que cubre todas las categorías de vehículos y los principales contaminantes<sup>34</sup>.

#### **Factores de emisión en caliente para vehículos de carga pesada (VCPó HGV)**

En el Workbook on emission factors for road transport (INFRAS 1995)<sup>35</sup> se incluye una útil recopilación de los factores de emisión para vehículos de carga pesada y otros tipos de vehículos (incluidos los camiones pesados y los autobuses) para varios patrones de conducción.

Los parámetros adicionales considerados en el caso de los vehículos de carga pesada son la pendiente de la carretera y el grado de carga del vehículo; Tanto los vehículos de carga pesada como los autobuses se dividen a su vez en una serie de subcategorías según su peso. En la citada publicación se dan factores de emisión de carácter 'discreto' para cada conjunto de patrones de conducción predefinidos con anterioridad. Dentro del proyecto MEET, y a partir de la curva estadística que mejor se adaptaba a los datos proporcionados por el texto mencionado, se definieron funciones continuas de los índices de emisión, dependiendo de la velocidad media del vehículo. Las funciones adoptan la siguiente forma:

$$\varepsilon = K + av + bv^2 + cv^3 + d + e + f \quad [8]$$

Donde:

$\varepsilon$ , es el índice de emisión en g/km para un vehículo de transporte de mercancías descargado, o para un autobús o autocar que transporta escasa carga, en una carretera sin pendiente (0%),

$K$ , es una constante,

$a - f$ , son los coeficientes,

$v$ , es la velocidad media del vehículo en km/h.

Las sustancias contaminantes consideradas son: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y las partículas. Los coeficientes ( $a-f$ ) de estas ecuaciones son válidos para cuatro clases de vehículos de carga (de 3.5 a 7.5

<sup>34</sup>Tablas de la A54 a A61 para los coches de pasajeros y Tablas de A61 a A63 para los vehículos de carga ligera del anexo de tablas.

<sup>35</sup>INFRAS (1995) Workbook on emission factors for road transport: explanatory notes. INFRAS, Bern, Switzerland

toneladas, de 7.5 a 16 toneladas, de 16 a 32 toneladas y de 32 a 40 toneladas), así como para autobuses y autocares<sup>36</sup>.

### **Ciclomotores y motocicletas**

En el pasado se le prestaba poca atención a las emisiones producidas por los vehículos de dos ruedas, y en cualquier caso menos que a las emisiones producidas por los utilitarios o los camiones. Sin embargo, en la década de los 70 quedó demostrado que en aquellos países en los que una gran parte de la población utiliza los vehículos de dos ruedas como medio de transporte la contribución de estos vehículos al problema de la contaminación puede ser significativa. Los motores de dos tiempos, en particular, pueden emitir cantidades significativas de hidrocarburo, pero las mediciones llevadas a cabo muestran que los motores de cuatro tiempos no están a la altura de los estándares establecidos en el caso de los coches utilitarios. En algunos países, los vehículos de dos ruedas serían una parte significativa dentro de los inventarios de las emisiones.

El problema para conseguir una estimación correcta sobre el comportamiento general de los vehículos de dos ruedas acerca de las emisiones que producen es que los datos de los que se dispone son escasos y, a menudo, se basan en muy pocos vehículos. Por otra parte, existe mucha más variedad de vehículos de dos ruedas que de cuatro en cuanto a la potencia del motor, al peso, a los tipos de motor y a los tipos de vehículo. La escasez de datos hace que toda esta variedad sea difícil de representar.

Los tipos de vehículo a considerar son:

*Los ciclomotores.* Vehículos de dos ruedas pequeños, a menudo de uso restringido. Existen grandes diferencias entre los distintos países en cuanto, por ejemplo, al límite de velocidad de los ciclomotores (de 25 km/h a 50 km/h) y a otras propiedades (ej. con o sin marchas).

*Las Motocicletas.* Vehículos más grandes cuyas características varían: de 125 a más de 1200 cc de motor, de 60 a los 350kg de peso, de 3.5 a 100 kW o más. Para ser utilizados en carretera, fuera de carretera e híbridos.

Los motores a considerar son los de 2 y 4 tiempos. Los motores Wankel se utilizaron durante un tiempo, pero en la actualidad están completamente fuera del mercado. En cuanto a las emisiones contaminantes, existen una serie de normas que los vehículos tienen que cumplir. A menudo, la legislación exige requisitos diferentes para los motores de 2 y de 4 tiempos y, evidentemente, para diferentes tipos de vehículos.

En total, se midieron las emisiones producidas por 24 motocicletas de la UDC europea, la EUDC también europea, la US-FTP americana, American Highway Cycle y el German Motorway Cycle. Esto permitió establecer una variable en función de la velocidad dentro del proyecto MEET<sup>37</sup>. Los factores de emisión propuestos se presentan en tres cuadros específicos en el ya mencionado informe final de dicho proyecto<sup>38</sup>.

---

<sup>36</sup> Los coeficientes para estas cuatro clases de vehículos son de la tabla A64 a la tabla A70 del anexo de tablas.

<sup>37</sup> Rijkeboer R C (1997) Emission factors for mopeds and motorcycles. Deliverable 11 of the MEET project. TNO, Delft, The Netherlands

<sup>38</sup> Ver anexo Tablas A71 a la Tabla A73 del anexo de tablas.

### Otros parámetros que influyen en las emisiones en caliente

Aparte de la tecnología del vehículo y de la velocidad media, otros parámetros influyen también en las emisiones, ya sea directamente (ej. la distancia recorrida por el vehículo, la temperatura del motor, la altitud a la que se encuentre), o alterando el funcionamiento del motor (ej. la pendiente de la carretera o la carga que transporta el vehículo). Los factores de emisión y las variables que aparecen en la bibliografía citada hacen referencia a las condiciones *estándar* para llevar a cabo los tests (es decir, cero altitud, cero pendiente de la carretera, vehículo vacío, etc.).

Los factores de emisión se calculan, en primer lugar, como una función de la velocidad media del vehículo. Dependiendo del tipo de vehículo, es necesario hacer una serie de correcciones que permitan tener en cuenta los efectos de la pendiente de la carretera, la carga del vehículo, la distancia recorrida y la temperatura ambiente. Así, para un tipo de vehículo y sustancia contaminante determinados:

$$e_{\text{caliente}} = f(v) * GC * LC * MC * TC \text{ [9]}$$

Donde:

$e_{\text{en caliente}}$ , es el factor de emisión corregido,

$f(v)$ , es el índice de emisión dependiendo de la velocidad media, para condiciones estándar,

$GC$ ,  $LC$ ,  $MC$  y  $TC$ , son los factores o variables de corrección para la pendiente, la carga, la distancia recorrida y la velocidad respectivamente.

Cada uno de estos factores de corrección se analiza en el informe final del MEET por separado, para la pendiente de la infraestructura viaria, para el grado de ocupación y la carga del vehículo, para la altitud, para la degradación de los dispositivos de control, para la temperatura ambiente y para el aire acondicionado, y su análisis se detalla a continuación:

La pendiente en la infraestructura viaria (GC):

- La pendiente de la carretera tiene el efecto de aumentar o disminuir la resistencia de un vehículo a la tracción. Aumentos o disminuciones de la carga en el motor tienen un efecto correspondiente en índices de la emisión y de combustible. No se puede asumir que la emisión adicional cuando viaja lo hace cuesta arriba es compensado completamente por la emisión reducida cuando cuesta abajo.
- En principio las emisiones y el consumo de combustible de los vehículos ligeros y de los pesados son afectadas por gradiente del camino. Sin embargo, debido a sus masas más altas, la influencia del gradiente es mucho más significativa en el caso de los vehículos pesados.
- El método adoptado para tener en cuenta el efecto del gradiente se basa en los resultados del programa alemán del factor de la emisión<sup>39</sup>. Se han introducido los factores especiales del gradiente, considerado para ser una función de:

---

<sup>39</sup> Hassel D and F J Weber (1997) Gradient influence on emission and consumption behaviour of light and heavy duty vehicles. Deliverable 9 of the MEET project. TÜVRheinland, Cologne, Germany

- La tecnología (para los vehículos de poca potencia) o de la masa (para los vehículos pesados).
- La pendiente del camino
- El agente contaminador
- La velocidad media del vehículo

Para cada categoría, gradiente y agente contaminador del vehículo, el factor del gradiente se puede calcular como función polinómica de la velocidad media del vehículo:

[10]

$$as_{i,j,k} = A6_{i,j,k} \cdot V^6 + A5_{i,j,k} \cdot V^5 + A4_{i,j,k} \cdot V^4 + A3_{i,j,k} \cdot V^3 + A2_{i,j,k} \cdot V^2 + A1_{i,j,k} \cdot V + A0$$

Donde:

$as_{i,j,k}$ , es el factor de corrección,

V, es la velocidad media,

$A0_{i,j,k}, \dots, A6_{i,j,k}$ , son constantes para cada agente contaminador, vehículo y tipo de gradiente.

Por lo tanto, se propone para corregir el factor de la emisión calculado para el uso del vehículo en un camino plano según la ecuación siguiente, para incorporar la influencia del gradiente del camino:

$$ec_{hot,i,j,k} = e_{hot,i,j,k} \times as_{i,j,k} \quad [11]$$

Donde:

$ec_{hot,i,j,k}$ , es el factor corregido de la emisión del agente contaminador i, en g/km, del vehículo de la categoría j conducido en los caminos del tipo k con el motor caliente.

$e_{hot,i,j,k}$ , es el factor de la emisión del agente contaminador i, en g/km, del vehículo de la categoría j conducido con los motores calientes en las carreteras del tipo k con el gradiente cero.

$as_{i,j,k}$ , es el factor de la corrección del gradiente del agente contaminador i del vehículo de la categoría j conducido en los caminos del tipo k para la clase apropiada del gradiente (clases de gradiente son: el 0%, el 2%, el 4%, el 6%, -2%, -4% y -6%).

Los coeficientes necesarios para el cálculo del factor de la corrección del gradiente se presentan en las tablas siguientes<sup>40</sup>.

El grado de ocupación, la carga del vehículo de mercancías:

Un incremento de la masa del vehículo requiere una carga adicional de energía al motor para poder funcionar. El consumo y la emisión son proporcionales a la energía que necesita el motor.

Se deben diferenciar dos categorías de vehículos:

- Para los vehículos de viajeros:

---

<sup>40</sup> Anexo de tablas: Tablas A74 a la Tabla A82

La influencia de la carga en estos vehículos es muy pequeña. Además esta influencia está cubierta para esta categoría de vehículos en los factores de emisión calientes estándares.<sup>41</sup>

- Para los vehículos de carga pesados:

Para estos vehículos la carga tiene gran influencia en el consumo y la emisión<sup>42</sup>. La función de corrección de la carga se expresa:

$$\varepsilon_l = \varepsilon_u \times \phi(\gamma, v) \quad [12]$$

Donde:

$\varepsilon_l$ , es el factor de la emisión cuando está cargado en g/km,

$\varepsilon_u$ , es el factor de la emisión cuando está descargado en g/km,

$\Phi(\gamma, v)$ , es la función del factor de la corrección de la carga,

$\Gamma$ , es la pendiente en porcentaje,

$V$ , es la velocidad media del vehículo en función de la carga en kilómetros por hora.

Factor de la corrección de la función  $\Phi(\gamma, v)$  es:

$$\phi(\gamma, v) = k + n\gamma + p\gamma^2 + q\gamma^3 + rv + sv^2 + tv^3 + u/v \quad [13]$$

Donde:

$K$ , es una constante,

$n$ -  $u$ , son coeficientes que se estiman.

Los coeficientes para estas funciones se presentan en las tablas del anexo<sup>43</sup>.

Para los autobuses y los coches urbanos, las funciones básicas proveen de estimaciones de las emisiones para el vehículo una carga media, más bien que de ninguna carga. Las funciones de la corrección de la carga descritas arriba no son aplicables para estos tipos del vehículo.

### La altitud

Existen muy pocos datos del efecto de la altitud en emisiones. Recientemente, algunas investigaciones fueron realizadas dentro del programa alemán/suizo del factor de la emisión<sup>44</sup> para estudiar la influencia de la altitud en las emisiones y en el consumo de combustible. Las medidas fueron realizadas en base de la *Test 72* de los E.E.U.U. con el motor operacionalmente caliente. Las altitudes simuladas fueron de 0, 1000 y 2000 m. Los vehículos de la prueba incluyeron los motores de combustión

<sup>41</sup> German/Swiss Emisión Factor Programme.

<sup>42</sup> Hickman A J (1997) Emission functions for heavy duty vehicles. Deliverable 10 of the MEET project. Project Report SE/289/97. Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK.

<sup>43</sup> Anexo de tablas de la A83 a la A86.

<sup>44</sup> German/Swiss Emisión Factor Programme.

interna convencional, el catalizador del lazo cerrado y los vehículos comerciales diesel del coche de pasajeros y ligeros con los motores diesel de la inyección directa.

Se demostró que es necesario tener cuenta de la influencia de la altitud al determinar las emisiones del agente contaminador para vehículos que recorren una importante parte de sus recorridos en una altitud elevada.

Debido al número relativamente pequeño de los vehículos investigados, el programa de prueba no permitió que el desarrollo de las funciones de la emisión y del consumo que corrigieran los efectos de la altitud.

Sin embargo, se puede indicar que hay una relación inequívoca entre las emisiones y la altitud para todos los tipos del vehículo estudiados. Se deben realizar otras investigaciones teniendo en cuenta:

- Los vehículos regulados con catalizador.
- Una muestra más grande
- Tener en cuenta unos intervalos de altitud más pequeños.

Para tener cuenta los efectos del comportamiento en la conducción, el programa debe incluir otros ciclos de conducción junto con los de la prueba 72 de los E.E.U.U. para poder producir funciones básicas.

### **La degradación de los controles de la contaminación**

En el caso de los motores de combustión interna convencional y de vehículos diesel, el control de emisión se deteriora generalmente, dentro de un intervalo de servicio. El nivel de la emisión se puede, sin embargo, restaurar aproximadamente al de un vehículo nuevo por el ajuste y el mantenimiento o por la corrección de defectos, a lo largo del kilometraje del vehículo. Debido a esto, no se considera el deterioro de los controles de emisión en función del kilometraje del vehículo en el caso de los motores de combustión convencional y de vehículos diesel. La condición de un mantenimiento generalmente más pobre para los vehículos más viejos tiene el efecto de aumentar emisiones pero éste es ignorado.

### **Vehículos en circuito cerrado con catalizador**

En el caso de los vehículos con catalizador, sin embargo, un deterioro inevitable del grado de conversión del catalizador (debido a los años y a la alta temperatura) lleva a un aumento de emisión con el aumento del kilometraje. En contraste con los vehículos convencionales de motor de combustión interna, sin embargo, la nueva condición de emisión plana no se puede restaurar en un kilometraje más alto incluso después de que se hayan corregido las averías, a menos que se ponga un catalizador de reemplazo.

Para alcanzar este objetivo, una posibilidad es determinar la relación estadística entre la emisión y el kilometraje usando un análisis de la regresión en base a una gran muestra de vehículos. En Europa tal investigación fue conducida por Programa del factor de la emisión. Fue deducido que un análisis de la regresión en base al US-Test-75 refleja la influencia del kilometraje del vehículo en la emisión, también se demostró que en el caso de los vehículos con los catalizadores de anillo abierto no había ninguna correlación estadística existe entre la emisión y el kilometraje del vehículo

Se ha conducido otro análisis usando el Modem internacional más grande disponible para Proyecto MEET. Ya que es necesario incluir tantos datos como sea posible, para los vehículos en la amplia gama de las clases del kilometraje, se utilizaron los resultados de los ciclos legislativos de la prueba (EC urbana y EUDC). Para los ciclos del mundo real, los datos para los vehículos en algunas clases del kilometraje son muy pocos. El análisis confirmó una degradación sistemática de emisiones con el

aumento del kilometraje para CO, HC y las emisiones de NOX, pero del CO2 (y por lo tanto el consumo de combustible) seguían siendo estables.

Tres fases del proceso de degradación fueron identificadas:

- La fase del rodaje (0 - 10.000 kilómetros). Incluso los vehículos relativamente nuevos demuestran una emisión por el deterioro, pero los niveles de la emisión durante este período sigue siendo bajos.
- La fase media (10.000 - 100.000 kilómetros). La degradación continúa durante esta fase y las emisiones alcanzan niveles absolutamente altos al final.
- Las emisiones finales de la fase (> 100.000 kilómetros) de los vehículos muchos kilómetros parecen estabilizarse. Esto puede estar debido a la necesidad de reparar o de sustituir el sistema de control de emisión por los kilómetros de vehículo, aunque debe ser observado que hay muy pocos datos para esta fase.

Usando este procedimiento, las funciones de la degradación fueron derivadas para los tres agentes contaminadores CO, HC y NOX, porque las tres clases del tamaño del motor usadas para los coches de la gasolina y para los dos ciclos usados en análisis (EC urbana y EUDC). Para proporcionar una base común para la función de las emisiones calientes y los factores de la degradación del kilometraje, solamente fueron utilizados los resultados de los coches incluidos en la producción de la emisión caliente en las funciones (los datos adicionales estaban disponibles, de los coches probados solamente usando los ciclos legislativos, y éstos fueron utilizados para verificar la validez en forma cruzada de la función de degradación, pero no en su producción). Las funciones de la degradación fueron normalizadas de modo que su valor en el kilometraje medio para cada clase del agente contaminador y del vehículo era uno.

El uso de las funciones es como sigue:

$$MCEF = MC(\text{velocidad, kilometraje}) \times EF(\text{velocidad}) \quad [14]$$

Donde:

*MCEF*, es el factor corregido kilometraje de la emisión,

*MC*, es el factor de la corrección del kilometraje,

*EF*, es el factor sin corregir de la emisión.

El factor de la corrección del kilometraje para las velocidades bajas (menos 19 kilómetros por hora) es determinado sobre la EC (El ciclo urbano), y para las altas velocidades (más de 63 kilómetros por hora) el factor de la corrección que debe ser utilizado es el de EUDC. Para las velocidades intermedias se obtiene el factor usando la función siguiente:

$$MC_V = MC_{UDC} + (v - 19) \times (MC_{MEUDC} - MC_{UDC}) \quad [15]$$

Donde:

*MCUDC*, es el factor urbano de la corrección,

*MCEUDC*, es el factor extra-urbano de la corrección,

*MC<sub>v</sub>*, es el factor de la corrección a la velocidad intermedia,

*V*, es la velocidad intermedia.

Los coeficientes para las funciones urbanas y extra-urbano de la corrección del kilometraje se dan en la tabla 47. Al sustituir estas expresiones en la ecuación anterior se llega a un sistema de las ecuaciones para la corrección factores que tienen la forma:

$$MC_V = a + bv + cm + dvm \quad [16]$$

Donde:

$m$ , es el kilometraje del vehículo,  
 $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ , son coeficientes.

Los coeficientes para estas ecuaciones también se incluyen en la tabla del anexo <sup>45</sup>.

### La temperatura ambiente

Las emisiones calientes son influenciadas mucho menos por la temperatura ambiente que las emisiones de arranque, pero debido a la amplia gama de temperaturas ambiente que hay en Europa, del norte al sur y en invierno y en verano, se debe dar una especial importancia a este efecto. La fuente principal de la información es un informe por VTI<sup>46</sup> que resume medidas de diversas instituciones.

Las medidas fueron conducidas usando el ciclo FTP 75 y usando los resultados a partir de las segundas (estabilización<sup>47</sup>) y terceras fases (transición caliente) de la prueba.

Las medidas disponibles cubren la gama de temperaturas -20°C a +25°C. El efecto de la temperatura se puede expresar como el ratio de emisiones a cualquier temperatura determinada con otros a una temperatura de referencia, y en este análisis, la temperatura de referencia fue 20°C, que es la típica para las medidas usadas para generar las funciones básicas de la emisión.

Entonces:

$$TCEF = TC(\text{temperatura}) \times EF(\text{velocidad}) [17]$$

Donde:

$TCEF$ , es el factor corregido temperatura de la emisión,  
 $TC$ , es el factor de la corrección de la temperatura,  
 $EF$ , es el factor sin corregir de la emisión.

La tabla del anexo<sup>48</sup> da los coeficientes para la determinación de los factores de la corrección de la temperatura. Hay diferencias entre los factores de la corrección determinados usando datos de estabilización y las fases transitorias calientes, debe ser reconocido que los datos muestran una considerable diferencia. En ausencia de datos más completos, deben estar considerados solamente como indicaciones del efecto de la temperatura ambiente en emisiones calientes. Por esa razón, probablemente lo mejor en la práctica es utilizar el promedio de las funciones para las dos partes de la prueba del FTP: los promedios también se demuestran en la tabla del anexo<sup>48</sup>.

### El aire acondicionado

Hay una tendencia de aumento para que los coches de pasajeros sean equipados con sistemas de aire acondicionado. Cuando el aire acondicionado es funcionando,

---

<sup>45</sup> Anexo de tablas: Tabla A87.

<sup>46</sup> VTI (1996) Influence of ambient temperature on warm engine exhaust emissions from passenger cars. Report 709A. VTI, Linköping, Sweden.

<sup>47</sup> la fase de la estabilización comienza después de 505 segundos de un arranque en frío. Es posible que el motor no esté calentado completamente al principio de esta fase en que las pruebas se llevan a temperaturas muy bajas.

<sup>48</sup> Anexo de tablas: Tabla A88.

impone una carga adicional al motor, con efectos consecuentes sobre el consumo y emisiones de combustible. Las pruebas son realizadas por ADEME<sup>49</sup> y UTAC<sup>50</sup> para comparar las emisiones y el consumo de combustible en una gama de coches diesel y de tres vías del catalizador. Los dos sistemas de pruebas fueron realizados de manera diferente, pero debido a la muestra relativamente pequeña de coches y la variabilidad de los resultados, no hay diferencias sistemáticas evidentes: por lo tanto se han considerado juntas.

Para los coches de la gasolina, todas las emisiones aumentan en promedio, aunque hay incertidumbre considerable a excepción del CO<sub>2</sub>, donde hay un aumento significativo de el casi 20%. Los diesel muestran aumentos significativos para NO<sub>x</sub>, P.M. y CO<sub>2</sub>, del 20 al 30%, pero disminuyen (no estadístico significativo) para el CO y HC. Así, está claro que el uso del aire acondicionado aumenta el consumo de combustible (indicada por los resultados del CO<sub>2</sub>), mientras que los efectos sobre otras emisiones dependen de la eficacia de la combustión del motor bajo una carga más alta y puede, en algunos casos, disminuir. Sigue siendo demasiada incertidumbre para poder proponer cuantitativamente factores para corregir el uso de los sistemas de aire acondicionado: los datos se relacionan solamente con un solo el ciclo legislativo (el ciclo europeo de la prueba), y son solo una pequeña cantidad de pruebas. Igualmente, los datos operacionales necesitados para evaluar este efecto no están disponibles: la frecuencia del uso de los sistemas de aire acondicionado no se sabe.

Son necesarios, por tanto, estudios más detallados del efecto del aire acondicionado en las emisiones, cubriendo más vehículos y una gama de ciclos de conducción mayor, y los exámenes se deben idear para proporcionar estadísticas más convenientes.

#### **Factor de emisión en caliente corregido**

El factor de emisión corregido de todas las características anteriores, se ha de combinar, entonces, con los datos apropiados acerca de la actividad desarrollada, como ya se ha mencionado anteriormente, y con la suma de los datos recogidos acerca de todas las categorías de vehículos con el fin de obtener las emisiones producidas por la totalidad del parque móvil. Debido a las limitaciones existentes en cuanto los datos disponibles, no es posible encontrar en la bibliografía una lista completa de todas las variables correspondientes a todas las categorías de vehículos existentes. La velocidad media del vehículo es un dato que se tiene en cuenta en todos los casos, pero otros datos sólo se pueden aplicar en aquellos tipos de vehículos sobre los que existe la información necesaria, y sobre los que se demuestra que estos datos ejercen una influencia significativa. A continuación, en la tabla siguiente se ofrece un sumario de los parámetros incluidos en el proceso de cálculo de las emisiones en caliente, según el método MEET; aunque es sabido que otros parámetros influyen también en este tipo de emisiones y se conocen, de igual manera, sus efectos, aún no existen datos suficientes a partir de los que realizar estimaciones cuantitativas que resulten fiables.

---

<sup>49</sup> ADEME (1996) La climatisation automobile: impact énergétique et environnementaux premier constat. ADEME, Paris, France

<sup>50</sup> UTAC (1997) Evaluation de l'influence de la climatisation sur la consommation de carburant et les émissions de polluants des automobiles. Process Verbal Nr. 96/04666. UTAC, France.

Tabla 22. Factores de emisiones corregido. Modo carretera.

Tipo de vehículo	Velocidad media	Pendiente	Carga	Distancia recorrida	Temperatura
Coche-convencional	✓	✓			
- con catalizador	✓	✓		✓	✓
- diesel	✓	✓			
VCL- convencional	✓	✓			
- con catalizador	✓	✓		(✓)*	(✓)
- diesel	✓	✓			
VCP	✓	✓	✓		
Autobús y autocar	✓	✓			
Motocicleta	✓				

\* Estos vehículos son tratados como los coches con catalizador

Fuente: Documento de trabajo del proyecto MEET (Transport Reseca Laboratory) 1.999

### Emisiones en frío, emisiones de arranque.

El método de estimación de emisiones de arranque propuesto por el proyecto MEET fue desarrollado de forma empírica utilizando para ello los datos obtenidos a partir de numerosos programas de análisis llevados a cabo en Europa.

En este proyecto se recopilaban y analizaban los datos más relevantes obtenidos de la medición de las emisiones producidas por un mismo vehículo con el motor en frío y en caliente, y realizando los tests bajo idénticas condiciones: la diferencia entre ambas mediciones se consideró representativa de los excesos de emisión resultantes del funcionamiento del motor en frío.

El coche de pasajeros era el único tipo de vehículo sobre el que existían suficientes datos. Dentro de esta categoría, se distinguió entre vehículos de gasolina y vehículo diesel, con y sin catalizador, pero los datos acerca de vehículos diesel equipados con catalizador eran demasiado escasos como para permitir realizar un análisis pormenorizado sobre esta subcategoría<sup>51</sup>.

Según el método MEET, para cada sustancia contaminante y cada tipo de vehículo se marca un valor de referencia que establece el exceso de emisión como el valor correspondiente a una temperatura de arranque de 20°C y a una velocidad media de 20km/h. El valor de referencia se corrige mediante las variables definidas en el método a partir del análisis de los datos recopilados, dependiendo de cuál sea la temperatura real de arranque y la velocidad media, así como la distancia recorrida por el vehículo (algunos trayectos son más cortos que la distancia necesaria para calentar completamente el motor del vehículo, y en esos casos, no se produce el exceso de emisión en su totalidad)

<sup>51</sup>Sérié E and R Joumard (1997) Modelling of cold start emissions for road vehicles. Deliverable 8 of the MEET project. Report LEN9731. INRETS, Bron, France.

Fórmula general para calcular el exceso de emisiones de arranque producidas durante el trayecto

La fórmula para calcular el exceso de emisión en función de la velocidad media, la temperatura ambiente y la distancia recorrida es la siguiente:

$$\text{exceso de emisión} = \omega \times [f(V) + g(T) - 1] \times h(d) \quad [18]$$

Donde:

*exceso de emisión*, durante un trayecto se expresa en g

*V*, es la velocidad media en km/h mientras el motor está frío

*T*, es la temperatura en °C (temperatura ambiente para un arranque en frío, temperatura de arranque del motor cuando el arranque tiene lugar a una temperatura intermedia)

*d*, es la distancia recorrida

*ω*, es el exceso de emisión que se toma como referencia (20°C y 20 km/h)

### Exceso de emisión que se toma como referencia

El valor de referencia de exceso de emisión se define como la cantidad de emisión producida a una velocidad media de 20 km/h con una temperatura de arranque de 20°C, y durante un trayecto lo suficientemente largo como para que el motor alcance sus condiciones normales de temperatura. En la tabla siguiente se muestran los valores de referencia para el exceso de emisión en función del agente contaminante y de la tecnología.

Tabla 23. Referencias de exceso de emisiones de arranque en frío a 20 °C y 20 km/h (ω)

Tecnología	Agente contaminador				
	CO <sub>2</sub>	CO	HC	NO <sub>x</sub>	FC
Coches de gasolina sin catalizador	144.16	63.51	8.23	-0.30	83.71
Coches Diesel sin catalizador	182.57	2.18	0.82	0.06	62.95
Coches gasolina con catalizador	132.46	28.71	4.62	1.77	59.79
Coches diesel con catalizador	153.36	0.74	0.65	0.03	55.4

Fuente: Documento de trabajo del proyecto MEET

### Influencia de la velocidad media

En el método MEET se utilizan una serie de variables específicas con el fin de tener en cuenta la influencia que ejerce la velocidad media a la que se desplaza el vehículo sobre el hecho de que se produzca un exceso de emisión *f(V)* y poder así variar el valor de referencia que aparece en la fórmula general anterior; estas variables se normalizan para darle el valor de 1 a la velocidad de 20 km/h.

Tabla 24. Coeficientes de corrección de la velocidad  $f(V)$  y los límites

Tecnología	Agente contaminante	Coeficientes correctores $f(V)$	Velocidad límite
Coches de gasolina con catalizador	CO <sub>2</sub>	$0.0034V + 0.9321$	-
	CO	$-0.0013V + 1.0261$	-
	HC	$-0.0053V + 1.1060$	-
	NO <sub>x</sub>	$0.0636V - 0.2712$	V > 5 km/h
	FC (calculado)	$0.0015V + 0.9707$	-
Coches diesel sin catalizador	CO <sub>2</sub>	1	-
	CO	$-0.0185V + 1.3704$	V < 74 km/h
	HC	$-0.0163V + 1.3252$	V < 81 km/h
	NO <sub>x</sub>	$-0.0227V + 1.4545$	V < 64 km/h
	FC (calculado)	1	-
Coches gasolina sin catalizador	CO <sub>2</sub>	$-0.0101V + 1.2024$	V < 119 km/h
	CO	$0.0288V + 0.4245$	-
	HC	$0.0142V + 0.7154$	-
	NO <sub>x</sub>	$0.1136V - 1.2727$	V > 11 km/h
	FC (calculado)	$0.0064V + 0.8716$	-

Fuente: MEET, 1999

### Influencia de la temperatura ambiental

En general, el exceso de emisión tiende a incrementarse al mismo tiempo que se reduce la temperatura de arranque. Las variables, que expresan el exceso de emisión en función de la temperatura de arranque, se determinaron usando un modelo lineal, y fueron estandarizadas para darle el valor de 1 a la temperatura de arranque de 20°C.

Tabla 25. Coeficientes de corrección de la temperatura y los límites

Tecnología	Agente contaminador	Coeficiente de corrección $g(T)$	Límite T
Coches de gasolina con catalizador	CO <sub>2</sub>	1	-
	CO	-0.2591T + 6.1829	T < 23 °C
	HC	-0.1317T + 3.6331	T < 27 °C
	NO <sub>x</sub>	1	-
	FC	-0.0555T + 2.1092	T < 38 °C
Coches Diesel Sin catalizador	CO <sub>2</sub>	-0.0458T + 1.9163	T < 41 °C
	CO	-0.0602T + 2.2048	T < 36 °C
	HC	-0.0976T + 2.9512	T < 30 °C
	NO <sub>x</sub>	-0.0893T + 2.7857	T < 31 °C
	FC	-0.0439T + 1.8787	T < 42 °C
Coches gasolina sin catalizador	CO <sub>2</sub>	1	-
	CO	-0.0918T + 2.8360	T < 30 °C
	HC	-0.1344T + 3.6888	T < 27 °C
	NO <sub>x</sub>	1	-
	FC	-0.0431T + 1.8618	T < 43 °C

Fuente: MEET, 1999

### Influencia de la distancia recorrida

Las emisiones producidas por un vehículo se estabilizan únicamente cuando su motor ha alcanzado sus condiciones normales de temperatura y es imprescindible recorrer una cierta distancia (la ‘*distancia en frío*’) antes de alcanzar dicha temperatura. Esta distancia varía según el tipo de vehículo, de la forma en que se conduce ese vehículo (que, según el método MEET, viene representada por la velocidad media), la temperatura ambiente y las sustancias contaminantes que se están analizando.

El exceso de emisión se produce durante toda la *distancia* recorrida *en frío* pero los trayectos más cortos no producen la cantidad total de los excesos de emisión que un trayecto de mayor duración también podría ocasionar en idénticas condiciones. Las variaciones en el exceso de emisión (en la fórmula general  $h(d)$ ) para trayectos más cortos que la *distancia recorrida en frío* se expresan como una función de la relación entre la longitud del trayecto y la distancia recorrida en frío; de esta manera:

$$h(d) = (1 - e^{-a\delta}) \quad [19]$$

Donde:

$\delta$ , es la relación entre la longitud del trayecto y la distancia recorrida con el motor en frío,

$a$ , es una constante.

Cuando la distancia del trayecto es igual a la distancia recorrida en frío, la función es igual a uno. Esta función exponencial adoptada por el proyecto MEET encaja bien con la mayoría de los datos analizados, mostrando la evolución del exceso de emisión dependiendo de la distancia recorrida<sup>52</sup>.

Otros tipos de vehículo:

- Coches utilitarios diesel con catalizador

En el proyecto MEET se utilizaron los pocos resultados disponibles, obtenidos a partir de los tests realizados sobre coches diesel con catalizador, para indicar el exceso de emisión tomado como referencia ( $\omega$ ) para este tipo de vehículos. A falta de datos adicionales, a las variables  $f(V)$ ,  $g(T)$  y  $h(d)$  se les otorga el mismo valor que a las utilizadas para los coches diesel que no tienen catalizador.

- Vehículos de carga ligera

Debido a que no se dispone de datos específicos sobre los vehículos de carga ligera, según el método MEET, el exceso de emisión de estos vehículos se calcula de la misma manera que para coches utilitarios con el mismo tipo de motor y el mismo sistema de control de emisión.

- Vehículos de carga pesada

Sobre este tipo de vehículos se dispone también de muy pocos datos que resulten relevantes<sup>53</sup>; sin embargo, fue posible hacer una estimación aproximada de los excesos de emisión que produce este tipo de vehículos (únicamente en el caso de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de NO<sub>x</sub> existe una relación sistemática entre el tamaño del motor o del vehículo y el exceso de emisión).

Puesto que, para los VCP, los datos operativos que indican el número de arranques en frío al día (u otro periodo de tiempo) son desconocidos, el método MEET asume que cada vehículo realiza un arranque en frío al día. Esta asunción, que tiene su base en la idea de que el uso comercial de los VCPs puede significar que este tipo de vehículos se arrancan en frío al comienzo de cada jornada de trabajo, y que, a lo largo del día, sus motores no se paran el tiempo suficiente como para que estos se enfríen de forma significativa. Algunos vehículos realizarán más de un arranque en frío al día pero, en contrapartida, durante los fines de semana y vacaciones, algunos de estos vehículos no se utilizan en absoluto.

- Autobuses y autocares

Puesto que los autobuses y los autocares normalmente poseen motores diesel del tipo anteriormente expuesto, según el método MEET, el exceso de emisión producido con el motor en frío es igual al producido por los VCP de igual peso. Mientras que el peso de autobuses y autocares varía significativamente dependiendo de su tamaño y de su capacidad, el peso más común es, probablemente, el que está en la categoría que va desde 16 a 32 toneladas.

A falta de información precisa, de nuevo es necesario dar por hecho que cada vehículo realiza un arranque en frío al día.

---

<sup>52</sup> Anexo de tablas: Tabla A89 y A90.

<sup>53</sup> Kurtul S and M A Graham (1992) Exhaust emission tests on ten heavy duty diesel engines. Report CR 275. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK.

### Pérdidas de evaporación:

Las emisiones de hidrocarburos producidas por los vehículos de motor se deben, principalmente, a las emisiones de salida y a las pérdidas por evaporación que tienen lugar a través del sistema de carburante del vehículo (el depósito del combustible, el carburador o el sistema de inyección, los conductos del combustible). Las emisiones por evaporación se producen debido a la combinación de varios hechos: la volatilidad del carburante, la variación de la temperatura ambiente y los cambios de temperatura que se producen en el sistema de combustible del vehículo durante el proceso normal de conducción (variación de la temperatura debido a la transmisión de calor desde el motor al resto de los componentes del sistema del combustible).

En general, existen cuatro tipos distintos de pérdida por evaporación:

- Pérdidas por llenado del depósito. Estas pérdidas se producen cuando el depósito de combustible del vehículo está lleno. Los vapores saturados son desplazados por el carburante líquido y salen a la atmósfera.
- Pérdidas diurnas. Estas pérdidas son el resultado del cambio de temperatura de la noche al día, que hace que el contenido del depósito del combustible se contraiga y se expanda, liberando los vapores saturados durante la expansión.
- Pérdidas por absorción de calor. Estas pérdidas tienen lugar cuando se para el vehículo tras su funcionamiento y hasta que se igualan las temperaturas (temperatura ambiente y temperatura del vehículo) se produce la evaporación del combustible en ciertas partes del motor.
- Pérdidas con el vehículo en funcionamiento. Estas pérdidas por evaporación tienen lugar cuando el vehículo está en marcha.
- Las pérdidas por llenado del depósito se atribuyen normalmente a la cadena de manipulación del combustible y no a las emisiones producidas por el vehículo. Por lo tanto, este tipo de pérdidas por evaporación no se trata en esta parte del proyecto.
- Las pérdidas por calor y las diurnas constituyen la parte más importante de las pérdidas producidas por evaporación. En los vehículos de menor antigüedad estas pérdidas deberían ser recogidas en su mayoría por la recogida del condensado (filtro de carbono) instalados en el vehículo. Dependiendo de la temperatura que tenga el motor al dejar de funcionar, se puede distinguir entre pérdidas por absorción de temperatura media o de temperatura elevada. Durante un corto periodo de tiempo, se utilizaron depósitos del combustible de material plástico, lo que permitía la difusión del combustible a través del plástico; en los últimos años, se están utilizando materiales plásticos para recubrir los depósitos (depósitos de plástico sellado) que los hacen impermeables al combustible.
- Las pérdidas que tienen lugar con el vehículo en marcha son, de todas las emisiones por evaporación, de las que menos documentación existe. En los coches modernos equipados con filtros de carbono se debería evitar que se produjeran pérdidas por evaporación, pero existen datos que prueban que este tipo de pérdidas se siguen produciendo de todas maneras. En aquellos vehículos sin estos filtros, las pérdidas que tienen lugar mientras el vehículo está funcionando pueden llegar a ser importantes, sin embargo, no se dispone de demasiados datos cuantitativos.

Se sabe que las pérdidas por evaporación producidas por los vehículos dependen de cuatro factores principales:

- La tecnología del vehículo (si está equipado o no con filtros de carbono)
- La temperatura ambiente y cómo varía a lo largo del día

- La volatilidad de la gasolina (dependiendo de los cambios de temperatura)
- Las características del proceso de conducción (longitud media del trayecto, tiempo que el vehículo ha estado aparcado, etc.).

Teniendo en cuenta las conclusiones obtenidas tras el análisis detallado y la comparación de los diferentes métodos disponibles, que llevó a cabo el proyecto MEET<sup>54</sup>, se eligió el método CORINAIR para ser incorporado al propuesto por el proyecto MEET, debido principalmente a la transparencia de su método de cálculo y a la disponibilidad de los datos requeridos.

El mencionado método CORINAIR (informe del año 1993) se ocupaba de tres tipos de emisiones por evaporación producidas por los vehículos:

- Las emisiones diurnas
- Las emisiones por absorción de temperatura elevada
- Las pérdidas con el vehículo en funcionamiento

En estos tres tipos de emisiones por evaporación influye significativamente la volatilidad de la gasolina utilizada, la temperatura ambiental absoluta, y las características de diseño del automóvil. En el caso de las emisiones por absorción de calor y de las pérdidas con el vehículo en funcionamiento, también es importante el patrón de conducción.

La principal ecuación para hacer la estimación de las emisiones por evaporación es:

$$E_{eva, cov, j} = 365 \times a_j \times (e^d + S^c + S^{fi}) + R \quad [20]$$

donde:

$E_{eva, cov, j}$ , son las emisiones de COV ocasionadas por las pérdidas por evaporación según la categoría  $j$  del vehículo,

$a_j$ , es el número de coches de gasolina de la categoría  $j$ ,

$e^d$ , es la media del factor de emisión por pérdidas diurnas de los vehículos de gasolina equipados con depósitos metálicos, dependiendo de la media mensual de la temperatura ambiente, de la variación de temperatura y de la volatilidad del combustible (RPV),

$S^c$ , es la media del factor de emisión por absorción de temperatura, elevada y media, de los vehículos de gasolina equipados con carburador,

$S^{fi}$ , es la media del factor de emisión por absorción de temperatura, elevada y media, de los vehículos de gasolina equipados con motor de inyección,

$R$ , son las pérdidas con el vehículo en funcionamiento a temperatura media y elevada.

Como sucede con otros tipos de emisión, es necesario combinar los factores de emisión con los datos apropiados acerca del uso que se hace del vehículo y de las condiciones del entorno, con el fin de realizar las estimaciones sobre las emisiones ocasionadas por el tráfico. Para ello, se pueden utilizar las siguientes ecuaciones:

$$S^c = (1 - q) \times (px^{s, hot} + wse^{e, warm}) \quad [21]$$

---

<sup>54</sup> Samaras Z, T Zachariadis and M Aslanoglou (1997) Evaporative emissions. Deliverable 14 of the MEET project. LAT Report 9717. Aristotle University Thessaloniki, Thessaloniki, Greece.

$$S^{fi} q e^{fi} x \quad [22]$$

$$R = m_j \times (p e^{r,hot} + w e^{r,warm}) \quad [23]$$

donde:

$q$ , es la fracción de vehículos de gasolina equipados con motor de inyección,

$p$ , es la fracción de trayectos terminados con el motor caliente (dependiendo de la media mensual de la temperatura ambiente),

$w$ , es la fracción de trayectos terminados con el motor frío o templado (trayectos más cortos) o con el catalizador con temperatura inferior a la de funcionamiento,

$x$ , es la media de trayectos realizados por vehículo y día, calculada para todo un año, o para periodos de tiempo más cortos,

$e^{s,hot}$ , es el factor de emisión media para emisiones por absorción de temperatura elevada (que depende de la volatilidad del combustible RVP),

$e^{s,warm}$ , es el factor de emisión media para emisiones por absorción de temperatura baja o media (que depende de la volatilidad del combustible RVP y de la media mensual de la temperatura ambiente),

$e^{fi}$ , es el factor de emisión media para emisiones por absorción de temperatura elevada y media de los coches de gasolina equipados con motor de inyección,

$e^{r,hot}$ , es el factor de emisión media para emisiones por pérdidas durante la marcha con el motor en caliente de los vehículos de gasolina (que depende de la RVP de volatilidad del combustible y de la media mensual de la temperatura ambiente),

$e^{r,warm}$ , es el factor de emisión media para emisiones por pérdidas durante la marcha a temperatura media de vehículos de gasolina (depende del RVP de volatilidad del combustible y de la media mensual de la temperatura ambiente),

$m_j$ , es la distancia total recorrida al año por la categoría  $j$  de vehículos de gasolina

Los datos relevantes acerca de la actividad desarrollada están reflejados en tablas en las que:

- Se exponen los datos estadísticos sobre el uso diario de los coches utilitarios esto es, el promedio de trayectos realizados, la duración y la distancia media de dichos trayectos - para el año en su totalidad y para tres de las estaciones en particular<sup>55</sup>.
- Se ofrecen detalles acerca de la proporción de trayectos que terminan con una determinada temperatura del motor en función de la temperatura ambiente.

De nuevo, los datos expuestos corresponden a un periodo total de un año por un lado, y a cada una de las estaciones por otro. Como ejemplo, los datos expuestos a

---

<sup>55</sup> André M, A J Hickman, D Hassel and R Joumard (1995) Driving cycles for emissions measurements under European Conditions. SAE Technical Paper Series 950926, Reprinted from: Global Emission Experiences: Processes, Measurements, and Substrates (SP-1094), SAE, Warrendale, USA.

André M (1997) Driving patterns analysis and driving cycles, within the project: European Development of Hybrid Technology approaching efficient Zero Emission Mobility (HYZEM). Report LEN 9709. INRETS, Bron, France

continuación en la tabla 63, muestran el uso promedio diario de los coches utilitarios corresponden a un periodo total de un año por un lado, y a cada una de las estaciones del año por otro

Las tablas del anexo muestran los factores de emisión para los tipos de vehículos para las emisiones de evaporación y los datos de emisión para ciclomotores<sup>56</sup>.

---

<sup>56</sup> Tablas del anexo: A91 y A92.

Tabla 26. Promedio de uso diario de los coches utilitarios.

	Promedio de uso diario - todos los días		
	Duración (min)	Distancia (km)	Número de trayectos
Año	61.4	42.25	4.87
Invierno	68.2	45.77	5.11
Verano	60.4	44.07	4.62
Intermedio	54.2	36.67	4.78
Días en los que se utiliza el coche al menos una vez			
Año	78.6	54.08	6.23
Invierno	83.2	55.81	6.23
Verano	74.3	54.16	5.68
Intermedio	76.3	51.65	6.73

Fuente: MEET (1999), informe final sobre coches utilitarios y nuevas tecnologías.

### 5.1.5 Carburantes mejorados: Actuales y futuros

Se espera que los nuevos y mejorados carburantes, que producen una menor cantidad de emisiones, se introduzcan en el mercado en los próximos años. La Orden 98/70/EC establece especificaciones de tipo medioambiental para la gasolina y para el gasoil que entrarán en vigor en dos etapas: la primera en el año 2000 y la segunda en el 2005.

En lo que a la gasolina se refiere, las especificaciones establecidas por esta Orden son las siguientes: reducción del contenido en plomo, azufre, compuestos aromáticos, benceno y olefinas, incremento del contenido en oxigenados, reducción de la presión del vapor Reid e incremento del índice medio (E100) y final (E150) de volatilidad. En el caso del diesel, las especificaciones son: reducción del contenido de azufre y de poliaromáticos, reducción de la destilación final ( $T_{95}$ ) y de la densidad, así como incremento del número de cetano.

Para calcular los efectos esperados que estos carburantes mejorados debidos a las emisiones de combustión y a las pérdidas por evaporación, existen pocos datos (el programa EPEFE, las actividades del American Auto/Oil dirigidas por el Working Group 1 del European Auto/Oil Programme).

A pesar del hecho de que estos datos hacen referencia exclusivamente a motores y sistemas de control de emisiones nuevos y bien ajustados, el método MEET los adoptó como indicadores de los efectos que los vehículos actuales tienen sobre las emisiones.

#### Combustibles alternativos

En este apartado se hace un resumen de las principales características de los combustibles alternativos que se pueden aplicar al sector de la automoción, centrándose en aquellos combustibles que podrían hacerse un hueco importante en el mercado en los próximos 20 años. Entre estos combustibles se incluye el gas natural, el metanol, el etanol, el biodiesel y el éter dimetílico.

En varios casos se comentan también los inconvenientes de utilizar combustibles alternativos, como pueden ser el efecto negativo que producen en el rendimiento térmico del motor, las emisiones de contaminantes no reguladas, etc.

En el Deliverable 26 del proyecto MEET se puede encontrar un informe completo sobre el estudio llevado a cabo acerca de los carburantes alternativos.

### **Gas Natural**

El gas natural comprimido (GNC) tanto con motores de combustible doble como con motores exclusivamente de este combustible. En los motores de combustible doble el GNC se mezcla con el aire en los cilindros y la mezcla obtenida se prende inyectando una pequeña cantidad de gasoil cuando el pistón se acerca al final del proceso de compresión. El gasoil prende rápido debido al calor de la compresión y prende, entonces, a su vez la mezcla de aire/GNC.

Entre las ventajas de los motores de combustible doble está la de que pueden estar diseñados para funcionar alternativamente tanto con gas natural con un piloto de gasoil como exclusivamente con gasoil. En los motores de uso exclusivo con GNC es necesario instalar un sistema de encendido por chispa, pero tiene la ventaja de necesitar solamente un sistema de combustible único.

Una desventaja del GNC es que los vehículos que lo utilizan necesitan repostar en estaciones de servicio especiales. En estas estaciones de servicio se suministra gas a baja presión, mientras que la presión de almacenaje en el vehículo es mucho mayor. Otro inconveniente es que la composición del GNC tiende a variar de forma significativa de una vez para otra y de una ciudad a otra. El GNC posee buenas propiedades antidetonantes y produce una combustión estable.

Basándose en la revisión de los datos disponibles, se puede afirmar que:

- Está claro que las emisiones de CO se reducen con el uso de GNC.
- Está claro que hay un incremento de las emisiones de HC. Esto se debe a que las emisiones de metano son bastante elevadas, y a que el catalizador de 3 vías no resulta muy eficaz con esta sustancia.
- Se reducen generalmente las emisiones de NOX.
- Las emisiones de partículas ligeras son mucho más bajas que las producidas por un motor diesel.
- El consumo de combustible de los vehículos que utilizan GNC es similar al de los vehículos que utilizan carburantes convencionales.
- Se reduce también la emisión de algunas sustancias contaminantes no reguladas (NMHC, benceno, butadieno, formaldehído y acetaldehído).

### **Metanol**

El metanol tiene buenas propiedades de combustión y de emisión. Su índice de octanaje de 110 y sus excelentes propiedades de escaso consumo hacen de él un combustible apropiado para los motores de ocho ciclos de bajo consumo. Debido a la baja presión de su vapor, el metanol produce escasas emisiones por evaporación. El metanol se puede derivar del gas natural, del petróleo sin refinar o de la biomasa o los residuos urbanos. Con los precios actuales, la forma más económica de producir metanol es a partir del gas natural.

La baja densidad de la energía del metanol hace que se requiera aproximadamente dos veces su peso para obtener la misma potencia que con la misma cantidad de gasolina. La alta temperatura de evaporación del metanol, junto con la gran cantidad necesaria, dificulta su completa evaporación. Los motores de 8 ciclos que utilizan metanol puro son casi imposibles de arrancar por debajo de los 5°C si no llevan pilotos de combustible o un sistema suplementario de calentamiento. Este hecho ha

llevado a la creación de una mezcla compuesta por un 85% de metanol y un 15% de gasolina (la llamada M85) para ser utilizada por la nueva generación de vehículos de carga ligera que utilizan metanol como combustible. Sin embargo, con el uso de M85 se han perdido la mayoría de las ventajas que el metanol tenía en cuanto al tema de las emisiones contaminantes.

Se han desarrollado vehículos capaces de funcionar con una combinación de gasolina y de metanol en una proporción de más de un 85%, y su comportamiento está siendo analizado. Los motores y sistemas de control de emisión de estos vehículos son similares a los que llevan los vehículos de gasolina de última generación y su rendimiento y propiedades de emisión son también parecidas. Los vehículos de carga pesada también pueden funcionar con metanol si se les realiza una serie de ajustes técnicos. En cuanto a su distribución, en el caso del metanol se puede usar el mismo tipo de equipamiento y seguir el mismo procedimiento que se utiliza actualmente en la distribución de la gasolina, aunque sería necesario realizar algunos cambios en cuanto a los materiales puesto que el metanol es mucho más corrosivo que la gasolina.

Existen importantes diferencias en la emisión de algunos compuestos que aún no están regulados. Las emisiones de benceno y PAH son menores que las producidas por los vehículos de gasolina y diesel, sin embargo, las de formaldehído son cinco veces mayores.

### **Etanol**

Al ser el siguiente compuesto de mayor peso molecular entre los alcoholes, el etanol se parece al metanol en la mayoría de sus propiedades físicas y de combustión. El etanol se puede conseguir a partir de ciertos cultivos agrícolas, como la caña de azúcar o el maíz, pero el proceso resulta más caro que la producción de metanol y se requiere además mayor cantidad de materia prima y de energía. Como en el caso del metanol, la energía producida a partir de etanol es de menor densidad que la producida por la gasolina, además, el etanol es de difícil evaporación debido a la baja presión de su vapor y a la alta temperatura a la que se produce dicha evaporación. Cuando el etanol se mezcla con la gasolina en proporciones superiores a un 22%, el combustible resultante se puede utilizar con motores convencionales de encendido eléctrico. El uso del etanol como combustible para ser mezclado con la gasolina está muy extendido en Brasil, África del Sur, y los Estados Unidos. El etanol puede ser distribuido utilizando el mismo sistema y procedimientos usados en la distribución de la gasolina. El etanol no es tan corrosivo como el metanol, aún así no es compatible con ciertos materiales que sería necesario cambiar.

Las emisiones de acetaldehído producidas por el etanol son mucho mayores que las producidas por la gasolina o el diesel, mientras que las emisiones de benceno, butadieno y PAH son considerablemente más bajas.

### **Biodiesel**

La Sociedad Americana para el Análisis de Materiales ha definido el biodiesel como “ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga de lípidos renovables, como el aceite de origen vegetal y las grasas animales, que se utilizan en el funcionamiento de los motores de compresión (diesel)”. En los años 70 y 80, las investigaciones estaban dirigidas bien a su estado puro y aceites vegetales parcialmente esterificados, o bien en combinación con diesel fósil. Sin embargo, su utilización ocasiona una serie de problemas en el motor y en los inyectores, por lo que ya no se usa sin esterificación.

Algunas de las características del biodiesel, como son su elevado índice de cetona y su buena lubricidad, resultan claramente ventajosas, mientras que otras, como por ejemplo su menor valor calorífico, su punto de congelación más elevado, y sus propiedades corrosivas, son, por el contrario, algunas de sus desventajas.

Se han realizado estudios a nivel mundial acerca de las emisiones de salida (por el tubo de escape) procedentes de combustibles biodiesel, pero los resultados obtenidos resultan a menudo poco concluyentes y, a veces, contradictorios.

### Éter dimetílico

El éter dimetílico (EDM) ha surgido recientemente como una buena alternativa de combustible para los motores diesel. El EDM se puede conseguir a partir de gran variedad de materias primas de origen fósil, incluidos el gas natural y el carbón, y de materias renovables y residuales. En cuanto a las características físicas, el EDM es parecido a los gases licuados del petróleo (GLP), con una presión del vapor relativamente baja a temperatura ambiente. Tiene un índice de cetano relativamente alto (55 - 60), pero menor valor calorífico que el diesel. La propiedad más significativa del EDM, en cuanto a su rendimiento con un motor diesel, es su baja temperatura de autoencendido, que es parecida a la del diesel normal. Resultados preliminares han demostrado que el uso del EDM como sustituto del carburante diesel requiere efectuar pocos cambios en el motor. Puesto que el EDM contiene ninguna o muy pocos enlaces carbono-carbono, durante la combustión las emisiones de HPA o benceno, de tolueno y de xileno son nulas o muy escasas. Como también se demostró, las emisiones de aldehído producidas por el EDM son más bajas que las que ocasionan los motores diesel.

## 5.1.6 Conclusiones del modo de transporte por carretera

El modo de transporte por carretera es el modo de transporte por excelencia. Por eso existen multitud de estudios centrados en el mismo. De los modelos expuestos, se puede concluir, que en todos los proyectos y metodologías analizadas hay que tener en cuenta:

La elección de la metodología para estimar el consumo de combustible y las emisiones depende del uso. Para dar una metodología general, aplicable en todas las situaciones típicas del tráfico la elección de la metodología más apropiada es la basada en la velocidad media incluyendo factores de corrección dependiendo de la situación.

Para la aplicación de la metodología es necesario estimar una serie de datos o resultados medios:

Clasificación y composición de la flota de un país, lo cual resulta difícil debido a la gran diversidad de estadísticas aplicadas en cada país y a la heterogeneidad de los mismos.

Además, se necesitan tres tipos de datos de entrada para cualquier modelo: un indicador de la actividad o de la movilidad (vehículo-kilómetros), un factor de la emisión (g/veh-km), y una definición de la diferenciación. Esto se refiere particularmente a los agentes contaminadores cubiertos, las categorías de vehículos con su tamaño, su tecnología, o su combustible, las condiciones de conducción (velocidad media, o dinámica de los patrones de conducción) y los factores adicionales de corrección (altitud, pendiente, carga, inspección/mantenimiento).

Todos los modelos se piensan para ser utilizados para una situación actual dada, y para las previsiones. En el último caso, lo importante es analizar cómo ciertos objetivos pueden ser resueltos, o evaluar medidas y políticas particulares.

## 5.2. Modo de Transporte por Ferrocarril

Aplicando la formulación sintética desarrollada por el programa MEET y Cost 319 el caso del modo ferroviario se analiza en función de la actividad y de los factores de emisión:

$$\dot{E} = \dot{A} \times E' \quad [24]$$

Donde:

$\dot{E}$ , es la emisión,

$\dot{A}$ , es la actividad,

$E'$ , es el factor de emisión para esa actividad

### 5.2.1 Metodologías aplicadas al modo de transporte por ferrocarril

Actualmente existen dos métodos de cálculo en función del grado de conocimiento de los datos:

#### Método del combustible total / consumo de energía conocida:

En este método la actividad está formada por el consumo de combustible o del consumo de energía primaria. Se debe diferenciar entre el consumo de las locomotoras diesel y las eléctricas, así encontramos:

Para las locomotoras diesel el consumo de combustible se estima de la siguiente forma:

$$E_i = F \times FSEF_i \quad [25]$$

Donde:

$E_i$ , es la emisión total del agente contaminador i en el marco de tiempo bajo consideración,

$F$ , es el consumo de combustible total en el marco de tiempo bajo consideración,

$FSEF_i$ , es el factor específico de la emisión de combustible, típicamente en gramos de agente contaminador por el combustible en kilogramos

Tabla 27. Emisiones típicas y los factores de consumo de combustible para las locomotoras diesel.

Emisiones	Potencia específica g/kW-h	Factor específico - g/kg
CO	1 - 10	5 - 40
VOC	0.5 - 4.0	3 - 25
NO <sub>x</sub>	6 - 16	30 - 70
Partículas	0.2 - 1.2	1 - 6
SO <sub>2</sub>	0.2 - 2	1 - 10
Consumo de combustible	190 - 220	-

Fuente: Meet 1999

Para las locomotoras eléctricas, las estimaciones de las emisiones, si se conoce la energía consumida por los trenes, los cálculos se deben hacer en base a la corriente eléctrica generada en la región considerada.

$$E_i = El \times E/SEF_i \text{ [26]}$$

Donde:

$E_i$ , es la emisión total del agente contaminador  $i$  en el marco de tiempo bajo consideración,

$El$ , es el consumo de electricidad total en el marco de tiempo bajo consideración,

$E/SEF_i$ , es el factor específico de la emisión de electricidad, típicamente en KW/h.

En el caso de la estimación de consumo de energía hay que tener especial atención en los datos sobre los factores específicos de emisión, ya que estos pueden estar en base al consumo de energía primaria de la central eléctrica o a la cantidad de energía eléctrica enviada sobre la red eléctrica. Además para este tipo de trenes no se podría hacer distinción entre trenes de pasajeros y de carga si utilizan una misma línea.

#### Método del combustible total/energía consumida no conocida:

Para calcular las emisiones para un tipo de tren dado o para un área geográfica más pequeña, se deben utilizar métodos alternativos debido a la necesidad de conocer datos de los cuales no disponemos.

Estos métodos se basan en su cálculo en valorar el consumo de energía para un tren dado en KJ por tonelada/km. Esta energía es la energía necesaria para mover un tren y es independiente del tipo de locomotora usada (diesel o eléctrica).

Las actividades se dan en pasajero.km para trenes de pasajeros o en toneladas.Km para trenes de carga.

Para los trenes de *transporte de pasajeros* las emisiones se pueden estimar de la siguiente forma:

$$E_i = \frac{WSEC \times P_{km}}{Pps} \times W \times BSEF_i \times 0,0036 \text{ [27]}$$

Donde:

$E_i$ , es la emisión total del agente contaminador  $i$  en el marco de tiempo bajo consideración, en toneladas,

$WSEC$ , es el consumo de energía específica del peso del tren en kJ/tone-km,

$P_{km}$ , es la cantidad de pasajero-kilómetro transportado por el tren dado dentro del marco de tiempo bajo consideración,

$Pps$ , es el coeficiente de carga del tren, en los pasajeros/asiento,

$W$ , es el peso del tren en tonelada por asiento,

$BSEF_i$ , es el factor específico de la emisión del freno en g/kWh de la energía producida.

Para los trenes de *transporte de mercancías* se aplica la siguiente ecuación:

$$E_i = WSEC \times T_{km} \times W \times BSEF_i \times 0,0036 \text{ [28]}$$

Donde:

$E_i$ , es la emisión total del agente contaminador  $i$  del aire en el marco de tiempo bajo consideración, toneladas,

$WSEC$ , es el consumo de energía específica del peso del tren en kJ/toneladas-km,

$T_{km}$ , es la cantidad de carga transportada por el tren dado dentro del marco de tiempo bajo consideración en tonelada-kilómetro,

$T_{pt}$ , es el coeficiente de carga del tren, en toneladas-carga/total de toneladas del tren,

$BSEF_i$ , es el factor específico de la emisión del freno tren en g/kWh de la energía producida.

Dentro de este método para el cálculo de consumo de energía existen dos subtipos, uno basado en el cálculo de la velocidad media y la distancia entre paradas y el otro basado en el estado de carga constante del tren. Pasamos a analizar estos dos métodos:

### Método 1. Las ecuaciones empíricas del consumo de energía

Este método se basa en el cálculo de la velocidad media para los distintos tipos de trenes, incluyendo los trenes de alta velocidad, los trenes entre ciudades, los trenes interregionales y los trenes locales. Este método es aproximado y está basado en el tráfico tipo.

Las correlaciones empíricas dadas para el consumo de energía del tren en KJ/toneladas-Km, en función de la velocidad media del tren y de la distancia media entre las paradas se dan de la siguiente forma<sup>57</sup>:

$V_{average}$  es la velocidad media del tren en la sección de la ruta en cuestión

$X$  es la distancia entre paradas en Km

Para los trenes ICE (Inter-city Express): [29]

$$\frac{\text{KJ}}{\text{tone.Km}} = 0,0070 \times V_{average}^2 + 74 \quad \ln(x)$$

$80 \text{ Km} \leq x \leq 200 \text{ Km}$

Para trenes TGV (Tren de alta velocidad francés): [30]

$$\frac{\text{KJ}}{\text{tone.Km}} = 0,0097 \times V_{average}^2 + 70 \quad \ln(x)$$

$150 \text{ Km} \leq x \leq 300 \text{ Km}$

Para trenes de pasajero británicos del HST (High Speed Train), IC3 (Inter-city 3) danés: [31]

$$\frac{\text{KJ}}{\text{tone.Km}} = 0,012 \times V_{average}^2 + 70 \quad \ln(x)$$

$40 \text{ Km} \leq x \leq 100 \text{ Km}$

Para trenes grandes de carga (masa vacía de 600 toneladas): [32]

$$\frac{\text{KJ}}{\text{tone.Km}} = 0,019 \times V_{average}^2 + 63 \quad \ln(x)$$

$80 \text{ Km} \leq x \leq 200 \text{ Km}$

Tren sueco RC (tren cremallera): [33]

---

<sup>57</sup> Jorgensen y Sorenson, 1997



$V_{ave}$  , es la velocidad media del tren en la ruta en m/s,

$V_{max}$  , es la velocidad máxima a la cual el tren acelera en m/s.

Esta ecuación se aplica para trenes que tienen una velocidad máxima más o menos constante. Para los trenes que tienen mucha variación en la velocidad máxima es aconsejable calcular el consumo de energía por tramos de la ruta.

## 5.2.2 Metodología específica para trenes de mercancías

En el proyecto EcoTransIT<sup>58</sup>, los datos de emisiones son considerados como un valor fijo para cada uno de los trenes de mercancías (diferente para las diferentes compañías ferroviarias incluidas en el estudio), distinguiendo entre todos los distintos factores de emisión y fija para el consumo de energía dos formulaciones alternativas:

Consumo de energía del tren medio de mercancías teniendo en cuenta el peso bruto como constante, sin variar entre los distintos tipos de mercancías.

$$ECC = ECT * (GTW_c / GTW) [36]$$

Donde:

$ECC$ , es el consumo de energía de una mercancía (Wh/mercancía-Km),

$ECT$ , es el consumo de energía de un tren (Wh/train-Km),

$GTW_c$ , es el peso bruto del tren (en toneladas) para una mercancía específica, incluye un ratio de relación entre peso neto/bruto para la mercancía específica transportada,

$GTW$ , es el peso bruto del tren (en toneladas), incluye un ratio de relación entre peso neto/bruto para la media de las mercancías transportadas.

Consumo de energía del tren de mercancías distinguiendo por tipo de mercancías (peso de la mercancía).

$$ECC = ECT_{mod} * (GTW_c / GTW_{mod}) [37]$$

Donde:

$ECC$ , es el consumo de energía de una mercancía (Wh/mercancía-Km),

$ECT$ , es el consumo de energía de un tren (Wh/tren-Km),

$GTW_c$ , es el peso bruto del tren (en toneladas) para una mercancía específica, incluye un ratio de relación entre peso neto/bruto para la mercancía específica transportada,

$GTW$ , es el peso bruto del tren (en toneladas), incluye un ratio de relación entre peso neto/bruto para la media de las mercancías transportadas.

En el proyecto EcoTransIT, diversas compañías ferroviarias han determinado que los pesos brutos de carga de los trenes son según la longitud del tren:

Trenes internacionales: 1.000 toneladas de peso típico para un tren medio

2.000 toneladas de peso máximo para un tren largo

Por lo tanto se estima que el peso bruto de un tren largo es de 1500 toneladas

<sup>58</sup> "Ecological Transport Information Tool".

Para los trenes cortos se ha estimado un peso bruto de 500 toneladas

Los *factores de carga* (toneladas netas/toneladas brutas) en función de los diferentes tipos de carga para el transporte ferroviario están representados en la tabla 93: para las mercancías a granel, para las mercancías medias y para las mercancías de volumen.

Tabla 29. Factores de carga para los distintos tipos de carga. Ejemplos especiales de transportes sin viajes vacíos

Tipo de carga	Tren
	t-netas/t-brutas
Petróleo, carbón de antracita, mineral	0,7
Residuos	0,6-0,65
Coches de pasajeros	0,35
Repuestos	0,3-0,55
Plátanos	0,63
Muebles	0,46
Ropa	0,24

Fuente: Mobilitäts-Bilanz / IFEU 1999a/

Tabla 30. Factores de carga para los distintos tipos de carga. Valores estimados

	Factor de carga sin viajes vacíos	Viajes adicionales vacíos	Factor de carga incluyendo los viajes vacíos
	T netas/t brutas		T netas/t brutas
Carga a granel	0,72	+80%	0,6
Carga media	n.a	n.a	0,5
Carga de volumen	0,11	+ 20%	0,1

n.a: No hay dato

Fuente: KBA, Diferentes compañías ferroviarias, estimación de IFEU

En este proyecto se utilizan los datos que se contrastan de dos fuentes:

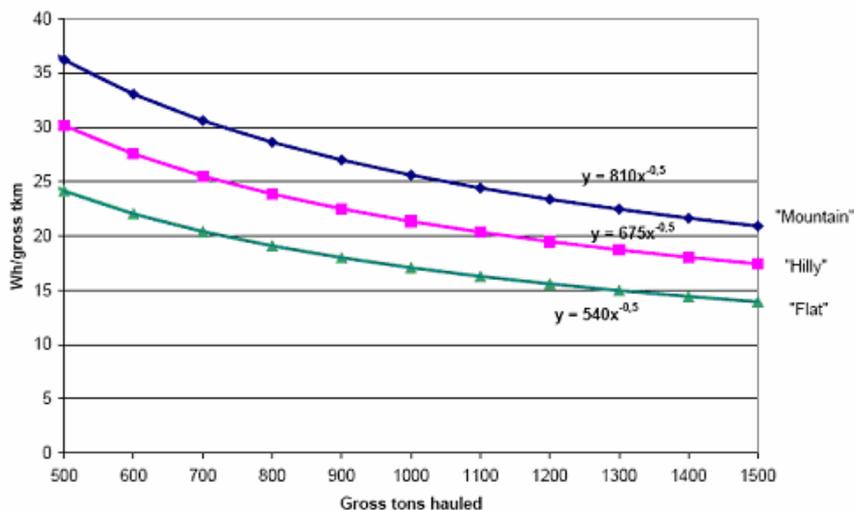
Consumo medio anual de transporte de mercancías típico para diferentes compañías.

Funciones de energía para el consumo de energía específica del transporte ferroviario

Para considerar las diversas topologías de los países europeos, se consideran tres tipos de funciones: Funciones en un “plano” (Dinamarca, Suecia), Funciones “montaña” (Austria, Suiza) y funciones “montañosa” (para el resto de los países).

Las funciones de energía para los trenes eléctricos se representan en la figura siguiente:

Gráfico 4. Energía consumida de los trenes eléctricos



Fuente: IFEU Heidelberg, 2005(incluyendo datos de DB y del OMIT)

En función de la topología, del tipo de carga y del tipo de tren tenemos que la energía final consumida por los trenes eléctricos es:

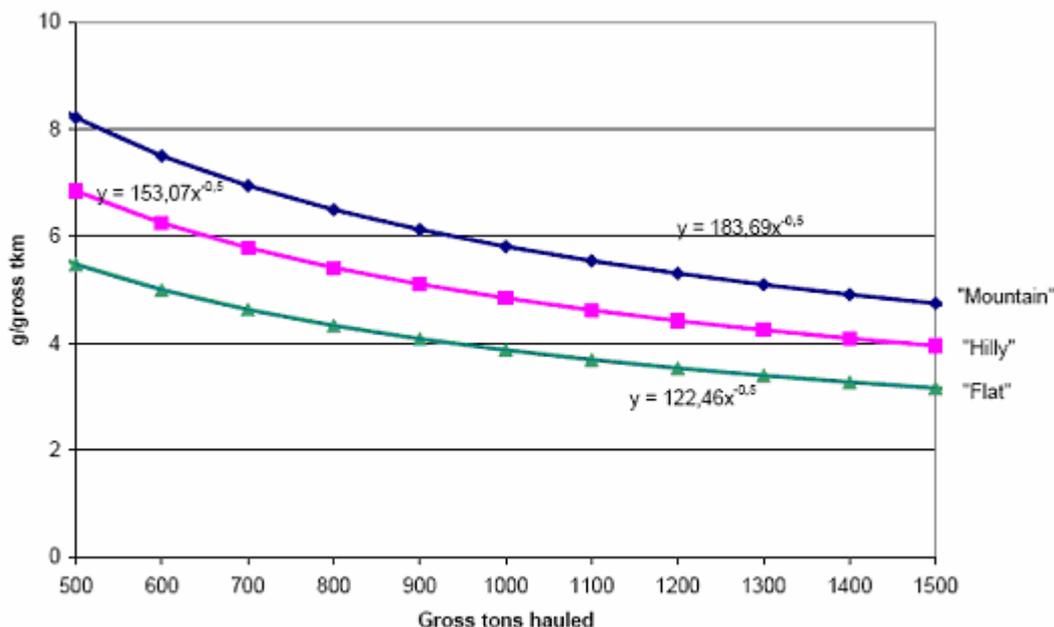
Tabla 31. Consumo de energía final específica para trenes eléctricos

Wh/tkm		Llano	Montañoso	Montañas
Tren (500t)	corto			
	A granel	40,2	50,3	60,4
	Medio	48,3	60,4	72,4
	Volumen	60,4	75,5	90,6
Tren (1000t)	medio			
	A granel	28,5	35,6	42,7
	Medio	34,2	42,7	51,2
	Volumen	42,7	53,4	64
Tren (1.500 t)	largo			
	A granel	23,2	29	34,9
	Medio	27,9	34,9	41,8
	Volumen	34,9	43,6	52,3

Fuente: IFEU Heidelberg, 2005(incluyendo datos del OMIT)

Para los trenes Diesel las funciones en función de la topología de los países se representa en la siguiente figura:

Gráfico 5. Energía consumida de los trenes diesel



Fuente: IFEU Heidelberg, 2005 (incluyendo datos OMIT 2001)

Los factores de emisión de los trenes diesel son, para las diferentes compañías ferroviarias:

Tabla 32. Factores de emisión para los trenes diesel.

en g/Kg	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NMHC	PM <sub>dir</sub>
Carga Green	3170	70	0,01	2,8(HC)	1,8
DB	3175	55	0,02	5,7	1,74
DSB	3170	56,7	0,07	1,8	2
TI	3100	60	0,1	4,9	5
SNCF	3150	39,6	0,1	4,7	1,5
Default	3170	55	0,1	4,9	1,5

Fuente: Diferentes compañías ferroviarias, estimación IFEU

### 5.2.3 Herramientas para el cálculo y predicción de los consumos y emisiones del ferrocarril.

En España se han desarrollado algunas herramientas para el cálculo y predicción de los consumos y emisiones del ferrocarril. Así el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia de Comillas realizó para Adif la Herramienta de Simulación de Marcha Mínima APLiCA que calcula tiempos de recorrido, velocidades y energía consumida y regenerada así como otras magnitudes asociadas a la circulación de un tren a marcha mínima en una línea ferroviaria.

### Simulador ALPI2810

Por otra parte Alberto García Álvarez y M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares, investigadores de la Fundación de los Ferrocarriles Españoles, han desarrollado el Simulador de Consumos ALPI2810 que se encuentra en la actualidad en la versión 5. Dicho simulador recoge todos los factores que tienen influencia en el consumo tanto del tren (14 parámetros) como de la línea de ferrocarril (29 parámetros) así como otros que son resultado de la combinación de tren y servicio (4 parámetros). También incorpora novedades como el concepto de paradas equivalentes por reducción de velocidad, el cálculo del consumo energético en distintos puntos desde la central eléctrica hasta en llantas y auxiliares del tren o la consideración de la energía recuperada en caso de existir freno regenerativo, así como el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### Unidades empleadas

El consumo se puede medir de tres formas diferentes:

- El *consumo por plaza estándar*, es consecuencia directa de la arquitectura del tren, de su rendimiento y de su concepción; por lo que la mayor responsabilidad en este indicador se sitúa en los diseñadores técnicos del tren (típicamente, el fabricante o tecnólogo del tren).
- El *consumo por plaza real* se obtiene al multiplicar el consumo por plaza estándar por el cociente entre las plazas estándar y las plazas reales. Este cociente (plazas estándar / plazas reales) es responsabilidad de quien decide sobre el diseño comercial del tren (normalmente es el operador del servicio), ya que se ve afectado por decisiones como en número de clases, la distancia entre asientos, si hay o no cafetería, número y dimensión de los aseos, si es preciso espacio para galleys, etc.
- El *consumo por viajero kilómetro* se obtiene al multiplicar el consumo por plaza real por el aprovechamiento (medido éste como los viajeros.km / plaza.km). El aprovechamiento es consecuencia de decisiones de programación operativa del servicio: la decisión adoptada entre frecuencia y aprovechamiento, la decisión de reforzar o no reforzar los servicios en día punta, de programar más o menos paradas...; y por ello tiene poco que ver con el diseño del tren.

En este trabajo se emplea el primero de los tres indicadores (consumo/plaza estándar) ya que es el más relacionado con la tecnología y tipo de tren, y el que es más rígido a largo plazo. Con los indicadores de plazas estándar / plazas reales y aprovechamiento, que son muy sencillos de calcular, se pueden obtener, para un caso concreto, si así se desea, los consumos por plaza real y por viajero.km.

De esta forma, al emplear indicadores desagregados, se puede conocer con mayor detalle la causa de un consumo alto o bajo, ya que puede responder a una combinación de tres tipos de decisiones que tienen su origen, normalmente, en actores diferentes. El empleo del indicador global (consumo / viajero.km) diluye las responsabilidades, y por ello resulta menos útil a los efectos que se pretenden lograr.

#### Datos de entrada

El consumo de energía y las emisiones no dependen exclusivamente del vehículo, sino también dependen del servicio que presta: el mismo vehículo puede tener consumos muy diferentes en distintos servicios. El servicio está caracterizado por una infraestructura concreta (velocidad máxima, perfil, túneles,...) y por una forma de operación determinada (número de paradas, márgenes de tiempo).

Cada servicio está caracterizado por un conjunto de valores concretos para los parámetros recogidos en la tabla siguiente:

PARÁMETRO	UNIDADES
Velocidad máxima del servicio	km/h
Velocidad media del servicio	km/h
Velocidad máxima en deriva	km/h
Velocidad mínima del freno eléctrico	km/h
Proporción de túnel	km/km
Factor de túnel (Tf)	
Coefficiente de curvas	daN/t
Tiempo medio parada comercial	min
Distancia entre paradas comerciales	km
Distancia entre paradas técnicas programadas	km
Distancia entre paradas técnicas no programadas	km
Distancia entre paradas equivalentes	km
Exceso específico pendientes	mm / km
% aprovechamiento freno regenerativo	%
Deceleración del freno de servicio	m/s <sup>2</sup>
% aprovechamiento s/plazas estándar	%
Densidad de plazas y servicios	
Coefficiente de trenes vacíos y sin servicio	
Tiempo de puesta a disposición de los viajeros	min
Corrección por longitud	%
<b>PARÁMETROS DE LA TRACCIÓN ELÉCTRICA</b>	
Energía entrada subestación / energía pantógrafo	kWh / kWh
Energía barras central / energía entrada subestación	kWh / kWh
Energía entrada central / energía barras central	kWh / kWh
g CO <sub>2</sub> emitidos / kWh barras central	gCO <sub>2</sub> /kWh
<b>DATOS PRIMARIOS DE LA LÍNEA</b>	
Longitud	km
Longitud de túneles	km
Paradas comerciales	Nº
Paradas técnicas programadas	Nº
Paradas técnicas no programadas	Nº
Paradas equivalentes por reducción de velocidad	Nº

Estos parámetros requieren, en algunos casos, alguna explicación o aclaración sobre el concepto y la forma de calcular el parámetro:

Se calcula la distancia entre *paradas equivalente por reducción de velocidad* de la siguiente forma: cada reducción de velocidad (debida al perfil de velocidades estáticas de la línea) que no sea para realizar una parada comercial o técnica, equivale a una “fracción de parada”, que se calcula como la parte de la energía cinética disipada en la reducción de velocidad con respecto a la energía cinética disipada en una parada partiendo de la velocidad máxima de la línea. Este indicador puede obtenerse del perfil de velocidades máximas de la línea y permite evaluar la energía generada o disipada en el freno por variaciones de velocidad debidas a causas diferentes de las paradas comerciales o técnicas. Así pues, para cada reducción de velocidad (de  $V_i$  a  $V_f$ ) supone una “fracción de parada equivalente” que

$$f_p = \frac{V_i^2 - V_f^2}{V_{\max}^2 - 0^2}$$

se calcula como  $f_p = \frac{V_i^2 - V_f^2}{V_{\max}^2 - 0^2}$ . Por ejemplo, si se tiene un tren cuya velocidad máxima está limitada por la infraestructura a 200 km/h y realiza una reducción de velocidad de 160 km/h a 100 km/h, el número de paradas equivalentes de esta

reducción es  $f_p = \frac{160^2 - 100^2}{200^2 - 0^2} = 0,39$

La *resistencia equivalente de las curvas* es un coeficiente que, multiplicado por la masa del tren, ofrece una fuerza equivalente continua en todo el recorrido que se opondría al movimiento, y cuyo valor sería igual a la suma de las fuerzas de resistencia en curva aplicadas exclusivamente a lo largo de la curva para cada una de ellas. Obsérvese que este coeficiente es equivalente a la resistencia mecánica específica al avance en línea recta ( $a$  en daN/t) a la que debe sumarse.

Si denominamos la *pendiente de equilibrio*  $p_e$  aquella en la que, para la velocidad máxima  $V_{max}$  se igualan los valores absolutos de la resistencia al avance y de la proyección de la fuerza de gravedad, tendremos:

$$M \times p_e = A + B \times V_{max} + C \times T_f \times V_{max}^2 \quad [38]$$

de donde, despejando  $p_e$ , y sustituyendo los coeficientes absolutos por específicos, se tiene:

$$p_e = a + b \times V_{max} + c \times T_f \times V_{max}^2 \quad [39]$$

El *exceso específico de pendientes* se define entonces como el sumatorio de las diferencias [en (mm/m)/km] entre la pendiente real y la *pendiente de equilibrio* en los tramos en que la pendiente de equilibrio es mayor que la real, multiplicada por la longitud en que existe esa diferencia y dividida por la longitud total del tramo. Tiene la utilidad de que se relaciona directamente con la parte de energía potencial que es disipada en el frenado en las pendientes para no rebasar la velocidad máxima. Para simplificar el cálculo, se puede partir de la suposición de que los coeficientes específicos son semejantes para los trenes de material convencional y para los de alta velocidad. Para el material convencional adoptamos  $a=1,15$  daN/t,  $b=0,01$  daN/(km/h)<sup>2</sup> y  $c=2,25 \times 10^{-4}$  daN/(kmh)<sup>2</sup> y para el de alta velocidad  $a=0,75$  daN/t,  $b=0,0065$  daN/(km/h)<sup>2</sup> y  $c=1,2 \times 10^{-4}$  daN/(kmh)<sup>2</sup>;

El porcentaje de aprovechamiento es necesario si se quiere calcular el consumo específico por viajero real y km; y además para calcular la masa del tren cargado. Se calcula así:

$$Aprovechamiento(PlazaEst) = \frac{viajeros.km}{plazareales.km} \times \frac{plazasreales.km}{plazasEst.km} = \frac{viajeros.km}{plazasEst.km}$$

La corrección por longitud es el cociente entre la longitud real de la línea y la distancia en línea recta, que resulta de gran utilidad si se quiere comparar el consumo del ferrocarril con el de otros modos de transporte.

Los parámetros del tren que son necesarios para realizar el cálculo del consumo y emisiones de CO<sub>2</sub> son los que vienen indicados en la tabla.

PARÁMETRO	UNIDADES
Velocidad máxima del tren	km/h
Masa del tren vacío	t
Masas rotativas equivalentes	t
Coeficiente A (resistencia mecánica)	daN
Coeficiente B (resistencia entrada de aire)	daN/(km/h)
Coeficiente C (resistencia aerodinámica)	daN/(km/h) <sup>2</sup>
Rendimiento en tracción	kWhs/kWhe
Rendimiento de auxiliares	kWhs/kWhe
Rendimiento del freno regenerativo	kWhs/kWhe
Tiene freno regenerativo? 1=si, 0=no	
% de freno eléctrico sobre el total	%
Superficie útil bruta del tren	m <sup>2</sup>
K coeficiente consumo de auxiliares	kWh/plaza eq · h
Plazas reales	plazas

Además se emplean otros parámetros que son resultado de la combinación del tren y el servicio.

PARÁMETRO	UNIDADES
Capacidad estándar	Plazas
Masa del tren con el % de las plazas equivalentes ocupadas	t
Indicador de calidad (plazas estándar/plazas reales)	
Paradas equivalentes por reducción de velocidad (v tren)	Nº

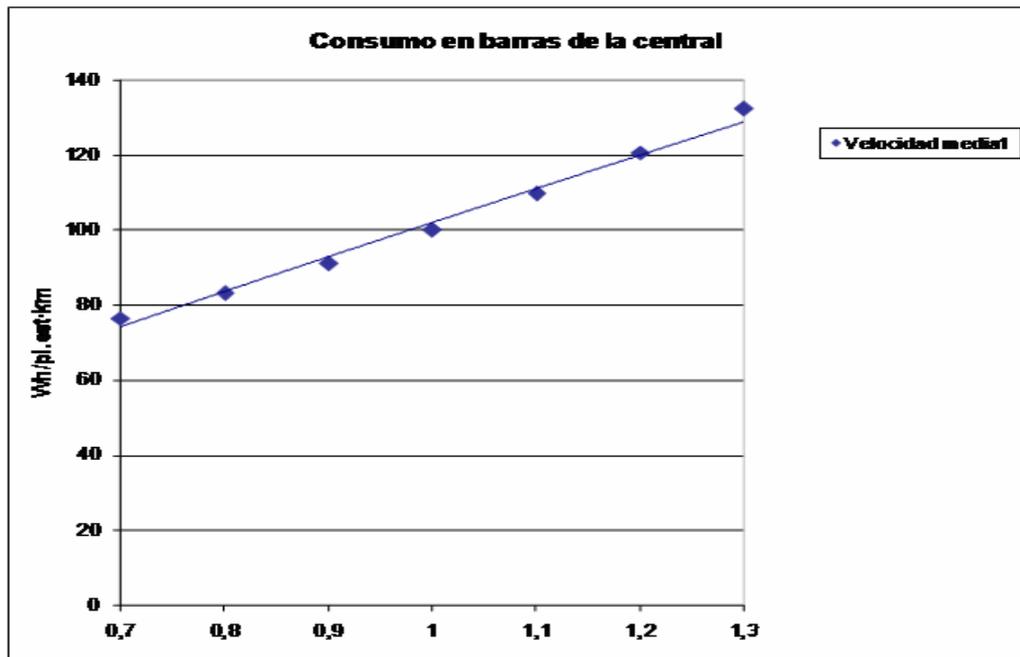
### Resultados obtenidos

Combinando los diversos parámetros antes expuestos se obtienen los consumos desglosados según se muestra en la tabla

CONSUMO DE ENERGÍA (kWh)	UNIDADES
Energía para vencer resistencia mecánica al avance en recta	kWh
Energía para vencer la resistencia adicional al avance en curvas	kWh
Energía para vencer resistencia entrada aire	kWh
Energía para vencer la resistencia aerodinámica en cielo abierto	kWh
Energía para vencer la resistencia aerodinámica en túnel	kWh
<b>Energía cinética disipada en reducciones de velocidad (-empleada resistencia al avance) sin c</b>	kWh
<b>Energía potencial disipada en el freno en pendientes sin conducción económica</b>	kWh
Energía consumida por los auxiliares técnicos	kWh
Energía consumida por los auxiliares comerciales	kWh
<b>Energía consumida en llantas y auxiliares</b>	kWh
Pérdidas en la locomotora tracción	kWh
Pérdidas en la locomotora auxiliares	kWh
<b>Energía importada en pantógrafo</b>	kWh
Energía disipada por el freno eléctrico (llanta)	kWh
Energía aprovechable del freno regenerativo (pantógrafo)	kWh
Energía aprovechada del freno regenerativo	kWh
<b>Consumo neto en pantógrafo (energía neta final)</b>	kWh
Consumo neto en pantógrafo con vacíos	kWh
Consumo neto en pantógrafo con vacíos y tiempo de puesta a disp. viajeros	kWh
<b>Consumo a la entrada de la subestación</b>	kWh
Consumo en barras de la central	kWh
<b>Consumo entrada central</b>	kWh
Emisiones de CO2	gCO2

La herramienta permite también analizar la sensibilidad del consumo a diversos parámetros como la velocidad media, el número de paradas comerciales, la masa del tren y los coeficientes A, B y C. En la figura 7 se puede ver un ejemplo de la repercusión que tiene en el consumo la variación de la velocidad media, para un determinado tren y servicio.

Figura 7. Consumo de energía de la central.



También se puede realizar una comparación del consumo desglosado de dos trenes y servicios diferentes, obteniéndose una salida gráfica.

### 5.2.4 Conclusiones del modo de Transporte Ferroviario.

En todos los estudios se distingue que los resultados que se obtienen para los diferentes países son distintos por la disponibilidad de los datos, y en este aspecto influye el hecho de que los ferrocarriles sean públicos o privados.

Los requisitos de datos para los modelos, son también muy variados debido a la variedad de operación de los trenes según el tipo de servicio, sirva como ejemplo que no es lo mismo (siendo ambos de pasajeros) la explotación de un tren de cercanías (con múltiples paradas y por tanto aceleraciones) que un tren de alta velocidad (con una velocidad punta superior pero con un número muy inferior de paradas). La necesidad de datos será también distinta dependiendo de si estamos hablando de un tren de mercancías frente a un tren de viajeros, ya que el tren de viajeros está sujeto a un horario y a una frecuencia menor que el tren de mercancías donde el concepto de puntualidad se define a través de la fiabilidad.

En cuanto al consumo de energía y por tanto las emisiones debemos tener en cuenta el tipo de combustibles y si hablamos de consumo de energía eléctrica, existe variedad en lo que se refiere a como el tren utiliza o no esa energía. En la contabilización del consumo de energía eléctrica influye también el sistema de provisión de la misma, y en este sentido la heterogeneidad europea produce distintos procedimientos, más si cabe desde la separación entre el gestor de la infraestructura y el operador del servicio ferroviario.

En los estudios posteriores a llevar a cabo, debería tenerse en cuenta que la heterogeneidad entre países hace difícil la comparativa. Estas dificultades se extienden también a los datos históricos ya que únicamente se dispone de datos para los últimos 15-17 años.

El reciente interés por analizar el modo ferroviario en lo que se refiere a emisiones y consumo energético afecta también a las metodologías utilizadas, mas recientes y con un desarrollo temporal menor respecto del modo carretera.

### 5.3. Modo de Transporte Marítimo

El consumo de energía y las emisiones de las embarcaciones pueden ser medidas a través de dos métodos, según se describe en el programa MEET y depende de las actividades que se realizan en las tres fases prefijadas para los movimientos del buque que son: navegación entre puertos, maniobras de aproximación y dentro del puerto, y maniobras de atraque.

Las dos metodologías distinguen entre un buque de mercancías y un buque de viajeros típico (un ferry) pero incluso dentro de estas dos grandes categorías existen grandes diferencias en lo que se refiere al consumo de energía. Los datos disponibles sobre las actividades realizadas en las tres etapas anteriores marcan el grado de agregación del modelo.

Pero en el caso de los buques otra cuestión que resulta fundamental más allá de la actividad a la que se dedique, nos referimos a la tipología del buque, a su maquinaria y al tipo de combustible, lo que afecta considerablemente al consumo de energía y por tanto a las emisiones contaminantes.

Estas son las principales categorías que se aplican:

Emisiones contaminantes consideradas

Código	Nombre
NOx	Oxido de nitrógeno
SOx	Oxido de Azufre
CO	Monóxido de carbono
VOC	Componentes orgánicos volátiles
PM	Partículas en suspensión
CO2	Dióxido de carbono

## Tipología de buque

Código	Nombre
SB	Granel sólido
LB	Granel líquido
GC	Mercancía general
CO	Contenedores
PC	Pasajeros/Ro-Ro/Mercancías
PA	Pasajeros
HS	Ferry de Alta velocidad
IC	Mercancías fluviales
SS	Barco de recreo
TU	Remolque
FI	Pesca
OT	Otros

## Clasificación por tipo de motor

Código	Nombre
SE	Turbinas de vapor
HS	Motores de alta velocidad
MS	Motores de velocidad media
SS	Motores de baja velocidad
IP	Motores para barcos de recreo de gran tamaño
OP	Fueraborda
TO	Cisterna, carga y descarga

## Clasificación por combustible

Código	Nombre
BFO	Gasóleo específico
MDO	Diesel específico
MGO	Gasolina específica
GF	Gasóleo

Modos de operación

Código	Nombre
C	Navegación
M	Maniobra
H	Atraque
T	Carga y descarga del tanque
A	Operaciones auxiliares

### 5.3.1 Metodologías para el modo de transporte Marítimo.

**Modelos de consumo de energía según el programa MEET:**

Para el modelo de consumo de energía la formulación que se utiliza en el programa MEET es la siguiente:

Metodología simplificada: requiere de una estimación de los días de trabajo para cada tipo de buque, motor y combustible. [40]

$$E_i = \sum_{j,k,l} E_{i,j,k,l}$$

$$\text{Siendo, } E_{i,j,k,l} = S_{j,k} (GT) \times t_{j,k,l} \times F_{i,j,l}$$

Donde:

$I$ , es el agente contaminante,

$J$ , es el combustible,

$K$ , es la categoría del buque,

$L$ , es el tipo de motor,

$E_i$ , es el total de emisiones para la tipología  $i$ .

$E_{i,j,k,l}$ , es el total de emisiones para el agente contaminante  $i$  por el tipo de combustible usado  $j$  en un buque de clase  $k$  con un tipo de motor  $l$ .

$S_{j,k} (GT)$ , es el consumo diario de combustible  $j$  en un buque de clase  $k$  como función del tonelaje bruto,

$t_{j,k,l}$ , es el número de días de navegación para un buque de clase  $k$  con un tipo de motor  $l$  usando combustible  $j$ .

$F_{i,j,l,m}$ , es el factor medio de emisiones contaminante para la categoría  $i$  del combustible  $j$  y teniendo en cuenta el tipo de motor  $l$ .

En el modelo más detallado se distingue entre los distintos sistemas de operación de un buque. Requiere un mayor detalle de los datos, el modelo anterior quedaría de la siguiente forma: [41]

$$E_i = \sum_{j,k,l,m} E_{i,j,k,l,m}$$

$$\text{Siendo, } E_{i,j,k,l,m} = S_{j,k,m} (GT) \times t_{j,k,l,m} \times F_{i,j,l,m}$$

Donde:

$I$ , es el agente contaminante,

$j$ , es el combustible,

$k$ , es la categoría del buque,

$l$ , es el tipo de motor,

$m$ , es el tipo de operación,

$E_i$ , es el total de emisiones para la tipología  $i$ ,

$E_{i,j,k,l,m}$ , es el total de emisiones para el agente contaminante  $i$  por el tipo de combustible usado  $j$  en un buque de clase  $k$  con un tipo de motor  $l$  en el modo de operación  $m$ ,

$S_{j,k,m}$  (GT), es el consumo diario de combustible  $j$  para un buque de clase  $k$  en el modo de operación  $m$  como función del tonelaje bruto,

$t_{j,k,l,m}$ , es el número de días de navegación para un buque de clase  $k$  con un tipo de motor  $l$  usando combustible  $j$  en el modo de operación  $m$ ,

$F_{i,j,l,m}$ , es el factor medio de emisiones contaminante para la categoría  $i$  del combustible  $j$  teniendo en cuenta el tipo de motor  $l$  en el modo de operación  $m$ .

Para ambas metodologías es necesario calcular el consumo de combustible, que se estima a partir de la base de datos de los Servicios de ingeniería de Registro Lloyd<sup>59</sup>.

En la base de datos de Lloyd hay aproximadamente 15.000 buques con datos del consumo de combustible, de los cuales 11.000 tienen el tonelaje medido de acuerdo con la Convención Internacional de tonelaje de 1969<sup>60</sup>.

La distribución de los buques de la muestra de dicho registro se demuestra en las tablas siguientes, en función del tipo de propulsión, del tipo de velocidad:

Tabla 33. Distribución de la muestra de la nave por el tipo de la propulsión

Propulsión	Número de naves
Motores Diesel	10.796
Turbinas de gas	12
Turbinas de vapor	221
Velero	6
Total	11.035

Fuente: MEET, 1999

Tabla 34. Distribución de la muestra de las naves por tipo de velocidad

Clase de velocidad (Nudos)	Número de naves
0-10	201
10-20	10.021
20-30	664
30-40	17
40-45	4

<sup>59</sup> Lloyds Register Engineering Services, London, UK

<sup>60</sup> International Convention on Tonnage Measurement of Ships, 1969

No conocidas	128
--------------	-----

Fuente: MEET, 1999

Tabla 35. Distribución de la muestra por tipo de nave

Nº de clase	Tipo de nave	Número de naves
01	A granel sólidos	2.206
02	Granel líquidos	2.542
03	Carga General	3.450
04	Contenedores	858
05	Pasajero/Ro-Ro/Cargo	856
06	Pasajero	83
07	Ferry de alta velocidad	18
08	Carga interior	0
09	Velero	6
10	Remolque	499
11	Pesquero	147
12	Otras	370

Fuente: MEET, 1999

El análisis estadístico de regresión llevado a cabo utilizando esta muestra de 11.000 buques, para el consumo de combustible en función del tonelaje bruto (para cada clase de la nave) muestra como los datos se correlacionan altamente ( $r > 0.68$  para todos los casos), todas las regresiones llevadas a cabo son significativas en un 99%.

En la tabla siguiente se presentan las funciones para cada tipo de nave en función del tonelaje bruto y el consumo medio.

Tabla 36. Consumo de combustible medio en las ecuaciones con plena energía y de la regresión lineal del consumo con energía plena en función del tonelaje bruto

Tipo de nave	Consumo medio (t/día)	Consumo con energía plena (t/día) en función del peso bruto (GT)
A granel sólidos	33.80	$C_{jk} = 20.186 + .00049 * GT$
Granel líquidos	41.15	$C_{jk} = 14.685 + .00079 * GT$
Carga general	21.27	$C_{jk} = 9.8197 + .00143 * GT$
Contenedores	65.88	$C_{jk} = 8.0552 + .00235 * GT$
Pasajeros/Ro-Ro/Carga	32.28	$C_{jk} = 12.834 + .00156 * GT$
Pasajeros	70.23	$C_{jk} = 16.904 + .00198 * GT$
Ferry de alta velocidad	80.42	$C_{jk} = 39.483 + .00972 * GT$
Carga de interior	21.27	$C_{jk} = 9.8197 + .00143 * GT$
Veleros	3.38	$C_{jk} = .42682 + .00100 * GT$
Remolques	14.35	$C_{jk} = 5.6511 + .01048 * GT$
Pesqueros	5.51	$C_{jk} = 1.9387 + .00448 * GT$
Otras naves	26.40	$C_{jk} = 9.7126 + .00091 * GT$
Todas las naves	32.78	$C_{jk} = 16.263 + 0.001 * GT$

Nota. j es el tipo del combustible y k es la clase de la nave

Fuente: MEET, 1999

Los datos de Lloyd proporcionan resultados de consumo de combustible para toda la potencia de la nave, por esto se debe hacer una corrección para ajustar estos datos. La Tabla 37 presenta el porcentaje de la potencia total en función de las situaciones de aceleración.

Tabla 37. Porcentaje de potencia total para diversos ajustes de la aceleración<sup>61</sup>.

Ajuste	% de potencia total	
	Barco	Remolque
Parado y sin utilizar	0	5
Muy despacio	10	10
Un tercio y despacio	20	20
Mitad de energía	40	40
Tres cuartos	60	60

<sup>61</sup> Scott Environmental Technology Inc (1981) Inventory of emissions from marine operations within the California coastal waters. Scott Environmental Technology Inc, San Bernardino, California

Energía plena	80	80
---------------	----	----

Fuente: MEET, 1999

Para la metodología simplificada el consumo de combustible se puede obtener como:

$$S_{jk} (GT) = C_{jk} (GT) * 0.8$$

y en la metodología detallada como:

$$S_{jkm} (GT) = C_{jk} (GT) * P.M. \quad [42]$$

Donde:

$S_{jk} (GT)$ , es el consumo diario de combustible  $j$  en clase de la nave  $k$  en función del tonelaje bruto,

$C_{jk} (GT)$ , es el consumo diario de energía plena de combustible  $j$  en la clase  $k$  de la nave en función de tonelaje bruto,

$S_{jkm} (GT)$ , es el consumo diario del combustible  $j$  en la clase  $k$  de la nave en el modo  $m$  en función de tonelaje bruto,

$p.m.$ , es la fracción del consumo de combustible máximo en el modo  $m$ . Las fracciones del consumo utilizados se muestran en la siguiente tabla para los distintos modos de funcionamiento.

Tabla 38. Fracción del consumo de combustible máximo en los distintos modos

Modo	Fracción (P.M)	
Modo travesía	0.80	
Maniobrando	0.40	
Atraque	0.20	
	Pasajeros	0.32
	Petrolero	0.20
	Otros	0.12
Remolque	Nave asistencia	0.20
	Actividad moderada	0.50
	Modo remolque	0.80

Fuente: MEET, 1999

Además del consumo de combustible hay que estimar, si no se sabe, el número de días de navegación. El número de días de navegación puede ser estimado mediante la velocidad de la nave y la distancia recorrida.

La siguiente tabla muestra los datos de Lloyd para la velocidad media en función del tipo de nave.

Tabla 39. Velocidad media en función del tipo de nave.

Tipo de nave	Velocidad media (nudos)
A granel sólidos	14.32
Granel líquidos	14.20
Carga General	14.29
Contenedores	19.09
Pasajero/Ro-Ro/Cargo	16.49
Pasajero	17.81
Ferry de alta velocidad	36.64
Carga interior	14.29
Velero	9.63
Remolque	12.91
Pesquero	11.96
Otras	13.45
Todas las naves	14.77

Fuente: MEET, 1999

**Ámbito de estudio TRENDS:**

Siguiendo con la misma metodología anterior del MEET, el estudio Transport and Environment Database System (TRENDS): Maritime air pollutant emission modelling, se desarrolla en el marco del proyecto Transport and Environment Database System (TRENDS).

Este trabajo estima las emisiones de buques en tráfico entre puertos de la UE 15 que supongan carga o descarga de mercancías, en el modo de operación de crucero para los años del periodo 1.997-2.000.

La clasificación realizada de los buques es la definida en Lloyd's Register of Ships.

Para el estudio se asume un consumo específico medio de combustible (SFC) de 205 g/Kwh. teniendo en cuenta la antigüedad de los buques y la navegación en condiciones no ideales, que los motores principales y auxiliares generan una carga combinada del 85 % de la capacidad instalada, correspondiendo a los motores auxiliares el 5% y el 80 % al motor principal.

El estudio solo considera el régimen de crucero, que la potencia de los motores auxiliares está entre el 20 y el 30 % de la potencia del motor principal y asume que los motores auxiliares consumen Marine Gas Oil (MGO).

Además define la velocidad de servicio como la velocidad que el buque es capaz de mantener en el mar en condiciones normales meteorológicas y al calado normal de servicio.

Las fuentes de Información del estudio son:

- Methodologies for Estimating air Pollutant Emissions from Transport (MEET). Como fuente de datos y metodologías técnicas.

- **EUROSTAT**. Descripción de buques y sus movimientos entre puertos de la UE-15.
- **Technical University of Denmark**. Suministrador de bases de datos relativas a buques comerciales.
- **Maritime Coastal Area (MCA)**. Base de datos de las rutas utilizadas por los buques.
- **Flodström (1997)**. Base de datos para el estudio de la relación entre la potencia de los motores y el tamaño del buque.
- **Lloyd's Register Engineering Services (1995)**. Base de datos para el estudio de la relación entre la potencia de los motores y el tamaño del buque.

En primer lugar el estudio muestra la relación entre el peso muerto el consumo de combustible y las GT para los diferentes tipos de buques, así como los valores de correlación, como se muestra en la Tabla 38.

Tabla 40. Relación entre el peso muerto (t), el consumo de combustible (Kg./Km.) y las GT para diferentes tipos de buques así como los valores de correlación.

Relationship between dead weight and fuel consumption with gross tonnage				
Vessel type	Dead weight (tonnes)	R-squared deviation	Fuel consumption (kg km <sup>-1</sup> )	R-squared deviation
Tanker	1.87 × GT	0.9886	0.2283 × GT <sup>0.5589</sup>	0.8865
Bulk carrier	1.83 × GT	0.9859	0.3059 × GT <sup>0.5241</sup>	0.913
General cargo	1.39 × GT	0.9287	0.1637 × GT <sup>0.6024</sup>	0.7105
Container	1.09 × GT	0.9445	0.0489 × GT <sup>0.7381</sup>	0.7748
RoRo/ferry/cargo	0.54 × GT	0.5404	1.2324 × GT <sup>0.3967</sup>	0.3025
Passenger ship	0.18 × GT	0.7816	0.173 × GT <sup>0.6134</sup>	0.7509

Fuente: Transport and Environment Database System (TRENDS): Maritime air pollutant emission modelling, 2004

Por otro lado, el documento realiza otra división de los barcos en función de la potencia de los motores. Así motores semirrápidos son habituales en buques pequeños y motores lentos en buques grandes. La frontera entre un grupo y otro lo marca en los 2.500 GT y los 2.000 Kw., basándose e los estudios de *Flodström (1997)* y del *Lloyd's Register Engineering Services (1995)* (motores más pequeños se consideran semirrápidos y por encima de este tamaño motores lentos).

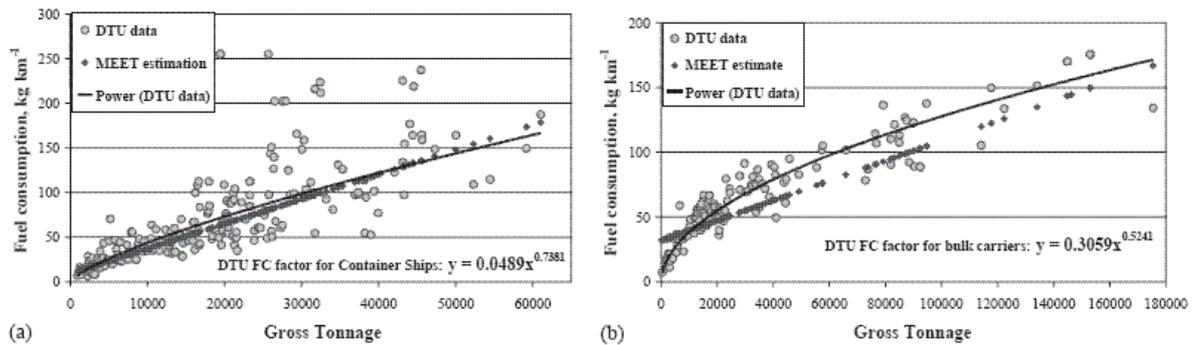
En este estudio los combustibles consumidos para cada tipo de motor son:

- Marine Fuel Oil (MFO) para motores lentos (40,0-40,5 MJ/Kg.).
- Marine Gas Oil (MGO) para motores semirrápidos (42,0-42,5 MJ/Kg.). Esta consideración no es consistente, ya que los motores semirrápidos usan F.O. mayoritariamente y especialmente los buques más modernos.

El Consumo específico de combustible (SFC) para motores diesel modernos es de 160 g/kWh y para los antiguos es de 220 g/kWh, para turbinas es de 280 g/kWh. Según las pruebas de banco el consumo específico de los motores lentos es de 187 g/kWh.

La figura 8 resume la relación entre el consumo de combustible y el GT, según diferentes estudios y la Tabla 39 muestra la relación de las distintas categorías de buques según el Eurostat y el Trends.

Figuras 8 (a) y (b): relación entre el consumo de combustible y el GT según diferentes estudios para buques porta-contenedores y graneleros según datos derivados del MEET 1999, de datos de la DTU y con buques reales.



Fuente: Transport and Environment Database System (TRENDS): Maritime air pollutant emission modelling. 2004

Tabla 41. Categorías en que el EUROSTAT y TRENDS agrupa a los barcos.

Eurostat definition of ship types and correlation with the TRENDS categories		
Eurostat	Ship categories included by Eurostat	TRENDS
Liquid bulk	Oil tanker, chemical tanker, LG tanker, tanker barge, other tanker	Tanker
Dry bulk	Bulk/oil carrier, bulk carrier	Bulk carrier
Container	Full container	Container ship
Specialised	Barge carrier, chemical carrier, irradiated fuel, livestock carrier, vehicle carrier, other specialised	General cargo
General cargo, non specialised	Reefer, RoRo passenger, RoRo container, other RoRo cargo, combination carrier general cargo/passenger, combination carrier general cargo/cargo, single-decker, multi-decker	RoRo/ferry/cargo
Dry cargo barge	Deck barge, hopper barge, lash-seabee barge, open dry cargo barge, covered dry cargo barge, other dry cargo barge	Bulk carrier
Passenger	Cruise, other passenger only	Passenger ship

Fuente: Transport and Environment Database System (TRENDS): Maritime air pollutant emission modelling. 2004

Para calcular el cálculo del consumo de combustible el documento sigue los siguientes pasos:

- Paso 1: Calcula el consumo de combustible en Kg./Km. por tipo de buque y tamaño, de acuerdo a la clasificación mostrada en la Tabla 38.
- Paso 2: Calcula como media ponderada el consumo específico medio en g GT/Km., por tipo de buque y tamaño en función de los buques que llegan a un determinado puerto.
- Paso 3: Calcula el consumo de combustible en Kg./Km. por tipo de buque sumando todos los tamaños de buques.

En la Tabla 40 se muestra el cálculo del consumo de combustible (Kg./Km.) para graneleros arribados al puerto de Helsinki en el primer trimestre del año 2.000, en donde pueden verse los tres primeros pasos antes señalados.

**Tabla 42. Consumo de combustible (Kg./Km.) para graneleros arribados al puerto de Helsinki en el primer trimestre del año 2.000.**

Calculation of fuel consumption per kilometre for bulk carriers entering the port of Helsinki by tonnage range. First quarter of 2000							
Calculation of specific fuel consumption per km travelled by the fleet							
Reporting port	Tonnage range	No. of vessels	Total GT	Average GT	Vessel FC (kg km <sup>-1</sup> )	SFC (g GT-km <sup>-1</sup> )	Fleet FC (kg km <sup>-1</sup> )
Helsinki	Up to 499	25	4164	167	4.47	26.8	112
Helsinki	1000-1999	1	1102	1102	12.02	10.9	12
Helsinki	2000-2999	1	2163	2163	17.12	7.91	17
Helsinki	10,000-19,999	4	50148	12,537	43.00	3.43	172
Helsinki	20,000-29,999	4	113,320	28,330	65.92	2.33	264
Total	All	35	170,897				577
Average				4883	16.47	3.37	

Fuente: Transport and Environment Database System (TRENDS): Maritime air pollutant emission modelling. 2004

- Paso 4: El combustible calculado en el paso 3 se divide entre la carga de los buques que llegaron/salieron del puerto considerado, obteniendo así el consumo específico de combustible por tonelada de carga entrante/saliente de puerto y Km. recorrido.
- Paso 5: Se calculan las (t Km.) de llegada y salida de mercancías transportadas en cada ruta. Se toman las distancias de cada una de esas rutas de la base de datos MCA y se consideran estas distancias divididas entre 2 (pues solo la mitad de la ruta considerada puede ser asignada a uno de los dos puertos implicados en la misma).
- Paso 6: Se calcula el combustible consumido en una ruta en particular en un determinado periodo en base al consumo específico según el paso 2 y a las mercancías transportadas.

En la Tabla 41 se muestran los consumos específicos de combustible en g GT/tm por tonelada de mercancía transportada en buques de graneles sólidos en el puerto de Helsinki durante el año 2000.

**Tabla 43. Consumos específicos de combustible en g GT/tm por tonelada de mercancía transportada en buques de graneles sólidos en el puerto de Helsinki durante el año 2000.**

Specific fuel consumption of bulk carriers entering the port of Helsinki with respect to goods weight. quarterly results for the year 2000					
Calculation of specific fuel consumption per tonnekm of goods carried					
Reporting port	Reference quarter	Cargo type	Gross weight of goods (tonnes)	Fleet FC (kg km <sup>-1</sup> )	SFC (g tonne km <sup>-1</sup> )
Helsinki	Q1	Dry bulk	232,237	577	2.48
Helsinki	Q2	Dry bulk	112,656	396	3.52
Helsinki	Q3	Dry bulk	191,837	738	3.58
Helsinki	Q4	Dry bulk	338,642	1140	3.37

Fuente: Transport and Environment Database System (TRENDS): Maritime air pollutant emission modelling. 2004

## TRENDS 2002.

Siguiendo en la línea del TRENDS, otro estudio realizado con anterioridad, titulado Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). Maritime and Inland Shipping Modules, muestra el trabajo realizado para

el desarrollo de los módulos marítimo y de aguas interiores, en el ámbito de la unión Europea (15 países), para el sistema TRENDS (Transport and Environment Databases System)

Los datos manejados en el proyecto han sido suministrados por EUROSTAT.

El proyecto TRENDS forma parte del proyecto para conocer la influencia de las actividades humanas sobre el medioambiente europeo. La base de datos resultante, realizada en MS Access, suministra indicadores medioambientales para el sector del transporte en los países UE-15, para el periodo 1.970-2.020.

El principal desafío encarado por este proyecto ha sido la utilización de una extensa base de datos sobre el transporte marítimo creada por el EUROSTAT con la finalidad de calcular emisiones contaminantes.

Los datos de flota se han tomado de Lloyd´s Register y suponen alrededor de 83.000 buques de más de 100 TRB, con 491 millones de Tns, no incluye buques de guerra ni barcos de placer ni barcos sin propulsión ni buques de servicio de puerto o navegación restringida a ríos y canales. De estos se han considerado los buques que han realizado transportes de mercancías en los 15 países de la UE.

Casi el 59% de la flota mundial esta formada por buques con menos de 5.000 DWT. Sin embargo estos buques sólo representan el 5% del tonelaje mundial. Así el 3% del número de buques mundiales, representan el 36% del tonelaje de la flota. Buques “tanqueros” y graneleros alcanzan el 26% en número y el 69% del DWT, de la flota de carga. Las categorías de los buques usadas en este estudio provienen del registro de buques de Lloyd´s, y son las siguientes:

- Graneleros: buques con una sola bodega compartimentada para poder llevar diferentes tipos de graneles secos.
- Tanques: buques con una sola bodega que puede tener o no compartimentada y especializados en graneles líquidos.
- Portacontenedores: especializados para contenedores.
- De carga General: especializados para llevar diversas formas de carga seca.
- RoRo/Ferris: Buques con varias cubiertas cuya carga pueda ser embarcada o desembarcada como carga rodada.
- De Pasajeros: especializados en el transporte de 12 o más pasajeros y su equipaje.

En el proyecto se ha elegido el GT de un buque como medida del tamaño del buque, aunque para cada tipo de buque se han desarrollado relaciones con el DWT, lo que permite usar indistintamente cualquiera de ellos como muestra la Tabla 42. La relación es muy buena para buques graneleros, tanques de carga general y portacontenedores y peor para buques RORO - Ferrys y de pasajeros.

Tabla 44. Relación entre GT y DWT.

Vessel type	Dead weight
Tanker	1.87 * GT
Bulk carrier	1.83 * GT
General Cargo	1.39 * GT
Container	1.09 * GT
RoRo/Ferry/Cargo	0.54 * GT
Passenger ship	0.18 * GT

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Los combustibles marinos se pueden dividir en dos tipos:

- Destilados marinos o gas-oil (42-42,5 MJ/Kg.). Normalmente usados en motores principales de buques pequeños o motores auxiliares de buques grandes.
- “Pesados” o fuel-oil (40-40,5 MJ/Kg.). Normalmente usados en motores principales de buques grandes. El más habitual es el denominado Bunker Fuel Oil.

Tanto unos como otros necesitan un tratamiento previo a su uso en un motor diesel (al que añadir un calentamiento hasta los 150°C en el caso del fuel-oil, para facilitar su inyección en la cámara de combustión).

Además los motores marinos se pueden dividir en dos categorías:

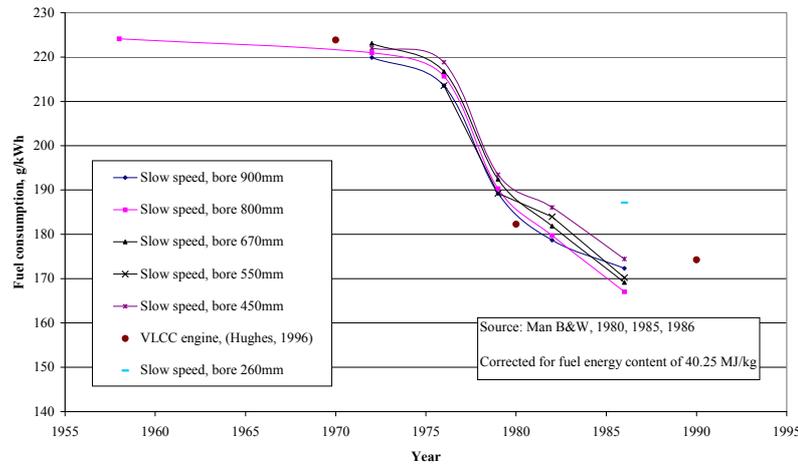
- Lentos de dos tiempos (80-300 rpm) de 4-12 cilindros con un uso exclusivo para propulsión, habituales en buques grandes (> 2.000 GT).
- Semirrápidos de 4 tiempos (400 rpm) de 12 cilindros en línea o 20 en “V”, usados tanto en propulsión como para generación eléctrica, muy habituales en Ferris y buques pequeños (< 2.000 GT).

En las 14.000 naves analizadas para este trabajo se observó que en un 71% de los motores principales instalados eran motores lentos, el 23% semirrápidos y el 6% turbinas de vapor aunque estos buques eran en general tanques y graneleros de gran tamaño.

En TRENDS se asumió que todos los buques de menos de 2.000 GT tienen motor semirrapido y los de más de 2.000 GT motor lento.

En cuanto a los consumos en Motores Principales, se puede observar como en la Figura 9, el consumo específico de un motor marino diesel ha decrecido mucho en los últimos 30 años.

Figura 9. Evolución de los consumos en motores principales.



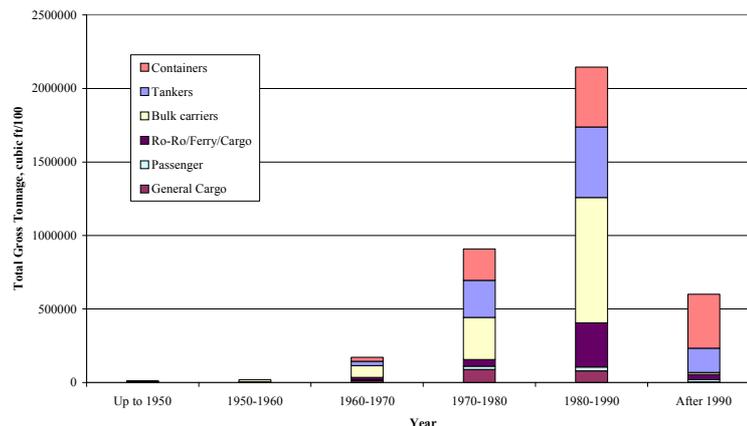
Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

El consumo específico de un motor marino diesel moderno puede ser de 160 g/kWh comparado con los 220 g/kWh de un motor antiguo. Las turbinas de vapor tienen un consumo de unos 280 grs/kwh.

En general se puede hablar de una flota envejecida para los buques de carga general y joven para los porta contenedores.

Basándose en la distribución de consumos específicos mostrada en la figura anterior y la distribución por antigüedad de la flota de la figura siguiente, se ha llegado en este estudio a un consumo específico de 187 g/kWh. Debe resaltarse que en torno a un 30% de la flota con los menos eficientes motores de 4 tiempos y turbinas de vapor, además de que los datos usados pertenecen a motores trabajando en las condiciones ideales del banco de pruebas. Estos consumos son en banco de pruebas por lo que los consumos en operación son significativamente superiores.

Figura 10. Distribución por edades de los diferentes tipos de buques (Lloyds Register 1.994)



Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Debe resaltarse que 200 g/kWh es el consumo habitual usado en los buques diesel en diferentes estudios (Bouscaren, Alexanderson, Flodstrom). Sin embargo en el estudio de Lloyds Register Engineering Services, el consumo específico calculado a partir de

los factores de emisión es de 210 g/kWh (1.990). *Bremnes* en su estudio presenta diferentes consumos específicos para los distintos tipos de buques:

- 202-203 g/kWh para graneleros.
- 191-210 g/kWh para tanqueros.
- 204-208 g/kWh para buques de carga en general.
- Para este trabajo el consumo específico elegido ha sido de 205 g/kWh.

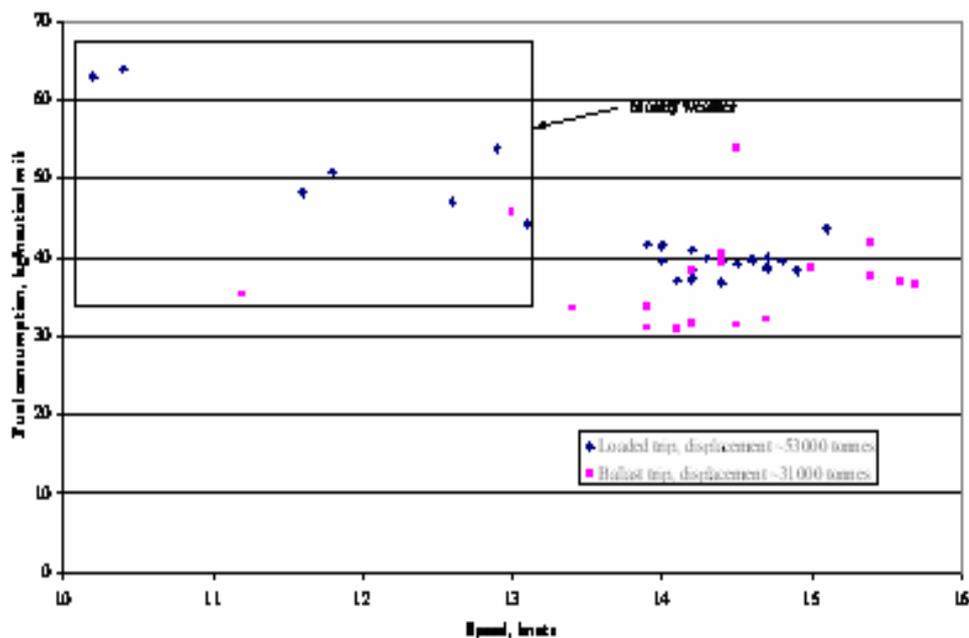
En cuanto a los datos necesarios de los buques para realizar el estudio y dado que la energía consumida por un buque depende de muchos factores, entre los que destacan:

- La velocidad y dirección del viento.
- Carga del buque.
- Forma del casco.
- Tipo de hélice.
- Estado del casco y la hélice.
- Tipo y mantenimiento del motor.
- Velocidad de operación.
- Requerimientos de los equipos auxiliares.

Todo esto podemos lo podemos comprobar en el siguiente estudio llevado a cabo con dos buques “tanqueros” (*Torm Alice* y *Torm Gotland*).

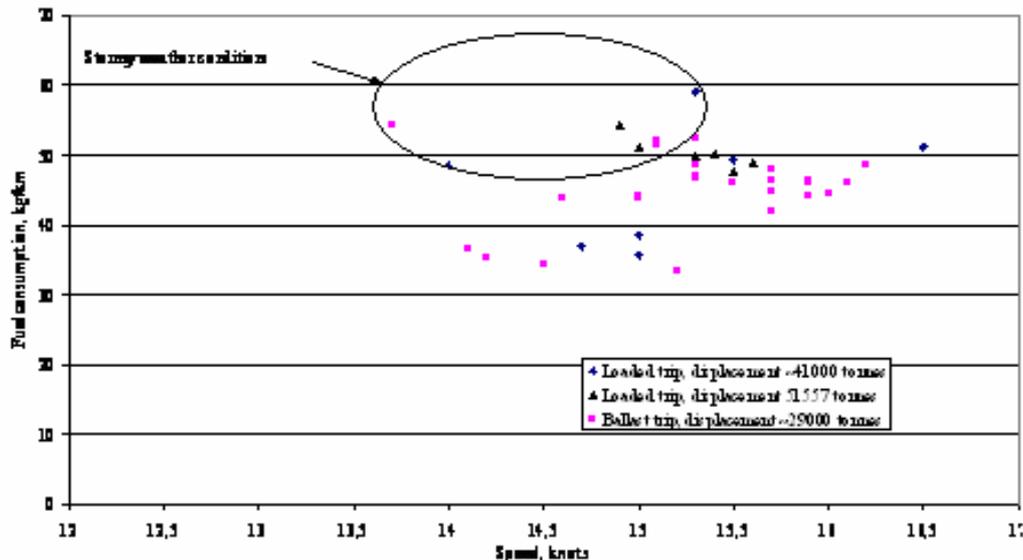
En la primera parte del estudio se analizó, para ambos buques, el consumo específico (Kg. /nautical mile) en función de la velocidad de operación bajo condiciones de lastre y de carga.

Figura 11. TORM ALICE



Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Figura 12. TORM GOTLAND



Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Se observa claramente que las condiciones de tormenta hacen disminuir la velocidad y aumentar el consumo. También que la variación del consumo es mayor con las condiciones meteorológicas que con el nivel de carga del buque, a pesar de lo cual, el nivel de carga tiene también sus efectos económicos (como puede verse en la siguiente tabla en la que el Torm Gotland varía su consumo un 6% y el Torm Alice un 13%, dependiendo de si la travesía la hace cargado o descargado).

Tabla 45. Datos de los dos Buques objeto de estudio.

Ship	Loading	Average speed, knots	Average power, Kw.	% of MCR	SFC, g/kWh	Average fuel consumption, kg/km
Torm Gotland	Loaded	15.21	6888	80	196	47.77
Torm Gotland	Ballast	15.26	6938	80	193	44.97
Torm Alice	Loaded	13.78	5422	90	199	42.81
Torm Alice	Ballast	14.22	4838	81	203	37.09

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Ambos buques tiene el mismo tipo de motor, que de acuerdo a los datos de su constructor (Man B&W) tiene un consumo en banco que varía entre 170-176 g/kWh (170 para el Torm Gotland y 176 para el Torm Alice). Obviamente, estas no dejan de ser las condiciones ideales en un test de banco. Resultados que cuando se miden en condiciones reales se ven incrementados en aproximadamente 25 g/kWh.

De los motores Auxiliares hay que añadir que muchos buques tienen motores auxiliares cuya potencia alcanza el 20-30% de la de los motores principales, aunque algunos graneleros y tanques tienen incluso más, al tener equipos de equipos de autocarga y descarga.

Otro de los factores que afecta al consumo de combustible es la carga del Motor. El motor principal esta normalmente funcionando a una potencia ligeramente inferior a la plena. Desde el punto de vista del consumo el motor suele estar optimizado alrededor del 80% de la carga plena o MCR (Maximum Continuous Rating). Un estudio realizado por *Alexandersson*, asume un factor de carga del motor del 80%. Por otro lado, una encuesta realizada por *Flodstrom*(1.997) sobre 82 buques de diferentes clases indica un rango de variación del factor de carga del motor entre 60 y 95% del MCR. En la Tabla 44 se muestra la media de los factores de carga (de este estudio) para diferentes tipos de buques, trabajando bajo condiciones normales de operación. Observar que los graneleros muestran unos factores de carga ligeramente inferiores al resto y que puede ser debido a su baja velocidad.

Tabla 46. Media de los factores de carga para diferentes tipos de buques, trabajando bajo condiciones normales de operación

Percentage MCR	All	General Cargo	Bulk carriers	RoRo	Tankers	Car Ro/Ro
Main engine load	81	83	72	82	84	83

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

En el estudio del *Lloyds Register Engineering Services*, se asume un factor de carga del motor del 85% del MCR, factor que también adopta el *Atmospheric Emission Inventory Guidebook*.

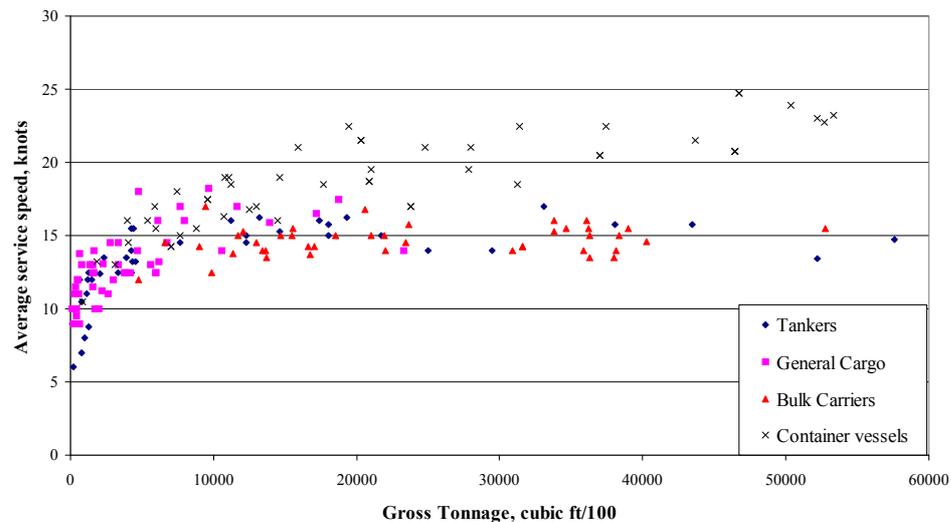
En lo referente a los motores auxiliares, la misma encuesta de *Flodstrom* (1.997) indica un factor de carga en el mar del 16%. La potencia instalada de motores auxiliares supone un 25% de la potencia instalada del motor principal, por lo que el consumo de los motores auxiliares puede ser evaluado como un incremento del 4% en la potencia del motor principal.

El estudio de *Lloyds* asume que la carga de los motores auxiliares es constante y del 100% del MCR por lo que la energía consumida por los motores auxiliares supondría 20-30% de la energía total. Así mismo este estudio considera que la combinación de los motores auxiliares y principales genera una salida de potencia equivalente al 85% del MCR del motor principal (Asume que los motores auxiliares consumen gas-oil).

Velocidad del Buque. La potencia de propulsión requerida depende del triple de la velocidad. Así un incremento de la velocidad de un 10% puede implicar un incremento de la potencia del 30%. Esta relación esta también indicada en la curva de la hélice, que es usada como base en muchos cálculos hidrodinámicos.

En la siguiente figura puede observarse la velocidad media de servicio se incrementa con el tamaño del buque. Los beneficios económicos del tamaño permiten incrementar el combustible requerido.

Figura 13. Evolución de la velocidad media del servicio por tamaño del buque.

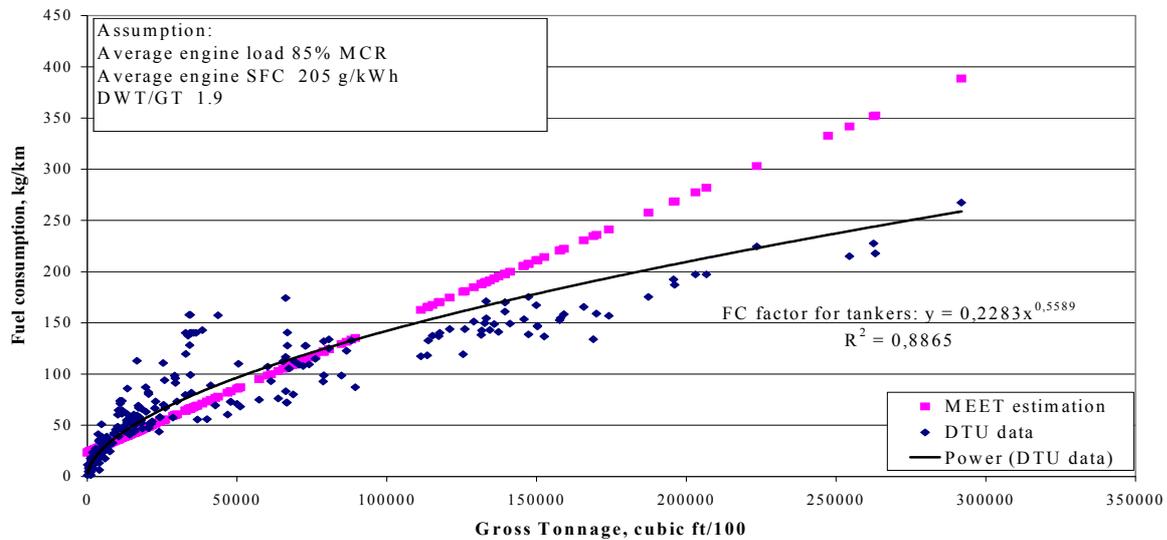


Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Debe tenerse en cuenta que la velocidad puede variar dependiendo de la carga, las condiciones meteorológicas y de los requerimientos logísticos y económicos. Para este trabajo se define la velocidad de servicio como aquella que el buque es capaz de mantener en el mar bajo condiciones normales y para un servicio normal.

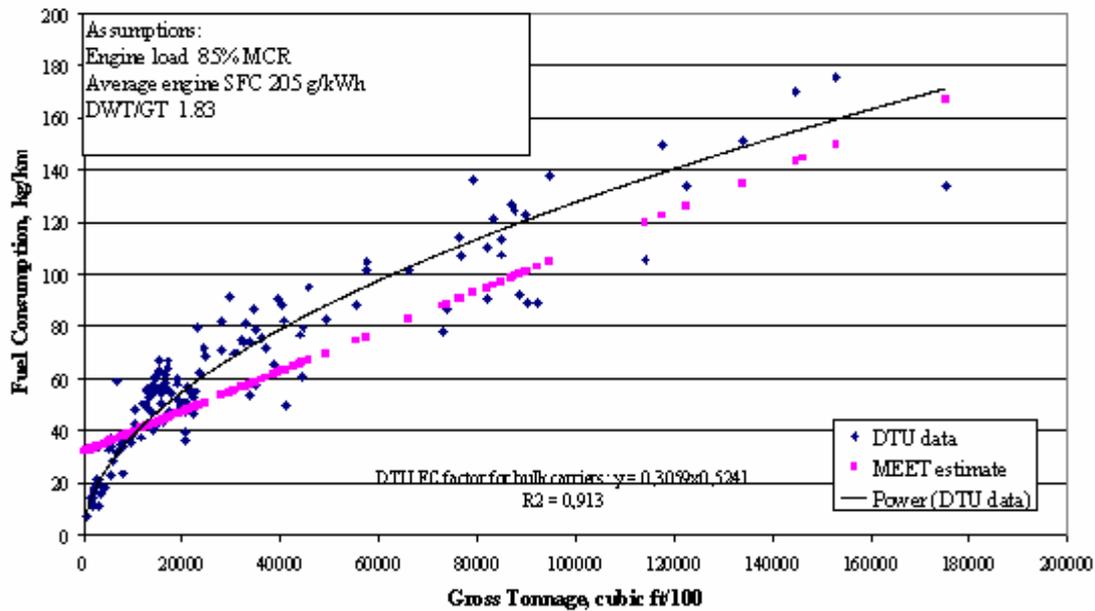
Los Factores de consumo de combustible han sido desarrollados en términos de combustible consumido por unidad de distancia, incluyendo la velocidad del buque. Los factores se basan de la base de datos creada y mantenida por el DTU, *Department of Naval Architecture and Offshore Engineering*, que contiene cerca de 2.300 entradas. Estos factores de consumo han sido comparados con otros producidos por el MEET (*Methodologies for Estimating Airborne Pollutant Emissions*), y se observa una correlación razonable entre las dos bases de datos. Estos datos se muestran en las figuras siguientes.

Figura 14. Consumo de combustible para buques tanques.



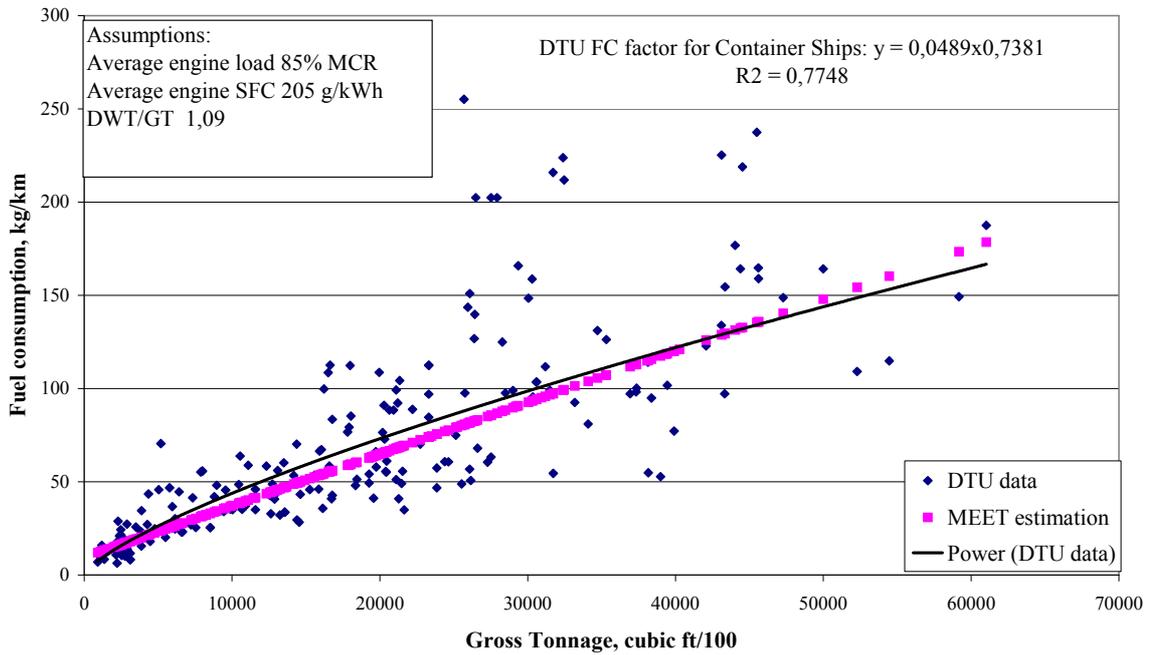
Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Figura 15. Consumo de combustible para Graneleros.



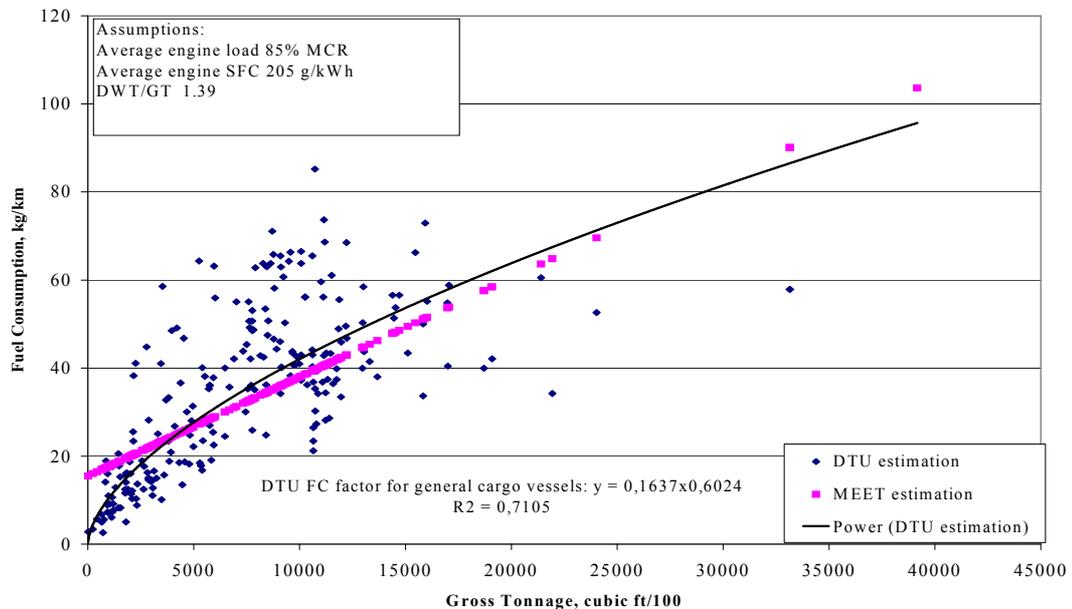
Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Figura 16. Consumo de combustibles para portacontenedores



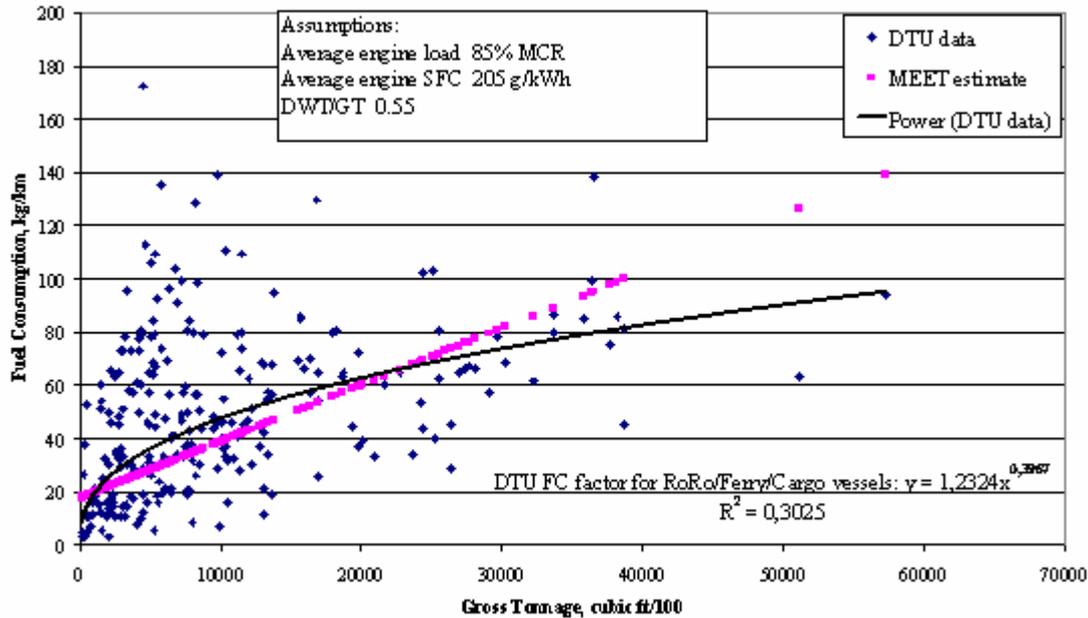
Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Figura 17. Consumo de combustible para buques de carga generales



Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Figura 18. Consumo de combustible para RORO/Ferry/Cargo Vessels



Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Los factores de consumo de combustible desarrollados por el MEET han sido desarrollados sobre la base de datos del *Lloyd's Maritime Information Services Ltd.* Estas figuras de consumo de combustible son resultado de una encuesta en la que se requería el consumo medio de combustible bajo condiciones normales de servicio, lo que hace que la validez de los mismos quede a discreción de los encuestados y que haya cierta incertidumbre sobre las condiciones de operación a las que están vinculados. Estos datos considerados por Lloyds incluye el consumo de motores auxiliares, que en algunos casos como los buques de pasajeros o porta contenedores (contenedores con refrigeración) puede ser importante. Se resalta que los datos de consumo mostrados pueden ser optimistas para no disuadir a las empresas cargadoras.

Los factores MEET asumen una relación lineal entre el GT y el consumo de combustible así como con la velocidad media para cada tipo de buque. Para mostrar mejor la relación con el GT de un buque se ha usado la curva de potencia para estimar el consumo de combustible de lo buques de la base de datos DTU.

La velocidad de servicio tiende a incrementarse con el tamaño y esto necesita tenerse en cuenta cuando se estima el consumo de combustible por unidad de distancia. Usando una velocidad media para cada categoría de buques, los factores MEET podrían quizás subestimar el consumo en los buques pequeños y sobreestimarlos en los grandes.

En muchos casos las funciones del consumo de combustible derivadas de DTU y del MEET, correlacionan razonablemente bien, con la posible excepción de los graneleros. Para este caso las estimaciones basadas en el DTU son significativamente más grandes que las basadas en el MEET. Esto puede ser debido a la reducida carga del motor principal que ha sido observada en los graneleros. Sin embargo para el propósito de este estudio la misma carga media del motor se ha mantenido para todos los tipos de buques.

Este estudio intentó construir un modelo de puerto para estimar el consumo de combustible y las emisiones en el mismo. La información ha sido extraída de tiempos medios de atraque y maniobra para diferentes tipos de buques. Sin embargo todos los

aspectos considerados dependen en gran medida de las facilidades de cada puerto. De esta forma no ha sido posible realizar un modelo que pueda ser aplicado de una manera exacta a todos los puertos europeos.

En cuanto a los datos sobre el tráfico de buques, las estadísticas sobre el tráfico marítimo para todos los movimientos de buques que afecten a los miembros de la UE-15 son suministrados por la Oficina Estadística de la Comisión Europea. Datos que son suministrados por los países miembros de acuerdo a las Directivas del Consejo 95/64/EC y 98/358/EC.

Además la duración limitada de los datos recogidos bajo las dos directivas mencionadas anteriormente (4 años, pero solamente para algunos estados miembros) hace que aparentemente no podría ser usado para generar series temporales de resultados. Para este propósito un segundo conjunto de datos, basado en el tráfico total de mercancías reportado por los países miembros, fue usado y una base de datos diferente fue construida.

Existen limitaciones de los datos debido a la competitividad existente entre los puertos, la aplicación de los datos obtenidos sólo es posible puerto-MCA (Maritime Coastal Areas) y no puerto-puerto como era la intención en un principio. Los datos puerto a puerto son registrados por la Comisión pero no están disponibles para este trabajo debido a las objeciones presentadas por algunos países miembros que consideran estos datos confidenciales. Este inconveniente ha causado complicaciones en la estimación de las distancias viajadas por los buques, ya que el concepto MCA cubre mucha distancia de la línea de costa. Los cálculos están basados en el concepto distancias puerto-MCA, que fueron suministradas por el Eurostat.

La relación puerto-MCA también significa que los datos no se reflejan, esto es, la cantidad de toneladas enviadas desde un puerto a una MCA no es necesariamente igual a la cantidad registrada por el mismo MCA como recibida de ese puerto. La razón para esto para esto es que mientras el puerto de origen indica el MCA para el que la carga es destinada, los puertos pequeños del otro lado no tienen que reportar los movimientos de la carga. Estos resultados en la carga destinada a puertos pequeños aparecen como “perdidos” en el registro.

Los datos están disponibles para los años 1.997 al 2.000, pero ninguno de ellos esta completo (faltan los datos de alguno de los países miembros como es el caso de Italia). También alguno de los datos ha tenido que ser excluido o modificado debido a errores o ser incompletos los registros. Además los tráficos hacia y desde los puertos españoles de Ceuta y Melilla no pueden ser tenidos en cuenta debido a que han sido guardados bajo códigos diferentes a los del resto de los puertos españoles. A pesar de todo esto los errores a que todo esto pudiera dar lugar parecen muy pequeños.

Pág. 23: Movimientos por Tipo y Tamaño de Buque. Los datos son específicos para cada puerto y dan información sobre la llegada de los buques. No dan información acerca del origen o destino MCA del viaje. Los datos indican la categoría del tonelaje, número de buques y GT de los buques.

Los tipos de buques descritos en la directiva no son los mismos que las categorías definidas en este estudio y por ello se ha tenido que hacer una tabla de correlación que se muestra a continuación. La propuesta de correlación entre tipos de buques y tipos de carga definidos con propósitos estadísticos ha sido uno de los mayores desafíos encarados por este estudio.

Tabla 47. Tipo de buque de acuerdo a la nomenclatura Eurostat y su correlación en TRENDS

Code	Vessel Type_EU	Ship categories included_EU	TRENDS
10	Liquid Bulk	Oil tanker	Tanker
		Chemical tanker	
		LG tanker	
		Tanker barge	
		Other tanker	
20	Dry Bulk	Bulk/oil carrier	Bulk Carrier
		Bulk carrier	
31	Container	Full container	Container Ship
32	Specialised	Barge carrier	General Cargo
		Chemical carrier	
		Irradiated fuel	
		Livestock carrier	
		Vehicle carrier	
		Other specialised	
33	General Cargo, non specialised	Reefer	RoRo/Ferry/Cargo ship
		RoRo passenger	
		RoRo container	
		Other RoRo cargo	
		Combination carrier general cargo/passenger	
		Combination carrier general cargo/cargo	
		Single decker	
		Multi-decker	
34	Dry cargo barge	Deck barge	Bulk Carrier
		Hopper barge	
		Lash-Seabee barge	
		Open dry cargo barge	
		Covered dry cargo barge	
		Other dry cargo barges	
35	Passenger	Cruise	Passenger ship
		Other passenger only	

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Tabla 48. Correspondencia entre los modelos de buques considerados en el EUROSTAT y TRENDS

Cod.	Carga	Tipo de buque
1	LIQUID BULK GOODS	Liquid bulk
10	LIQUID BULK GOODS	Liquid bulk
11	LIQUID BULK, LIQUIFIED GAS	Liquid bulk
12	LIQUID BULK, CRUDE OIL	Liquid bulk
13	LIQUID BULK, OIL PRODUCTS	Liquid bulk
19	OTHER LIQUID BULK GOODS	Liquid bulk
2	DRY BULK GOODS	Dry bulk
20	DRY BULK GOODS	Dry bulk
21	DRY BULK, ORES	Dry bulk
22	DRY BULK, COAL	Dry bulk
23	DRY BULK, AGRICULTURAL PRODUCTS	Dry bulk
29	OTHER DRY BULK GOODS	Dry bulk
3	LARGE CONTAINERS	Container
30	LARGE CONTAINERS	Container
31	LARGE CONTAINERS, 20' FREIGHT UNITS	Container
32	LARGE CONTAINERS, 40' FREIGHT UNITS	Container
33	LARGE CONTAINERS, FREIGHT UNITS > 20' AND < 40'	Container
34	LARGE CONTAINERS, FREIGHT UNITS > 40'	Container
5	RO RO, MOBIL SELF-PROPELLED UNITS	RoRo/Cargo
50	RO RO, MOBIL SELF-PROPELLED UNITS	RoRo/Cargo
51	RO RO, ROAD GOODS VEHICLES AND ACCOMPANYING TRAILERS	RoRo/Cargo
52	RO RO, PASSANGER CARS AND ACCOMPANYING TRAILERS/CARAVANS	RoRo/Cargo
53	RO RO, PASSANGER BUSES	RoRo/Cargo
54	RO RO, IMPORT/EXPORT MOTOR VEHICLES	RoRo/Cargo
56	RO RO, LIVE ANIMALS ON THE HOOF	RoRo/Cargo
6	OTHER RO RO, MOBILE UNITS	RoRo/Cargo
60	OTHER RO RO, MOBILE UNITS	RoRo/Cargo
61	OTHER RO RO, UNACCOMPANIED ROAD GOODS TRAILERS AND SEMITRAILERS	RoRo/Cargo
62	OTHER RO RO, UNACCOMPANIED CARAVANS AND OTHER ROAD, AGRICULTURAL AND INDUSTRIAL TRAILERS	RoRo/Cargo
63	OTHER RO RO, SHIPBORNE PORT-TO-PORT TRAILERS, AND SHIPBORNE BARGES ENGAGED IN GOODS TRANSPORT	RoRo/Cargo

Cod.	Carga	Tipo de buque
9	OTHER CARGO, NOT ELSEWHERE SPECIFIED	General cargo
90	OTHER CARGO, NOT ELSEWHERE SPECIFIED	General Cargo
91	OTHER CARGO, FORESTERY PRODUCTS	General Cargo
92	OTHER CARGO, IRON AND STEEL PRODUCTS	General Cargo
99	OTHER CARGO, GENERAL	General Cargo

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

La mayor fuente de datos sobre el transporte marítimo ha sido la base de datos *Eurostat NewCronos Regio*.

La Base de datos de distancias de puertos a MCA, se tomaron los datos de “The Veson Distance Tables from Fairplay”. Se consideraron las distancias en línea recta y cuando faltaba un puerto se tomaba la distancia a un puerto próximo de la misma MCA. No se consideraron incrementos por mala mar.

El consumo específico de combustible por kilómetro fue calculado sobre la base de los factores de los consumos de combustible y la distribución del tamaño del tráfico portuario. Las tablas de estos consumos se muestran a continuación.

Tabla 49. Consumo de combustible por kilómetro de graneleros por rango de tonelaje, entrados en el Puerto de Helsinki durante el primer trimestre del año 2.000.

Port	Vessel type	Tonnage Range	No. of vessels	GT of vessels	Average GT	Fuel consumption, Kg./km	SFC, g/GT km	Total Consumption, Kg./km
FIHEL	Dry Bulk	up to 499	25	4164	166.56	4.47	26.81	111.65
FIHEL	Dry Bulk	1000 - 1999	1	1102	1102	12.02	10.91	12.02
FIHEL	Dry Bulk	2000 - 2999	1	2163	2163	17.12	7.91	17.12
FIHEL	Dry Bulk	10000 - 19999	4	50148	12537	43.00	3.43	171.99
FIHEL	Dry Bulk	20000 - 29999	4	113320	28330	65.92	2.33	263.67

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Tabla 50. Consumo específico de combustible de graneleros, entrados en el Puerto de Helsinki con respecto al peso de las mercancías, en el año 2.000.

Reporting port	Reference quarter	Cargo	Gross weight of goods, tonnes	Fuel consumption of all vessels, kg/km	SFC, g/ goods tonne km
FIHEL	1	Dry Bulk GOODS	232237	576.45	2.48
FIHEL	2	Dry Bulk	112656	396.32	3.52
FIHEL	3	Dry Bulk	191837	737.68	3.58
FIHEL	4	Dry Bulk	338642	1141.85	3.37

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Para el cálculo del Consumo Total de Combustible, debe resaltarse que en algunos casos los consumos de combustible estimados fueron inviablemente bajos. A veces un buque puede entregar un peso bajo de mercancías que tienen y por lo tanto el combustible requerido fue sobreestimado

Tabla 51. Consumo total de combustible asignado al Puerto de Helsinki desde diferentes rutas para buques de transporte de graneles secos en el año 2.000.

Port	MCA of loading / unloading	Vessel type	Distance (nautical miles)	Gross Weight of Goods (tonnes)	SFC (g/tonkm)	Fuel Consumption (tonnes)
FIHEL	Belgium	Dry bulk	1250	255	3.58	1.07
FIHEL	Denmark	Dry bulk	700	1312	3.30	2.90
FIHEL	Estonia	Dry bulk	50	523	3.58	0.09
FIHEL	Germany: Baltic	Dry bulk	620	8322	3.30	16.34
FIHEL	Germany: N. Sea	Dry bulk	720	3	2.48	0.00
FIHEL	Latvia	Dry bulk	230	256	3.37	0.18
FIHEL	Netherlands	Dry bulk	1160	139	3.30	0.49
FIHEL	Norway	Dry bulk	910	4059	3.52	12.03
FIHEL	Poland	Dry bulk	420	587904	3.30	727.75
FIHEL	Russia: Baltic	Dry bulk	170	274027	3.30	147.22
FIHEL	Spain N. Atlantic	Dry bulk	1870	5	3.52	0.03
FIHEL	Sweden: Baltic	Dry bulk	560	1658	3.52	3.02
FIHEL	United Kingdom	Dry bulk	1150	10806	3.30	38.52

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

En cuanto procedimiento para la obtención de los datos regionales, se siguen las siguientes directrices:

las toneladas de mercancías por país eran atribuidas a los tipos de buques de acuerdo a la división del tonelaje total transportado por un específico tipo de buque en el año 2.000, como se puede observar en la Tabla 52.

Tabla 52. Participación de cada tipo de buque en el transporte de mercancías sobre la base de tonelaje. Estados miembros de la UE para el año 2.000.

Country	Container	Dry bulk	General Cargo	Liquid bulk	RoRo/Cargo
BE	0.30	0.18	0.11	0.22	0.19
DE	0.37	0.18	0.05	0.21	0.20
DK	0.06	0.19	0.02	0.31	0.42
ES	0.26	0.23	0.06	0.37	0.08
FI	0.16	0.19	0.18	0.25	0.22
FR	0.12	0.22	0.07	0.49	0.10
GB	0.14	0.14	0.03	0.43	0.24
GR	0.16	0.31	0.04	0.30	0.19
IE	0.22	0.22	0.02	0.26	0.28
IT	0.19	0.21	0.07	0.33	0.20
NL	0.21	0.28	0.04	0.41	0.06
PT	0.18	0.28	0.07	0.45	0.02
SE	0.08	0.14	0.08	0.30	0.39

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

La separación adicional fue hecha aplicando una división de la capacidad entre los buques con motores semirrápidos y lentos.

Tabla 53. División de la capacidad entre los buques con motores lentos y semirrápidos para el año 2.000.

Country	Engine type	Container	Dry Bulk	General cargo	Liquid Bulk	RoRo/Cargo
BE	Medium speed				0.05	
BE	Slow speed	1	1	1	0.95	1
DE	Medium speed		0.09	0.01	0.04	0.04
DE	Slow speed	1	0.91	0.99	0.96	0.96
DK	Medium speed	0.01	0.11	0.19	0.10	0.10
DK	Slow speed	0.99	0.89	0.81	0.90	0.90
ES	Medium speed	0.06	0.03	0.03	0.02	0.09
ES	Slow speed	0.94	0.97	0.97	0.98	0.91
FI	Medium speed		0.03		0.02	0.01
FI	Slow speed	1	0.97	1	0.98	0.99
FR	Medium speed		0.03	0.01	0.02	0.01
FR	Slow speed	1	0.97	0.99	0.98	0.99
GB	Medium speed		0.01		0.04	0.01
GB	Slow speed	1	0.99	1	0.96	0.99
GR	Medium speed	0.00	0.10	0.03	0.11	0.10
GR	Slow speed	1	0.90	0.97	0.89	0.90
IE	Medium speed		0.05		0.09	0.01
IE	Slow speed	1	0.95	1	0.91	0.99
IT	Medium speed	0.01	0.05	0.03	0.05	0.05
IT	Slow speed	0.99	0.95	0.97	0.95	0.95
NL	Medium speed				0.02	0.04
NL	Slow speed	1	1	1	0.98	0.96
PT	Medium speed			0.01	0.01	0.07
PT	Slow speed	1	1	0.99	0.99	0.93
SE	Medium speed		0.08		0.04	0.01
SE	Slow speed	1	0.92	1	0.96	0.99

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

El número de buques fue calculado usando una carga media por buque calculada a partir de una base de datos para el año 2.000. Mientras la carga media puede parecer poco realista en algunos casos, esta correlación todavía suministraría un número de buques proporcional a los observados para el año 2.000 (ver tabla 54).

Tabla 54. Carga media por tipo de buque en toneladas para el año 2.000.

Country	Container	Dry Bulk	General cargo	Liquid Bulk	RoRo/Cargo
BE	3360	158186	2734	5557	1819
DE	3574	4987	7805	8879	236
DK	839	9087	539	5550	36
ES	2477	8946	6384	5692	251
FI	3014	9282	4197	6227	199
FR	3559	23472	17350	23802	305
GB	4834	22841	3700	5575	391
GR	1972	2739	2775	2713	374
IE	1398	10536	1320	5868	560
IT	2774	27491	17722	8724	392
NL	4134	44991	110715	15219	279
PT	1857	26394	7789	9693	57
SE	2269	8430	47360	9912	201

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

El número total de buques fue alternativamente dividido en buques con motores lentos y semirrápidos usando la tabla siguiente.

Tabla 55. Participación de los buques con motores lentos y semirrápidos, basado en el número de buques que hagan escala en cada estado miembro para el año 2.000.

Country	Engine type	Container	Dry Bulk	General cargo	Liquid Bulk	RoRo/Cargo
BE	Medium Speed	0,07		0,01	0,29	
BE	Slow Speed	0,93	1,00	0,99	0,71	1,00
DE	Medium Speed	0,04	0,59	0,15	0,40	0,35
DE	Slow Speed	0,96	0,41	0,85	0,60	0,65
DK	Medium Speed	0,02	0,54	0,77	0,49	0,56
DK	Slow Speed	0,98	0,46	0,23	0,51	0,44
ES	Medium Speed	0,15	0,21	0,13	0,13	0,21
ES	Slow Speed	0,85	0,79	0,87	0,87	0,79
FI	Medium Speed		0,29		0,09	0,08
FI	Slow Speed	1,00	0,71	1,00	0,91	0,92
FR	Medium Speed	0,02	0,37	0,15	0,14	0,08
FR	Slow Speed	0,98	0,63	0,85	0,86	0,92
GB	Medium Speed		0,28	0,04	0,31	0,12
GB	Slow Speed	1,00	0,72	0,96	0,69	0,88
GR	Medium Speed	0,03	0,69	0,38	0,80	0,54
GR	Slow Speed	0,97	0,31	0,62	0,20	0,46
IE	Medium Speed	0,00	0,29	0,03	0,33	0,08
IE	Slow Speed	1,00	0,71	0,97	0,67	0,92
IT	Medium Speed	0,04	0,33	0,18	0,29	0,25
IT	Slow Speed	0,96	0,67	0,82	0,71	0,75
NL	Medium Speed		0,03	0,02	0,20	0,27
NL	Slow Speed	1,00	0,97	0,98	0,80	0,73
PT	Medium Speed	0,00	0,07	0,11	0,06	0,25
PT	Slow Speed	1,00	0,93	0,89	0,94	0,75
SE	Medium Speed	0,01	0,32	0,14	0,26	0,18
SE	Slow Speed	0,99	0,68	0,86	0,74	0,82

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

Un procedimiento similar fue aplicado a los buques de pasajeros.

En la Tabla 56 se muestra, a continuación, la distancia recorrida por tipo de buque y país en el año 2.000.

Tabla 56. Distancia recorrida por tipo de buque y país en el año 2.000 (en millas náuticas).

Country	Container	Dry bulk	General Cargo	Liquid bulk	RoRo/Cargo
BE	4323	3916	4267	1860	381
DE	4720	3029	2245	1165	438
DK	185	2060	540	923	16
ES	104	2621	1153	1358	92
FI	7	1430	1623	1209	14
FR	3137	3919	1377	1685	109
GB	3738	3568	2042	1228	76
GR	75	1189	1332	621	15
IE	22	3072	1307	852	169
IT	1889	2898	1816	1320	285
NL	4841	5027	2785	2427	571
PT	641	3201	2004	1638	1486
SE	874	1746	1120	875	55

Fuente: Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport. Transport and Environment Database System (TRENDS). 2002

### Conclusiones de este estudio

La base de datos marítimos TRENDS, puede suministrar resultados sobre emisiones contaminantes atmosféricas para un tipo de buques o para el total del tráfico marítimo, por puerto, país o área costera marítima. Debido al hecho de que en los datos suministrados por el EUROSTAT, la conexión entre los buques y la carga no esta clara, fueron observadas discrepancias en los resultados relativos a varios tipos de buques, especialmente para los buques tipo RoRo.

Fue uno de los objetivos de este proyecto encontrar una forma de representar los resultados espacialmente. La base de datos GISCO contiene una extensa lista de puertos, pequeños y grandes tanto de aguas costeras como interiores. El número de puertos de puertos a los que las emisiones podían ser atribuidas era significativamente más pequeño debido a:

Los puertos de aguas interiores no han sido considerados.

EUROSTAT no tiene datos de todos los puertos (países como Italia y algunos puertos pequeños, no envían sus datos o no lo hacen a tiempo).

La tabla de distancias puerto-MCA no esta completa para algunos puertos.

En la base de datos GISCO no todos los puertos tienen el Locote, que es la única conexión con los resultados de las emisiones.

**Inventario de las emisiones marítimas comerciales:**

Este estudio fue preparado por James J. Corbett, Jr., P.E., Paul S. Fischbeck, Ph.D. Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University (Pittsburgh) en 1998.

Las fuentes de información empleadas para este estudio son:

LMIS, Lloyd's Maritime Information Services 1996 y Lloyd's Register Engineering Services que proporcionan las características de los buques del registro de flota de 1996 mayores de 100 GT, incluyendo el tipo de propulsión, potencia al freno y datos de los motores.

United States Army Corps of Engineers (USACE), 1995 [U.S. Waterway Data, Bureau of transportation Statistics, U.S. Department of transportation, Oak Ridge, Tennessee]. Incluye datos del año 1993 describiendo el transporte y comercio marítimo; registro de la red de derrotas de navegación y movimientos de carga y buques dentro y alrededor de U.S. para su uso en el metodo B.

1993 National Waterway Network (NWN), base de datos geográficos. Incluye información física y situación de cada derrota .

ISO, Reciprocating Internal Combustion Engines - Exhaust Emission Measurement - Part 4: Test Cycles for Different Engine Applications, 1996. Se obtienen datos sobre los ciclos de actividad marítima permitiendo ajustarlos para el tiempo estimado en servicio y tiempo en navegación por año.

Abrams, A. Ship cargo Capacity Tightens in 2nd Quarter (Journal of Commerce, 1997), este estudio trata las capacidades de carga de los buques en rutas oceánicas, aguas interiores (fluviales) y grandes lagos.

Wilde Mathews, A., Cargo from Asia Overwhelms Transport, in Wall Street Journal 1998a. Estadísticas sobre factores de capacidad de carga en las rutas interiores.

Wilde Mathews, A. Jet-age Anomalies, Slowpoke Barges Do Brisk Business, in Wall Street Journal 1998b. Capacidades de carga de las gabarras dedicadas al transporte.

En el ámbito geográfico, el estudio incluye todos los buques (tráfico doméstico e internacional) que operan en aguas de los U.S., esto incluye aproximadamente 200 millas de la costa, aguas interiores y en los Grandes Lagos.

Este informe sólo considera las máquinas principales de propulsión y no las auxiliares. El estudio se limita a buques mayores de 100 GRT. Base de datos [LMIS, 1996]. Solamente se consideran en el estudio las categorías 2 y 3 de motores marinos (Ver tabla 55).

Tabla 57. EPA Categories for Compression ignition (CI) Marine Engines

EPA Category	Propulsion Engine Displacement per Cylinder (liters)
1	Less than 5
2	Equal to 5, less than 20
3	Equal to or greater than 20

EPA Category	Cylinder Displacement (liters)	Engines
2	5 < 2 < 20	Medium - Speed
3A	20 < 3A < 60	50 % Medium-Speed 50 % Slow-Speed
3B	3B > 60	Slow-Speed

Fuente: Commercial Marine Emissions Inventory for EPA Category 2 and 3 Compression Ignition Marine Engines in United States Continental and Inland Waterways. 1998

Este estudio principalmente, se basa en dos métodos:

- Método A: basado en operaciones generales de los buques (Flota de bandera U.S., excluye las operaciones fuera de aguas U.S.). Permite obtener las emisiones debidas a los buques de bandera US con las limitaciones antes expuestas en alcance del estudio.

Tabla 58. Número Estimado de buques de bandera U.S. por tipo y categoría E.P.A.

Servicio Buque	Categoría				Total
	1	2	3	No Diesel	
Portacontenedor	-	1	49	37	87
Pesca	2498	241	40	-	2778
Pasaje	8	-	6	27	41
Ro-Roa	6	21	39	32	97
Transporte	6	17	49	347	419
Remolcador	244	975	42	7	1269
De Servicio	420	171	12	47	650
<b>Total</b>	<b>3182</b>	<b>1426</b>	<b>236</b>	<b>498</b>	<b>5341</b>

aRo-Ro: incluye buques que llevan vehículos y otros (No contenerizado)

Fuente: Commercial Marine Emissions Inventory for EPA Category 2 and 3 Compression Ignition Marine Engines in United States Continental and Inland Waterways. 1998

El resumen del consumo de fuel de la flota de bandera U.S. en toneladas de fuel por día (tpd) está representado en tabla 57. Estas estimaciones no son razonables cuando se comparan con el consumo de fuel de otras fuentes [Evans and Marlow, 1990; Ewart, 1982].

Las máquinas de categoría 3 son subdivididas por el volumen del cilindro.

- Subcategoría 3A: máquinas con capacidades de cilindro mayores de 20 litros y menos de 60

- Subcategoría 3B: máquinas con capacidades de cilindro mayores de 60 litros

Tabla 59. Consumo de fuel estimado para motores de ignición por compresión en la flota U.S. (tpd)

Servicio Buque	Categoría		
	5 l. < 2 < 20 l.	20 l. < 3A < 60 l.	3B > 60 l.
Portacontenedor	5	-	56
Pesca	5	13	10
Pasaje	-	10	20
Ro-Roa	6	48	40
Transporte	6	31	29
Remolcador	5	24	31
De Servicio	4	20	12

Fuente: Commercial Marine Emissions Inventory for EPA Category 2 and 3 Compression Ignition Marine Engines in United States Continental and Inland Waterways. 1998

Los motores de la categoría 2 se suponen motores semirápidos.

- Las motores más grandes en la categoría 3 (3B) se suponen motores lentos de dos tiempos, además se ha supuesto que los motores de categoría 3A se dividen en un 50 % de motores lentos y el otro 50 % de motores semirápidos.
- El método A incluye buques de bandera U.S. que operan en cualquier sitio del mundo.
  - Método B: Considera las emisiones emitidas por buques de bandera no US operando en las aguas US.(200 millas desde la costa y aguas interiores y los Grandes Lagos). Se basa en perfiles de transporte de carga y comercio. Buques extranjeros operando en aguas U.S. con información de carga extranjera transportada en buques extranjeros dentro de los puertos U.S. No incluye buques de pesca, pasaje, remolcadores y de servicio.

Según las bases de datos disponibles, se consideran aproximadamente 5000 derrotas marítimas clasificadas por regiones geográficas, para poder calcular los movimientos de la carga.

Los movimientos de carga en toneladas-millas para cada región se calcula sumando el

$$C_G = \sum_{i=1}^{5,000} L_{Gi} * T_{Gi}$$

producto del número de toneladas transportadas a través de cada derrota en una región por la distancia de esa derrota, como se muestra debajo: [43]

Donde:

“C”, Movimiento de carga en toneladas milla

“G”, Región Geográfica (Océano, Aguas Interiores, Grandes Lagos)

“L”, Distancia en millas de la derrota “i”

“T”, Tonelaje (toneladas totales transportadas en 1993) de link “i”

“i” , Cada derrota de los datos de NWN y WCSC para una región geográfica dada

Tabla 60. Resumen de Movimientos de Carga en 1993 por Major Waterway

Región	Distancia (millas) <sup>a</sup>	10 <sup>6</sup> Tons movidas <sup>b</sup>	10 <sup>9</sup> Ton-milla
Océano	116.411	15.968,6	764,9
Grandes Lagos	8.382	7.662,2	85,3
Ríos Interiores	43.566	33.055,5	494,4
Sin asignar	120	91,9	2,3
<b>Total</b>	<b>168.478</b>	<b>56.778,2</b>	<b>1.346,9</b>

Datos NWN [USACE, 1995]

Datos WCSC [USACE, 1995] El tonelaje movido no es el mismo que las toneladas recibidas o enviadas por un puerto determinado; las mismas toneladas pueden ser movidas por varias derrotas, y pueden ser contadas en toneladas-millas más de una vez.

Fuente: Commercial Marine Emissions Inventory for EPA Category 2 and 3 Compression Ignition Marine Engines in United States Continental and Inland Waterways. 1998

Para estimar las emisiones por tonelada-milla de los buques mercantes, se usaron las emisiones diarias estimadas por buque del método A, y se utilizaron los datos de Tonelaje de Peso Muerto (DWT) y velocidad media del registro Lloyds.

El DWT aportado por el Lloyds fue multiplicado por 80% para obtener una estimación de las toneladas de máxima carga que podía llevar cada buque; el peso muerto medio para buques de carga de la flota mundial es 34.387 DWT; el DWT medio para buques de carga de la flota U.S. es 15.454 DWT.

Sin embargo, los buques no operan completamente cargados. Muchos barcos, particularmente los tanques, pueden llevar carga en una dirección y volver de vacío (en lastre). Otros barcos llevan carga en ambas direcciones, pero rara vez su van cargados al máximo de su capacidad. La mayoría de los buques van cargados entre el 50 % y el 65 % de su capacidad, cuando la carga media excede al 70 % de la capacidad esto puede indicar que pocos barcos están disponibles para la citada ruta [Abrams, 1997]. Este análisis aplica un factor de capacidad de carga del 50 % para buques que operan en rutas oceánicas, y un 60 % para ríos y grandes lagos. Esto coincide con el informe Wilde Mathews, 1998a.

El factor de capacidad de carga es más grande en los ríos porque se entiende que los buques son más pequeños, con menos calado y las capacidades totales más pequeñas por barco. Este hecho, combinado con el tonelaje tan grande movido por los ríos, implica que estos barcos son cargados capacidades más grandes que los de transporte de cabotaje y oceánico. Por otra parte, las barcazas (gabarras) pueden ser añadidas o quitadas de un grupo de hasta 35 gabarras [Wilde Mathews, 1998b], y por lo tanto las gabarras remolcador/ empujador pueden también transportar capacidades medias grandes.

Los datos de velocidad proporcionados por el Lloyd's representan la velocidad de diseño del buque, y los datos de BHP (Brake Horsepower). Por lo tanto, los factores de carga del ciclo útil / actividad (duty cycle) eran aplicados a la velocidad siguiendo el mismo camino que para BHP. Para ser consecuente con los ajustes hechos para la carga máxima BHP que es el 80 % de la rated BHP, la velocidad máxima era ajustada empleando la relación entre la potencia y el cubo de la velocidad. Esto determina que la velocidad máxima es el 93 % de la velocidad de diseño del buque.

Tabla 61. Velocidad media (nudos) Buques de carga de la flota U.S. (Ajustada al ciclo de actividad)

Servicio Buque	Categoría				Weighted Average
	1	2	3A	3B	
Container	-	5	-	10	10
Ro-Ro	6	8	10	10	9
Transporte	5	7	8	8	7
Weighted Average	5	7	9	9	9

Fuente: Commercial Marine Emissions Inventory for EPA Category 2 and 3 Compression Ignition Marine Engines in United States Continental and Inland Waterways. 1998

Tabla 62. Velocidad media (nudos) Flota Mundial de Buques Mercantes (Ajustada al ciclo de actividad)

Vessel Service	Category				Weighted Average
	1	2	3A	3B	
Container	-	6	13	16	16
Ro-Ro	6	8	14	14	12
Transporte	5	6	12	12	11
Weighted Average	5	6	12	12	11

Fuente: Commercial Marine Emissions Inventory for EPA Category 2 and 3 Compression Ignition Marine Engines in United States Continental and Inland Waterways. 1998

Para distinguir entre comercio doméstico e internacional se han usado los datos de los puertos de la base de datos WCSC. De esta base de datos se obtuvieron las toneladas de carga recibida o enviada de los 179 puertos registrados, o más bien las toneladas movidas a través de las derrotas fijadas.

En 1993, el 49% de la carga recibida en puertos de mar de las regiones U.S. (Atlántico, Pacífico y Costas del Golfo) era doméstica. En los grandes lagos, el 80 % del comercio era doméstico; el 70% del comercio enviado a través de los ríos era doméstico.

Para estimar el número de buques U.S. dedicados al comercio extranjero, este análisis usa los datos “U.S. Census Bureau” indicando el número de entradas en puerto para el comercio internacional. Unos 90.000 barcos entraron en toda la nación. Aproximadamente el 15% de estos barcos eran registrados como buques de bandera U.S.; este factor era aplicado para distinguir entre el comercio internacional dentro del comercio internacional transportado por buques U.S. y el comercio internacional transportado por buques extranjeros. (Partiendo de que el 15% de los barcos haciendo entradas en puerto con carga internacional eran buques de bandera U.S, esto supone que el 68% de los buques de carga registrados en la flota de U.S transportan carga internacional)

### Estudio específico de las emisiones en el mar mediterráneo.

Este estudio fue realizado por el Lloyd's Register of Shipping por encargo de la Unión Europea (Dirección General para el medioambiente, seguridad nuclear y protección civil).

El estudio consiste en la cuantificación de las emisiones debidas a las exhaustaciones de buques en el Mar Mediterráneo y en el Mar Negro.

La información del estudio comprende dos periodos de dos semanas cada uno, del 1 al 14 de Febrero y del 1 al 14 de Agosto del año 1990. Los datos empleados quedan comprendidos entre 1985 y 1997.

Los movimientos de los buques se obtuvieron del Lloyd's Maritime Information Services (LMIS) and Register of ships los dos periodos citados del año 1990.

La información de las características de los buques se obtuvo del Lloyd's Register of Shipping, London, 1990, International Maritime Organization, Ship' Routeing, 5<sup>th</sup> Edition, International Maritime Organization, London, 1987

International Maritime Organization, *The International Convention for the Prevention of Pollution from ships, MARPOL 73/78*, Consolidated Edition, International Maritime Organization, 1997, proporciona la definición del área del estudio.

El ámbito geográfico de estudio son los buques operando dentro de los mares Mediterráneo y Negro. El área del estudio queda por tanto, definido como "El Mar Mediterráneo propio incluyendo los golfos y los mares en él, limitado al oeste por el estrecho de Gibraltar en el meridiano 5° 36' W y el Mar Negro. Esta área comprende aproximadamente 2.966.000 km<sup>2</sup>, como muestra la figura 19 .

Los Buques incluidos son los buques de más de 250 GT viajando por el área del estudio durante las 4 semanas citadas. Se incluyeron un total de 7.050 buques y 212 ferrys diferentes.

Los movimientos de buques durante los periodos seleccionados ascendían a un total de 34.055. Además, los movimientos de los ferrys eran 16.376 deducidos de los horarios de los operadores o internacionales.

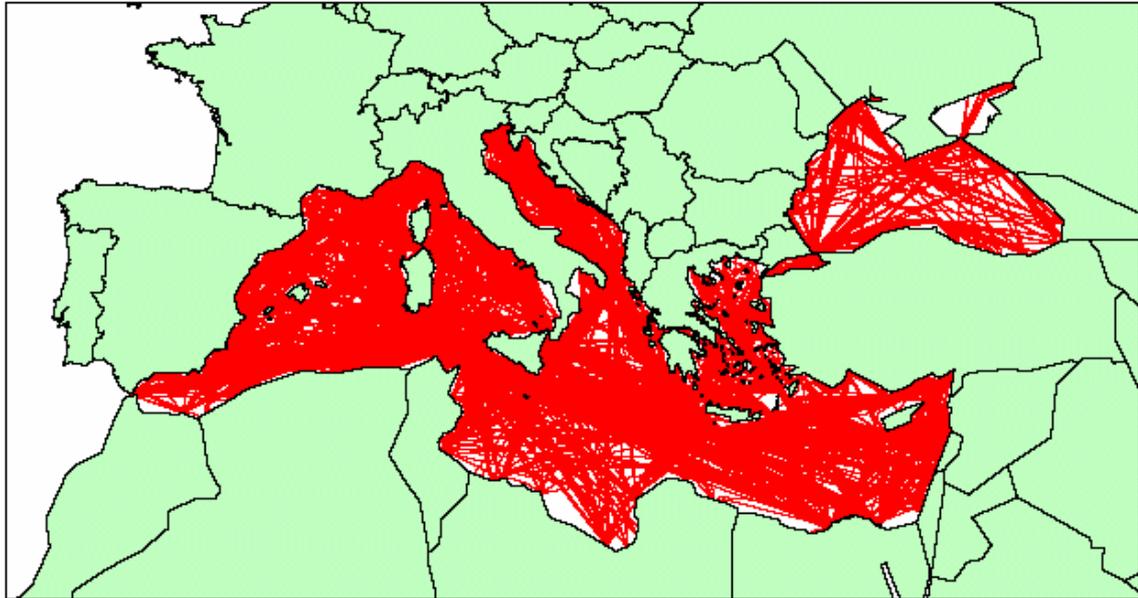
Se excluyen del estudio los barcos de pesca y las embarcaciones menores por no estar recogidas en la base de datos del LMIS.

Se incluyeron sólo los buques en tránsito, que llegaban o salían de un muelle. No se tuvieron en cuenta la estancia en puerto, ni el fondeo a la espera de atraque ni la espera de órdenes.

Se supusieron que las máquinas principales de todos los buques operaban al 85% MCR para todo el tiempo que se encontraban navegando.

Además se supuso que la energía auxiliar era proporcionada por motores diesel semirrápidos para todos los buques.

Figura 19. Mapa del área del estudio mostrando las rutas marítimas.



Fuente: Marine Exhaust Emissions Quantification Study-Mediterranean Sea. 1.999.

Tabla 63. Categorías de los buques por tipo de máquina

Engine Type	Nº of Vessels	%	Total Power (kW)	%
Medium Speed	3.675	50,6	11.809.136	26,2
Slow Speed	3.434	47,3	29.686.729	65,8
Steam	153	2,1	3.585.525	8,0
<b>Total</b>	<b>7.262</b>	<b>100</b>	<b>45.081.390</b>	<b>100</b>

Fuente: Marine Exhaust Emissions Quantification Study-Mediterranean Sea. 1.999.

Tabla 64. Velocidades medias (nudos) y Potencias de motores auxiliares (kW) por tipo de buque y tamaño.

Ship Type	Average GRT						Speed Factor (knots)
	< 500	500-999	1000 - 4999	5000 - 9999	10000 - 49999	> 50000	
Liquefied Gas Tanker	75	100	125	300	400	1000	16
Chemical Tanker	40	50	165	300	435	-	15
Other tanker	40	50	165	300	435	530	14
Bulk Dry Cargo	20	40	175	300	380	500	14
General Cargo	20	40	175	300	380	-	14
Passenger/ General Cargo	20	40	175	300	380	-	18
Container	40	60	160	500	1400	1400	20
Refrigerated Cargo	40	140	180	455	580	-	20
Ro-Ro Cargo	100	150	350	1000	2500	4000	18
Passenger / Ro-Ro Cargo	100	150	350	1000	2500	4000	20
Passenger	100	150	350	1000	2500	4000	20
Other Dry Cargo	20	40	175	300	380	500	15
Fish Catching	-	80	200	-	-	-	11
Other Fishing	40	105	180	550	550	-	15
Offshore	40	60	150	350	450	-	14
Research	40	60	150	400	400	-	14
Tug	40	60	150	-	-	-	11
Dredger	40	50	60	130	770	-	9
Cable	80	-	200	300	400	-	7
All other ship types	20	40	175	300	380	500	-

Fuente: Marine Exhaust Emissions Quantification Study-Mediterranean Sea. 1.999.

Se tomaron las siguientes consideraciones:

- Los motores principales operan al 85 % de su potencia máxima continua (MCR) mientras están en régimen de crucero.
- Se consideraron unas velocidades medias según tipo de buque (Tabla 64) a fin de calcular el tiempo de viaje.
- Los motores auxiliares son motores de tipo semirapido. Se consideró una potencia del 100% del MCR.
- No se consideraron las emisiones en puerto salvo las producidas durante las maniobras de entrada y salida.

- No se consideraron las emisiones producidas por los buques pesqueros y militares.

### Análisis de las emisiones de los buques comerciales marinos.

El estudio, Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000, fue encargado por la “Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency (EPA)”.

El estudio se basa en la metodología denominada AP-42, que consiste en el cálculo por tipo de buque y tamaño de las emisiones en tres etapas:

- Primera: La adjudicación del tiempo pasado en la zona de puerto en diferentes modos de operación
- Segunda: El cálculo de consumo de combustible en cada modo de operación
- Tercera: Cálculo de las emisiones en función del consumo de combustible y los factores de emisión

El estudio fue realizado por la British Columbia Ferry Corporation, por el Lloyd’s, por el U.S. Coast Guard y por Environment Canada.

### Las fuentes de información del documento

El estudio se basa en 9 informes de la European Environment Agency (EEA)

- *Marine Exhaust Emissions Research Programme*. Lloyd’s Register of Shipping, London, United Kingdom [1990, 1991, 1995]. Proporciona los datos relevantes de los distintos tipos de buques utilizados para el estudio, es decir, las características técnicas. Se contaba con información de 48 máquinas instaladas en 39 buques.
- *Port of Vancouver Marine Vessel Emissions Test Project*, Final Report, ERMD #97-04, Environment Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 1997. Aporta datos sobre las actividades marítimas dentro de regiones/puertos de Canadá. El informe describe cuatro modos de operación en términos generales y no posee información del factor de carga de la máquina durante esas condiciones. Además no todas las máquinas eran examinadas en todos los modos.
- *Shipboard Marine Engines Emission Testing for the United States Coast Guard*, Delivery Order Number 31, Final Report, prepared by Environmental Transportation Consultants for the Volpe National Transportation Systems Center and the United States Coast Guard Headquarters Naval Engineering Division, undated (emissions testing conducted in 1995). Proporciona datos de distintos tipos de máquinas operando en diferentes condiciones de carga para un número de buques determinado de la flota de USCG.
- *Analysis of Marine Emissions in the South Coast Air Basin*, Draft Report, EPA Contract Number 68-C6-0068, Work Assignment Number 0-02, prepared by Acurex Environmental Corporation for the U.S. Environmental Protection Agency, 1999. Proporciona una detallada clasificación de buques por tipo, así como, datos detallados de la actividad por tipo obtenida de informe Acurex 1996: “*Marine Vessel Emission Inventory and Control Strategies*”.

El estudio considera los buques mercantes y de puerto operando en el área portuaria y tomó un total de 4100 buques oceánicos de los cuales se disponían de los datos suficientes para realizar los cálculos.

En la tabla 65 se definen las categorías de las capacidades de los motores de los buques y en la tabla 66 aparecen resumidos los datos recogidos de las distintas fuentes de información.

Tabla 65. Categorías EPA para las máquinas basadas en el la capacidad de los cilindros.

EPA Category	Engine Type	Propulsion Engine Displacement per Cylinder (liters)
1	High speed	Less than 5
2	Medium Speed	Equal to 5, less than 20
3	Slow Speed	Equal to or greater than 20

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Tabla 66. Resumen de la información de emisiones utilizada.

Reference	BC Ferries	Environment Canada	Lloyd's Register	Coast Guard
Vessels	8	13	40	6
Engines				
Slow speed	0	9	11	0
Medium speed	6	1	36	8
High speed	3(?)	1	0	4
Auxiliary	3	5	2	0
Test cycle	Normal cruise Docking Full Power for Auxiliary	Maneuvering Low Speed Normal Cruise Hoteling for Auxiliary engines	100 % load 75 % load 50 % load 25 % load Idle	100 % load 75 % load 50 % load 25 % load Idle
Data Reported	All except THC in kg/ton of fuel	All in kg/ton of fuel	All except PM, as raw data	All in mass per kw-hr and per ton of fuel
Potential Problems	Test points undefined and varies by engine	Test points undefined. All engines not tested at all loads	Measured output at 100% load unrelated to rated power	Measured and rated power do not match for some engines

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

La ecuación y el análisis gráfico del consumo específico de combustible en función del porcentaje de carga de la propulsión se muestran a continuación

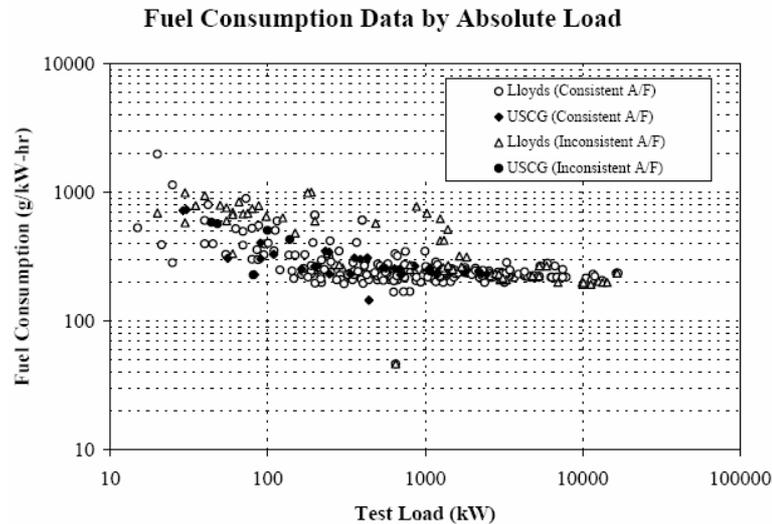
Las figuras 20 y 21 muestran el consumo específico de combustible en función de la carga del motor y del % de potencia usado respectivamente. La distribución estadística del consumo específico de combustible en función del % de potencia del motor usado presenta una buena correlación. El análisis de regresión indica que el consumo específico de combustible está inversamente relacionado a la carga parcial de la máquina como sigue:

$$\text{Fuel Consumption (g/kW-hr)} = 14.1205 (1/\text{Fractional Load}) + 205.7169$$

(t = 22.75) (t = 32.88)

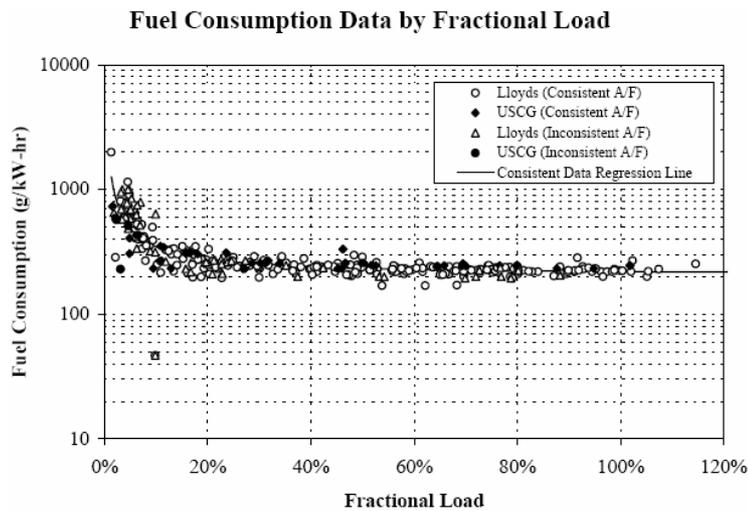
[r<sup>2</sup> = 0.64, F = 518, Observations = 291]

Figura 20. Consumo específico de combustible por carga completa.



Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Figura 21. Consumo específico de combustible por carga fraccionada.



Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

### Análisis del Informe Acurex

Este informe aporta un esquema de clasificación por peso muerto y tipo de buque. El análisis se basa en los datos del Lloyd’s, de los buques que visitan la bahía de San Pedro. El Acurex clasifica los buques por tipo y “categoría de diseño” donde:

$$\text{Design Category} = (\text{DWT})^{0.667} * (\text{Service Speed})^3 / 10^4$$

El Acurex desarrolla 8 categorías por tipo de buque: de transporte de coches, graneleros, contenedores, de carga general, de pasajeros, frigoríficos, Ro-Ro, y buques tanques. Estas ocho categorías se subdividen por categoría de diseño en 200.

El informe Arcadis usa los mismos tipos de buques pero también proporciona velocidades por tipo de buque.

Tabla 67. Categorías de diseño.

Ship Type	Cruise Speed
Bulk carriers/Tankers/General Cargo	15 - 16 knots
Reefer/Ro-Ro/Container	20 - 22 knots
Auto carriers (average speed)	18.3 knots
Passenger liner (average speed)	19.9 knots
Many Passenger liners	> 30 knots

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Esto sugiere que los bulk carriers y los buques tanque tienen una relación parecida entre peso muerto y potencia, mientras que los reefer, portacontenedores y RoRo pueden también tenerla.

La clasificación de Booz-Allen para buques de servicio (no oceánicos): buques de pesca; remolcadores; ferry de pasaje; dragas; y botes de trabajo / tripulación. Esta clasificación es utilizada también por el Acurex pero después todos estos buques excepto los de pesca y remolcadores son introducidos dentro de la categoría llamada "otros".

#### Clasificación de los modos de operación

Los buques navegan a velocidad de crucero, pero cuando se aproximan a pocas millas del puerto reducen velocidad (zona llamada Precautionary Area) situándose en unos 10 - 12 nudos. Al entrar el área de puerto (aproximadamente a 1 milla) el buque reduce a unos 5 nudos. Una vez en el puerto sólo los auxiliares proporcionan la potencia eléctrica, en un modo llamado "hoteling" (Atracado).

Potencias del motor propulsor en cada modo se dan en la tabla 68.

Tabla 68. Potencias del motor por modo de operación.

Operating Mode	Rated Power (main engines)
Full	80
Half	40
Slow	10
Moored	0
Auxiliary power engines 500 kW	

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Para buques de puerto las potencias serían en tres modos del 80%, 50% y 20 %.

El informe Acurex recomienda usar las siguientes cargas de energía auxiliar independientemente del tipo de buque (excepto para buques de pasaje) o peso:

Tabla 69. Carga de energía por modo de operación.

Modes	Power
Slow / Fast cruise	750 kW
Manoeuvring	1250 kW
Hoteling	1000 kW
Passenger ships only 5000 kW	

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

La EEA fija dos análisis de regresiones que unen potencia a las características del buque. La primera es entre potencia y peso muerto por tipo de buque para cada uno de los 8 tipos. El segundo tiene la potencia como variable independiente y usa  $(DWT)^{0.667}$  y  $(velocidad)^3$  como variables independientes.

Tabla 70. Carga de la máquina por tipo de buque para cada modo de operación.

Ship Type	Cruise	Slow Cruise	Maneuvering
Auto Carrier	80	20	15
Bulk Carrier	80	40	20
Container	80	10	10
General Cargo	80	35	20
Passenger	80	20	15
Reefer	80	20	15
RoRo	80	15	10
Tanker	80	40	20

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

La tabla 71 muestra las regresiones para los 8 tipos y a través de todos los tipos de buques usando  $(DWT)$  como la variable independiente. La regresión tiene un coeficiente muy bajo cuando todos los tipos de buques son combinados, pero tiene valores mucho más aceptables cuando cada tipo de buque es considerado por separado. Muchas de las regresiones por tipo de buque tienen valores de  $r^2$  en exceso de 0.55.

Tabla 71. Resultados de regresiones entre Potencia y Tonelaje de Peso Muerto

SHIP TYPE	INTERCEPT	DWT COEFF	R-SQUARE
ALL (N= 4103 )	9070 (42.05 )	0.1097 (26.01)	0.14
AUTO CARRIER (N= 157 )	7602 (7.33)	0.4172 (5.75)	0.176
BULK CARRIER (N= 1644)	6726 (54.54)	0.0985 (26.01)	0.55
CONTAINER (N=489)	-749.4 (-0.61)	0.800 (26.29)	0.59
GENERAL CARGO (N=641)	3046 (15.67)	0.288 (28.43)	0.56
PASSENGER (N= 40)	-4877 (-1.24)	6.81 (9.97)	0.72
REEFER (N=160)	1364 (2.23)	1.007 (14.93)	0.58
RORO (N= 110)	4358 (6.70)	0.5364 (18.34)	0.76
TANKER (N=861)	6579 (34.61)	0.1083 (41.16)	0.66

T-statistics in parentheses under coefficients.

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

La tabla 72 muestra las regresiones para los mismos tipos de buques cuando  $(DWT)^{0.667}$  y  $(velocidad)^3$  son variables independientes. Estas regresiones son más claras que las que sólo usan el DWT, pero las mejoras no son muy grandes, excepto para el caso en que todos los tipos de buques son considerados como un grupo.

Los coeficientes de regresión para graneleros y buques tanque son muy parecidas, y como su velocidad también es bastante similar, se combinan ambas categorías. La tabla 70 también muestra que el valor del coeficiente DWT para transportes de coches, RoRo, portacontenedores y frigoríficos es parecida (entre 15 y 20) por lo que se combinan también. Los diagramas de potencia frente a DWT para estos tipos de buques muestran que los Ro-Ro, frigoríficos y transporte de coches están distribuidos en un rango de 5000 a 20000 toneladas de DWT mientras que la mayoría de los portacontenedores están entre 20000 y 70000 de DWT. Debido al ratio, relativamente alto, entre potencia y peso muerto, comparado con los buques de carga general y buques tanque, y debido al hecho de que el tamaño de muestra de este tipo de buques era sólo de unos 100 a 160, fueron unidos con los portacontenedores. Los coeficientes de regresión para las categorías se muestran en la tabla 71.

Tabla 72. Regresiones de Potencia frente a Peso Muerto y Velocidad de crucero

SHIP TYPE	INTERCEPT	DWT COEFF	SPEED COEFF	R-SQUARED
ALL (N= 4103)	-4585 (23.18)	6.711 (51.95)	2.662 (92.66)	0.73
AUTOCARRIER (N=157)	2956 (1.947)	14.41 (5.788)	0.381 (3.38)	0.25
BULK CARRIER (N=1644)	1586 (6.514)	5.901 (48.55)	0.791 (13.11)	0.61
CONTAINER (N=489)	-13924 (-10.36)	20.06 (12.60)	2.342 (16.63)	0.73
GENERAL CARGO (N=839)	-1307 (-7.73)	8.819 (34.94)	1.202 (34.84)	0.80
PASSENGER (N= 40)	-25305 (-4.43)	118.45 (5.228)	2,612 (3.498)	0.73
REEFER (N= 160)	-2357 (-3.68)	17.00 (8.749)	0.861 (10.98)	0.77
RORO (N= 110)	-3664 (-5.02)	16.18 (15.68)	1.386 (9.040)	0.88
TANKER (N= 861)	156.6 (0.544)	6.271 (49.32)	1.291 (16.40)	0.78

T-statistics in parentheses. Equation uses (DWT)0.667 and (SPEED)3 as independent variables.

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Tabla 73. Tipos de buques recomendados y regresiones de Potencia a Peso Muerto.

SHIP TYPE	INTERCEPT	DWT COEFF.	R-SQUARE
BULK CARRIERS +TANKERS (N=2505)	9070 (48.52)	0.101 (49.55)	0.67
PASSENGER (N= 40)	-4877 (-1.24)	6.81 (9.97)	0.72
GENERAL CARGO (N= 641)	3046 (15.67)	0.288 (28.43)	0.56
CONTAINER/RORO AUTO CARRIER/REEFER (N= 917)	2581 (5.50)	0.719 (47.27)	0.71

T-statistics in parentheses under coefficients.

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

El porcentaje de Carga del Motor Principal y Potencia de Auxiliares según el modo de operación se representan en la tabla 74.

Tabla 74. Potencias recomendadas por Modo de Operación

Vessel Type	Cruise	Slow Cruise	Maneuvering
Bulk Carrier & Tankers	80	40	20
General Cargo	80	35	20
Passenger	80	20	10
Container/RoRo/Reefer/Auto Carrier	80	30	15
<b>Auxiliary Loads in kW</b>			
Ship Type	Fast/Slow Cruise	Maneuvering	Hoteling
Passenger ships	5000	5000	5000
All Others	750	1250	1000

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Las fórmulas de relación entre potencia de propulsión y DWT por tipo de buque se muestran a continuación.

Los buques oceánicos eran clasificados en 4 tipos y su potencia era relacionada al peso muerto (DWT) usando regresiones lineales. Los resultados dan lugar a la tabla 4.5 y las ecuaciones resultantes son las siguientes:

- Graneleros y buques Tanque:
  - $HP = 9070 + 0.101 (DWT)$  [44]
- Buques de Carga General:
  - $HP = 3046 + 0.288 (DWT)$  [45]
- Buques Portacontenedores/RoRo/transporte de coches /Frigoríficos:
  - $HP = 2581 + 0.719 (DWT)$  [46]
- Buques de Pasaje:
  - $HP = -4877 + 6.81 (DWT)$  [47]

La relación de la categoría de buques de pasaje es la más incierta ya que la muestra de buques en esta categoría era muy pequeña (40).

El porcentaje de carga y potencia de AE por tipo de buque y modo de operación se muestra en la tabla 72.

Tabla 75. Porcentaje de carga y potencia de AE (%)

Vessel Type	Cruise	Slow Cruise	Maneuving
Bulk Carrier & Tankers	80	40	20
General Cargo	80	35	20
Passenger	80	20	10
Container/RoRo/Reefer/Auto Carrier	80	30	15
All non-ocean going	80	40	20
Suggested Auxiliary Loads in kW (ocean-going vessels only)*			
Ship Type	Fast/Slow Cruise	Maneuving	Hoteling
Passenger ships	5000	5000	5000
All Others	750	1250	1000

\*Non-ocean going vessels do not have separate auxiliary loads of significance

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

A continuación se muestran la clasificación de los buques con la información de su peso muerto, por tipo de motor, etc, de las 8 categorías de buques analizadas en este estudio.

Tabla 76a. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.

Ship Type	Engines	Design categories	Corresponding DWTCategories	Avg. LMIS bhp for Category	BSFC gram/bhp-hr	Cruise fuel consumption for category (gal/hour)
Transporte de coches	Motor diesel	0 - 200	0 - 5800	-	-	-
		200 - 400	5800 - 16500	13552	100	328
		400 - 600	16500 - 30300	16003	100	387
		> 600*	30300 +	18000	100	435

Tablas 76b. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.

Ship Type	Engines	Design categories	Corresponding DWTCategories	Avg. bhp LMIS for Category	BSFC gram/bhp-hr	Cruise fuel consumption for category (gal/hour)
Granelero	Motor diesel	0 - 200	0 - 14100	8143	100	197
		200 - 400	14100 - 40000	10103	100	244
		400 - 600	40000 - 73600	12508	100	302
		600 - 800	73600 - 113300	15626	100	378
		800-1000	113300 -158400	23763	100	575
		> 1000	158400 +	31200	100	755
	Turbinas de vapor	600 - 800	73600 - 113300	16500	250	918
		800-1000	113300- 158400	24000	250	1335
		1000-1200	158400- 208200	27500	250	1530

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Tablas 76c. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.

Ship Type	Engines	Design categories	Corresponding DWTCategories	Avg. LMIS bhp for Category	BSFC gram/bhp-hr	Cruise fuel consumption for category (gal/hour)
Porta Contenedor	Motor diesel	0 - 200	0 - 1900	8000	100	193
		200 - 400	1900 - 5500	15044	100	364
		400 - 600	5500 - 10200	15364	100	372
		600 - 800	10200 - 15700	19234	100	465
		800-1000	15700 - 21900	25499	100	617
		1000-1200	21900 - 28800	26117	100	632
		1200-1400	28800 - 36300	30116	100	728
		1400-1600	36300 - 44400	38739	100	937
		1600-1800	44400 - 53000	42533	100	1029
		1800-2000	53000 - 62100	47651	100	1152
		2000-2200	62100 - 71600	53207	100	1287
		> 2200	71600 +	67080	100	1622
	Turbinas de vapor	600 - 800	10200-15700	32000	250	1780
		800-1000	15700-21900	31238	250	1737
		1000-1200	21900-28800	38000	250	2114
		1200-1400	28800-36300	0	250	0
		1400-1600	36300-44400	0	250	0
		1600-1800	44400-53000	69833	250	3884
		1800-2000	53000-62100	0	250	0
2000-2200	62100-71600	36000	250	2002		

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Tablas 76d. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.

Ship Type	Engines	Design categories	Corresponding DWTCategories	Avg. LMIS bhp for Category	BSFC gram/bhp-hr	Cruise fuel consumption for category (gal/hour)
Carga General	Motor diesel	0 - 200	0 - 11600	2598	100	63
		200 - 400	11600 - 32900	10179	100	24
		400 - 600	32900 - 60500	12988	100	314
		600 - 800	60500 - 93100	16870	100	408
		800 - 1000	93100 - 130200	35008	100	847
		> 1000*	130200 +	26000	100	629

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Tablas 76e. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.

Ship Type	Engines	Design categories	Corresponding DWTCategories	Avg. LMIS bhp for Category	BSFC gram/bhp-hr	Cruise fuel consumption for category (gal/hour)
Buque Pasaje	Motor diesel	0 - 100	0 - 1400	13943	100	337
		100 - 200	1400 - 4000	20544	100	497
		200 - 300	4000 - 7400	26103	100	631
		300 - 400	7400 - 11500	28859	100	698
		400 - 500*	11500 - 16000	33831	100	818
		500 - 600	16000 - 21100	-	100	-
		600 - 700	21100 - 26600	-	100	-
		700 - 800*	26600 - 32500	48747	100	1179
	Turbinas de vapor	0 - 100	0 - 1400	-	250	-
		100 - 200	1400 - 4000	-	250	-
		200 - 300	4000 - 7400	24500	250	1363
		300 - 400	7400 - 11500	30220	250	1681
		400 - 500	11500 - 16000	-	250	-
		500 - 600	16000 - 21100	44000	250	2447
		21100 +				

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Tablas 76f. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.

Ship Type	Engines	Design categories	Corresponding DWTCategories	Avg. LMIS bhp for Category	BSFC gram/bhp-hr	Cruise fuel consumption for category (gal/hour)
Frigoríficos	Motor diesel	0 - 100	0 - 1500	5134	100	124
		100 - 200	1500 - 4200	6530	100	158
		200 - 300	4200 - 7800	8989	100	217
		300 - 400	7800 - 12100	12846	100	311
		400 - 500	12100 - 16900	12385	100	300
		500 - 600	16900 - 22200	16609	100	402
		600 - 700	22200 - 28000	20797	100	503
		700 - 800	28000 - 34200	23200	100	561
		> 800*	34200 +	25500	100	617

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Tablas 76g: Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.

Ship Type	Engines	Design categories	Corresponding DWTCategories	Avg. LMIS bhp for Category	BSFC gram/bhp-hr	Cruise fuel consumption for category (gal/hour)
RoRo	Motor diesel	0 - 200	0 - 2500	-	100	
		200 - 400	2500 - 7200	16683	100	403
		400 - 600	7200 - 13300	19085	100	462
		600 - 800	13300 - 20500	27900	100	675
		800-1000	20500 - 28700	30150	100	729
		1000-1200	28700 - 37700	34987	100	846
		Turbinas de vapor	600 - 800*	13300 - 20500	32000	250
	800-1000*		20500 - 28700	31000	250	1724
	1000-1200		28700 - 37700	30000	250	1669
	> 1200		37700 +	32000	250	1780

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

Tablas 76h: Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.

Ship Type	Engines	Design categories	Corresponding DWTCategories	Avg. LMIS bhp for Category	BSFC gram/bhp-hr	Cruise fuel consumption for category (gal/hour)
Tanques	Motor diesel	0 - 200	0 - 12800	5894	100	143
		200 - 400	12800 - 36300	11840	100	286
		400 - 600	36300 - 66700	15252	100	369
		600 - 800	66700 - 102800	16251	100	393
		800-1000	102800 - 143600	19130	100	463
		1000-1200	143600 - 188800	24725	100	598
		1200-1400	188800 - 238000	22690	100	549
		> 1400*	238000 +	35000	100	846
	Turbinas de vapor	0 - 200	0 - 12800	7000	250	389
		200 - 400	12800 - 36300	12333	250	686
		400 - 600	36300 - 66700	15587	250	867
		600 - 800	66700 - 102800	20000	250	1112
		800-1000	102800 - 143600	24457	250	1360
		1000-1200	143600 - 188800	26667	250	1483
		1200-1400	188800 - 238000	28350	250	1577
		1400-1600	238000 - 290800	33600	250	1869
1600-1800	290800 +	32000	250	1780		

Notes:

Calculation of cruise fuel consumption assumes cruise at 80% MCR and assumes a fuel density of 0.95 kg/l

BSFC is estimated based fuel consumption estimates for 1983 and never ships from reference 18

Fuente: Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data 2000

### Estudio para la organización Marítima Internacional.

El estudio fue encargado por la Organización Marítima Internacional (IMO) y fue desarrollado por Norwegian Marine Technology Research Institute (MARINTEK).

La información del estudio está comprendida entre los años 1990 y 1999 y considera en su estudio los buques de 100 GTR o más.

Este estudio onbiene los dats y diferente información de:

- Information from DNV's internal databases. Det Norske Veritas (DNV), 1998
- International Energy Annual 1997, World Energy database 1999, Energy balance, OECD total 1996, 1999 and Monthly Oil Statistics-Balances 1993, 1999. Energy Information Administration (EIA)
- Marine Exhaust Emissions Research Programme. Lloyd's Register Engineering Services, London, 1995

- World Fleet Statistics, 1996. Lloyd's Register of Shipping
- Propeller Roughness, Its Nature, and Its Effect upon the Drag Coefficients of Blades and Ship Power. RINA Transactions, Grigson, C.W.B. London 1982
- Alternative fuel for Marine Application, MARINTEK by Hennie et al, 1998
- Roughness and Fuel Consumption. Connection, Computation and Examples, (in Norwegian). Næss, E, Trondheim 1985
- Speed, Power and Roughness: The Economics of Outer Bottom Maintenance, RINA Transactions. Townsin, R.L., Byrne, D., Milne, A., Svensen, T., London 1980.
- Water injection in their medium speed engines, Wärtsilä NSD by G. Hellen, 1998.
- Reciprocating Internal Combustion Engines -- Exhaust Emission Measurement -  
 - Test Cycles for Different Engine Applications, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1996.

En primer lugar y como muestra la tabla 74, el estudio da una reducciones en el consume de combustible mediante la aplicación de ciertas medidas técnicas.

Tabla 77. Reducciones potenciales de consumo de combustible/ CO2 por medidas técnicas

Measures, new ships	Fuel/CO <sub>2</sub> saving potential	Combined <sup>1)</sup>	Total <sup>1)</sup>
Optimised hull shape	5 - 20 %	5 - 30 %	5 - 30%
Choice of propeller	5 - 10 %		
Efficiency optimised	10 - 12 % <sup>2)</sup>	14 - 17 % <sup>2)</sup>	
	2 - 5 % <sup>3)</sup>	6 - 10 % <sup>3)</sup>	
Fuel (HFO to MDO)	4 - 5 %	8 - 11 %	
Plant concepts	4 - 6 %		
Fuel (HFO to MDO)	4 - 5 %		
Machinery monitoring	0.5 - 1 %		
Measure, existing ships	Fuel/CO <sub>2</sub> saving potential	Combined <sup>1)</sup>	Total <sup>1)</sup>
Optimal hull maintenance	3 - 5 %	4 - 8 %	4 - 20 %
Propeller maintenance	1 - 3 %		
Fuel injection	1 - 2 %	5 - 7 %	
Fuel (HFO to MDO)	4 - 5 %		
Efficiency rating	3 - 5 %	7 - 10 %	
Fuel (HFO to MDO)	4 - 5 %		
Eff. rating + TC upgrade	5 - 7 %	9 - 12 %	
(HFO to MDO)	4 - 5 %		

<sup>1)</sup> Where potential for reduction from individual measures are well documented by different sources, potential for combination of measures is based on estimates only

<sup>2)</sup> State of art technique in new medium speed engines running on HFO.

<sup>3)</sup> Slow speed engines when trade-of with NOx is accepted.

Fuente: Study of Greenhouse Gas Emissions from ships to International Maritime Organization. 2000.

Tabla 78. Consumos mundiales de combustible marino en los años 1990-1995 según diferentes fuentes y separando fuel de diesel oil.

Year	Data source	Publication		Marine bunker (Mton)		Sum (Mton)
		By	Year	Residual	Distillate	
1990	NSA <sup>1)</sup>	UNFCCC	1996	100	40	140
1990	CONCAWE <sup>2)</sup>	Corbett	1999	100	40	140
1992	EIA <sup>3)</sup>	Corbett	1999	110	30	140*
1993	EIA <sup>3)</sup>	Corbett	1999	109	38	147*
1994	IEA	UNFCCC	1997	-	-	≈127**
1995	IBIA	IBIA	1999	-	-	140

<sup>1)</sup> NSA-Norwegian Shipping Academy (Liddy, J.P. Bunker fuels – A global View towards Year 2000, 1992)

<sup>2)</sup> CONCAWE, The European environmental and refining implications of reduction of sulphur content of marine bunker fuels, CONCAWE Air Qual. Manage. Grup, Brussels, Belgium, 1993

<sup>3)</sup> Reported by: Maloney, M. J., World Energy Database, Energy Inform. Admin. (EIA), Washington D.C. 1996

\* EIA definition: "bunkers": Fuels supplied to ships and aircraft in international transportation, irrespective of the flag of the carrier, consisting primarily of residual, distillate, and jet fuel oils (<http://www.eia.doe.gov/emeu/iea/glossary.html>).

\*\* IEA definition: "International marine bunkers" cover those quantities delivered to sea-going ships of all flags, including warships. Consumption by ships engaged in transport in inland and coastal waters is not included (<http://www.iea.org/stats/defs/origins/marine.htm>).

Fuente: Study of Greenhouse Gas Emissions from ships to International Maritime Organization. 2000.

El incremento de la potencia para mantener la velocidad por rugosidad de casco y hélice y relación con tiempo desde diqueado.

Hay una significativa reducción del consumo de combustible debida a la optimización de la forma del casco y tipo de hélice. Esto variará dependiendo de la categoría del buque y el tipo de comercio.

Tabla 79. Potencial reducción de Energía para buques nuevos-medición casco/hélice

Measure	Fuel/CO2 saving potential	Combined
Optimised hull shape	5 - 20 %	5 - 30 %
Choice of propeller	5 - 10 %	

Fuente: Study of Greenhouse Gas Emissions from ships to International Maritime Organization. 2000.

### El Casco y la hélice en buques existentes

El Casco. La resistencia viscosa del buque (fricción) se incrementa considerablemente incrementando la rugosidad del casco. La rugosidad del casco tiende a incrementarse durante la vida en servicio del buque (gráfica 5.2) y podría incrementarse significativamente entre diqueados, dependiendo del sistema de pintado aplicado. El incremento de la rugosidad depende no sólo del mantenimiento del buque sino también del área de operación y el perfil operacional. Es muy difícil obtener estadísticas del estado actual mirando la rugosidad del casco y las prácticas de mantenimiento.

Los sistemas de pintura anti-incrustantes reducen significativamente el problema de incremento de rugosidad entre diqueados, mientras los intervalos de mantenimiento del sistema de pintura no sean excesivos.

La disminución de la rugosidad en servicio ha sido confirmada en el informe de Townsin del año 1980. Esto se muestra ya que los buques más viejos obviamente han sido diqueados numerosas veces y que para cascos que inicialmente son bastante

lisos, la rugosidad es incrementada como resultado del diqueado. De esto, se podría concluir que además de usar un sistema de pintura autopulimentadas deben ser mejorados los sistemas de mantenimiento del casco, en especial el rechorreo del casco del casco debería ser hecho a intervalos regulares.

Basándose en esto, la rugosidad del casco podría ser mantenida en aproximadamente a nivel de un nuevo buque, que se supone 150 µm, mediante una buena práctica de mantenimiento del casco. En dique seco se usa una pintura auto pulimentada que es la práctica común actual, el incremento en la rugosidad después del diqueado se supone 30 µm. Para un buque de 10 años, diqueado dos veces, esto da una rugosidad de 60 µm. Un incremento en la rugosidad implica un incremento en la energía demandada para mantener una velocidad de 3 - 4 %.

Para la vida en servicio de un buque, un incremento en la rugosidad del casco implica un incremento de la resistencia viscosa. Como consecuencia, habrá un incremento de la energía demandada para mantener la velocidad. El uso de subestándares de sistemas de pintura, largos periodos en puerto, largas estancias en aguas cálidas, y/o excederse de la vida en servicio de los sistemas de pintura, incrementará la rugosidad en más de 60µm. Una significativa parte de la flota mundial probablemente esté en esta categoría. Se puede fijar el ahorro de potencia por un perfecto mantenimiento del casco en más del 3 - 4 % dado por el 60 µm de incremento de rugosidad, y 5 % es considerado como lo más probable.

La Hélice. La modificación de alternativas en la hélice en buques existentes puede dar como resultado la reducción del consumo de combustible.

La rugosidad de la hélice tiene mucha menos importancia que la del casco, probablemente porque el posible impacto en el consumo de combustible es menor. Grigson (1982) presenta un método para calcular el incremento de la fricción de la pala de la hélice debida a la rugosidad. Basado en este método, es posible hacer una estima bastante buena del incremento de potencia, si el incremento de la rugosidad es conocido. Sin embargo, hay muy pocos datos de medición del incremento de rugosidad en servicio. Esto hace usar una estima empírica muy alta del 3% de incremento en el consumo de energía debido a una hélice rugosa típica. Para mantener la rugosidad de la hélice se incrementa en un nivel bajo, la rugosidad de la hélice debería ser medida cuando el buque es diqueado, y la hélice pulida si la rugosidad se ha incrementado en 0.2 mm. Es importante realizar una medición real de la antes y después de pulir. La observación visual no es suficiente. Esto da lugar a un coste efectivo que significa una reducción de energía.

Tabla 80. Energy reduction potential for existing ships - hull/propeller measures

Measure	Fuel/CO2 saving potential	Combined
Optimal hull maintenance	3 - 5 %	3 - 8 %
Propeller maintenance	1 - 3 %	

Fuente: Study of Greenhouse Gas Emissions from ships to International Maritime Organization. 2000.

Por otro lado este estudio realiza una comparativa de transporte por varios medios, portacontenedor de 1200 TEU, y de 5000 TEU, Buque rápido y transporte aéreo. El buque convencional rápido usa 0.35 ton/TEU, mientras que el Fastship usa 4.2 ton/TEU. (ver tabla siguiente)

Tabla 81. Power, fuel consumption and cost of various fast transatlantic freight concepts

	SeaLance DK Group Inc.	Fastship Inc.	Aircargo	New 5000 TEU ship
Crossing time	72 hours	85 hours	12 hours	139 hours
Door to door time	5 days	5 to 7 days	5 to 7 days	7-20
Speed [knots]	46	37.5	450	23
Power [MW]	92.5	250		49.8
# of TEU (20')	1200	1432	15	5000
Cargo Weight	Ca. 10.000t	Ca. 10.000t	124t	58.022t
Fuel per hour [ton/h]	24	54		9.4
Fuel per trip [ton]	1720	4600	70	1300
Fuel per TEU [ton]	1.9	4.2	6	0.35
Fuel price \$/ton	190	190	211	130
Fuel expense per voyage	327.000\$	874.000\$	14.790 \$	169.000\$

Fuente: Study of Greenhouse Gas Emissions from ships to International Maritime Organization, 2000.

En el estudio se encuentra una descripción de los diferentes combustibles y el modo de operar con ellos, que se describe a continuación.

Las calidades del combustible marino disponible son:

- Marine Gas Oil (MGO)
- Marine Diesel Oil (MDO)
- Intermediate Fuel Oil (IFO)
- Heavy Fuel Oil or Residual Fuel Oil (HFO)

El HFO es el combustible marino dominante. Es el resultado final de la línea de proceso en una refinería y es altamente sensible a la calidad de crudo y la estructura de la refinería. Las especificaciones tienen que ser desarrolladas a un nivel de calidad que sea aceptable cuando se apunta a un combustible barato que no restrinja la disponibilidad de la estructura de la refinería y el crudo en uso. Las plantas de conversión permiten extraer destilados más ligeros del crudo, los cuales han sido introducidos en las refinerías hace algunos años, la calidad del combustible oil es más pobre y el incremento en proporción se aproxima a la especificación crítica que puede ser aceptada. No sólo desde el punto de vista medioambiental sino también desde el punto de vista de lo que es aceptable para una máquina.

El HFO tiene que ser tratado a bordo de un buque. El calor necesario se toma normalmente del calor residual de escape, mientras que la retirada del lodo requiere energía eléctrica (menor). La calidad del escape del buque no influye para el pre-tratamiento del combustible. El lodo representa una pérdida de combustible y un problema de disposición. Los componentes quitados porque son perjudiciales para la máquina serán emitidos cuando el lodo es quemado a bordo. El consumo mundial de combustible marino HFO es del 80 %.

La descripción de los buques objeto de estudio se muestra en la tabla 82.

Tabla 82. Case ship description, based on Emission Inventory Analysis

	Oil tanker	Bulk carrier	Container	General Cargo
DWT	275,000	70,000	36,500	12,700
Main engine type	Slow speed	Slow speed	Slow speed	Medium speed
Speed (knots)	14	14	20	15

Fuente: Study of Greenhouse Gas Emissions from ships to International Maritime Organization. 2000.

La capacidad de Carga de los buques se define como:

El DWT (Peso muerto) comprende no solo la carga que se puede transportar si no también los consumos y pertrechos.

El Lloyd´s establece una relación entre el peso muerto (DWT) y la capacidad de carga según la siguiente ecuación:

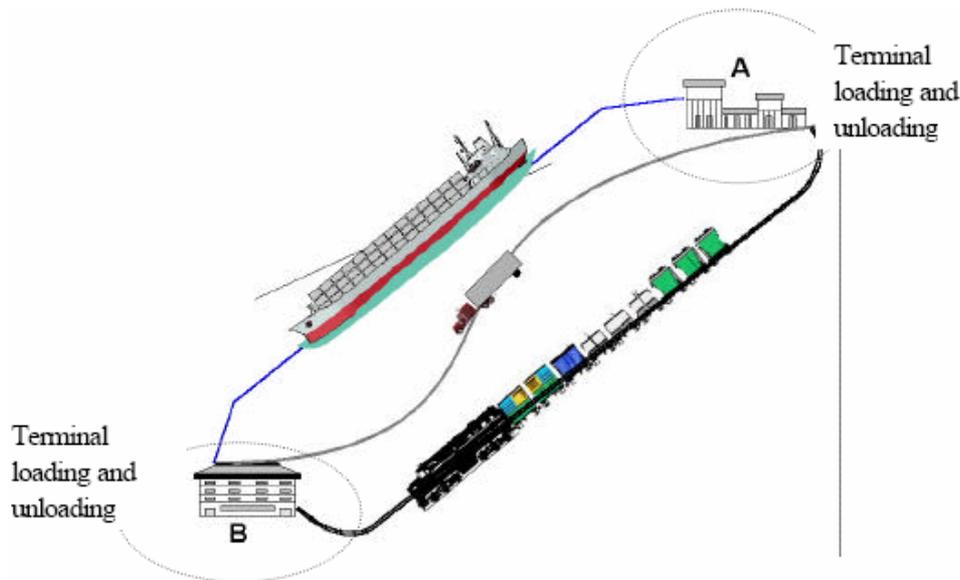
$$\text{Capacidad de Carga} = 0.8 * \text{DWT}$$

Este trabajo, para finalizar define un Modelo Ideal de Transporte para los distintos modos de transporte.

Se define una cantidad igual de carga movida por cada modo de transporte (marítimo, ferrocarril y carretera) a través de una distancia igual. No se especifica el tipo de carga pero si el tonelaje. Al definir un tonelaje de carga igual y una distancia recorrida igual, las toneladas-km en el denominador son iguales para todos los modos y el flete de todos los modos de transporte pueden ser comparados.

Se considera una distancia entre movimientos de carga de 2 millas o 3218 km y 32.2 millones de toneladas de carga movida por cada modo de transporte en un año.

Figura 22. Comparativa modal de un mismo recorrido.



Fuente: Study of Greenhouse Gas Emissions from ships to International Maritime Organization. 2000.

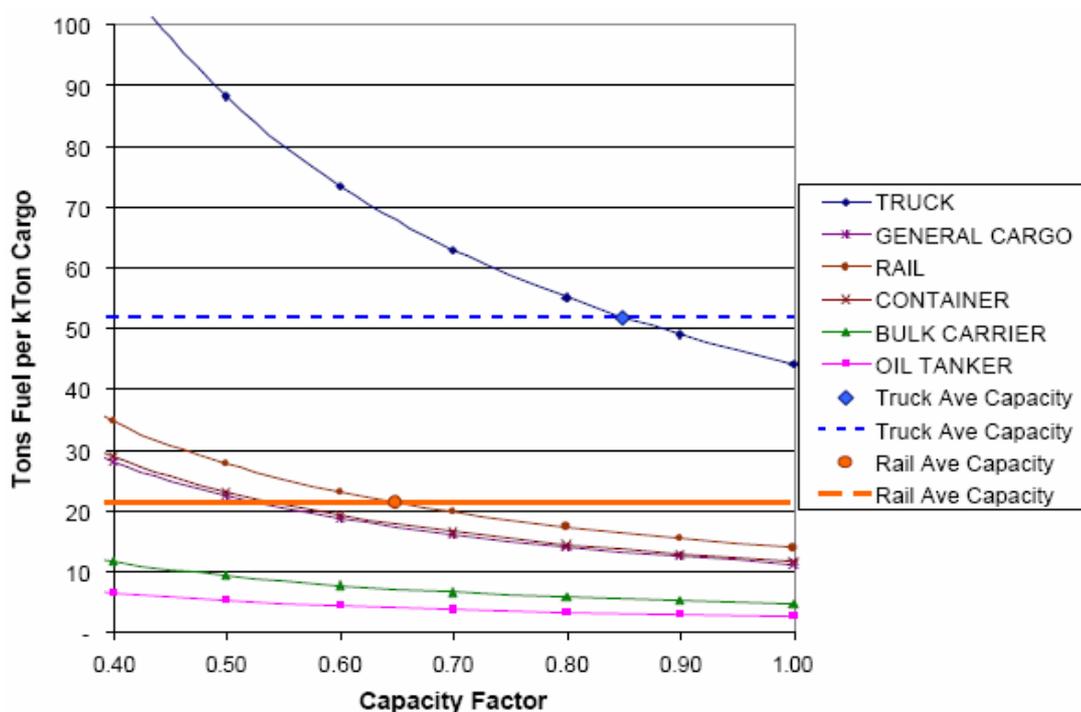
La velocidad y distancia en régimen de maniobra se establecen en 10 nudos y 3218 km (aprox. 2 millas), con estas consideraciones se calcula, el número de horas por viaje, número anual de viajes por buque y el número de buques necesario para mover el total de carga en un año.

La potencia de la máquina a velocidad de crucero se usa para estimar el consumo medio de combustible diario durante el tránsito. El total de combustible consumido por viaje se estima multiplicando el consumo de combustible diario en tránsito y periodos de retorno por la cantidad de tiempo utilizado en el viaje y maniobra, respectivamente.

Multiplicando el combustible consumido en cada viaje por el número anual de viajes por buque y por el número de buques necesarios, este modelo estima el consumo anual de combustible necesario para mover el tonelaje total de carga. El uso total de combustible dividido por el total de carga movida da como resultado una estimación de la intensidad de energía anual, medida como uso de combustible por ktn de carga. De este valor se pueden aplicar conversiones para obtener la intensidad estimada de energía en MJ por ktonne de carga.

La figura 23 muestra que el factor de capacidad tiene un efecto significativo en el consumo de combustible por ktonne de carga, y que el efecto es más grande para camiones. Usando factores de capacidad medios se tiene que los camiones consumen dos veces más de combustible por ktn que el ferrocarril.

Figura 23. Consumo de combustible de los distintos modos.



Fuente: Study of Greenhouse Gas Emissions from ships to International Maritime Organization. 2000.

### Emisiones del transporte marítimo internacional y su impacto medioambiental.

El ámbito del estudio se refiere a buques mercantes y de pasajeros realizando tráficos internacionales.

Los buques analizados en este estudio, en lo que refiere a buques mercantes, son unos 45000, todos ellos mayores de 100 GT. Los datos técnicos de los buques se han obtenido los registros de la AMVER de los años 1996 y 2000. Dentro de los mercantes están todos, como buques de mercancía general, tanque, contenedores, etc.

La información empleada data de finales de la década de los noventa, llegando hasta el año 2000 y sus fuentes son:

- *Lloyd's Register of Shipping* (LR), 1996, 2000. Nos da la base de datos sobre los buques.
- *Lloyd's World Fleet Statistics*.
- *Environmental Protection Agency* (EPA). Datos de la carga del motor.
- *Endresen and Sorgard*, 1999. Descripción sobre el modelo de emisiones debidas a los motores principales de definidos tipos de barcos.
- *Fearnleys*, 1997 y *Tankerworld*, 2001, donde encontramos información sobre ciclos operacionales de los buques.
- *Lloyd's Maritime Information Services*, 2002., donde nos dan datos de perfiles operacionales de buques.
- The Automated Mutual-assistance Vessel Rescue system" (AMVER) donde podemos obtener los datos de tráfico de buques.

El documento nos da la distribución de la flota mundial de buques mayores de 100 GT, en el año 2000.

Los barcos de mercancías, en tráficos internacionales, consumen entre 140 y 150 millones de toneladas de combustible y transportan 5.400 millones de toneladas (Datos año 2002).

El consumo específico de combustible de los buques dependiendo del tipo de motores que utilicen viene medido en kg/kW h.

Además nos muestra el tiempo anual navegando en régimen de crucero, en función del peso muerto desplazado. Este es un dato interesante a la hora de conocer el perfil operacional del buque.

El modelo de emisiones estima el combustible consumido y las emisiones de gas desde los motores principales para tipos de buques definidos. El modelo de cálculo combustible consumido está basado en el número de horas de mar, en relaciones estadísticas entre tamaño (en Dwt ó GT) y potencia de la maquinaria para cada tipo de buque (contenedor, granelero, mercancía general, etc.), distribución por tipo de maquinaria en tipos de barcos, consumo específico por unidad de potencia y asumiendo un factor de carga de la maquinaria.

Las emisiones de gases en este estudio vienen dadas por la siguiente fórmula:

$$M_{g,i,k,s} = c_{g,s}^f F_{i,k,s} = c_{g,s}^f b_s m_{i,k} t_{i,k} p_{i,k} n_{i,k} e_{i,k,s}, \quad (1)$$

where

- $M_{g,i,k,s}$  the amount of pollutant emitted of type  $g$  for ships of type  $i$  in size category  $k$  with engine type  $s$ , kg pollution;
- $c_{g,s}^f$  the fuel-based emission factor for pollution type  $g$  in relation to engine type  $s$ , kg pollution/kg fuel;
- $F_{i,k,s}$  the fuel consumption of vessels of type  $i$  in size category  $k$  with engine type  $s$ , kg fuel;
- $b_s$  the specific fuel consumption for engine type  $s$ , kg fuel/kW h;
- $m_{i,k}$  the average engine load for a ship of type  $i$  and size category  $k$ ;
- $t_{i,k}$  the average number of operating hours during a year for a vessel of type  $i$  and size category  $k$ , h/yr;
- $p_{i,k}$  average installed engine power for a vessel of type  $i$  and size category  $k$ , kW;
- $n_{i,k}$  the number of vessels of type  $i$  in size category  $k$ ;
- $e_{i,k,s}$  the fraction of vessels of type  $i$  in size category  $k$  with engine type  $s$ .

[48]

La ecuación (1) es una simplificación basada en el promedio de parámetros.

Las máquinas auxiliares también contribuyen al total de las emisiones de gases, pero no están incluidas en la ecuación (2).

Los términos diferentes de la ecuación son discutidos a continuación:

- El número de buques,  $n_{i,k}$  mayor o igual a 100GT en la flota mundial nos es dado por la Lloyd's World Fleet Statistics con referencia a los años 1996 y 2000.
- El promedio de potencia instalada en la maquinaria esta relacionado con el tamaño, la fórmula de relación se basa en los datos de 4500 buques clasificados por Det Norske Veritas (DNV)(base de datos de SPRINT), y es la siguiente:

$$p_{i,k} = \alpha_i X_{i,k}^{\beta_i}, \quad (2) \quad [49]$$

- En esta fórmula  $\alpha_i$  y  $\beta$  son las constantes de regresion en la ecuación, con valores diferentes para el buque de tipo  $i$ , y  $X_{i,k}$  es el tamaño promedio de los barcos en la categoría de tamaño  $k$  de tipo  $i$ . El tamaño del buque es dado por su peso muerto (Dwt) para todo tipo de buques, excepto para los de pasajeros, donde aplicamos el GT. En el coeficiente correlación  $\alpha_i$  se ha encontrado unos valores que varían entre los 2.6 de los buques portacontenedores, hasta los 39.8 de los graneleros, y  $\beta$  varía desde los 0.5 de los graneleros a los 0.86 de los buques portacontenedores.

- El coeficiente de correlación varía desde 0.88 hasta 0.96 por los diferentes tipos de barcos.
- El tamaño promedio ( $X_{i,k}$ ) para un buque de tipo  $i$  con una desviación en la categoría de tamaño  $k$  está basado en el World Fleet Statistics. La relación estadística dada por la ecuación (2) permite cuantificar la potencia instalada del motor,  $p_{i,k}$  y es usada en este estudio.

- Los datos aportados por DNV, clasifican los buques en función del tipo de maquinaria que utiliza ( $e_{i,k,s}$ ) y de la categoría de buque. Los buques más grandes, con alrededor de 60.000 DWT, son equipados normalmente con motores lentos, mientras que los buques pequeños, que están por debajo de 2.000 DWT, usan en su mayoría motores semirápidos, aunque un número significativo de buques utiliza motores rápidos (un 30% aprox. dependiendo del tipo de buque). Buques entre 2000 y 12000 Dwt son equipados generalmente con motores semirápidos (alrededor de un 80%), mientras que los buques entre 12000 y 60000 DWT son mayormente equipados con motores lentos (entre un 50-80% dependiendo del tipo de buque). Generalmente, solo unos pocos buques son equipados con turbinas (entre 2-15% de los grandes buques, dependiendo del tipo). El consumo específico de cada uno de ellos viene dado en la tabla 2 (Harrington, 1992; Klock, 1994).
- El promedio de la carga media del motor propulsor en modo crucero,  $m_{i,k}$ , es de un 70% según está asumido en este estudio. En mar abierta, los buques habitualmente operan a un 85% de su capacidad máxima. Pero este es un rendimiento permitido solo en momentos de largos periodos sin parar, así, en periodos con el buque a velocidad reducida, maniobras para entradas a puerto y para trayectos en lastre se reduce el promedio de rendimiento del motor. Se considera una media de potencia usada del 70% del MCR porque es un promedio realista y porque además este factor de carga de la propulsión principal es el que viene definido por el IMO en su código técnico, aplicado para la verificación de las emisiones de óxido de nitrógeno, limitadas con la regulación 13 del anexo IV (IMO, 1998).
- El perfil medio de actividad,  $t_{i,k}$ , para cada tipo de barco y categoría de tamaño lo obtenemos de las bases de datos de CONCAWE (1994) y del Lloyd's. El perfil operacional es un dato que depende de varios factores, ya que está en íntima relación con el tamaño del buque, número de viajes anuales, producto que carga-descarga...etc. Así, la fracción anual de tiempo en puerto de buques del tráfico mundial es de un 37% del tiempo, mientras que para buques que operan en aguas europeas exclusivamente es de un 59,5%, basado en un estudio con 605 buques noruegos. La estancia media en puerto es de 1,5 a 2,4 días.
- En relación con la potencia y el consumo de los motores auxiliares, cabe decir que el porcentaje de potencia instalada, de promedio, es de un 20% de la de la potencia instalada de los motores principales para buques de más de 100 GT. En cuanto al consumo, asciende a un 10% del consumo del motor principal cuando el buque se encuentra en régimen de crucero. Asimismo, podemos decir que el consumo en operaciones en puerto es de un 5% del consumo en crucero, aunque en los buques tanque el consumo es mayor.

### Comparación con otros estudios

Corbett y Fischbeck (2000) usan datos de la potencia al freno y del consumo específico de combustible como base para un modelo de emisiones de buques. La estimación de un consumo de combustible de 170 Mt por parte de la flota de carga del comercio internacional es un 20% superior a la de las estimaciones de este estudio. Muchos de los buques de carga iguales o mayores a 100 GT están en el tráfico doméstico y por lo tanto no forman parte del inventario de consumo de combustible internacional y Corbett si los considera.

El consumo de combustible en el tráfico doméstico es, significativo y fue de 22 Mt (incluyendo las aguas interiores y el cabotaje pero excluyendo los barcos pesqueros) para los países de la OCDE en 1998.

La venta de combustible para el transporte marítimo internacional por parte de los países de la OECD fué de 84 Mt (*International Energy Agency (IEA), 2001*).

Según un estudio de Japón para el IMO (*Japan, 2000*), sugiere que los tanques, graneleros y contenedores contribuyen en un 31, 30 y 32% respectivamente al consumo total de combustible (probablemente 140 Mt).

Un análisis de los datos de potencia reales de buques comparando con la potencia obtenida según la fórmula antes explicada da como resultado que puede haber entre un 3 y un 5% de potencia real instalada que la usada en este estudio y por tanto en el consumo de combustible.

Coincidiendo con este punto, sabemos que las expectativas de consumo de los motores auxiliares es de entre un 5 y un 15% del consumo de los motores principales durante el trayecto, con lo que la incertidumbre total de consumo de combustible por este hecho es de un 5%.

Este modelo aplica un promedio de potencia del motor del 70% de MCR, aunque este dato depende del tipo de buque y de su tamaño y también esta muy ligado al precio del combustible y del flete.

Se asume que la velocidad media es de 11 nudos, pero las variaciones pueden llegar a ser sustanciales, estando en un intervalo de entre 10 a 13.6 nudos.

Además, el consumo también varía si pasamos de un trayecto con el buque cargado a si el trayecto se realiza en lastre, y por este motivo dicho consumo puede llegar a fluctuar en un 10%.

Los consumos en puerto no se han considerado en este estudio y están entre el 2y el 6 % del total, como media el 4 % luego se compensan con la sobrestimación de la potencia instalada.

Existe una relación clara entre el tamaño del buque y el tiempo anual en servicio.

La estimación del consumo mundial de combustible por buques mercantes y de pasajeros mayores de 100 GT es de 132 Mt en el año 1996 y de 144 Mt para el año 2000, mientras que la venta mundial de combustible esos años fue de 138 Mt y 147 Mt respectivamente, parte del cual fue consumido por buques de guerra y no de carga.

#### **Actualización de las emisiones del tráfico marítimo.2004**

El estudio Updated emissions from ocean shipping de 2004, comprende el cálculo de las emisiones debidas a la actividad de buques en flotas internacionales, tanto de carga como otros comerciales como buques de guerra.

El consumo de combustible de buques de navegación por aguas interiores o en tráfico de cabotaje local no se ha considerado.

Se han considerado los buques mercantes mayores de 100 GT.

La estimación se ha realizado según un modelo de tipo agregativo (Bottom-up).

Según datos del año 2001, se estima que el consumo anual de combustible es de 289 Mt, que es más de dos veces el consumo registrado de la flota internacional.

Las diferencia con otros estudios se deben no solo a las incertidumbres de estos cálculos si no también a que no hay una separación clara entre flota en tráfico internacionales y en tráfico en aguas interiores o en cabotaje.

Los estudios anteriormente realizados consideran que el transporte marítimo es el más eficiente desde el punto de vista de consumo de combustible, aunque también se deriva que es una fuente significativa de contaminación por lo que recientemente se han ido incrementando las regulaciones tendientes a minimizar este impacto.

Tabla 83. Consumo mundial según distintas fuentes de información.

Source	Fuel Consumption, Million Tonnes	NO <sub>x</sub> , Tg N	SO <sub>x</sub> , Tg S	Inventory Years Represented
This work	289	6.87	4.72	2001 fleet activity
Endresen et al. [2003]	~165–200	3.45	3.23	average of 1996, 2000
IMO Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships [Skjølsvik et al., 2000]	~120–147	3.06		average of results from two methodologies 1996
Corbett et al. [1999]	~140–147	3.08	2.83 4.24	on the basis of 1993 fuel statistics and 1996 fleet data
RIVM and EDGAR databases [Olivier and Berdowski, 2001; Olivier and Peters, 1999]	~121 (estimated from EDGAR CO <sub>2</sub> data) <sup>b</sup>	2.77	2.45	average of 1990, 1995
Benkovitz et al. [1996]	not provided	1.60	2.30	reported for circa 1985 from 1989–1990 studies

<sup>a</sup>Where previous studies presented multiple years or results from separate methodologies, we report an average of their results for simplicity. While fuel consumption and related emissions are expected to vary from year to year (particularly within a given study’s set of assumptions), the differences among these various estimates relates more to input assumptions and data than to interannual variation.

<sup>b</sup>To convert from CO<sub>2</sub> data reported by EDGAR to fuel consumption, the CO<sub>2</sub> emissions were converted to elemental carbon and divided by the average percent by weight of carbon in marine fuel (86%).

Fuente: Updated emissions from ocean shipping. 2004

Para las estimaciones de consumo de fuel para los buques registrados a nivel internacional, y con más de 100 GT, se ha adoptado una metodología tipo Bottom-úp para el cálculo del consumo de combustible.

La potencia de los motores se ha tomado de fuentes estadísticas (Lloyd’s Register) en la que se encuentran los datos reales de los buques.

La ecuación de consumo de combustible usada es la siguiente:

$$\text{Fuel Consumption}_{\text{metric tonnes per year}} = \sum_{\text{Subgroup } i=1}^n P_{\text{MW}} \cdot F_{\% \text{MCR}} \cdot t_{\text{hrs/yr}} \cdot \text{SFOC}_{\text{g/kWh}} \cdot \frac{1}{1000}$$

Donde: [50]

$P_{\text{MW}}$  , Potencia instalada acumulada de los motores para cada subgrupo.

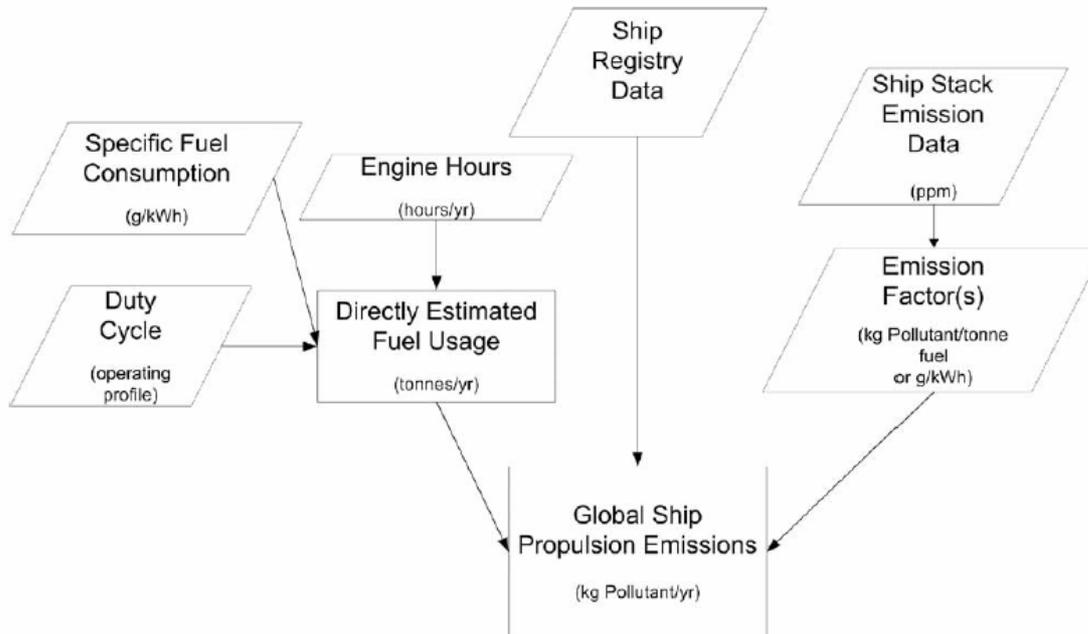
$F_{\% \text{MCR}}$  , Factor de carga del motor para cada fase del ciclo de actividad.

$t_{\text{hrs/yr}}$  , Promedio de funcionamiento del motor, en horas, para cada subgrupo.

$\text{SFOC}_{\text{g/kWh}}$  , Consumo específico de combustible.

La sistemática seguida para el cálculo de las emisiones se muestra en le diagrama de la figura 24:

Figura 24. Consumo mundial según distintas fuentes de información.



Fuente: Updated emissions from ocean shipping. 2004

La base de datos de la Lloyd's para buques de más de 100 GT, comprende 88.660 buques con 116.280 motores principales y contabilizando más de 280.100 MW de potencia propulsora instalada (323.000 MW incluyendo los motores auxiliares).

De todos estos tipos de motores, alrededor de un 67% son motores de cuatro tiempos (semirrápidos o rápidos), un 27% son motores de dos tiempos, hay un 6% del que no se tienen datos y por último, hay un 1% que son turbina mayoritariamente de vapor.

En el informe encontramos el perfil de la flota mundial clasificada por tipos de buques, número de estos, motores principales y auxiliares y potencia instalada de cada uno de estos y tenemos la media de horas funcionando los motores propulsores incluyendo la carga de estos, anualmente, para los diferentes tipos de buques.

La flota de buques militares presentan perfiles operacionales muy diferentes con mayor tiempo en puerto y regímenes de potencia por debajo del 50 %, el 90 % de su tiempo en navegación como resumen el consumo estimado supone el 14 % del consumo total (Flota comercial y militar).

Para realizar la estimación del consumo de combustible de la flota comercial se usa una versión detallada basada en datos de la industria naval y en datos de los motores tradicionalmente no disponibles en los registros de los buques.

Se han considerado los buques clasificados en 132 subgrupos:

- 8 grupos por tipo de buques
- 5 grupos por tipo de motores propulsores (lentos, semirrápidos, rápidos, turbinas y otros),
- 4 subgrupos por potencia de cada tipo de motores (gran potencia, potencias medias, potencias pequeñas y turbinas).

Los motores auxiliares se han analizado como un grupo aparte.

Se ha considerado un 1 % de buques inactivos.

Los perfiles operacionales considerados en el estudio se muestran en las tablas 84 y 85.

Se ha considerado la potencia máxima real en el caso de motores rateados (Preparados para trabajar a una potencia máxima inferior a la teórica)

Tabla 84. Perfiles operacionales de transporte.

Transport Ships	Full Cruise	Slow Cruise	Precautionary Speed	Maneuvering
Speed	93% of rated	85% of rated	46% of rated	23% of rated
Power	80% of rated	61% of rated	10% of rated	1% of rated
Speed (adjusted)	100%	91%	80%	63%
Power (adjusted)	100%	76%	12.50%	1.20%
Weighting factor	0.65	0.2	0.1	0.05

Fuente: Updated emissions from ocean shipping. 2004

Tabla 85. Perfiles operacionales de no transporte.

Non-Transport Ships	Full Cruise	Slow Cruise	Precautionary Speed	Maneuvering
Speed	93% of rated	85% of rated	46% of rated	23% of rated
Power	80% of rated	61% of rated	10% of rated	1% of rated
Speed (adjusted)	100%	91%	80%	63%
Power (adjusted)	100%	76%	12.50%	1.20%
Weighting factor	0.2	0.5	0.15	0.15

Fuente: Updated emissions from ocean shipping. 2004

Para los motores auxiliares, se han estimado de promedio un 50% de su capacidad máxima y 3500 horas operativas anuales.

- Los combustibles usados y considerados son:
- Los motores lentos consumen HFO en un 95%, y MDO en un 5%.
- Los motores semirapidos 70% HFO y 30% MDO.
- Los motores rápidos consumen MDO y MGO.
- Las calderas para turbinas de vapor consumen HFO y las de gas MGO. (Actualmente también gas derivado del boiler of de la carga).

El consumo específico medio para buques de transporte de carga es de 206 g/kwh (media de todos los ciclos) y 221 g/kwh para buques no de transporte. Se han considerado consumos específicos según tipo y tamaño de motor, tipo de combustible y edad del equipo.

El resultado del cálculo fue un consumo total de 289 Mtn de las que el 80 % aproximadamente es fuel oil.

Tenemos en la tabla 86 los datos sobre tiempos de funcionamiento y % de carga de los motores principales y auxiliares en cada fase del ciclo de actividad, así como consumos específicos incluyendo valores máximo, mínimo y valor considerado en los cálculos:

Tabla 86. Rangos de las variables.

Input Variable	Lower Bound	Base-Case Estimate	Upper Bound
Engine hours per year			
Main engines	5500	6500	7010
Auxiliaries <sup>a</sup>		3500	
Engine power at "full cruise"	75% of rated	80% of rated	80% of rated
Main engine duty cycle <sup>b</sup> :			
Full cruise	0.10	0.65 (T), 0.20 (NT)	0.82
Slow cruise	0.15	0.20 (T), 0.50 (NT)	0.50
Precautionary sponsored	0.02	0.10 (T), 0.15 (NT)	0.15
Maneuvering	0.01	0.05 (T), 0.15 (NT)	0.15
Specific fuel consumption, g/kWh			
Transport vessels		206	
Non-transport vessels	-10%	221	+10%
Auxiliaries <sup>a</sup>		230	
Auxiliary fuel use	-10%	modeled estimate	+10%
NO <sub>x</sub> emission factor, g/kWh			
Transport vessels		17.0	
Non-transport vessels	-20%	16.0	+20%
Auxiliaries		13.7	
SO <sub>x</sub> emission factor, <sup>c</sup> g/kWh			
Transport vessels		10	
Non-transport vessels	-10%	10	+10%
Auxiliaries		4.6	
CO <sub>2</sub> emission factor, g/kWh			
Transport vessels		655	
Non-transport vessels	-10%	702	+10%
Auxiliaries		696	
HC emission factor, g/kWh			
Transport vessels		0.6	
Non-transport vessels	-25%	0.5	+25%
Auxiliaries		0.4	
PM emission factor, <sup>d</sup> g/kWh			
Transport vessels		1.25	
Non-transport vessels	-25%	1.25	+25%
Auxiliaries		0.80	

<sup>a</sup>Auxiliary engines were all assumed to have a composite duty cycle of 50%, with sensitivity to auxiliary fuel estimate evaluated independent of duty cycle. Auxiliary fuel estimate ~15 million metric tonnes fuel per year.

<sup>b</sup>T, transport ship; NT, non-transport ship. Duty cycle changes were defined with correlations to "full cruise" power, because the total weighting cannot exceed 1.00.

<sup>c</sup>SO<sub>x</sub> emissions from diesel engines are strictly related to the sulphur content of the fuel. These factors are based on the weighted-average fuel sulfur levels, per the discussion. On average, they represent an average fuel-sulfur content of 2.5%.

<sup>d</sup>PM factors for marine diesels remain very uncertain, are still difficult to measure and can be defined differently. We apply the latest published average values for in-service marine engines.

Fuente: Updated emissions from ocean shipping. 2004

Las tablas 87 y 88 nos dan los % de potencia y de velocidad en cada modo del ciclo de actividad:

Tabla 87. Potencia y velocidad por ciclo de actividad para el transporte

Transport Ships	Full Cruise	Slow Cruise	Precautionary Speed	Maneuvering
Speed	93% of rated	85% of rated	46% of rated	23% of rated
Power	80% of rated	61% of rated	10% of rated	1% of rated
Speed (adjusted)	100%	91%	80%	63%
Power (adjusted)	100%	76%	12.50%	1.20%
Weighting factor	0.65	0.2	0.1	0.05

Fuente: Updated emissions from ocean shipping. 2004

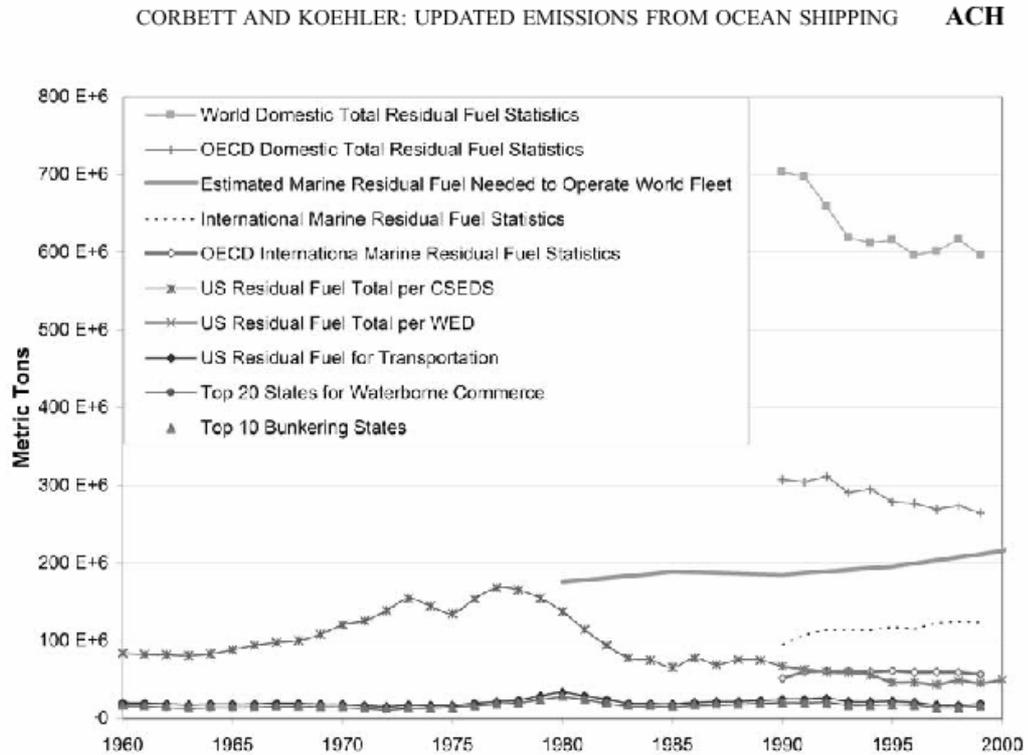
Tabla 88. Potencia y velocidad por ciclo de actividad para el no transporte.

Non-Transport Ships	Full Cruise	Slow Cruise	Precautionary Speed	Maneuvering
Speed	93% of rated	85% of rated	46% of rated	23% of rated
Power	80% of rated	61% of rated	10% of rated	1% of rated
Speed (adjusted)	100%	91%	80%	63%
Power (adjusted)	100%	76%	12.50%	1.20%
Weighting factor	0.2	0.5	0.15	0.15

Fuente: Updated emissions from ocean shipping. 2004

Tenemos, para finalizar este informe una comparación de consumos HFO en el periodo 1990-1999 en la figura 25, para uso por fuentes estacionarios o por buques según diferentes fuentes:

Figura 25. Comparación de los consumos de HFO según distintas fuentes.



Fuente: Updated emissions from ocean shipping. 2004

### Consideraciones de otros parámetros de estudio.

El artículo, Considering alternative input parameters in an activity-based ship fuel consumption and emissions model: Reply to comment by Oyvind Endresen et al. on “Updated emissions from ocean shipping”. 2004, es una respuesta a los comentarios realizados por Endresen y otros, al artículo “Updated emissions from ocean chips” desarrollado por los mismos autores según el cual las estimaciones de consumo mundial de combustible duplicaban las estimadas por Endresen y otros, en su artículo “Emissions from internacional sea transportation and environmental impact”.

Corbett y Koehler están de acuerdo con la metodología usada por Endresen la cual es la misma usada por ellos y centran la diferencia en el valor de los datos de entrada usados para el cálculo del consumo de combustible.

Los datos que más discrepancias registran, son aquellos referidos a las horas de operación, perfil de carga y al consumo específico.

Ambos modelos difieren principalmente en dos puntos:

Endresen utiliza fórmulas obtenidas por inferencia estadística para obtener la potencia de los motores en función de los GT del buque mientras que Corbett utiliza datos reales de buques obtenidos de las bases de datos especializadas.

Endresen estima las horas de funcionamiento de los motores mientras que Corbett introduce las horas de funcionamiento tanto de los motores principales como las de los motores auxiliares.

Así, tenemos en la tabla 89 un resumen por tipos de buques, de tipos de motores principales, sus horas de funcionamiento y el % de potencia usada en régimen de crucero, obtenidas de los inspectores de los operadores.

Tabla 89. Resumen de los tipos de buques.

Ship Types	Installed Main Engines <sup>a</sup>	Average Operating Hours per Year	Typical Cruising Load (Percent of Installed Power)
Bulk carriers, tankers	two-stroke: 91% four-stroke: 6%	6500	55% if low freight rates, 80% normal freight rates
Large container vessels (>1500 TEU)	two-stroke: 100%	6700–7200	80%
Small container vessels (<1500 TEU)	two-stroke: 55% four-stroke: 45%	6300–6700	80%
Crude oil carriers	two-stroke: 80% four stroke: 19%	6700–7300	75%
Lift-on lift-off (LoLo)	two-stroke: 55% four stroke: 32%	6000	80%
Roll-on roll-off (RoRo)	two-stroke: 11% four stroke: 77%	6500–7000	80–85%
Passenger vessels	primarily four-stroke	4000	55%
Fishing vessels <sup>b</sup>	two-stroke: 3% four stroke: 69%	6000–7000	70%

<sup>a</sup>Based on installed power.

<sup>b</sup>A number of fishing vessels are not powered by diesel engines, but by Otto cycle, spark-ignited engines.

Fuente: Considering alternative input parameters in an activity-based ship fuel consumption and emissions model: Reply to comment by Oyvind Endresen et al. on “Updated emissions from ocean shipping”. 2004

Corbett se muestra de acuerdo con Endresen en que el promedio de carga del motor principal es de un 70%, y atribuye a un error tipográfico la estimación de su anterior estudio del 2003 en el que asegura que la carga promedio es de un 80%. Así, según datos facilitados por los operadores, se puede asegurar que la potencia utilizada por los buques está comprendida entre el 70 y el 75% en régimen de crucero, con lo que la carga total media es del 65% para los buques de carga y del 48% para los buques que no son de carga.

En la tabla 90 se recoge la información relevante acerca de las horas de funcionamiento según el tamaño del buque, en cada régimen, según Endresen:

Tabla 90. Resumen del número de horas de funcionamiento del buque.

Vessel Size, dry weight	Values Taken From <i>Endresen et al.</i> [2004a]				Values Derived From A Through D					
	Engine Hours A	In-Service Days B	Port Calls C	Days in Port D = C × 1.5	Engine Running Days E = A/24	Days When Engines Not Running (in Port) F = B - (A/24)	At-Sea Days G = B - D	Laid Up Days (Not in Service) H = 360 - B	Maximum Sea Days I = 360 - D	
<5,000	4000	240	100	150	167	73	90	120	210	
5,000–100,000 <sup>a</sup>	5000	270	60	90	208	62	180	90	270	
>100,000 <sup>b</sup>	6000	300	35	53	250	50	247	60	307	
Fleetwide averages <sup>c</sup>	5840	300	70	105	243	57	210 <sup>c</sup>	60	255	

<sup>a</sup>We averaged values for large and small vessel sizes reported by *Endresen et al.* [2004a] to estimate in-service days and port calls for vessels between 5000 and 100,000 dry weight.

<sup>b</sup>The number of port calls used here is increased from the lower bound (20 days) reported by *Endresen et al.* [2004a] so that days in port (53 days) will exceed the days when the engines are not running (50 days) in a large in-service vessel.

<sup>c</sup>*Endresen et al.* [2004a] say “that on average, vessels spend around 220 days at sea,” but the weighted average of the data presented in their Table 2 is 210 days at sea. We applied a weighted-average interpolation based on the 210 at-sea days (G) to estimate fleetwide average engine hours, port calls, and days in port values (A–D) accordingly; we cap the in-service days at 300 to avoid exceeding their upper bound, although the weighted interpolation would suggest 315 in-service days.

Fuente: Considering alternative input parameters in an activity-based ship fuel consumption and emissions model: Reply to comment by Oyvind Endresen et al. on “Updated emissions from ocean shipping”. 2004

Corbett y Koehler no están en desacuerdo con lo que respecta al ciclo de actividad recogido en el estudio de Endresen. Según un estudio del puerto de Los Ángeles se considera que los motores de un barco pueden llegar a estar parados durante el 60-75% del tiempo en puerto. Además, los tiempos de vuelta al servicio se han visto reducidos en un 89% de promedio entre los años 1970 y 1998. Así, el tiempo que necesita ahora un portacontenedores para volver al servicio está en 0,5 días y se incrementa a 2 días para los bulk-carriers, estando el promedio entre 1,16 y 1,27 días para el conjunto de los buques.

Referente a la flota sin actividad o reparando según la Lloyd’s, se estima que aproximadamente un 1% de la flota mundial está en proceso de reparación, como media, en un momento cualquiera y además el 2,6% de la flota mundial es excedentaria, un valor que se viene manteniendo por debajo del 3% desde 1999 y que se considera un valor no desproporcionado.

Tenemos en la tabla 91 un resumen de días de actividad de buques de no carga según Endresen con el que Corbett se muestra de acuerdo:

Tabla 91. Resumen del número de días de actividad.

Nontransport Vessels	Engine Hours	In-Service Days	Days of Operation in Port	At-Sea Days
Tugboats	4392	183	64	119
Typical (inferred) <sup>a</sup>	4368	182	0	182
Upper bound	5640	235	0	235

Fuente: Considering alternative input parameters in an activity-based ship fuel consumption and emissions model: Reply to comment by Oyvind Endresen et al. on “Updated emissions from ocean shipping”. 2004

Las estimaciones de consumo específico para el cálculo del modelo dan como promedio según Corbett un ratio de 195gr/Kwh. para los motores principales de los buques de mercancías y de 215gr/Kwh. para los motores principales de los buques de no mercancías y para los motores auxiliares de los buques de mercancías y aunque estos valores son claramente superiores a los de los fabricantes de los motores hay que tener en cuenta que los fabricantes referencian sus datos a consumos al 85 % de régimen y los motores funcionan frecuentemente a otros regímenes con consumos superiores, así como que la edad media es de 15 años por lo que se consideran correctos los valores antes citados.

En la tabla 92 se muestra un resumen de fuel en Mt aportados por Endresen y Corbett con los límites de variación inferior y superior de cada estimación:

Tabla 92. Resumen del consumo de fuel estimado.

Comparison of Various Assumptions	Fuel Estimate, Mt/yr	Percent Change From Corbett and Koehler [2003]	Percentile of Maximum Activity-Based Model Uncertainty Value
World fleet (cargo, noncargo, military)			
From Corbett and Koehler [2003] assumptions	289		72nd
Lower specific fuel consumption rates	274	5%	57th
Fewer at-sea and in-port days, assuming only 1% of vessels are laid up, lower specific fuel consumption	257	11%	40th
Fewer at-sea and in-port days, more days laid up, lower specific fuel consumption	248	14%	31st
Upper bound per Endresen et al. [2004a]	200	31%	5th
Lower bound per Endresen et al. [2004a]	170	41%	0th
Registered fleet (cargo, noncargo)			
From Corbett and Koehler [2003] assumptions	248		73rd
Lower specific fuel consumption rates	235	5%	60th
Fewer at-sea and in-port days, assuming only 1% of vessels are laid up, lower specific fuel consumption	218	12%	39th
Fewer at-sea and in-port days, more days laid up, lower specific fuel consumption	209	16%	29th
Upper bound per Endresen et al. [2004a]	200	33%	25th
Lower bound per Endresen et al. [2004a]	170	37%	5th
Cargo fleet			
From Corbett and Koehler [2003] assumptions	203		80th
Lower specific fuel consumption rates	192	5%	65th
Fewer at-sea and in-port days, assuming only 1% of vessels are laid up, lower specific fuel consumption	184	9%	55th
Fewer at-sea and in-port days, more days laid up, lower specific fuel consumption	175	14%	42nd
Upper bound per Endresen et al. [2004a]	150	26%	17th
Best estimate Endresen et al. [2004a]	144	29%	12th
Lower bound per Endresen et al. [2004a]	140	31%	10th

Fuente: Considering alternative input parameters in an activity-based ship fuel consumption and emissions model: Reply to comment by Oyvind Endresen et al. on “Updated emissions from ocean shipping”. 2004

**Metodologías para el cálculo de las emisiones de los buques. Revisión de los factores de emisión.**

El estudio Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors. 2004, realizado por SMED (Swedish Methodology for Environmental Data) en colaboración con el IVL (Swedish Environmental Research Institute), el SCB (Statistic Sweden) y el SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) para buques > 100 GRT (Gross Register Tonnage) y con datos referidos solamente a Suecia.

Los parámetros utilizados para cada modo de operación de han obtenido de datos correspondientes al año 2002.

Los factores de emisión corresponden a datos tomados desde 1999 al 2001.

Para los motores fabricados antes de 1993, se ha considerado un 7 % más de consumo específico que a la asignada a los motores nuevos.

Se muestra en la tabla 93 los informes requeridos de emisiones de buques.

Tabla 93. Resumen del consumo de fuel estimado.

<i>"UNFCCC and IPCC guidelines"</i>
Fuel Combustion Activities (Table 1A, 3d Transport – "National Navigation")
Small Combustion in Agriculture, Forestry, Fishing (Table 1A, 4ciii – "National Fishing")
Memo Item, "International Marine Bunkers" <sup>b)</sup>
<i>"CLRTAP and CORINAIR guidelines"</i>
"National sea traffic" <sup>a)</sup> (SNAP code 080402) – Table 1 A 3d
"National Fishing" <sup>a)</sup> (SNAP code 080403)
"International sea traffic" <sup>a)</sup> (SNAP code 080404) – Table 1 A 3d i
"Inland Waterways" - "Sailing Boats with auxiliary engines" (SNAP code 080301-01)
"Inland Waterways" - "Motorboats / Workboats" (SNAP code 080301-02)
"Inland Waterways" - "Personal watercraft / leisure craft" (SNAP code 080301-03)
"Inland Waterways" - "Inland Goods Carrying vessels" (SNAP code 080301-03)

<sup>a)</sup> Refers to ships > 100 gross tonnes, at sea, in port or on inland waterways irrespective of flag.

<sup>b)</sup> Equivalent to International sea traffic in CORINAIR reporting i.e. for ships > 100 gross tonnes.

Fuente: Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors. 2004.

El consumo de combustible realizado por calderas, incineradores y grupos de emergencia son insignificantes respecto a los del motor propulsor o las de los motores auxiliares y se pueden despreciar.

Los ME y AE son clasificados atendiendo a su velocidad de giro (en términos de revoluciones por minuto -rpm-)en:

- Motores Rápidos (HSD): 60-300 rpm.
- Motores Semirrápidos (MSD): 300-1.000 rpm.
- Motores Lentos (SSD): 1.000-3.000 rpm.

SSD y MSD son los más comunes entre los motores propulsores y los MSD y HSD entre los motores auxiliares.

Los tipos de combustibles marinos analizados se describen a continuación. Los barcos consumen una variedad de combustibles clasificados por su viscosidad, variando desde los más ligeros (*Marine Destillates* -MD-) (1 a 50 cst) hasta los más pesados (*Residual Oils* -RO-) (55 a 810 cst)

Dentro de los destilados una segunda clasificación se realiza entre marine gas oils y marine diesel oils.

- Marine Gas Oils es un aceite destilado ligero y limpio que no contiene residual fuel oil.
- Marine diesel oil es un destilado mas pesado y que puede contener algo de residual fuel oil.

Los MDO son los más usados por los buques de pesca debido a que no disponen de mucho espacio para instalar los equipos de precalentamiento necesario para utilizar combustibles de alta viscosidad (RO).

El tipo de operación que realiza el buque afecta al consumo de combustible y por tanto a las emisiones. En general se pueden identificar tres tipos de modos operacionales en un buque:

- Crucero, con el ME al 80 % de la potencia instalada y donde el consumo de los AE no es significativo.
- Maniobra, donde el principal consumo de combustible es el del ME pero con peso relativo menor y muy variadas cargas.
- Puerto, con el ME parado y los AE al 50 % de la potencia instalada.

Se considera que los motores fabricados antes de 1993 tienen un consumo específico un 7% mayor que los actuales.

Los consumos específicos por tipo de motor, combustible usado y modo de operación datos año 2002, se muestran en las tablas siguientes:

Crucero, para motores principales:

Tabla 94. Modo de operación crucero.

<u>Engine</u> <u>type</u>	<u>Fuel</u> <u>type</u>	<u>Fuel cons.</u> <u>sfc</u>
SSD	MD	185
SSD	RO	195
MSD	MD	205
MSD	RO	215
HSD	MD	205
HSD	RO	215
GT	MD	300
GT	RO	305
ST	MD	300
ST	RO	305

Fuente: Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors. 2004.

Maniobra, para motores auxiliares:

Tabla 95. Modo de operación maniobra.

<b>Engine type</b>	<b>Fuel type</b>	<b>Fuel cons. sfc</b>
SSD	MD	204
SSD	RO	215
MSD	MD	226
MSD	RO	237
HSD	MD	226
HSD	RO	237
GT	MD	330
GT	RO	336
ST	MD	330
ST	RO	336

Fuente: Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors. 2004.

En puerto, para motores auxiliares:

Tabla 96. Modo de operación en puerto.

<b>Engine type</b>	<b>Fuel type</b>	<b>Fuel cons. sfc</b>
MSD	MD	217
MSD	RO	227
HSD	MD	217
HSD	RO	227

**NOTES:-**

Approximate levels of uncertainty with emission factors at 95% confidence level (for whole fleet).

= uncertainty ca 5-10%

= uncertainty ca 10-20%

Fuente: Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors. 2004.

El consumo específico por tipo de motor, combustible usado y para el modo de operación crucero se muestra en la tabla 97, con datos del año 2001.

Tabla 97. Modo de operación crucero para ME.

<b>Engine type</b>	<b>Fuel type</b>	<b>Fuel cons. sfc</b>
SSD	MD	185
SSD	RO	195
MSD	MD	205
MSD	RO	215
HSD	MD	205
HSD	RO	215
GT	MD	300
GT	RO	305
ST	MD	300
ST	RO	305

Approximate levels of uncertainty with emission factors at 95% confidence level (for whole fleet).

= uncertainty ca 5-10%

= uncertainty ca 10-20%

Fuente: Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors. 2004.

**Verificación de las emisiones estimadas.**

La Investigación de este documento está basada en realizar un cálculo de las emisiones según métodos de predicción y comprobar estos datos con los reales obtenidos en los buques: porta-contenedores de 6.600 TEU (Sine Maersk), construido en 1998, y en un buque de transporte de graneles secos (New Spirit) construido el año 2002 de 26.562 GT y un DWT de 48.183 t. Ambos resultados están bastante de acuerdo.

Las fuentes de información de "Verification of ship emission estimates with monitoring measurements to improve inventory and modelling. 2004" son:

*Starcrest Consulting Group LLC et al., 2004.* Base de datos relativa a operaciones realizadas por buques en la Bahía de San Pedro (California).

ISO, Reciprocating Internal Combustion Engines -- Exhaust Emission Measurement -- Part 4: Test Cycles for Different Engine Applications, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1996.

Lloyd's Register (1993). Marine Exhaust Emissions Research Programme: Phase II Transient Emission Trials. Lloyd's Register Engineering Services, London. Clasificación de los motores marinos.

El mejor método para el cálculo de consumo de combustible se basa en 4 pasos:

- Paso 1: Identificar los buques a introducir en el modelo y el número y tipo de máquinas en servicio.
- Paso 2: Estimar las horas de servicio de las máquinas por viaje o en cada parte del viaje.
- Paso 3: Determinar los perfiles de carga en los motores, incluyendo potencia y ciclo de actividad.
- Paso 4: En función de las combinaciones de tipos de motores y de combustibles aplicar a los datos anteriores los consumos específicos de combustible para el cálculo de consumo total de combustible.

Para mejorar la exactitud de la estimación de consumos es importante el buscar al máximo detalle la velocidad del buque, la carga de los motores principales y auxiliares para cada etapa del ciclo de actividad así como la duración de cada una de estas.

Varios estudios demuestran que los buques operan un 70 % del tiempo a menos de 400 Km. de tierra.

La fórmula utilizada para calcular el consumo de combustible se muestra a continuación.

$$\text{Fuel Consumption}_{\text{metric tonnes per year}} = \sum P_{MW} \cdot F_{\%MCR} \cdot t_{\text{hrs/yr}} \cdot SFOC_{\text{g/kWh}} \cdot \frac{1}{1000} \quad [51]$$

$P_{MW}$  is accumulated installed engine power for each subgroup

$F_{\%MCR}$  is engine load factor based on duty cycle profile

$t_{\text{hrs/yr}}$  is average engine running hours for each subgroup

$SFOC_{\text{g/kWh}}$  is the power-based specific fuel oil consumption

Los movimientos de los dos buques antes citados, con fechas de llegada y salida a la región de la bahía de San Pedro, velocidades según Lloyd's, velocidades en la zona de control de aire así como la distancia recorrida en esta zona, se muestran en la tabla 95.

Tabla 98. Resumen de los buques analizados.

Activity Date (Arrival or Departure)	Vessel Name	Weighted Avg. Actual Speed in AQCZ (knots) A	Lloyd's Service Speed (knots) B	Actual-to- Service Speed Ratio C = A/B	Actual Distance in AQCZ (nmi) D	Time in AQCZ (hours) E = D/A
25-Mar-02	Sine Maersk <sup>1</sup>	12.00	25	0.48	21.5	1.79
28-Apr-02	New Spirit	12.34	14.5	0.85	21.75	1.76
7-May-02	New Spirit	14.19	14.5	0.98	21.5	1.51
21-Jun-02	Sine Maersk	12.22	25	0.49	21.75	1.78
24-Jun-02	Sine Maersk	11.95	25	0.48	21.5	1.80
21-Sep-02	Sine Maersk	13.34	25	0.53	21.75	1.63
24-Sep-02	Sine Maersk	12.49	25	0.50	21.5	1.72
4-Jan-03	Sine Maersk	16.36	25	0.65	21.75	1.33
10-Jan-03	Sine Maersk	11.69	25	0.47	21.5	1.84
12-Apr-03	Sine Maersk	8.65	25	0.35	21.5	2.49
14-Apr-03	Sine Maersk	11.30	25	0.45	21.5	1.90
31-May-03	New Spirit	13.55	14.5	0.93	21.5	1.59
01-Jun-03	New Spirit	13.78	14.5	0.95	21.75	1.58
09-Aug-03	Sine Maersk	19.06	25	0.76	21.5	1.13
11-Aug-03	Sine Maersk	18.99	25	0.76	21.5	1.13
08-Nov-03	Sine Maersk	18.00	25	0.72	21.5	1.19
10-Nov-03	Sine Maersk	19.46	25	0.78	21.5	1.11
14-Dec-03	New Spirit	11.83	14.5	0.82	21.5	1.82
23-Dec-03	New Spirit	13.34	14.5	0.92	21.75	1.63
07-Feb-04	Sine Maersk	11.59	25	0.46	21.5	1.86
09-Feb-04	Sine Maersk	12.10	25	0.48	21.5	1.78
08-May-04	Sine Maersk	16.67	25	0.67	21.5	1.29
10-May-04	Sine Maersk	14.63	25	0.59	21.5	1.47

1. Data for the arrival of this vessel was incomplete and is not included in this analysis.

Fuente: Verification of ship emission estimates with monitoring measurements to improve inventory and modelling. 2004

La determinación de los perfiles de carga del motor. Los perfiles de carga del motor son un conjunto de factores de carga que corresponden a diferentes velocidades del motor (y que corresponden a velocidades del buque, para los motores principales). Para la velocidad de crucero el factor de carga del motor es alrededor del 80 % del MCR (potencia disponible navegando a la máxima velocidad de crucero), para mejorar el consumo de combustible y reducir los costes de mantenimiento. De acuerdo a los tests realizados al Sine Maersk, el buque puede tener una velocidad de crucero cercana al 80 % del MCR, cuando el factor de carga del motor era aproximadamente del 85 %, y además, el modelo esta en consonancia con los datos tomados de típicas operaciones realizadas por los buques en la Bahía de San Pedro (California).

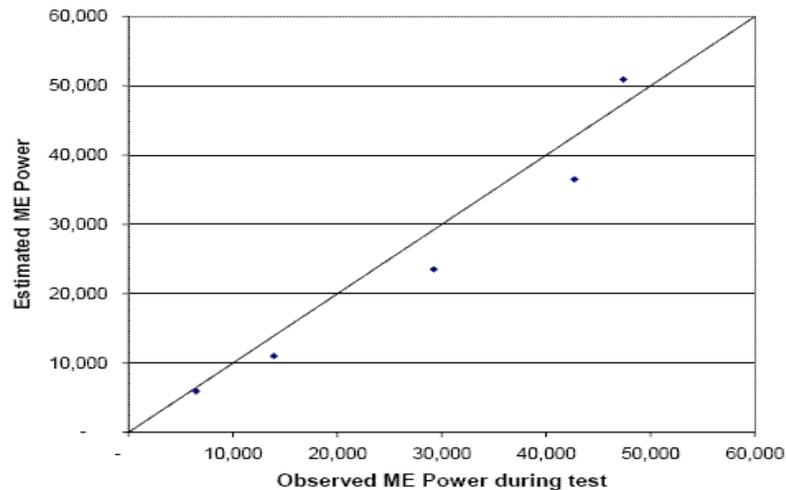
Basado en velocidad observada del buque, el New Spirit cuando estaba operando a 9,7 nudos (67 % del ratio de velocidad) el factor de carga del motor, de acuerdo a la ley del cubo de la hélice, sería del 30 %.

Muchos estudios han aplicado los estándares ISO para ciclos completos de motores marinos, los datos de la flota sugieren que, por término medio, los motores principales no pueden operar de acuerdo a estos perfiles. Así, el perfil de carga para buques considerando sólo la parte del viaje dentro del Programa VSR, no se ajustaría a los ciclos de carga ISO, para estos análisis el perfil de carga desarrollado a partir del modelo VSR era el usado.

Los factores de carga para velocidades lentas son estimados usando la *ley del cubo de la hélice*, según la cual existe una relación cúbica entre el cambio de la velocidad del buque y la potencia de propulsión. Esta relación es aproximada y varía de un buque a otro.

En la figura 26, para el buque Sine Maersk, esta ley predice menos potencia que la observada para la mayoría de las cargas. La figura resume la comparación entre los datos observados de la potencia del motor principal y la estimada de acuerdo a la *ley del cubo de la hélice*.

Figura 26. Relación entre datos observados y estimados.



Fuente: Verification of ship emission estimates with monitoring measurements to improve inventory and modelling. 2004

A continuación se muestra el resumen de consumo de energía y potencias estimadas en la navegación de crucero y en la zona de control de aire.

Tabla 99. Resumen reconsumo de energía y potencia estimada.

Activity Date (Arrival or Departure)	Vessel Name	Actual-to-Service Speed Ratio	Load Factor	Lloyd's ME Power (KW)	Full-cruise ME Power (kW)	Composite ME Power (kWh)
		F (see Table 1)	$G = F^3$	H	$I = 0.80 * H$	$J = E * G * I$
25-Mar-02	Sine Maersk	0.48	0.11	54,840	43,872	8,691
28-Apr-02	New Spirit	0.85	0.62	6,708	5,366	5,826
7-May-02	New Spirit	0.98	0.94	6,708	5,366	7,625
21-Jun-02	Sine Maersk	0.49	0.12	54,840	43,872	9,115
24-Jun-02	Sine Maersk	0.48	0.11	54,840	43,872	8,622
21-Sep-02	Sine Maersk	0.53	0.15	54,840	43,872	10,862
24-Sep-02	Sine Maersk	0.50	0.12	54,840	43,872	9,417
4-Jan-03	Sine Maersk	0.65	0.28	54,840	43,872	16,349
10-Jan-03	Sine Maersk	0.47	0.10	54,840	43,872	8,247
12-Apr-03	Sine Maersk	0.35	0.04	54,840	43,872	4,518
14-Apr-03	Sine Maersk	0.45	0.09	54,840	43,872	7,708
31-May-03	New Spirit	0.93	0.82	6,708	5,366	6,950
01-Jun-03	New Spirit	0.95	0.86	6,708	5,366	7,266
09-Aug-03	Sine Maersk	0.76	0.44	54,840	43,872	21,924
11-Aug-03	Sine Maersk	0.76	0.44	54,840	43,872	21,779
08-Nov-03	Sine Maersk	0.72	0.37	54,840	43,872	19,567
10-Nov-03	Sine Maersk	0.78	0.47	54,840	43,872	22,854
14-Dec-03	New Spirit	0.82	0.54	6,708	5,366	5,294
23-Dec-03	New Spirit	0.92	0.78	6,708	5,366	6,813
07-Feb-04	Sine Maersk	0.46	0.10	54,840	43,872	8,104
09-Feb-04	Sine Maersk	0.48	0.11	54,840	43,872	8,838
08-May-04	Sine Maersk	0.67	0.30	54,840	43,872	16,777
10-May-04	Sine Maersk	0.59	0.20	54,840	43,872	12,919

Fuente: Verification of ship emission estimates with monitoring measurements to improve inventory and modelling. 2004

### MEERI 2.005. Calculation system for the Finnish waterborne traffic emissions. 2006.

MEERI 2005 es un subprograma del sistema de cálculo LIPASTO 2005, para el cálculo de las emisiones en aguas costeras finlandesas incluidas aguas interiores.

El sistema de cálculo incluye los siguientes tráficos: Internacional visitando puertos finlandeses dentro de la zona económica de Finlandia, Esto quiere decir la distancia recorrida hacia y desde el punto Sur de Aland (punto de cruce en el Mar Báltico para Finlandia, Estonia y Suecia) hasta el puerto, el tráfico local y el de aguas interiores, de barcos de recreo y pesca y el de rompehielos. No están incluidos los buques de guerra de la armada finlandesa.

La fuente principal de información del estudio es *Exhaust Gas Emissions from Sea Transportation. Stockholm 1993. Swedish Transport Research Board, Alexanderson A., Flodström E., Öberg R. & Stålberg P.* Estudio sobre los días de estancia en puerto de los buques y diseño del cálculo de las emisiones.

En este documento de desarrolla la siguiente fórmula de cálculo del consumo de combustible que es la misma usada en otros modelos: [52]

$$E_{v,y} = \sum_{i=1}^9 \sum_{m=1}^7 \sum_{z=1}^3 \sum_{y=1}^7 \left( \frac{S_{i,m,x,f,y} d_{v,i,m,f,y} P_{i,z,m} E_o}{f_{i,m}} e_{i,m,v,g,z} + S_{i,m,x,y} P_{i,z,m} E_o t_{i,m,v,g,z} \right) \quad (1)$$

where

- E is total emissions
- S is number of ships
- d is distance travelled (from previous port visit)
- e is the emission factor

and where

- l is type of ship
- m is gross register ton class
- x is port
- o is operation area
- z is engine type
- p is engine power class
- g is engine load
- f is speed class
- t is time used for manoeuvre and berthing
- y is calculation year
- v is compound

Este estudio considera un tiempo de 20 minutos para cada una de las operaciones de entrada o salida durante las cuales el Motor Principal está a una potencia del 20 % del nominal y los motores auxiliares a un 80% de la potencia nominal, considera que durante la estancia en puerto la carga de motores auxiliares es de un 60% excepto para los buques de la clase VII que supone un 80%, la duración entre 13 y 43 horas según tamaño y tipo de buque y un tiempo de 7 horas en puerto para los buques de pasaje.

### Las Emisiones de los buques Zona europea

En el estudio “SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005” sólo se han considerado buques comerciales más de 500 GT (unos 31.000 en todo el mundo).

Además, considera que un buque que arriba a un puerto al menos cada 8 semanas, pertenece a un servicio de línea regular y se centra en la flota europea.

Las fuentes de datos principales son:

- Lloyd’s Maritime Information System (LMIS)), The Lloyd’s Maritime Database [CD-ROM], Lloyd’s Register-Fairplay Ltd., London. Base de datos relativa a los movimientos de los buques.
- Lloyd’s Maritime Intelligence Unit (LMIU), The Lloyd’s Maritime Database [CD-ROM], Lloyd’s Register-Fairplay Ltd., London. Base de datos relativa a las características de los buques.

El documento, partiendo de los datos del *Lloyd’s Register-Fairplay* , obtiene una media de 1,4 motores principales (ME) por buque y de 3,5 auxiliares (AE) instalados, asumiendo para este estudio 1 ME y 4 AE para la realización de este estudio.

Para los fines de este estudio divide la flota de buques en pequeños, medianos y grandes en función de la potencia instalada tanto de motores principales como auxiliares.

El estudio realiza una clasificación en tres categorías de los distintos tipos de motores principales existentes en la flota de bandera europea. Para cada tipo se considera una potencia media y aplica esta clasificación para obtener un perfil tanto de la flota europea como la mundial.

Tabla 100. Clasificación de los tipos de motores principales.

	Small	Medium	Large
Class boundaries ME kW rating (kW)	ME < 6,000 kW	6,000 kW <= ME < 15,000 kW	15,000 kW = < ME
Upper and low engine sizes in each range (kW)	75-6,000	6,000-15,000	15,000-146,618
Representative engine size used in calculations (kW)	3,000	10,000	25,000
Fraction of ships using SSD 2-stroke engines	48%	58%	55%
<b>EU-flagged fleet &gt;500GT</b>			
Fraction of EU-flagged ships falling into the ME categories	55%	35%	10%
Fraction of total EU-flagged fleet installed capacity	20%	45%	35%
<b>World fleet &gt;500GT</b>			
Fraction of world fleet ships falling into the ME categories	60%	30%	10%

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

A continuación realiza la clasificación en tres categorías de los distintos tipos de motores auxiliares existentes en la flota de bandera europea. Para cada tipo se considera una potencia media y aplica esta clasificación para obtener un perfil de la flota europea.

Tabla 101. Clasificación de los tipos de motores auxiliares.

	Small	Medium	Large
Class boundaries AE kW rating (kW)	AE < 1,000 kW	1,000 kW <= AE < 2,000 kW	2,000 kW = < AE
Representative installed engine capacity used in calculations (kW)	530	1,470	3,780
Upper and low engine capacity in each range (kW)	4-1,000	1,000-2,000	2,000-18,667
Fraction of EU-flagged ships falling into the AE categories	33%	33%	33%
Fraction of total EU-flagged fleet installed AE capacity	10%	25%	65%

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

En la tabla 102 se muestra la distribución de la potencia de un buque entre los motores principales y auxiliares para los tres tamaños de buques considerados en este estudio.

Tabla 102. Distribución de la potencia de un buque entre motores.

Table 2.4 Proportion of installed capacity represented by MEs and AEs

	Small	Medium	Large
Fraction of ME installed capacity of total ship's installed capacity (%)	84%	88%	91%
Fraction of AE installed capacity of total ship's installed capacity (%)	16%	12%	9%
Total installed capacity (%)	100%	100%	100%

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

Los factores de carga de los motores principales y auxiliares en función de la etapa del ciclo de actividad del buque (navegación, maniobras, atraques), se representan en la tabla 103.

Tabla 103. Factores de carga por modo de operación.

Table 2.5 Main and Auxiliary Engine Load Factors

	ME		AE	
	Load factor (%)	Operation (% of time)	Load factor (%)	Operation (% of time)
At sea	80%	100%	30%	100%
Ships at berth	20%	5% (Note 1)	40%	100%
Manoeuvring	20%	100%	50%	100%

Note 1: This assumption underestimates the emissions for tankers at berth since tankers operate MEs at higher operating times.

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

Los tiempos (horas/año) de operación para las distintas etapas de actividad de un buque: navegación, maniobra, atraque y sin actividad, empleadas en este estudio, se muestran en la tabla 104.

Tabla 104. Horas por modo de operación.

	Average operating hours of engines (hours/year)
Time at Sea	6,000
Time at Berth	700
Time Manoeuvring	20
Total Operating Time	6,720
Not Operating (no relevant load factors on engines) (refurbishment etc. )	2,040
Total hours per year	8,760

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

La potencia usada (kWh/año) del motor principal por buque, tamaño del motor, etapa de actividad y año se calcula como la multiplicación de los datos de la Tabla 100, 102 y 103. (Tabla 2.2 x Tabla 2.5 x Tabla 2.6).

Tabla 105. . Potencia usada (kWh/año) del motor principal por buque.

	Small	Medium	Large
	(kWh/year)	(kWh/year)	(kWh/year)
At sea	14,400,000	48,000,000	120,000,000
At berth	21,000	70,000	175,000
Manoeuvring	12,000	40,000	100,000
Total Power Use	14,433,000	48,110,000	120,275,000

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

La potencia usada (kwh/año) de los motores auxiliares por buque, tamaño del motor, etapa de actividad y año, se calcula como la multiplicación de los datos de la Tabla 101, 102 y 103 (Tabla 2.3 x Tabla 2.5 x Tabla 2.6).

Tabla 106. . Potencia usada (kWh/año) del motor auxiliar por buque.

	Small	Medium	Large
	(kWh/year)	(kWh/year)	(kWh/year)
At sea	4-252,000 = 1,008,000	4-666,000 = 2,664,000	4-1,710,000 = 6,840,000
At berth	4-39,200 = 156,800	4-103,600 = 414,400	4-266,000 = 1,064,000
Manoeuvring	4-1,400 = 5,600	4-3,700 = 14,800	4-9,500 = 38,000
Total Power Use	4-292,600 = 1,170,400	4-773,300 = 3,093,200	4-1,985,500 = 7,942,000

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

La potencia total usada (kwh/año) por buque tamaño del motor, etapa de actividad y año, se calcula como la suma de las tablas anteriores (tablas 105 y 106).

Tabla 107. Potencia total usada (kWh/año) por buque.

	Vessel Size		
	Small	Medium	Large
	(kWh/year)	(kWh/year)	(kWh/year)
At sea	15,408,000	50,664,000	126,840,000
At berth	177,800	484,400	1,239,000
Manoeuvring	17,600	54,800	138,000
Total Power Use	15,603,400	51,203,200	128,217,000

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

Tabla 108. Consumos específicos de motores principales y auxiliares.

	sfc (g/kWh)
Shore-side Electricity Report - auxiliary engines using 0.1% sulphur MD	217
Shore-side Electricity Report - auxiliary engines using 2.7% sulphur RO	227
NOx Abatement and Sea Water Scrubbing Reports – Both main and auxiliary engines using a mix of RO and MD	200
NOx Abatement and Sea Water Scrubbing Reports – Ships using MD	196

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

Tabla 109. Consumo anual de motores auxiliares para buques en la etapa de actividad atracado y por tamaño.

	Small (t/year/vessel)	Medium (t/year/vessel)	Large (t/year/vessel)
Fuel consumption by AEs at berth	32	89	230

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

Tabla 110. Consumo anual de los buques, por etapa de actividad y por tamaño.

	Small (t/year)	Medium (t/year)	Large (t/year)
At sea	3,082	10,133	25,368
At berth	40	110	281
Manoeuvring	4	12	31
Total fuel consumption per year	3,126	10,255	25,680

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

Tabla 111. Tiempo de estancia del buque atracado por año y tiempo de este funcionando los motores auxiliares, así como reducción posible utilizando corriente de tierra.

	Average
Berth: Berth utilisation (% of year)	70%
Berth: Hours per year (hours/year)	$24 \cdot 365 \cdot 0.7 = 6,130$
Ship: Time at berth using AE (hours per year per ship)	700
Ship: Average number of converted ships needed per berth (-)	$6,130/700 = 8.76$
Shore-side electricity system usage at berth (hours/year)	6,130

Fuente: SERVICE CONTRACT ON SHIP EMISSIONS: Assignment, Abatement and Market-based Instruments. ENTEC Agosto de 2005.

### Influencia de otros factores sobre el consumo de combustible.

En el estudio Testing and extrapolation methods, propulsion, performance, predicting powering margins. International Towing Tank. Recommended procedures and guidelines. ITTC. 2.005, se dan una serie de recomendaciones de cuanto potencia de margen debe ser instalada en un buque para obtener la velocidad requerida en

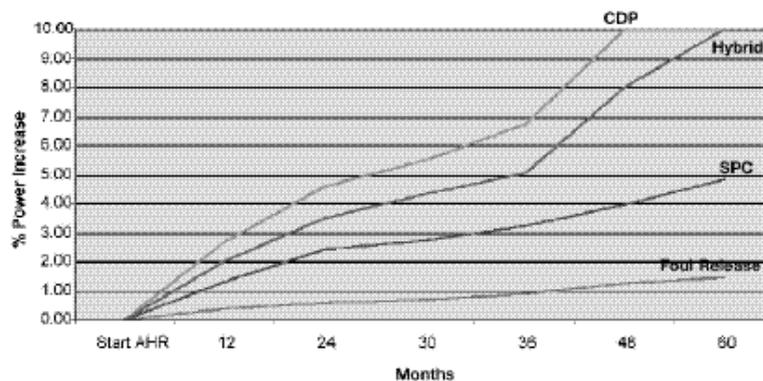
condiciones reales de navegación, es decir, para compensar el efecto de: las olas, el viento, aguas poco profundas, el timón y de la temperatura del aire y del agua así como de los efectos de la edad y de la rugosidad del casco y la hélice (*Powering margin*), así como para operar en condiciones económicas (*Engine operation margin*) y que consideraciones hay que realizar en el diseño de la hélice para absorber el 100% de la potencia del motor en condiciones futuras de servicio (*Light running margin*).

Las fuentes de información del estudio son:

- *ISO Standard 15016*. Procedimiento para el análisis de los datos relativos a pruebas de velocidad, los efectos de las olas, y del viento, en la resistencia al avance.
- *ITTC Procedure 7.5-04-01-1.2*. Procedimiento para el análisis de los datos relativos a pruebas de velocidad y el efecto del viento.
- *ITTC Procedure 7.5-02-07-02.2*. Procedimiento para considerar los efectos de las olas en la resistencia al avance.
- *The International Marine Coatings Hull Roughness Penalty Calculator*. Programa informático para el cálculo de la influencia de la rugosidad del casco del buque en la velocidad.
- Townsin, R.L., 2003, "The Ship Hull Fouling Penalty", International Marine Coatings.

En la figura siguiente se muestra el incremento de la potencia (%) en función del tiempo (meses) desde el diqueado para diferentes tipos de pinturas anti-suciedad del casco en un buque rápido (tipo porta-contenedores).

Figura 27. Incremento de la potencia (%) en función del tiempo (meses) desde el diqueado para diferentes tipos de pinturas anti-suciedad del casco en un buque rápido (tipo porta-contenedores).



Fuente: Testing and extrapolation methods, propulsion, performance, predicting powering margins. International Towing Tank. Recommended procedures and guidelines. ITTC. 2.005.

La estimación de los márgenes de potencia recomendados por los principales fabricantes de motores marinos son:

- Powering margin: 15 a 25 % de la MCR especificada (*maximum continuous rated power*, potencia máxima continua navegando a la máxima velocidad de crucero).
- Engine operation margin: 10 a 15 % de la MCR especificada
- Light running margin: 5 a 7 % de la MCR especificada.

### 5.3.2 Otras metodologías para las naves de mercancías

En otros proyectos como el EcoTransIT (sobre el transporte marítimo fluvial) lo que se proporciona es una tabla de consumo de energía según la carga del buque y tipo de la vía de navegación (río, canal, aguas arriba, aguas abajo, etc.) y una simplificación para los consumos de energía agrupando las clasificaciones anteriores. Las emisiones contaminantes también son agregadas en una tabla para todo tipo de buques de transporte fluvial y diferenciando por el factor de emisión contaminante.

#### Naves marítimas:

El proyecto EcoTransIT distingue tres categorías de naves marítimas, en función del tamaño y de la capacidad de utilización. Así el consumo de energía específica y de las emisiones resultantes para cada tipo de nave según /Borken 1999/es:

- Recipientes, Ro-Ro-recipiente y naves contenedores generales de carga: estos recipientes tienen una capacidad de carga 9.000 t a 23.000 t y funcionan más o menos en capacidad completa en todos los viajes. Los Ro-Ro-recipientes se emplean para los viajes cortos del transbordador.
- Recipientes de carga a granel: éstos tienen una capacidad de carga media de alrededor 40.000 t; funcionan a menudo en la capacidad completa unidireccional y de vuelta vacía.
- Petroleros: los petroleros se utilizan para el transporte del petróleo y tienen generalmente una capacidad de carga de 50.000 t a 200.000 T. Funcionan generalmente en capacidad cero o completa.

#### Resultados de las naves marítimas. Factores de emisión y consumo de energía de las naves marítimas

Para determinar el consumo de energía y emisiones del transporte de mar, en el Borken 1999 se analizaron diversas fuentes internacionales. Con respecto al consumo de energía de diversos tipos de naves, las gamas que fueron obtenidas son las que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 112. El consumo de energía (petróleo crudo) del mar:

Tipo de barco	g/tkm
Buque de carga general	3,8 - 9,6
Buque de carga a granel	2,2 - 4,9
Petroleros	0,7 - 2,6

Fuente: Borken 1999 (diversos estudios internacionales)

El *consumo de energía* para los tipos de naves en función de la carga específica se da en la siguiente tabla.

Tabla 113. Consumo de energía (petróleo crudo) para tres tipos de carga específica.

Tipo de barco/carga específica	g/tkm
Carga a granel	2
Carga media	4
Carga de volumen	7

Fuente: IFEU-Valoración basada en Borken 1999 (diversos estudios internacionales)

Los factores de la emisión también se toman de Borken 1999. Se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 114. Factores de emisión para las naves marítimas

g/Kg	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NMHC	PM <sub>dir</sub>
Barco marítimo	3.185	84	80	2,4	6,1

Fuente: Borken 1999 (diversos estudios internacionales)

### El método de la asignación para los Ferry

Para aplicar un método de cálculo en los ferry, es necesario asignar valores distintos en función del tipo de carga y su capacidad, ya que el ferry lleva tanto pasajeros como mercancías y resulta muy difícil asignar un consumo sin tener en cuenta esta característica.

Existen diversas metodologías de asignación por ejemplo, Kristensen 2000 o Kusche 2000.

Para EcoTransIT utilizamos el método de la asignación que ha sido sugerido para el modelo del cálculo de NTM por el Bäckström 2003. Este método asigna según número de cubiertas en ferry. El número de las cubiertas del pasajero y del vehículo se considera en el primer paso de la asignación. Debe también considerarse si estas cubiertas se utilizan solamente de forma parcial para ciertas categorías del vehículo o si se extienden sobre el total de la nave. El segundo paso de la asignación divide la longitud de los carriles (lanemeters) ocupados por los vehículos considerados por la longitud total de los carriles ocupados.

Los valores medios siguientes se han calculado según este método por el ejemplo concreto del Scanlines Ferry:

- Camión (30 toneladas gruesas) 27 g/bruto-toneladas-km
- Railcar (46 toneladas gruesas) 22 g/bruto-toneladas-km

Estos valores se toman y se distinguen según tipos del vehículo y la clase media. Los valores específicos de la energía que resultan se resumen en la tabla siguiente.

Tabla 115. El consumo de energía para la carga específica para ferry.

g/tkm	Tren	Camión<7,5t	Camión<28t	Camión<40t
Carga a granel	37	75	63	49
Carga media	45	87	72	55
Carga de volumen	56	139	112	79

Fuente: Bäckström 2003, IFEU-asunciones IFEU Heidelberg 2005

Estos valores representan un ejemplo del ferry y son derivados por un método concreto de asignación. Son indicativos y pueden variar mucho de un ferry a otro en función de las compañías.

### Resultados del Ferry

Los ferry funcionan casi exclusivamente con los motores a velocidad media y funcionan generalmente con aceite de gas/gasoil marina.

En EcoTransIT utilizan los valores de NTM. Según el Bäckström 2003, el contenido del sulfuro en Suecia es alrededor 0.5-1%. Este combustible, sin embargo, tiene comúnmente un contenido del sulfuro de el hasta 3%. Por lo tanto se utiliza un valor medio de 1.5%.

Tabla 116. Factores de emisión de los ferry

g/Kg	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NMHC	PM <sub>dir</sub>
Transbordadores (ferry)	3.100	70	30	0,98	2

Fuente: NTM, valoración para la SO<sub>2</sub> IFEU Heidelberg 2005

### Naves de Transporte fluvial

En cuanto al segundo medio de transporte, el transporte fluvial, el consumo de energía y las emisiones de los recipientes de la navegación interior dependen de parámetros tales como tamaño (capacidad) de la carga, energía del motor, motor tecnología y utilización del motor. Éstos correlacionan con la edad de la nave, del coeficiente de carga y de las condiciones de la corriente. Para un análisis detallado, por lo menos los factores principales deben ser considerados, que son tamaño de la nave, coeficiente de carga y condiciones de la corriente.

Los valores de la energía para el transporte interior de la nave están disponibles para diversas clases de las naves y diversas operaciones como contra la corriente/río abajo, de flujo libre/con las esclusas.

La tabla siguiente se deriva de una investigación de IFEU basada en diversas fuentes nacionales e internacionales (Borken 1999).

Tabla 117. Consumo de energía de las naves interiores en función de la condición de la operación y de flujo libre o con las esclusas.

Condición de la operación		Corriente libre		Con esclusas	
Tipo de nave (carga explosiva)		Río Arriba	Río abajo	Río Arriba	Río abajo
<b>Barco Lleno</b>					
800 t	g/km	2740	7072	3442	4683
1250t	g/km	3770	9718	4754	6463
1750t	g/km	4871	12551	6112	8336
2500t	g/km	5643	14465	7072	9624
<b>Factor de carga 50%</b>					
800 t	g/km	7,7	20,1	9,4	12,9
1250t	g/km	6,8	17,8	8,2	11,2
1750t	g/km	6,3	16,4	7,5	10,3
2500t	g/km	5,2	13,1	6,1	8,4
<b>Factor de carga 100%</b>					
800 t	g/km	4,4	11,7	4,9	7,0
1250t	g/km	4,0	10,3	4,4	6,1
1750t	g/km	3,7	9,4	4,0	5,6
2500t	g/km	3,0	7,7	3,3	4,7

Fuente: Borken 1999 basó en diversas fuentes internacionales IFEU Heidelberg 2005

Para EcoTRANSIT, los valores específicos de la energía, que se requieren para una nave media en las tres condiciones de funcionamiento (ninguna corriente, por aguas arriba y en sentido descendiente), así como para los tres tipos de carga, deben ser considerados con las tres asunciones siguientes:

- para una nave típica, se utiliza un recipiente del tipo de Europa con una capacidad de carga de la carga de hasta 1.250 t.
- para las condiciones de funcionamiento “contra la corriente” y “río abajo”, se utilizan los valores medios respectivos para de flujo libre y la presa regulada/con condiciones de las esclusas.
- para los arroyos no-que fluyen, se utiliza el valor medio de las condiciones reguladas, por aguas arriba y en sentido descendiente de la presa.

Al distinguir entre los tres tipos de carga con respecto al consumo de energía, debe considerarse que los viajes vacíos están hechos generalmente contra el curso del transporte real: un viaje de vuelta vacío que sigue un transporte contra la corriente por lo tanto será en sentido descendiente.

En los cálculos de los consumos de energía, esto se considera asignando a la pieza vacía asumida del viaje un valor del consumo de energía según el contador-dirección. Los valores del consumo así determinado se enumeran en la tabla siguiente.

Tabla 118. Valores del consumo de energía para la navegación interior

g/tkm	Río arriba	Río abajo	Sin corriente
Carga a granel	9,6	7	7,2
Carga media	13,6	8,2	9,6
Carga de volumen	22,9	12,6	15,8

Fuente: Borken 1999, IFEU-asunciones IFEU Heidelberg 2005

**Resultados de los factores de emisión para la navegación interior**

Los factores de la emisión para las naves interiores fueron tomados de Borken 1999 y se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 119. Factores de la emisión para las naves interiores

g/Kg	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NMHC	PM <sub>dir</sub>
Barcos fluviales	3175	60	*	4,7	1,7

\* las mismas asunciones que para el ferrocarril

Fuente: Borken 1999 IFEU Heidelberg 2005

### 5.3.3 Conclusiones del modo de transporte marítimo.

Para el modo de transporte por marítimo se han descrito dos metodologías: una detallada y otra simplificada, con independencia de la actividad del barco.

Cada viaje se puede clasificar en tres fases básicas, cruzando entre los puertos, maniobrando en el área del puerto, y atracando en el área de embarque.

La metodología más detallada se ha desarrollado para considerar las operaciones transitorias, el cargamento y el descargar portuario y generación de la potencia auxiliar, para así proporcionar una estimación de las emisiones de las naves cruzando entre puertos y en el puerto.

La metodología simplificada se ha desarrollado para cuando las actividades del área de embarque son poco importantes o cuando la información sobre actividades del puerto no está disponible.

El principio usado en ambos métodos es calcular el consumo de energía asociada a una actividad definida y las emisiones del agente contaminador de la estimación usando factores específicos de la emisión del combustible. La información básica sobre factores de consumo y de emisión de combustible se deriva de una revisión extensa de la literatura (EPA, IMO, CONCAWE, Lloyd Registro y organizaciones que funcionan en actividades marítimas tales como Marintek y Mariterm).

Los datos que resultan han sido analizados para proporcionar un sistema coherente de tarifas de consumo y de emisión.

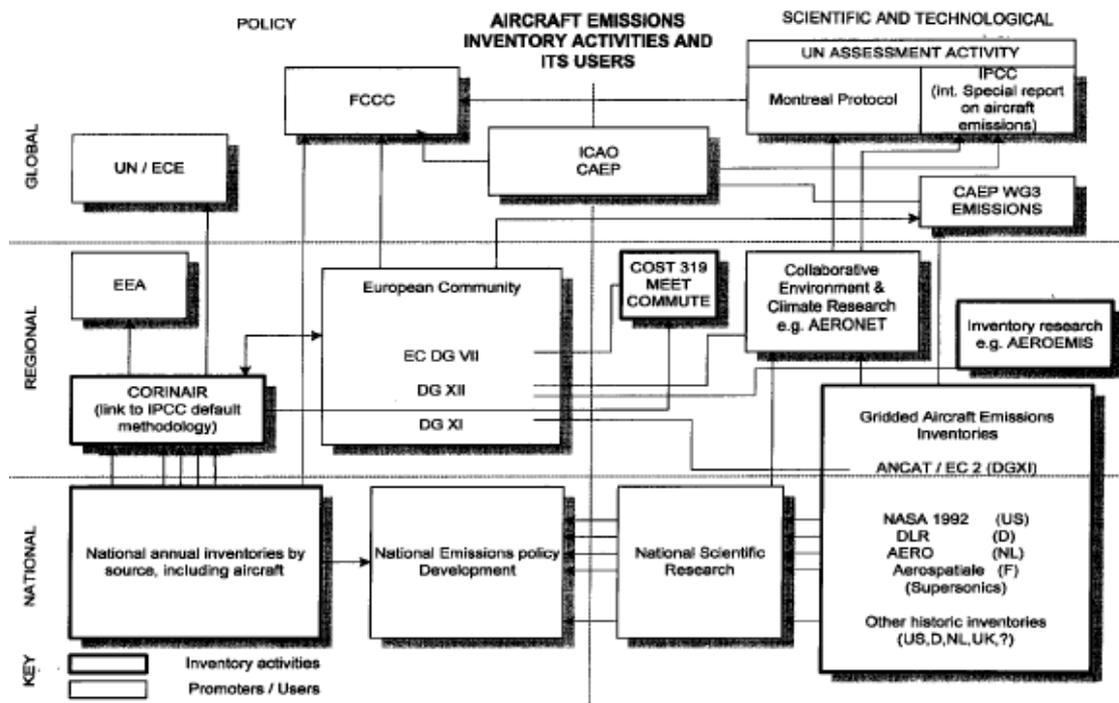
Por otro lado el proyecto Meet no menciona el transporte fluvial el cual se recoge en el proyecto EcotransIT, para las naves de navegación interior que transportan mercancías.

## 5.4. Modo de transporte aéreo

En la Acción Cost 319 se describen todas las instituciones Europeas que están trabajando en esta área. Estas instituciones están recogiendo datos del tráfico y de la emisión y están generando inventarios de la emisión, y determinando sus efectos.

El cuadro siguiente muestra imagen simplificada de quién, porqué y qué están haciendo a nivel europeo. Existen muchos trabajos los cuales a veces utilizan bases de datos y metodologías distintas que normalmente llevan a resultados que no pueden ser comparados entre sí. Las actividades europeas más importantes en este campo (AERO, AERONET, ANCAT, actividades de la EEA, MEET, CONMUTE y EcoTRANSIT) se describen a continuación.

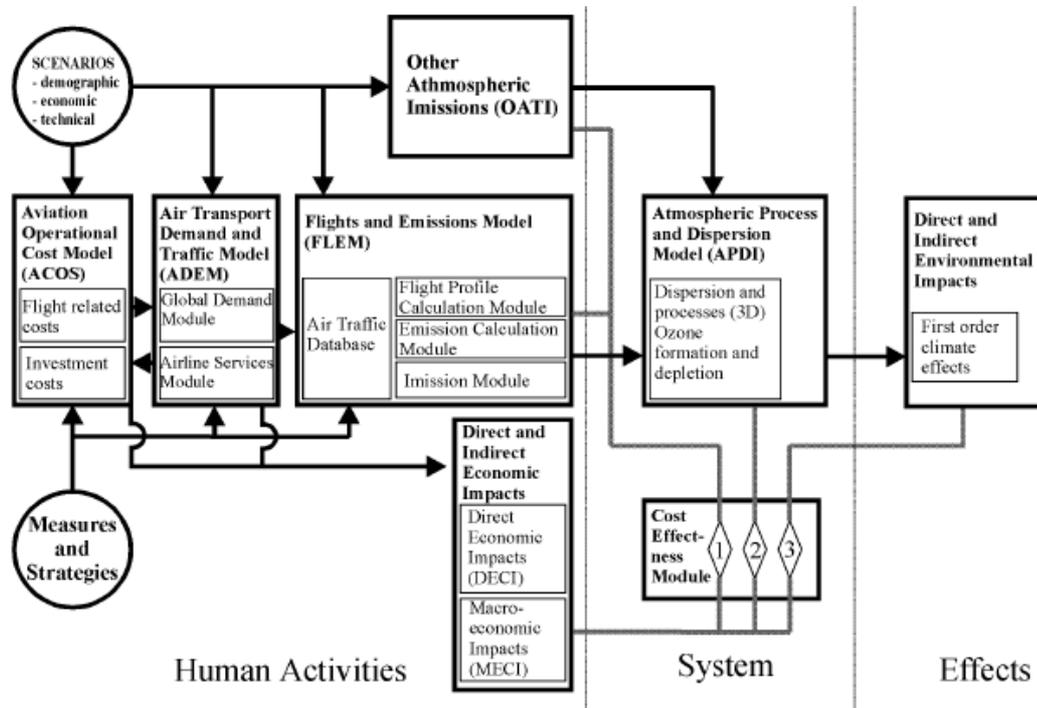
Figura 28. Las actividades Europeas relacionadas con las emisiones del tráfico aéreo.



Fuente: Action Cost 319 Final Report, 1999

En primer lugar el proyecto AERO (las emisiones de la aviación y evaluación de las opciones de la reducción) comienza en 1993 en el departamento de los Países Bajos de aviación civil (RLD). Un consorcio de cuatro socios, de RLD, de análisis del recurso (RA, Delft), de consulta de MVA (Londres, Reino Unido) y del laboratorio aeroespacial nacional (NLR, Amsterdam) apuntan a determinar el alcance de los problemas ambientales que se relacionaron con el tráfico aéreo y encontrar una estrategia para reducir el impacto en la atmósfera. Se está desarrollando un modelo que permite investigar medidas de política posibles y determinar sus impactos en el ambiente así como en la economía [DG de la aviación civil, 1998].

Figura 29. AERO- modelo [NLR, 1996].



Fuente: Action Cost 319 Final Report, 1999

Como parte esencial del AERO- modelo, NLR está desarrollando un modelo de emisiones y de vuelos (FLEM). Consiste en cinco módulos:

- Modelos de maniobras de vuelo,
- Mapas de vuelo,
- Modelos de emisión,
- Conversión emisión /inmisión,
- Emisiones militares [diez tienen y de Witte, 1997].

Por otro lado, otro proyecto desarrollado a nivel europeo, es el AERONET, que es una red temática patrocinada por aeronáutica del DG XII/C de la CCE. Este proyecto comenzó en 1997 y tiene como objetivo crear una plataforma europea para mejorar el intercambio de los datos y la experiencia, establecer una vista común de las preguntas y de los potenciales abiertos, identificar los vacíos científicos y tecnológicos, especificar los proyectos relevantes de investigación y desarrollo y para apoyar la generación de una posición europea común para los esfuerzos reguladores internacionales.

No se realiza ningún trabajo de investigación real dentro de AERONET pero hay cinco grupos de trabajo que se centran en las cuestiones claves. Estos grupos son:

1. *HEIM*: Está centrado en la armonización de los inventarios y de modelos de emisión.
2. *OTD*: Está centrado en las operaciones y el pronóstico del desarrollo del tráfico aéreo.
3. *MT*: Está centrado en las técnicas de medida y trata de:
4. *EAT*: Centrado en los soportes para las tecnologías del motor y del avión.
5. *SO*: Está centrado en las reacciones del sistema ante diversos parámetros.

El proyecto ANCAT, está centrado en la disminución del impacto causado por transporte aéreo y abarca a un grupo de expertos dentro de la conferencia europea de la aviación civil (ECAC). Este grupo tiene los siguientes trabajos:

AERONOX, era un proyecto de investigación patrocinado por la CCE que investigó el impacto de las emisiones de NO<sub>x</sub> del tráfico aéreo en la atmósfera. Existen, además, tres sub-proyectos en este programa:

- SP1 = base de datos de la emisión de los gases de combustión del motor,
- SP2 = consecuencias físicas y químicas en el avión,
- SP3 = modelo de simulación atmosférico global.

ANCAT/EC2 es una extensión del trabajo anterior producido por el grupo de funcionamiento del ANCAT/EC establecido por ECAC. Un primer inventario del año base, conocido como ANCAT/EC1A, fue publicado en 1995 y utilizado como entrada para los modelos atmosféricos globales en el proyecto de AERONOX. En ANCAT/EC2 se modela una nueva selección de los tipos de avión representativos usando la base de datos de ANCAT/EC1A con ajustes de menor importancia pero con herramientas distintas, basadas en un modelo paramétrico del diseño del avión que también predice el consumo de combustible a través del ciclo del vuelo.

En cuanto a las actividades de EEA, en 1994 la agencia ambiental federal alemana (UBA) fue designada por la agencia ambiental europea (EEA) como líder de proyecto para el centro europeo de las emisiones del aire (ETC/AE). Su objetivo principal es establecer el inventario europeo anual de emisiones del aire, incluyendo emisiones totales y emisiones por país y sector de la fuente. Estas actividades se relacionan y se unen a EMEP (programa cooperativo para supervisar y la evaluación de la transmisión de la gama larga de los agentes contaminadores del aire en Europa), a IPCC (panel intergubernamental en cambio del clima), y a CORINAIR (inventario europeo de la base de emisiones del aire).

La guía atmosférica del inventario de la emisión de EMEP/CORINAIR presenta las pautas comunes para la valoración de emisiones del tráfico. La guía incluye una sección que se ocupa del transporte aéreo [EEA, 1997]. La metodología presentada incluye tres acercamientos (una metodología muy simple, una metodología simple, y una metodología detallada), basados todos en estadística de las ventas del combustible. Cuatro clases de actividades del tráfico aéreo tienen que ser consideradas:

- Tráfico doméstico del aeropuerto (LTO-ciclo de < altitud 1000 m),
- Tráfico internacional del aeropuerto (LTO-ciclo de < altitud 1000 m),
- Tráfico doméstico de la travesía (> altitud de 1000 m),
- Tráfico internacional de la travesía (de > altitud 1000 m)(Reglas visuales del vuelo, VFR)

Las actividades incluyen los movimientos del tráfico aéreo vuelos regulares y vuelos charter de pasajeros y tráfico aéreo de mercancías así como el rodaje por la pista, tráfico del helicóptero y la aviación general. El tráfico aéreo militar se incluye en lo posible.

El proyecto MEET, está centrado en las metodologías para estimar emisiones del agente contaminador del transporte aéreo. Dentro del proyecto MEET se creó una metodología para estimar las emisiones del agente contaminador del aire del tráfico aéreo. Aunque los vuelos operacionales militares y los vuelos de VFR (reglas visuales del vuelo) son incluidos, el foco principal estaba en vuelos de IFR (el vuelo del instrumento gobierna). Los índices de la emisión para los agentes contaminadores NO<sub>x</sub>, CO, HC, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, y para el consumo de combustible se han publicado para 30 combinaciones del avión/del motor [Kalivoda y Kudrna, 1997].

En una segunda fase del MEET se proyecta un estudio para el desarrollo futuro del tráfico aéreo (vuelos de IFR solamente). Finalmente, esto condujo a una tabla de las tarifas de reducción (a partir del año 1995) para los índices de consumo de combustible y de emisión para los componentes NO<sub>x</sub>, CO, y HC en los años 2010 y 2020 [Kalivoda y otros., 1998].

CONMUTE trabaja en los soportes de una metodología común para medir las consecuencias para el medio ambiente del transporte Multimodal y como el MEET, es un proyecto de investigación y desarrollo del DG. Los objetivos principales son:

definir una metodología estratégica para medir las consecuencias para el medio ambiente de las opciones de la política del transporte y apoyar la toma de decisión a nivel europeo,

desarrollar el software que incorpore los aspectos principales de la metodología y pueda presentar resultados a los usuarios,

demostrar el uso de los aspectos principales de la metodología y del software.

Este software incluye un módulo para las emisiones del tráfico aéreo que se base en la metodología y los datos del MEET.

Como conclusión del análisis de estas metodologías, el Cost 319 afirma que existen diferencias entre el consumo de combustible y los índices de emisión de los distintos inventarios y laboratorios, por tanto es necesario comparar estos datos y describir las diferencias. Los pasos para convertir estos datos son:

- recoger todos los datos relevantes de la emisión disponibles,
- explicar las diferencias entre las fuentes de datos,
- encontrar un sistema europeo de índices de emisión para los inventarios de la emisión del tráfico aéreo.

El proyecto EcoTransIT, comienza en el 2003 compara el consumo de energía y las emisiones del agente contaminador de los transportes de mercancías con el tren, el camión, los barcos y los aviones. De tal modo también relaciona tráfico combinado y diversos estándares técnicos de los vehículos en su cálculo.

EcoTransIT es financiado actualmente por cinco compañías ferroviarias europeas (Railion AG, SBB, Greencargo, Trenitalia, SNCF), que decidieron crear una base de datos medioambiental, una metodología y una base de cálculo a través de internet para el transporte de mercancías para todos los modos de transporte. La evaluación ambiental se basa en fundamentales científicos fundados. El método del cálculo fue desarrollado en el ifeu-instituto independiente de Heidelberg y los factores subyacentes de la emisión son actualizados regularmente. La última versión del EcoTransIT es Version 3.1.4 (DB 13.11.06)

## **5.4.1 Metodologías para el modo de transporte Aéreo**

---

Después de un repaso por todos los proyectos a nivel europeo, que están trabajando en esta área, nos centramos en el análisis de las metodologías desarrolladas por el MEET, ya que es este es el proyecto más completo respecto a las categorías de aviones.

El transporte aéreo, según el contenido del programa MEET, puede ser clasificado en tres grandes categorías en lo que se refiere a la relación existente entre modo de operación y las emisiones contaminantes que cada uno de ellos conlleva:

- Vuelos operados con instrumentos de vuelo (IFR)
- Vuelos militares

- Vuelos operados visualmente (VFR)

Esto supone, como cualquier clasificación una agregación, que existen casos que se sitúan entre los grupos marcados, pero son los menos importantes en cuanto al volumen total de consumos energéticos y emisiones.

Los datos existentes sobre las distintas categorías son muy desiguales, en especial debe ponerse especial cautela en la primera categoría ya que entre el 60% y el 80% de las emisiones contaminantes se originan en este tipo de vuelos.

Las metodologías desarrolladas por el proyecto MEET se diferencian en función de las tres categorías de vuelos:

### Vuelos operados con instrumentos de vuelo (IFR)

La metodología para el cálculo de emisiones en los vuelos operados con instrumentos de vuelo es la siguiente (según propone MEET): [53]

$$TE_p = \sum_r \sum_j SE_{j,p,r} \times N_{j,r}$$

r p

D2 (A)

Siendo,  $SE_{j,p,r} = \int_{D_1(A)}^{D_2(A)} FC_j(Dr) \times El_{j,p}(Dr) dDr$

D1 (A)

Donde:

- $j$  es la categoría de aeronave/motor,
- $p$  es la contaminación producida por una emisión determinada,
- $r$  es la ruta desde un aeropuerto a otro,
- $TE_p$  es el total de emisiones para el factor  $p$  (kg por periodo),
- $SE_{j,p,r}$  son las emisiones específicas para el agente contaminante  $p$ , de una aeronave/motor  $j$  en una ruta  $r$  (kg por aeronave),
- $N_{j,r}$  es el número de aeronaves por categoría  $j$  en una ruta  $r$  por periodo,
- $FC_j(Dr)$  es el consumo de combustible en una aeronave de categoría  $j$  por km ( $Kg_{combustible}/Km$ ),
- $El_{j,p}(Dr)$  es el índice de emisiones por agente contaminante  $p$  ( $Kg_{emisiones}/Kg_{combustible}$ ),
- $Dr$  es la distancia entre dos ciudades (ruta  $r$ ) (km),
- $D_2(A) - D_1(A)$  es la distancia volada en el área A (km).

Tres cuestiones necesitan ser señaladas en este modelo:

- Los índices de las emisiones contaminantes se refieren a la contaminación producida según el tipo de combustible y teniendo en cuenta unas condiciones de vuelo estándar. Esto significa que cubren la mayor parte de las operaciones de vuelo pero no las operaciones de tierra que hacen referencia a suministro (tanto de combustible como de los servicios auxiliares) como las operaciones de puesta en marcha de los motores.

Las operaciones que incluye, analiza, el modelo son las siguientes:

Movimientos hasta cabecera de pista, despegue, ascenso, navegación, descenso, aterrizaje, y movimientos hasta punto de parada.

- Las emisiones por contaminante para cada motor/aeronave en una ruta determinada, han sido calculadas con el programa ATEMIS (Air Traffic

Emissions Simulation) que calcula el consumo de combustible, NOx, CO y VOC y que es utilizado en Austria.

El programa ATEMIS calcula el flujo instantáneo de combustible mediante la fórmula:

$$ff_i = th_j (M, a, \lambda, ps) \times SFC_j (M, a, \lambda, ps) \quad [54]$$

Donde:

$ff_i$  es el flujo instantáneo del combustible del motor  $j$  (kg/h),

$th_j$  es la fuerza del empuje del motor  $j$  (n),

$M$  es el número de Mach <sup>62</sup>,

$a$  es la altitud (los kilómetros),

$\lambda$  es el cociente de bypass<sup>63</sup>,

$SFC_j$  es el consumo de combustible específico.

Un modelo que usa seis parámetros describe el gráfico de funcionamiento del empuje del motor ( $th_j$ ) y el consumo de combustible ( $SFC$ ): <sup>55+</sup>

$$th_j (M, a, \lambda, ps) = th_0 \times ps \times \sum_{k=0}^2 [ a_{k_k} (\lambda) + d_k (\lambda) ] \times M^{(2-k)}$$

$$SFC (M, a, \lambda, ps) = th_0 \times ps \times \sum_{m=0}^2 [ a_{g_m} (\lambda) + b_m (\lambda) ] \times M^{(2-m)}$$

Donde:

$th_j$  es la fuerza del empuje del motor  $j$ ,

$th_0$  es la fuerza del empuje del motor para  $M = 0$  y  $a = 0$ ,

$M$  es el número de Mach,

$SFC_0$  es el  $SFC$  para  $M = 0$  y  $a = 0$ ,

<sup>62</sup> El número Mach es una medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto. Dicha relación puede expresarse según la ecuación:  $Ma = V/V_s$ . Mach 1 equivale a la velocidad del sonido, Mach 2 es dos veces la velocidad del sonido, etc. Además el número Mach no es constante sino que depende de la temperatura.

<sup>63</sup> En el bypass es típico transformar la energía del gas en energía potencial de presión, para reducir la velocidad y, por tanto, las pérdidas de presión que puedan suceder en este conducto. En el motor la corriente de entrada se bifurca en dos una vez que se atraviesa la primera etapa de compresión. Una parte del aire ( $W_{120}$ ) se dirige hacia un conducto llamado bypass y que descarga directamente a la atmósfera a través de una tobera. El resto del aire ( $W_{20}$ ) sigue el circuito convencional del turborreactor puro. El índice de derivación ( $W_{120}/W_{20}$ ) mide la relación entre el aire que pasa por el bypass y el que pasa por el motor. Cuando mayor sea el índice de derivación mayor es la cantidad de aire que no atraviesa completamente el motor y mayor será el diámetro del mismo. Conforme se aumenta esta relación se consigue una reducción progresiva del consumo de combustible y de ruido que compensa fácilmente el aumento del área frontal a velocidades de vuelo intermedias (subsónico alto).

- $\lambda$  es el cociente de bypass,
- $ps$  es el ajuste de la energía (0 - 1,)
- $a$  es la altitud (los kilómetros),

$k_k(\lambda)$ ,  $d_k(\lambda)$ ,  $g_m(\lambda)$ ,  $b_m(\lambda)$  son coeficientes en función del cociente de bypass.

Puesto que la producción de  $NO_x$  depende fuertemente de la temperatura de la combustión, que disminuye con temperatura exterior (el motor admite temperatura), el índice específico de la emisión para  $NO_x$  se corrige para la altitud usando los resultados de Lipfert<sup>64</sup>: [56]

$$\eta_{NOx}(M,a) = e_{NOx}(M,a)$$

$$e_{NOx}(M=0, a=0)$$

ARTEMIS utiliza cuatro clases de datos de entrada:

#### Datos del tráfico aéreo

Cada vuelo civil de IFR dentro, en, y sobre del territorio de Austria es almacenado digitalmente por el Control Austriaco, la oficina federal anterior de la aviación civil. Cada línea representa un movimiento del avión con sus características:

#### Datos del aeropuerto

El fichero de datos del aeropuerto contiene la información sobre el aeropuerto en sí mismo, así como funcionamiento básico del avión.

#### Puntos de ruta

Los puntos de ruta se utilizan para proporcionar una distribución regional de las emisiones.

#### Datos del avión (motores)

Los datos del avión representan el funcionamiento de motor y los factores específicos de la emisión

Tabla 120. Datos del tráfico aéreo en Austria

---

<sup>64</sup> Lipfert F W (1972) Correlation of gas turbine emission data. ASME Paper No. 72-GT- 60, ASME, Fairfield, New York

Número de vuelo	Tipo de avión	Wake turbul.cat.	Velocidad	Nivel de vuelo	Tiempo	Del aeropuerto	Al Aeropuerto	Punto de ruta #1	Punto de ruta #2	Punto de ruta #3	...	Punto de ruta #n
AOE298	B73S	M	442	330	0	EGCC	LGKR	BRE				
TRA124	B73S	M	420	350	5	LTAI	EHAM	MUR	GRZ	PET	VEL	GRO
AMM362	B757	M	471	370	31	EGCC	LGIR	LOF	VIW	TEL		
AOE268	B757	M	468	370	32	EGCC	LGKR	BRE				
AEF862	MD80	M	447	330	34	EDDF	LTAC	KIR	LNZ	LIM	GRZ	MUR

Fuente: MEET 1999

### Vuelos militares

Debido a la naturaleza diversa de los datos militares disponibles, la metodología para los vuelos militares se basa en las horas de la operación y del consumo de combustible medio por hora. Este acercamiento se ha utilizado ya para los vuelos militares en el inventario de ECAC/ANCAT 2:

$$TME_p = \sum_m EI_{m,p} \times FC_m \times H_m \quad [57]$$

Donde:

$TME_p$ , es la emisión militar total del agente contaminador  $p$  (los kilogramos por período),

$H_m$ , es el número de horas de la operación de la clase de avión  $m$  por el período (horas por período),

$FC_m$ , es el consumo de combustible de la clase de avión  $m$  por hora (kg combustible/ hora),

$EI_{m,p}$  es el índice de emisión para el agente contaminador  $p$  (kg emisión/kg combustible),

$m$  es la clase de avión militar,

$p$  es el agente contaminador.

Dependiendo de la referencia usada y del país, las aplicaciones militares referidas al tráfico aéreo varían de 13 al 43% de combustible total de la aviación y contribuyen de un 2 al 35% de NOX del avión.

Tabla 121. Consumo de combustible y emisiones del tráfico aéreo militar y total

Referencia	Año base	Combustible quemado (Mt/yr)			Emisiones NO <sub>x</sub> (Mt/yr)		
		Militar	total	% militar	Militar	total	% militar
ANCAT	1992	17.1	132.5	12.9	0.21	10.82	1.9
CH	1990	69.7	420.5	16.6	0.34	6.57	5.2
D	1984	1205.9	2802.4	43.0	10.16	28.89	35.2
NL	1992	98.0	628.0	15.6	1.50	8.10	18.5

Fuente: MEET 1999

## Vuelos de VFR

La disponibilidad de datos para los vuelos de VFR es muy similar al del tráfico aéreo militar. Eso significa que no hay información detallada sobre la trayectoria de vuelo y de las emisiones específicas disponibles así que el algoritmo utilizado es igual que para los vuelos militares.

$$TVE_p = \sum_{v,p} EI_{v,p} \times FC_v \times H_v \quad [58]$$

Donde:

$TVE_p$  es la emisión total del vuelo de VFR del agente contaminador  $p$  (los kilogramos por período),

$H_v$  es el número de horas de la operación de la clase del avión  $v$  en el período (horas por período),

$FC_v$  es el consumo de combustible de la clase del avión  $v$  por la hora (kg combustible/ hora),

$EI_{v,p}$  es el índice de la emisión para el agente contaminador  $p$  (kg emisión/kg combustible),

$v$  es la clase del avión de VFR,

$p$  es el agente contaminador.

## 5.4.2 Conclusiones del modo de Transporte Aéreo

Las metodologías analizadas muestran que dependiendo del tipo de operación del avión el consumo de combustible se calcula aplicando tres metodologías (MEET), cuya complejidad varía en función de los datos disponibles.

El principal problema de los datos que son necesarios para calcular el consumo de combustible del modo aéreo es la escasez y la heterogeneidad de los datos que se encuentran.

Como principal punto del análisis de este modo de transporte, se debe mencionar el esfuerzo por encontrar un formato común para la recogida de datos. Por lo que en este análisis se trata de:

- recoger todos los datos relevantes de la emisión disponibles,
- explicar y analizar las diferencias entre las fuentes de datos,
- encontrar un sistema europeo de índices de emisión para los inventarios de la emisión del tráfico aéreo.

En cuanto a los resultados existen diferencias dependiendo del inventario de emisiones de referencia utilizado y de los distintos estudios.

## 5.5. Transporte Urbano

El modo urbano, tiene unas características de explotación diferenciadoras respecto del resto de modos de transporte. Estas características hacen referencia especialmente a un incremento considerable de los consumos de energía que generan mayores emisiones contaminantes por vehículo.

En cualquier caso las metodologías anteriores en lo que se refiere al ferrocarril y a la carretera son totalmente aplicables y lo que varía son los parámetros de estimación asociados a las variables. Y de esta forma dentro del modo carretera se exponía un análisis y los resultados obtenidos para una ciudad como Bruselas.

En este modo es además el que encuentra más desarrollado el análisis entre modelos de movilidad y consumos energéticos, lo que también se ha denominado modelo instantáneo ya que muchos programas de modelización del tráfico contienen algún módulo de consumos energéticos y emisiones.

Recorar lo que mencionábamos al comienzo del documento sobre la falta de metodología estandarizada por parte del IDEA y sobre unos resultados no cuantificados y no materializados en su totalidad.

El ámbito del transporte urbano resulta más complejo, quizá por tener una mayor disponibilidad de datos y quizá por ser uno de los sistemas de transporte con una incidencia más directa y percibida sobre el consumo de energía y las emisiones contaminantes.

En este sentido la Autoridad de Transporte Metropolitano de Barcelona (ATM) en su Plan de Movilidad hace una revisión de los costes sociales y medioambientales que tiene el sistema de transporte metropolitano en su área de influencia, Barcelona. Llegando incluso a la aplicación del programa COPERT para algunas estimaciones.

Como podemos observar esto significa un paso más allá de los modelos considerados anteriormente y es el cálculo de costes que el modo implica. En el tema de los costes se diferencian entre los costes internos a la actividad, los costes de operación (entre los que se incluye el consumo de combustible) y los costes externos donde se incluyen entre otros los costes producidos por la contaminación.

Los costes de la contaminación son calculados a través de las enfermedades que producen asociando en el modelo la base de datos existente sobre contaminación atmosférica (BeTa 2002) y los costes de atención médica que se producen. Otra diferencia significativa es que de entre todos los factores contaminantes que se suelen considerar en los distintos estudios, el que mencionamos de la ATM se centra en la contaminación atmosférica por su relación directa con la salud. En este sentido, los datos que el modelo requiere alcanzan un gran detalle ya que por ejemplo, para el cálculo de los costes médicos, las causas de enfermedad del paciente tienen que estar recogidas y mencionar explícitamente su relación con la contaminación atmosférica.

Este estudio, que es más amplio que los anteriores, toma como punto de partida la relación que mencionábamos en la nota metodológica sobre los modelos y que hacía referencia a que los modelos de movilidad pueden ofrecer datos sobre los consumos energéticos y emisiones contaminantes, aunque sea a través de una simplificación.

En el modelo desarrollado tanto el consumo de combustible como las emisiones contaminantes son consideradas a través de funciones específicas que en el primer caso depende del modo de transporte pero que incluye alguna variable de operación tales como velocidad media. Para el cálculo de la contaminación tiene en cuenta la formulación realizada por INFRAS que se concreta en:

$$C_p^{i,b} = \sum_{j=1}^{13} E_{e,j}^b P_{e,j}^{i,b} C_{e,j} + C_{mc} \sum_{l=1}^n T_l \quad [59]$$

Donde:

$C_p^{i,b}$ , es el coste total de la contaminación atmosférica en el modo i y en el ámbito b (Euros)

$E_{e,j}^b$ , es el número de enfermos de la tipología j en el ámbito b

$P_{e,j}^{i,b}$ , es la probabilidad de que un efecto negativo de la tipología j sea debido al transporte de un modo i en el ámbito b

$C_{e,j}$ , es el coste unitario de la enfermedad  $j$  derivada a la contaminación atmosférica (Euros/persona).

$C_{mc}$ , es el coste unitario de los materiales (Euros/tn)

$T_l$ , emisiones por el tipo de vehículo  $l$

Distintos son los resultados obtenidos para el estudio llevado a cabo en 1996 (publicado en el 2003) por el Consorcio de Transportes de Madrid<sup>65</sup> en el que los objetivos eran los siguientes:

Establecer la base para elaborar la Cuenta Regional del Transporte de Madrid, según las directrices europeas sobre contabilidad de los costes de transporte.

Desarrollar una metodología para la evaluación de los costes sociales del transporte en términos monetarios, que pudiera actualizarse de modo periódico.

Evaluar la contribución de las políticas de transporte al desarrollo sostenible mediante la cuantificación de las externalidades.

Comparar los costes totales de los distintos medios de transporte, señalando la responsabilidad de cada una de las diferentes partidas de coste.

Contribuir a la transparencia de los sistemas de financiación de los modos de transporte y a la definición de las políticas en materia de transporte y medioambiente desde una perspectiva social.

---

<sup>65</sup> Guerrero, M.J y Monzón, A.(2003) “Cuenta Económica y socio-ambiental del transporte terrestre de viajeros en la Comunidad de Madrid. 1996”. Consorcio de Transportes de Madrid.

---

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Abbott P. G., S. Hartley, A. J. Hickman, R. E. Layfield, I. S. McCrae, P. M. Nelson, S. M. Phillips & J. L. Wilson (1995): The environmental assessment of traffic management schemes. TRL report 174, Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K.

ACEA & Europia (1996): European programme on emissions, fuels and engine technologies. Final report, ACEA, Brussels.

ACEA, Europia & European Commission (1995): Effect of fuel qualities and related vehicle technologies on European vehicle emissions - An evaluation of existing literature and proprietary data. Final report, European Commission, Brussels.

Ahlvik P., S. Eggleston, N. Gorißen, D. Hassel, A.J. Hickman, R. Joumard, L. Ntziachristos, R. Rijkeboer, Z. Samaras & K.-H. Zierock (1997): COPERT II, Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport - Methodology and Emission Factors. European Environment Agency, Copenhagen.

André M., R. Vidon, P. Tassel, D. Olivier & C. Pruvost (1996): A method for assessing energetic and environmental impact of traffic changes in urban areas using instrumented vehicles. Proceedings of the 'World Conference on Transport Research', Volume 2.

André M. (1998a): Modelling transport systems, Pergamon Press. Construction de cycles de conduite représentatifs pour la mesure des émissions de polluants des véhicules (Building-up of representative driving cycles for vehicle pollutant emission measurements). PhD thesis, INSA Lyon. IINRETS report, LEN9808, Bron, France, 278 p.

André M. (1998b): Approches et difficultés liées à l'évaluation des parcs de véhicules et de leurs conditions d'utilisation. Proceedings seminar UNDP Changements climatiques et pollution atmosphérique par le trafic routier, Algiers, 29-30 juin 1998, PNUD-FEM, Rabat, Morocco, p. 150-164.

André M., U. Hammarström & I. Reynaud (1999): Driving statistics for the assessment of air pollutant emissions from road transport. INRETS report, LTE9906, Bron, France, 191 p.

Andrias A., Z. Samaras, D. Zafiris & K.H. Zierock (1993): CORINAIR working group on emission factors for calculating 1990 emissions from road traffic. Volume 2: COPERT - Computer programme to calculate emissions from road traffic - User's manual. Final report, document of the European Commission, ISBN 92-826-5572-X, Brussels.

ATM (2006): Pla Director de Mobilitat de la Regió Metropolitana de Barcelona. Documento: Adaptació de l'estudi de costos socials i ambientals del Transport de la DGPT a la Regió Metropolitana de Barcelona.

Brasseur G.P., R.A. Cox, D. Hauglustaine, I. Isaksen, J. Lelieveld, D.H. Lister, R. Sausen, U. Schumann, A. Wahner & P. Wiesen (1997): European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions. European and Climate Programme of the European Commission.

Boulter P. G. (1996): Traffic calming - effect on vehicle emissions modelled from measured speed profiles. TRL report PR/SE/155/96 (unpublished), Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K.

Boulter P. G. (1997): Traffic calming and vehicle emissions: a literature review. TRL Report 307, Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K. Busch F. (1996): MOTION - a new approach to urban network control. Traffic Technology.

Carrié L. & J. Noppe (1997): User requirements for the MEET project. Ademe report, Paris, 34 p. [MEET] CEC - Commission of the European Communities (1996): Transport Research APAS Strategic Transport: Transport strategic modelling, VII - 22. CEC report, Brussels.

Chiquetto S. (1997): The environmental impacts from the implementation of a pedestrianisation scheme. Transportation Research D, 2(2), pp 133-146.

- CONCAWE (1988): The control of vehicle evaporative and refueling emissions - the on-board system. Concaawe report, N° 88/62, Brussels.
- CONCAWE (1990): The effect of temperature and fuel volatility on vehicle evaporative emissions. Concaawe report, N° 90/51, Brussels.
- Cooper, David. - IVL- SMED (2004): Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors.
- Cooper, David- IVL (2004): HCB, PCB, PCDD and PCDF emissions from ships.
- Corbett-Paul, J. J, Fishbeck, P. S. (1998): Commercial Marine Emissions Inventory for EPA Category 2 and 3 Compression Ignition Marine Engines in United States Continental and Inland Waterways.
- Corbett J. J., Koehler, Horst W. (2003): Updated emissions from ocean shipping.
- Corbett J. J., Koehler, Horst W. (2004): Considering alternative input parameters in an activity-based slip fuel consumption and emissions model: Reply to comment by Oyvind Endresen et al. on "Updated emissions from ocean shipping".
- Corbett J. J. (2004): Verification of ship emission estimates with monitoring measurements to improve inventory and modelling.
- COST (1996): Working Group A3 on heavy duty vehicle emissions: notes on a meeting in Cologne on 7 May 1996. Management Committee of the COST Action 319. European Commission, DG VII, EUCO-COST/319/6/96, Brussels.
- Cox J.A. & A.J. Hickman (1998): Aggregated emission factors for road and rail transport. TRL report, PR SE/493/98, Crowthorne, UK, 83 p.
- Dasgupta M., R. Oldfield, K. Sharman & V. Webster (1994): Impact of traffic policies in five cities. TRL Report PR 107, Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K.
- DG of Civil Aviation (1998): AERO decision support system. Min. of Transport, Public works and water management, Directorate General of Civil Aviation, The Hague, The Netherlands.
- Economic and Social Studies on the Environment, Université Libre de Bruxelles, Brussels, 48p.
- Edwards H. (1997): Network flow models for traffic flow descriptions based on a traffic assignment model and O/D-estimation utilising traffic counts and travel survey data. Draft report, Swedish Nat. Road Transport Res. Inst., Linköping, Sweden.
- Eggleston H.S., N. Gorissen, R. Joumard, R.C. Rijkeboer, Z. Samaras & K.-H Zierock (1989): CORINAIR working group on emission factors for calculating 1985 emissions from road traffic - volume 1: methodology and emission factors. CEC report, EUR 12260 EN, Luxembourg, 79 p.
- Eggleston H.S., D. Gaudioso, N. Gorissen, R. Joumard, R.C. Rijkeboer, Z. Samaras & K.-H Zierock (1993): CORINAIR working group on emission factors for calculating 1990 emissions from road traffic - volume 1: Methodology and emission factors. CEC report, Luxembourg, 116 p.
- EEA (1996): EMEP/CORINAIR atmospheric emission inventory guidebook. McInnes G. ed., first ed., European Environment Agency, Copenhagen.
- EEA (1997): EMEP/CORINAIR atmospheric emission inventory guidebook. Sub-sector air traffic. European Environment Agency, Copenhagen, <http://www.eea.eu.int>.
- EEA (1998): EMEP/CORINAIR atmospheric emission inventory guidebook. Draft second ed., <http://www.aeat.co.uk/netcen/airqual/TFEI/unece.htm>.
- ENTEC (2002): Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community -European Commission.
- ENTEC (2005): Service contract on ship emissions: Abatement and market-based instruments.

- Espey M. (1996): Explaining the variation in Elasticity Estimates of Gasoline Demand in the U.S.: A Meta-Analysis. *The Energy J.*, 17(3), p. 49-60.
- EPA (2000): Analysis of commercial marine vessels emissions and fuel consumption data.
- Georgakaki, A., Coffey, R., Sorenson S.C. (2002): Development of a Database System for the Calculation of Indicators of Environmental Pressure Caused by Transport (TREND).
- Georgakaki, A. y otros (2004): Transport and Environment Database System (trends): Maritime air pollutant emission modelling.
- Gilson B., V. Favrel & W. Hecq (1997): Overview and Analysis of the links between "Models of Mobility" and "Models of Pollutant Emissions from Transport".
- González, H. (2005) "Introducción a los modelos de sistemas energéticos, económicos y mediambientales: Descripción y aplicaciones del modelo POLES". *Revista de Economía Mundial* 13.
- Greene D.L. (1992): Vehicle Use and Fuel Economy: How Big is the 'Rebound' Effect. *The Energy J.*, 13(1), p. 117-143.
- Guensler R. & D. Sperling (1994): Congestion pricing and motor vehicle emissions - an initial review. In *Curbing gridlock: peak period fees to relieve traffic congestion*. Transportation Research Board, Washington.
- Hammarström U. (1996): Exhaust Emissions from Road Traffic - Description of Driving Patterns by Means of Simulation Models. In *Estimation of pollutant emissions from transport, proceedings of the workshop on 27-28 Nov. 1995*, European Commission, DG VII, Brussels, p. 87-97.
- Hammarström U. (1998): Air resistance coefficients for estimation of exhaust emissions from road traffic, a literature survey. VTI report, Linköping, Sweden, 40 p. Federal Republic of Germany for the reference year 1990 (English translation). COST secretariat, CEC DG VII, Brussels.
- Hassel D. (1995): Emission factors for heavy duty vehicles. Management Committee of the COST Action 319. European Commission, DG VII, EUCO-COST /319/2/95, Brussels.
- Hassel D. & F.J. Weber (1997): Gradient influence on emission and consumption behaviour of light and heavy duty vehicles. TÜV Rheinland report, n° 376013/09, Cologne, Germany, 22 p.
- Herrstedt L. (1992): Traffic calming design - a speed management method. *Accident Anal. and Prev.*, 24(1), pp 3-16.
- Hickman A.J. (1997): Emission functions for heavy duty vehicles. TRL report, n° PR/SE/289/97, Crowthorne, U.K., 24 p.
- Hickman J., D. Hassel, R. Joumard, Z. Samaras & S. Sorenson (1999): Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. TRL report, n° SE/491/98, Crowthorne, U.K., 350 p.
- Höglund P. G. (1995): Estimating traffic related exhaust emissions and imissions at road and street intersections. Esitelmä: KFB and VTI Research Information Days, Linköping, Sweden.
- Höglund P. G. (1999): The influence of different vehicles' acceleration and deceleration patterns on the amount of emitted exhaust pollution. Report, Royal Inst. Technology, Stockholm, 41 p.
- IDEA (2005). Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012. Documento E4: Plan de Acción 2005-2007.
- INFRAS (1995): Workbook / Handbook on emission factors for road transport, version 1.1. INFRAS, Bern, Umweltbundesamt, Berlin, and Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

Infrass (2007).” Hadndbook on estimation of external costs in the transport sector”.Versión 1.0. INFRAS, Bern, Umweltbundesamt, Berlin, and Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

IPCC/OECD/IEA (1997): Revised guidelines for national greenhouse gas inventories.Intergovernmental Panel on Climate Change working group 1, Technical Support Unit, Hadley Centre, Bracknell, U.K.

ITTC (2005): Testing and extrapolation methods, propulsion, performance, predicting powering margins. International Towing Tank. Recommended procedures and guidelines.

Jorgensen M.W. & S.C. Sorenson (1997): Estimating emission from railway traffic. DTU report, n° ET-EO-97-03, Dept of Energy Eng., Lyngby, Denmark, 135 p.

Joumard R., L. Paturel, R. Vidon, J.-P. Guitton, A.-I. Saber & E. Combet (1990): Emissions unitaires de polluants des véhicules légers. INRETS report, n° 116, Bron, France, 120 p.

Joumard R., P. Jost, J. Hickman & D. Hassel (1995a): Hot passenger car emissions as a function of instantaneous speed and acceleration. Sci. Total Environ., 169, p 167 - 174.

Joumard R., R. Vidon, L. Paturel, C. Pruvost, P. Tassel, G. de Soete & A. Saber (1995b): Changes in pollutant emissions from passenger cars under cold start conditions.INRETS report, n° 197 bis, Bron, France, 75 p.

K.A. Lavender B.Sc. (1999): Marine Exhaust Emissions Quantification Study-Mediterranean Sea.

Kalivoda M.T. & M. Kudrna (1997): Methodologies for estimating emissions from air traffic.CEC DG VII contract ST-96-SC.204, Psia-Consult report, n° 95.106, Perchtoldsdorf, Austria, 90 p.

Kalivoda M.T., M. Kudrna, P. Fitzgerald, B.H. Bek, S.C. Sorenson & C. Trozzi (1998): Future non-road emissions. DTU report, Dept of Energy Eng., Lyngby, Denmark, 110 p.

Keller M., R. Évéquoz, J. Heldstab & H. Kessler (1995): Luftschadstoff-Emissionen desStrassenverkehrs 1950-2010. BUWAL, Bern, Schriftenreihe Umwelt Nr.255, 430 p.(also available in French).

Keller M. & P. de Haan (1998): Intermodal comparisons of atmospheric pollutant emissions.Infras report, B75320-8, Bern, 71 p.

Knörr, W. and Reuter, C. (2005): EcoTransIT: Ecological Transport Information Tool. Environmental Methodology and Data.Heidelberg.

Krawac S. (1993): Traffic management and emissions. Sci. Total Environ., 134, pp 305-

314.Kurtul S. & M.A. Graham (1992): Exhaust emission tests on ten heavy duty diesel engines.TRRL report CR 275, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK.

Kyriakis N.A., Z.C. Samaras & A.E. Andrias (1998): Road traffic composition. LAT report,n°9823, Thessaloniki, Greece, 144 p.

Laurikko J., L. Erlandsson & R. Abrahamsson (1995): Exhaust emissions in cold ambientconditions: considerations for a European test procedure. SAE Int. Cong. & Exp., Detroit, Michigan, SAE Paper 950929.

Lenner M. (1994): Pollutant emissions from passenger cars. Influence of cold start, temperature and ambient humidity. VTI report, n° 400A, Linköping, Sweden, 42 p.

Lewis C.A. (1997): Fuel and energy production emission factors. ETSU report, n°R112, Didcot, U.K., 56 p.

Madre J. L., Y. Bussière & J. Armoogum (1995): Demographic dynamics of mobility inurban areas: a case study of Paris and Grenoble. World Congress on Transport Research, 16-21 July 1995, Sydney, Australia.McArragher J., W. Betts, J. Bouvier, D. Kiessling, G. Marchesi, K.Owen, J. Pearson, F.Renault, K. Schug, D. Snelgrove & J. Brandt (1987): An investigation into evaporativehydrocarbon emissions from European vehicles. Concawe report, N° 87/60, The Hague, The Netherlands, 87 p.

- Marintek-Carnegie Mellon (2000): Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships (Final Report IMO).
- MEERI (2006): Calculation system for the Finnish waterborne traffic emissions.
- Méndez, M.E. (2002).” Reforma fiscal verde y doble dividendo. Una revisión de la evidencia empírica”.
- MMT (Municipality of Metropolitan Toronto) (1993): Toronto SCOOT demonstration project report. Municipality of Metropolitan Toronto.
- Mulroy T. M. (1989): Fuel savings from computerised traffic control systems. Energy efficiency in land transport. EC Directorate General for Energy, Brussels.
- Negrenti E. (1998): Consumption and emission models: results from action COST 319. ENEA report, n° RTI-ERG-SIRE-98/19, Rome, 39 p.
- NLR (1996): NLR participates in national project on reduction of aviation emissions. National Aerospace Lab., NLR News, 23, Amsterdam.
- OECD (1994): Road transport research - congestion control and demand management. OECD, Paris.
- Oyvind Endressen-Eirik Sorgárd (2003): Emission from international sea transportation and environmental impact.
- Pekkarinen S. & J. Dargay (1996): Public transport subsidies: the impact of regional bus card on travel demand and energy use in Finnish urban areas. Report 96/6, Transport Studies Unit, University College, London. INRETS report N° LTE 9901 157
- Reiter C. (1997): Erstellung von Emissionskennfeldern. Diplomarbeit, TU-Graz, Graz, Austria. Rijkeboer R.C. (1997): Emission factors for mopeds and motorcycles. TNO report, n° 97.OR.VM.31.1/RR, Delft, The Netherlands, 16 p.
- Rent, O, Nunge, S. y otros (1997): Feasibility study on the development of a design for an emission projection model based on the CORINAIR-Approach.
- Robertson D. I., N. Wilson & S. Kemp (1996): The effects of co-ordinated and isolated signal control on journey times and exhaust emissions along the A12 in London. Traffic Eng. and Cont., January 1996, pp 4-9.
- Samaras Z.C. & T I. Zachariadis (1994). A comparative assessment of methodologies to estimate motor vehicle emissions. Proc. intern. conf. ‘The emission inventory: perception and reality’, Pasadena, California, publication VIP-38, Air and Waste Management Assoc., Pittsburgh, USA, p. 12-27.
- Samaras Z., T. Zachariadis & M. Aslanoglou (1997): Evaporative emissions. Lat report, n° 9717, Thessaloniki, Greece, 37 p.
- Samaras Z. & L. Ntziachristos (1998): Average hot emission factors for passenger cars and light duty trucks. LAT report, n° 9811, Thessaloniki, Greece, 112 p.
- Samaras Z., N. Kyriakis, R. Joumard, M. André, E. Sérié, D. Hassel, F.J. Weber, A.J. Hickman, R. Rijkeboer, P. Sturm, S. Sorenson, C.A. Lewis, E. Beckman, C. Trozzi, R. Vaccaro & M. Kalivoda (1998a): Methodologies for estimating air pollution from transport - Emission factors and traffic characteristics data set. LAT report, n° 9802, Thessaloniki, Greece, 193 p.
- Samaras Z., T. Zachariadis, R. Joumard, I. Vernet, D. Hassel, F.J. Weber & R. Rijkeboer (1998b): Alternative short tests for inspection and maintenance of in-use cars with respect to their emissions performances. 4e coll. int. Transports et pollution de l'air, Avignon, France, 9-13 juin 1997, and Int. J. Vehicle Design, vol. 20, Nos 1-4 (Special Issue), p. 292-303.
- Samaras Z., R. Coffey, N. Kyriakis, G. Koufodimos, F.J. Weber, D. Hassel & R. Joumard (1998c): Emission factors for future road vehicles. LAT report, No 9829, Thessaloniki, Greece, 108 p.

- Sammer G. (1992): Effects of the 30 km/h speed limit on exhaust gas - a holistic view. Symposium on Traffic Induced Air Pollution, Univ. Graz, Graz, Austria.
- Seika M. (1996): Evaluation of control strategies for improving air quality with London and Berlin as examples. PhD Thesis, Univ. Birmingham, U.K.
- Sérié É. & R. Joumard (1997): Modelling of cold start emissions for road vehicles. INRETS report, LEN 9731, Bron, France, 52 p.
- Skabardonis A. (1994): Evaluation of the fuel efficient traffic signal management (FETSIM) program. Research Report UCB-ITS-RR-94-11, Univ. California, Berkeley, USA.
- Sturm P.J., K. Pucher & R.A. Almbauer (1994): Determination of motor vehicle emissions as a function of the driving behaviour. In proc. of the conf. "The emissions inventory; perception and reality", Pasadena, California, publication VIP-38, Air and Waste Management Assoc., Pittsburgh, USA, p 483-494.
- Sturm P.J., P. Boulter, P. de Haan, R. Joumard, S. Hausberger, J. Hickmann, M. Keller, W. Niederle, L.Ntziachristos, C. Reiter, Z. Samaras, G. Schinagl, T. Schweizer & R. Pischinger (1998): Instantaneous emission data and their use in estimating passenger car emissions. VKM-THD Report, Vol. 74, Verlag der Techn. Univ. Graz, Graz, Austria, 42 p., ISBN 3-901351-24-8.
- Ten Have H.B.G. & T.D. de Witte (1997): Flights and emission model (FLEM) - General report model version 3.11. NLR CR 97327 L, National Aerospace Lab. NLR, Amsterdam.
- TNO (1993): Project in use compliance air pollution by cars in use. TNO Annual Report 1992- 1993, TNO, The Netherlands, 85 p.
- TRL, TRG & University of Portsmouth (1997a): Monitoring and evaluation of ENTRANCE - public transport priority Southampton. Unpublished report to Hampshire County Council, Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K.
- TRL, TRG & University of Portsmouth (1997b): Monitoring and evaluation of ENTRANCE - public transport priority Eastleigh. Unpublished report to Hampshire County Council, Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K.
- Trozzi C. & R. Vaccaro (1998): Methodologies for estimating air pollutant emissions from ships. Techne report, n° MEET RF98, Rome, 43 p.
- USEPA (1991): Supplement A to compilation of air pollutant emission factors (AP-42) - Volume II: mobile sources. Usepa, Ann Arbor, USA.
- USEPA (1992): User's guide to MOBILE5. Test and Evaluation Branch, Office of Air and Radiation, Draft 4a. Usepa, Ann Arbor, USA.
- USEPA (1995): Air CHIEF CD-ROM, version 4.0. Usepa, USA.
- Van Every B. & M. Holmes (1992): Local area traffic management: effects on the environment. Local Government Engineering Conference, Adelaide, Australia.
- Vejdirektoratet (1997): Luftforurening i 21 miljrprioriterede gennemfarer. Report nr. 143, Vejdirektoratet, Copenhagen.
- Vincent R. A. & R. E. Layfield (1977): Nottingham Zones and Collar study - overall assessment. TRRL Report LR 805, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, U.K.
- Watkiss, P. et all (2005) The social cost of Carbon (SCC) Revie: Methodological Approaches for Using SCC Estimates in Policy Assessment, Final Report. London: UK Defra.
- Webster D. C. (1993): Effect of traffic calming schemes on vehicle emissions. TRL Report PR/TT/13/93 (unpublished), Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K.
- Wood K. & R. Smith (1993): Assessment of the pilot priority (red) route in London. TRL Report PR 31, Transport Research Laboratory, Crowthorne, U.K.
- Younes B. (1995): The benefits of improving public transport: a myth or reality? Transport Rev., 15, 4, pp 333-356.

Zachariadis T. (1995): Comparison of microscale and macroscale traffic Emission estimation tools: DGV, COPERT and KEMIS. Laboratory of Applied Thermodynamics, report 9508, Thessaloniki, Greece, 40p.

Zachariadis T. (1996): Review of motor vehicle emission models and their application in a European context: accomplishments and further needs. Laboratory of Applied Thermodynamics, report 9601, 50p. + supplement with DRIVE-MODEM calculations, Thessaloniki, 1996.

Zachariadis T. & Z. Samaras (1996). Comparative assessment of European tools to estimate traffic emissions. Proc. 3rd Intern. Symp. 'Traffic Induced Air Pollution: Emissions, Impact and Air Quality', Graz, Austria, Technical Univ. Graz, Vol. 68, p. 165-177. Also appearing in Intern. J. Vehicle Design, Vol. 18, N° 3/4, p. 312-325, 1997.

Züger P. & R. Blessing (1995): Émissions nocives du trafic. Les méfaits des embouteillages et des gendarmes couchés. Touring: Journal du Touring Club Suisse, No 1.

## 7. ANEXO

### 7.1. Fórmulas de conversión

El método siguiente es para convertir la energía consumida (kJ/t.Km) en factores de emisión (g/pasajero .km).

Deberíamos incluir las fórmulas:

Para trenes eléctricos:

$$E_i = \frac{\frac{E'}{10^6} \cdot m \cdot L \cdot PSEF_i}{P \cdot L}$$

Para trenes diesel

$$E_i = \frac{\frac{E' \cdot m \cdot L \cdot FSEF_i}{3600}}{P \cdot L} \quad (1kJ = 3600kWh)$$

Donde:

$E_i$ , es la emisión en g/pasajero.Km del agente contaminante  $i$

$E'$ , es la energía consumida en KJ/t.Km

$m$ , es la masa del tren en toneladas

$L$ , es el recorrido del viaje en Km

$PSEF_i$ , es la energía específica del factor de emisión en g/Gj

$FSEF_i$ , es el combustible específico del factor de emisión en g/ kWh

$P$ , es la fracción de los asientos ocupados

### 7.2. Clasificación de los vehículos

En esta tabla están las grandes categorías de los vehículos analizados en el MEET (categorías) y sus equivalencias con la clasificación del UN-ECE, estas categorías a su vez se sub- clasifican según el tamaño o capacidad del vehículo y su actividad (tipos).

Tabla A1: Resumen de las categorías y tipos de vehículos

Categoría	Tipo (sub-clase)/ Clasificación UN-ECE
Coches de pasajeros M1	Coches de pasajeros /M1
Vehículos de carga ligera N1	Vehículos que transportan carga ligera/N1
Vehículos de carga pesada M2, M3,N2,N3	Vehículos que transportan mercancías pesadas (HGV) /N2, N3 (dependen de las toneladas)
	Autobuses Urbanos / M2
	Autobuses /M3
Vehículos de dos ruedas L1,L2,L3,L4,L5	En función de la cilindrada y de los ejes

Las tablas siguientes, "categorías de vehículo", que son las que aparecen en el MEET y la otra según la "clasificación del UN-ECE".

Entre estas dos clasificaciones existe una importante diferencia. Esta diferencia es que, tamaño de los vehículos de carga pesada, que transportan mercancías pesadas (HGV), no coincide en sus rangos de toneladas entre la clasificación del MEET y la clasificación del UN-ECE. Simplemente, el MEET hace referencia a esta clasificación (UN-ECE), para aclarar los tipos de vehículos pero no sigue (en el caso de los HVG) los mismos criterios de rangos de los tamaños de la cargas.

Tabla A2: Clasificación de los vehículos en función del motor, tamaño, años y nivel de regulación del vehículo.

Categoría/UN-ECE	Motor/Combustible	Tamaño	Año del Modelo	Nivel de Regulación
Coche de Pasajeros/ M1	Gasolina	<1.4 l	hasta 1971	Pre-regulation
			1972 - 1977	70/220 & 74/290/EEC
			1978 - 1980	77/102/EEC
			1981 - 1984	78/665/EEC
			1985 - 1992	83/351/EEC
			1986 - 1991	Improved Convencional
			1986 - 1991	Open loop catalyst
			1991 - 1996	91/441/EEC (EURO I)
			1996 - today	94/12/EEC (EURO II)
			2001-2005	EURO III
		2005 -	EURO IV	
		1.4-2.0 l	Hasta 1971	Pre-regulation
			1972 - 1977	70/220 & 74/290/EEC
			1978 - 1980	77/102/EEC
			1981 - 1984	78/665/EEC
			1985 - 1992	83/351/EEC
			1986 - 1991	Improved Convencional
			1986 - 1991	Open loop catalyst
			1991 - 1996	91/441/EEC (EURO I)
			1996 - today	94/12/EEC (EURO II)
			2001-2005	EURO III
		2005 -	EURO IV	
		>2.0	Hasta 1971	Pre-regulation
			1972 - 1977	70/220 & 74/290/EEC
			1978 - 1980	77/102/EEC

Categoría/UN-ECE	Motor/Combustible	Tamaño	Año del Modelo	Nivel de Regulación
			1981 - 1984	78/665/EEC
			1985 - 1992	83/351/EEC
			1986 - 1991	Improved Convencional
			1986 - 1991	Open loop catalyst
			1991 - 1996	91/441/EEC (EURO I)
			1996 - today	94/12/EEC (EURO II)
			2001-2005	EURO III
			2005 -	EURO IV
	Diesel	< 2.0 l	Hasta 1986	Sin control
			1986 - 1996	88/436 & 91/441/EEC (EURO I)
			1996 - today	94/12/EEC (EURO II)
			2001-2005	EURO III
			2005 -	EURO IV
		> 2.0 l	Hasta 1986	Sin control
			1986 - 1996	88/436 & 91/441/EEC (EURO I)
			1996 - today	94/12/EEC (EURO II)
			2001-2005	EURO III
			2005 -	EURO IV
	LPG	Todos	Hasta 1986	Convencional
			1986 - 1996	88/436 & 91/441/EEC (EURO I)
			1996 - today	94/12/EEC (EURO II)
			2001-2005	EURO III
			2005 -	EURO IV
	CNG	Todos		
	Alcohols	Todos		
	Bio diesel	Todos		
	Electricos	Todos		
	Hibridos	Todos		
2 Ejes	Todos		Sin control	

Categoría/UN-ECE	Motor/Combustible	Tamaño	Año del Modelo	Nivel de Regulación
				Categorías futuras
Vehículos de carga ligera/N1	Gasolina	<3.5 t	Hasta 1995	Sin control
			1995 - 1998	93/59/EEC (EURO I)
			1998 -	96/69/EEC (EURO II)
				EURO III
				EURO IV
	Diesel		Hasta 1995	Sin control
			1995 - 1998	93/59/EEC (EURO I)
			1998 -	96/69/EEC (EURO II)
				EURO III
				EURO IV
	LPG			
	CNG			
	Alcohols			
	Bio diesel			
Electricos				
Hídridos				
Vehículos de carga pesada/ M2, M3,N2,N3	Diesel	HGV 3.5 - 7.5 t	Hasta 1993	ECE R49 & 88/77/EEC
			1993 - 1997	91/542/EEC stage I (EURO I)
			1997 - today	91/542/EEC stage II (EURO II)
				EURO III
				EURO IV
		HGV 7.5 - 16 t	Hasta 1993	ECE R49 & 88/77/EEC
			1993 - 1997	91/542/EEC stage I
			1997 - today	91/542/EEC stage II
				EURO III
			EURO IV	
		HGV16 - 32 t	Hasta 1993	ECE R49 & 88/77/EEC

Categoría/UN-ECE	Motor/Combustible	Tamaño	Año del Modelo	Nivel de Regulación		
			1993 - 1997	91/542/EEC stage I		
			1997 - today	91/542/EEC stage II		
				EURO III		
				EURO IV		
		HGV 32 - 40 t	Hasta 1993	ECE R49 & 88/77/EEC		
			1993 - 1997	91/542/EEC stage I		
			1997 - today	91/542/EEC stage II		
				EURO III		
		HGV/> 40 t > 40 t	Hasta 1993	ECE R49 & 88/77/EEC		
			1993 - 1997	91/542/EEC stage I		
			1997 - today	91/542/EEC stage II		
				EURO III		
		Autobuses urbanos/ M2	Hasta 1993	ECE R49 & 88/77/EEC		
			1993 - 1997	91/542/EEC stage I		
			1997 - today	91/542/EEC stage II		
				EURO III		
		Coaches/M3	Hasta 1993	ECE R49 & 88/77/EEC		
			1993 - 1997	91/542/EEC stage I (EURO I)		
			1997 - today	91/542/EEC stage II (EURO II)		
				EURO III		
						EURO IV
		LPG	Todos			
		CNG	Todos			
		Bio diesel	Todos			

Categoría/UN-ECE	Motor/Combustible	Tamaño	Año del Modelo	Nivel de Regulación
	Electricos	Todos		
	Hibridos	Todos		
Vehículos de 2-ruedas	Gasolina	< 50 cm <sup>3</sup>	Hasta 1996	ECE R 47
			1997-1998	COM(93)449 Stage 1
			Después 1999	COM(93)449 Stage 2
		> 50 cm <sup>3</sup> 4 Ejes	Hasta 1996	ECE R 40.01
			Después 1997	COM(93)449
		> 50 cm <sup>3</sup> 2 Ejes	Hasta 1996	ECE R 40.01
Después 1997	COM(93)449			

Tabla A3. Clasificación de los vehículos de acuerdo con UN-ECE

Categorías	Description
L	Vehículos de motor con menos de cuatro ruedas
L1	Vehículos de 2 reudas con una capacidad de cilindrada en el motor que no exceda de 50cc y con una velocidad máxima que no exceda de 40 Km/hora.
L2	Vehículos de 3 reudas con una capacidad de cilindrada en el motor que no exceda de 50cc y con una velocidad máxima que no exceda de 40 Km/hora.
L3	Vehículos de 2 reudas con una capacidad de cilindrada en el motor que exceda de 50cc o con una velocidad máxima que exceda de 40 Km/hora.
L4	Vehículos de 3 reudas ordenado asimetricamente en relación a la longitud media de los ejes con una capacidad de cilindrada en el motor que exceda de 50cc o con una velocidad máxima que exceda de 40 Km/hora. (motocicletas con sidecar)
L5	Vehículos de 3 reudas ordenado asimetricamente en relación a la longitud media de los ejes con una capacidad de carga que no exceda de 1000Kg y una capacidad de cilindrada del motor que exceda de 50 cc o con una velocidad máxima que exceda de 40 Km/hora. (motocicletas con sidecar)
M	Vehículos que tengan un mínimo de cuatro ruedas o tengan tres ruedas con un máximo de carga de 1 tonelada y se usen para llevar pasajeros.
M1	Vehículos usados para llevar pasajeros y con menos de 8 asientos más el asiento del conductor
M2	Vehículos usados para llevar pasajeros y con mas de 8 asientos más el asiento del conductor, y con un máximo de peso que no exceda de 5 toneladas
M3	Vehículos usados para llevar pasajeros y con mas de 8 asientos más el asiento del conductor, y con un máximo de peso que exceda de 5 toneladas
N	Vehículos que tienen más de cuatro ruedasg o tienen tres ruedas con una carga máxima que exceda de 1 tonelada y se usa para llevar mercancías
N1	Vehículos usador para llegar mercancías y tienen un máximo de carga que no exceda de 3,5 toneladas
N2	Vehículos usador para llegar mercancías y tienen un máximo de carga que exceda de 3,5 toneladas pero no exceda de 12 toneladas
N3	Vehículos usador para llegar mercancías y tienen un máximo de carga que exceda de 12 toneladas

## 7.3. Anexo de Resultados y Aplicaciones por modos de transporte.

### Modo de transporte por carretera

#### Resultados del modo de transporte por carretera

Resultados parciales, resultados finales y datos específicos para el caso español son:

**Resultados intermedios de composición de la flota para el caso español. Datos base 1995.**

Tabla A4. Composición de la flota en España.

Tipo de vehículo	Combustible	Tamaño	Tipo de emisión	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Coches de pasajeros	Gasolina	<1.4 l	Pre ECE	195833	12423	156	0	0	0	0
			ECE 15-00/01	1399387	588773	93098	2087	0	0	0
			ECE 15-02	773876	534591	184832	15678	108	0	0
			ECE 15-03	1151532	992997	578672	143423	7184	23	0
			ECE 15-04	3144335	3065010	2633307	1585524	444174	30917	192
			Improved conventional	0	0	0	0	0	0	0
			Open loop	0	0	0	0	0	0	0
			EURO 1	0	2616746	2550804	2213462	1357507	387242	27238
			EURO 2	0	0	2765378	2698111	2349248	1452664	419735
			EURO 3	0	0	0	2377765	2309952	1973412	1151544
		EURO 4	0	0	0	626888	3892126	7023573	9578214	
		1.4- 2.0 l	Pre ECE	75535	4792	60	0	0	0	0
			ECE 15-00/01	539764	227098	35909	805	0	0	0
			ECE 15-02	298495	206199	71292	6047	42	0	0
			ECE 15-03	444162	383013	223202	55320	2771	9	0
			ECE 15-04	1212815	1182218	1015704	611559	171324	11925	74
			Improved conventional	0	0	0	0	0	0	0
			Open loop	0	0	0	0	0	0	0
			EURO 1	0	1009316	983881	853764	523610	149365	10506
			EURO 2	0	0	1066646	1040700	906138	560313	161898
			EURO 3	0	0	0	917138	890981	761173	444167
		EURO 4	0	0	0	241800	1501249	2709092	3694454	
		>2.0 l	Pre ECE	8393	532	7	0	0	0	0
			ECE 15-00/01	59974	25233	3990	89	0	0	0
			ECE 15-02	33166	22911	7921	672	5	0	0
			ECE 15-03	49351	42557	24800	6147	308	1	0
			ECE 15-04	134757	131358	112856	67951	19036	1325	8
			EURO 1	0	112146	109320	94863	58179	16596	1167
			EURO 2	0	0	118516	115633	100682	62257	17989

Tipo de vehículo	Combustible	Tamaño	Tipo de emisión	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
			EURO 3	0	0	0	101904	98998	84575	49352
			EURO 4	0	0	0	26867	166805	301010	410495
	Diesel	<2.0 l	Sin control	940179	630754	317033	93581	9503	119	0
			EURO 1	498819	1055250	1101842	870635	467533	130962	11997
			EURO 2	0	0	481545	472508	420093	272514	84474
			EURO 3	0	0	0	512480	497880	425404	248346
			EURO 4	0	0	0	135281	840257	1514319	2065686
			Sin control	626786	420503	211355	62387	6336	79	0
			EURO 1	332546	703500	734561	580423	311689	87308	7998
			EURO 2	0	0	321030	315006	280062	181676	56316
			EURO 3	0	0	0	341653	331920	283602	165564
			EURO 4	0	0	0	90187	560171	1009546	1377124
	LPG	Todos	Sin control	470	315	159	47	5	0	0
			EURO 1	249	528	551	436	234	66	6
			EURO 2	0	0	241	236	210	136	42
			EURO 3	0	0	0	257	249	213	124
			EURO 4	0	0	0	68	420	758	1034
2-Ejes	Todos	Sin control	0	0	0	0	0	0	0	
Vehículos de carga ligera	Gasolina	Todos	Sin control	562773	630652	494872	284250	70462	1600	0
			EURO 1	0	43541	135066	131839	103582	24389	66
			EURO 2	0	0	152906	208867	198028	128577	15633
			EURO 3	0	0	0	262312	611320	909438	1111222
			EURO 4	0	0	0	0	0	0	0
	Diesel	Todos	Sin control	1397270	1565801	1228682	705743	174944	3972	0
			EURO 1	0	108104	456087	447198	365757	111500	1092
			EURO 2	0	0	258898	398717	383089	268289	37886
			EURO 3	0	0	0	651275	1517803	2257979	2758975
			EURO 4	0	0	0	0	0	0	0
Vehículos de carga pesada	Diesel	3.5 - 7.5 t	Convencional	170775	166776	125710	63672	9315	22	0
			EURO 1	0	37809	51271	48600	31507	3803	2
			EURO 2	0	0	60575	60191	55286	29806	1885
			EURO 3	0	0	0	96781	202304	289243	340080
			EURO 4	0	0	0	0	0	0	0
		7.5 - 16 t	Convencional	77180	75373	56813	28776	4210	10	0
			EURO 1	0	17087	23171	21964	14239	1719	1
			EURO 2	0	0	27376	27202	24986	13471	852
			EURO 3	0	0	0	43739	91429	130720	153696
			EURO 4	0	0	0	0	0	0	0
		16 - 32 t	Convencional	124265	121355	91473	46331	6778	16	0
			EURO 1	0	27512	37307	35364	22926	2767	1
			EURO 2	0	0	44078	43798	40229	21689	1371
			EURO 3	0	0	0	70432	147208	210469	247461
EURO 4	0		0	0	0	0	0	0		

Tipo de vehículo	de Combustible	Tamaño	Tipo de emisión	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020		
		>32 t	Convencional	10449	10204	7691	3896	570	1	0		
			EURO 1	0	2313	3137	2974	1928	233	0		
			EURO 2	0	0	3706	3683	3383	1824	115		
			EURO 3	0	0	0	5921	12378	17697	20807		
			EURO 4	0	0	0	0	0	0	0		
		Autobuses urbanos	Convencional	22879	20222	13316	8412	2540	23	0		
			EURO 1	0	3280	4811	4777	4249	1414	2		
			EURO 2	0	0	5905	5902	5811	4641	752		
			EURO 3	0	0	0	5434	12330	19044	24342		
		Coaches	Convencional	22879	20222	13316	8412	2540	23	0		
			EURO 1	0	3280	4811	4777	4249	1414	2		
			EURO 2	0	0	5905	5902	5811	4641	752		
			EURO 3	0	0	0	5434	12330	19044	24342		
		Motocicletas	Gasolina	<50 cc	Sin control	2751658	2812006	2046913	1159151	532885	N/A	N/A
					Stage I	0	0	397550	355471	258432	N/A	N/A
					Stage II	0	0	415588	1361987	2101322	N/A	N/A
>50 cc	Sin control			876754	895982	652203	369337	169792	N/A	N/A		
2-s	Controlado			0	0	259088	547230	751882	N/A	N/A		
>50 cc	Sin control			472098	482452	351186	198874	91426	N/A	N/A		
4-s	Controlado			0	0	139509	294662	404860	N/A	N/A		

Fuente: MEET 1.999

**Kilómetros anuales, distribución de los kilómetros y las velocidades representativas para España (Año de referencia 1995).**

Tabla A5. Características del tráfico en España

Tipo de vehículo	de Combustible	Tamaño	Tipo de emisión	Recorrido anual total por vehículo anual (km)	Distribución del recorrido (%)			Velocidad de los vehículos representativa (km/h)		
					Ciudad	Carretera 2°	Carreter princip	Ciudad	Carretera 2°	Carreter princip
Coches pasajeros	Gasolina	<1.4 l	Pre ECE	5794	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			ECE 15-00/01	6537	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			ECE 15-02	7058	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			ECE 15-03	7742	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			ECE 15-04	9344	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			Improved conventional	-	-	-	-	-	-	-
			Open loop	-	-	-	-	-	-	-
			EURO 1	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			EURO 2	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			EURO 3	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
		EURO 4	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0	
			1.4- 2.0 l	Pre ECE	5794	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0

Tipo de vehículo	Combustible	Tamaño	Tipo de emisión	Recorrido total por vehículo anual (km)	Distribución del recorrido (%)			Velocidad de los vehículos representativa (km/h)		
					Ciudad	Carretera 2º	Carreter princip	Ciudad	Carretera 2º	Carreter princip
			ECE 15-00/01	6537	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			ECE 15-02	7058	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			ECE 15-03	7742	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			ECE 15-04	9344	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			Improved conventional	-	-	-	-	-	-	-
			Open loop	-	-	-	-	-	-	-
			EURO 1	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			EURO 2	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			EURO 3	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
			EURO 4	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
		>2.0 l	Pre ECE	5794	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0
		ECE 15-00/01	6537	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0	
		ECE 15-02	7058	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0	
		ECE 15-03	7742	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0	
		ECE 15-04	9344	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0	
		EURO 1	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0	
		EURO 2	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0	
		EURO 3	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0	
	EURO 4	11723	30.5	30.6	38.9	20.0	60.0	83.0		
	Diesel	<2.0 l	Sin control	12633	68.8	13.7	17.5	20.0	60.0	83.0
			EURO 1	17916	68.8	13.7	17.5	20.0	60.0	83.0
			EURO 2	17916	68.8	13.7	17.5	20.0	60.0	83.0
			EURO 3	17916	68.8	13.7	17.5	20.0	60.0	83.0
			EURO 4	17916	68.8	13.7	17.5	20.0	60.0	83.0
		>2.0 l	Sin control	12633	68.8	13.7	17.5	20.0	60.0	83.0
			EURO 1	17916	68.8	13.7	17.5	20.0	60.0	83.0
			EURO 2	17916	68.8	13.7	17.5	20.0	60.0	83.0
			EURO 3	17916	68.8	13.7	17.5	20.0	60.0	83.0
EURO 4			17916	68.8	13.7	17.5	20.0	60.0	83.0	
LPG	Todos	Sin control	12633	100.0	0.0	0.0	20.0	60.0	83.0	
		EURO 1	17916	100.0	0.0	0.0	20.0	60.0	83.0	
		EURO 2	17916	100.0	0.0	0.0	20.0	60.0	83.0	
		EURO 3	17916	100.0	0.0	0.0	20.0	60.0	83.0	
		EURO 4	17916	100.0	0.0	0.0	20.0	60.0	83.0	
2-Ejes	Todos	Sin control	-	-	-	-	-	-		
Vehículos de carga ligera	Gasolina	Todos	Sin control	22500	42.0	27.0	31.0	20.0	60.0	83.0
			EURO 1	22500	42.0	27.0	31.0	20.0	60.0	83.0
			EURO 2	22500	42.0	27.0	31.0	20.0	60.0	83.0
			EURO 3	22500	42.0	27.0	31.0	20.0	60.0	83.0
			EURO 4	22500	42.0	27.0	31.0	20.0	60.0	83.0

Tipo de vehículo	Combustible	Tamaño	Tipo de emisión	Recorrido anual total por vehículo anual (km)	Distribución del recorrido (%)			Velocidad de los vehículos representativa (km/h)		
					Ciudad	Carretera 2°	Carreter princip	Ciudad	Carretera 2°	Carreter princip
	Diesel	Todos	Sin control	30000	78.0	10.0	12.0	20.0	60.0	83.0
			EURO 1	30000	78.0	10.0	12.0	20.0	60.0	83.0
			EURO 2	30000	78.0	10.0	12.0	20.0	60.0	83.0
			EURO 3	30000	78.0	10.0	12.0	20.0	60.0	83.0
			EURO 4	30000	78.0	10.0	12.0	20.0	60.0	83.0
Vehículos de carga pesada	Diesel	3.5 - 7.5 t	Convencional	55000	40.0	50.0	10.0	20.0	60.0	90.0
			EURO 1	55000	40.0	50.0	10.0	20.0	60.0	90.0
			EURO 2	55000	40.0	50.0	10.0	20.0	60.0	90.0
			EURO 3	55000	40.0	50.0	10.0	20.0	60.0	90.0
			EURO 4	55000	40.0	50.0	10.0	20.0	60.0	90.0
		7.5 - 16 t	Convencional	55000	40.0	50.0	10.0	20.0	60.0	90.0
			EURO 1	55000	40.0	50.0	10.0	20.0	60.0	90.0
			EURO 2	55000	40.0	50.0	10.0	20.0	60.0	90.0
			EURO 3	55000	40.0	50.0	10.0	20.0	60.0	90.0
			EURO 4	55000	40.0	50.0	10.0	20.0	60.0	90.0
		16 - 32 t	Convencional	70000	24.9	27.8	47.3	20.0	60.0	90.0
			EURO 1	70000	24.9	27.8	47.3	20.0	60.0	90.0
			EURO 2	70000	24.9	27.8	47.3	20.0	60.0	90.0
			EURO 3	70000	24.9	27.8	47.3	20.0	60.0	90.0
			EURO 4	70000	24.9	27.8	47.3	20.0	60.0	90.0
		>32 t	Convencional	70000	24.9	27.8	47.3	20.0	60.0	90.0
			EURO 1	70000	24.9	27.8	47.3	20.0	60.0	90.0
			EURO 2	70000	24.9	27.8	47.3	20.0	60.0	90.0
			EURO 3	70000	24.9	27.8	47.3	20.0	60.0	90.0
			EURO 4	70000	24.9	27.8	47.3	20.0	60.0	90.0
Autobuses urbanos	Convencional	27987	100.0	0.0	0.0	20.0	60.0	90.0		
	EURO 1	27987	100.0	0.0	0.0	20.0	60.0	90.0		
	EURO 2	27987	100.0	0.0	0.0	20.0	60.0	90.0		
	EURO 3	27987	100.0	0.0	0.0	20.0	60.0	90.0		
	EURO 4	27987	100.0	0.0	0.0	20.0	60.0	90.0		
Coaches	Convencional	27987	0.0	50.0	50.0	20.0	60.0	90.0		
	EURO 1	27987	0.0	50.0	50.0	20.0	60.0	90.0		
	EURO 2	27987	0.0	50.0	50.0	20.0	60.0	90.0		
	EURO 3	27987	0.0	50.0	50.0	20.0	60.0	90.0		
	EURO 4	27987	0.0	50.0	50.0	20.0	60.0	90.0		
Motocicletas	Gasolina	<50 cc	Sin control	2067	100.0	0.0	0.0	N/A	N/A	N/A
			Stage I	2067	100.0	0.0	0.0	N/A	N/A	N/A
			Stage II	2067	100.0	0.0	0.0	N/A	N/A	N/A
		>50 cc	Sin control	3403	73.7	12.7	13.6	N/A	N/A	N/A
		2-s	Controlado	3403	73.7	12.7	13.6	N/A	N/A	N/A
		>50 cc	Sin control	3403	73.7	12.7	13.6	N/A	N/A	N/A

Tipo de vehículo	Combustible	Tamaño	Tipo de emisión	Recorrido anual total por vehículo anual (km)	Distribución del recorrido (%)			Velocidad de los vehículos representativa (km/h)		
					Ciudad	Carretera 2º	Carreter princip	Ciudad	Carretera 2º	Carreter princip
		4-s	Controlado	3403	73.7	12.7	13.6	N/A	N/A	N/A

Fuente: MEET 1.999

**Factores de emisión.**

**Tabla A6. Vehículos de viajeros gasolina- Factores Emisiones en caliente CO<sub>2</sub> (g/Km)**

Media europea de los factores de emisión				159.49
Países	Ciudad	Carreteras secundarias	Carreteras principales	Media países por
Bélgica	202.41	141.28	167.07	164.09
Dinamarca	145.65	130.18	154.96	139.59
Francia	171.19	131.02	157.56	149.74
Alemania	170.48	143.46	195.22	165.01
Grecia	218.25	136.86	140.26	168.51
Irlanda	164.10	131.00	136.86	140.45
Italia	204.95	129.92	172.86	164.71
Luxemburgo	149.40	132.69	152.61	144.19
Holanda	197.96	131.16	159.01	161.17
Portugal	174.43	130.90	145.45	142.39
España	212.38	127.63	135.29	156.49
Reino Unido	191.05	135.03	177.67	166.77
Media europea por tipo de vía	188.79	131.29	165.21	

Fuente: MEET 1.999

**Tabla A7. Vehículos de viajeros diesel- Factores Emisiones en caliente CO<sub>2</sub> (g/Km)**

Media europea de los factores de emisión				0.58
Países	Ciudad	Carreteras secundarias	Carreteras principales	Media países por
Bélgica	0.85	0.57	0.38	0.60
Dinamarca	0.65	0.47	0.38	0.53
Francia	0.77	0.47	0.36	0.58
Alemania	0.68	0.45	0.35	0.50
Grecia	1.00	0.52	0.41	0.91
Irlanda	0.77	0.57	0.42	0.59
Italia	0.97	0.47	0.36	0.53
Luxemburgo	0.65	0.52	0.40	0.55
Holanda	0.85	0.52	0.38	0.62
Portugal	0.77	0.47	0.41	0.54
España	0.97	0.52	0.43	0.81
Reino Unido	0.85	0.45	0.36	0.62
Media europea por tipo de vía	0.82	0.47	0.36	

Fuente: MEET 1.999

## Aplicación a casos concretos del modo carretera

### El caso de una gran ciudad. Bruselas

Existen dos divisiones, para analizar el uso de los distintos modos en la ciudad de Bruselas, uno que es la división tradicional en la cual se asignan cada uno de los porcentajes a sus respectivos modos. Y la otra es cuando se aplica la el Plan de movilidad verde de 1997 a 2000.

Tabla A8. Definición de las divisiones modales (solo los transportes motorizados)

División modal "tradicional"	20%	Transporte público: Autobuses
	60%	Coches de pasajeros
División modal "Commute verde"	25%	Transporte público: Autobuses
	45%	Coches de pasajeros

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A9. Definición de los escenarios en función de la tecnología y del tipo de división modal.

	Flota con tecnología actual (1995)	Con tecnología disponible mejor (1995)	Flota con tecnología futura (2010)
	Enfoque medio	Enfoque marginal	Enfoque medio
División modal "tradicional"	Escenario A	Escenario B	Escenario C
División modal "Commute verde"	Escenario D	Escenario E	Escenario F

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Para analizar los resultados compara estos seis escenarios

Tabla A10. Factores de carga asumidos por modos.

División modal "tradicional"	75%	Transporte público: Autobuses
	1,1 p/coche (28%)	Coches de pasajeros
División modal "Commute verde"	77%	Transporte público: Autobuses
	1,3 p/coche (32%)	Coches de pasajeros

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A11. Composición de la flota y asunciones de la tecnología actual y mejorada por modos.

	Flota con tecnología actual (1995)	Con tecnología disponible mejor (1995)	Flota con tecnología futura (2010)
	Enfoque medio	Enfoque marginal	Enfoque medio
<b>Flota de autobuses</b>			
Tipos	flota de 1995	EURO-2	Euro-2, 3, 4
<b>Coches de pasajeros</b>			
	Flota de Belgica 1995	EURO-2	Flota de Belgica en 2010
Parte de Diesel	42.3%	43.0%	44.0%
Parte de pre- Euro	47.0%		0.0%
Parte de Euro 1	43.0%		0.1%
Parte de Euro 2		100.0%	6.9%
Parte de Euro 3			27.5%
Parte de Euro 4			65.5%

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A12. Composición de la flota y asunciones de la tecnología actual y mejorada por modos.

	Flota con tecnología actual (1995)	Con tecnología disponible mejor (1995)	Flota con tecnología futura (2010)
	Enfoque medio	Enfoque marginal	Enfoque medio
<b>Flota de autobuses</b>			
Tipos	flota de 1995	EURO-2	Euro-2, 3, 4
<b>Coches de pasajeros</b>			
	Flota de Belgica 1995	EURO-2	Flota de Belgica en 2010
Parte de Diesel	42.3%	43.0%	44.0%
Parte de pre- Euro	47.0%		0.0%
Parte de Euro 1	43.0%		0.1%
Parte de Euro 2		100.0%	6.9%
Parte de Euro 3			27.5%
Parte de Euro 4			65.5%

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Gráfico A1: Emisiones medias por cercanía motorizado (suma para todos los modos).

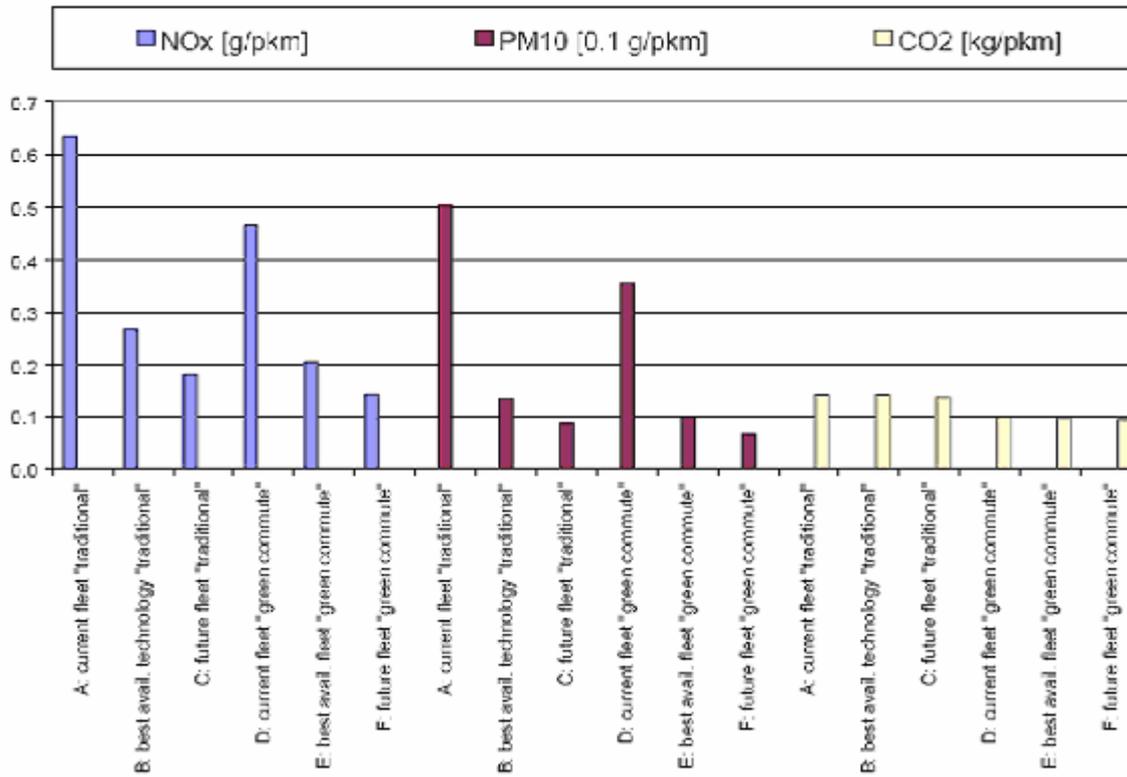
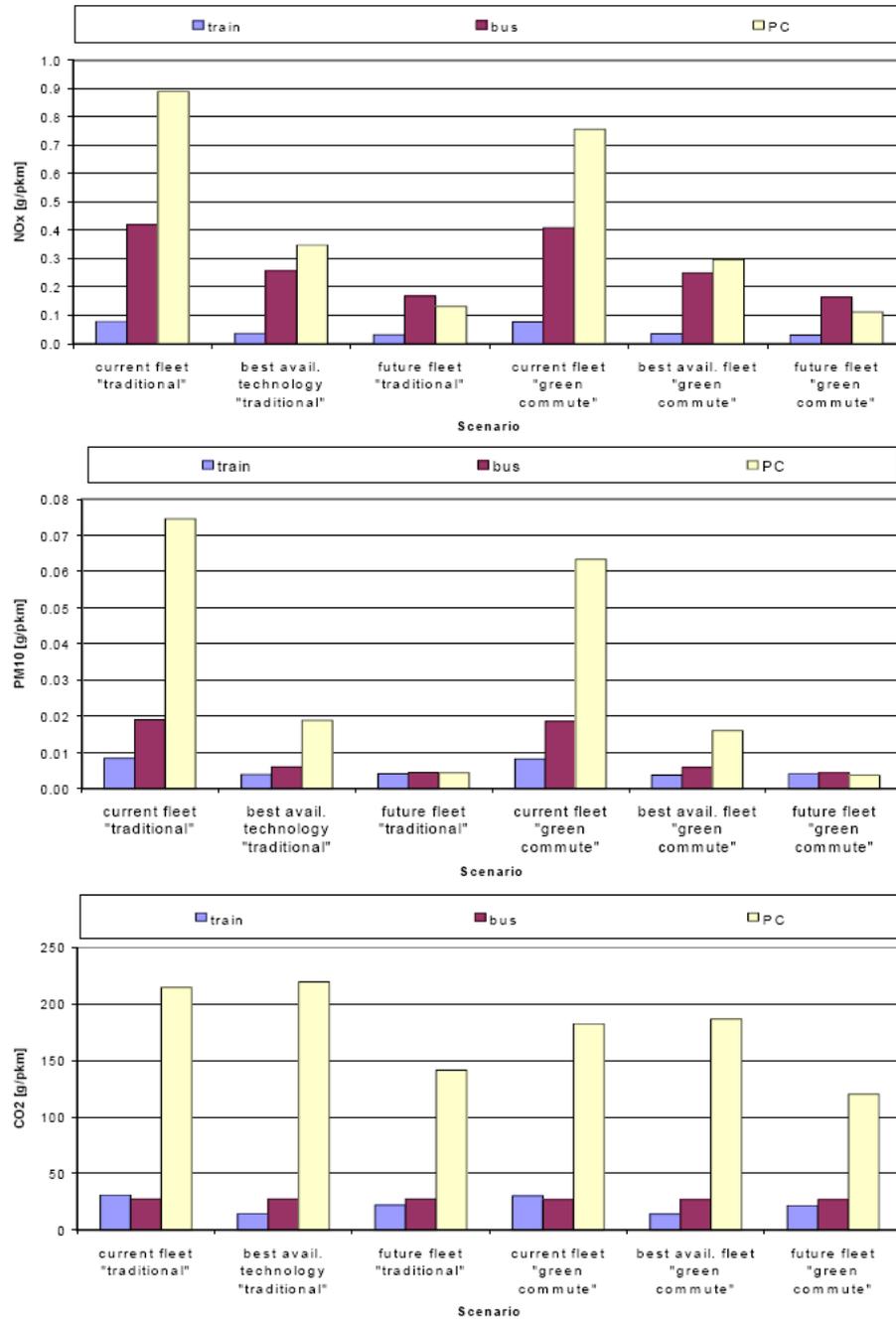


Gráfico A2: Emisiones de NO, PM10, CO<sub>2</sub>, por pasajero/km , por modos y por escenarios.



### El caso de un corredor de Viajeros. El Corredor Viena-Roma.

El viaje comienza en el centro de VIENA y se establecen dos escenarios principales.

Tabla A13. Definición de escenarios

División modal "tradicional"	20%	Transporte público: Autobuses
	60%	Coches de pasajeros
División modal "Commute verde"	25%	Transporte público: Autobuses
	45%	Coches de pasajeros

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A14. Definición de parámetros

Parámetros asignados	Valor
Factores de emisión de la flota con la tecnología actual	Composición de la flota media por carretera de Austria (1995)
Factores de emisión con tecnología disponible mejorada	Euro 2
Factores de emisión de la futura flota con tecnología mejorada	Composición de la flota media por carretera de Austria (2010)
Factores de carga media	2,3 Personas/coche
Factores de carga máxima	4 personas/ coche

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A15. Trayecto por carretera Viena-Roma.

Puntos del viaje	Tipo de carretera	Carretera en la ciudad (km)	Autovia en ciudad (Km)	Autovia (Km)
Centro de ciudad Viena	Carretera de ciudad	4		
Viena	Autovia de ciudad		6	
	Autovia			181
Graz	Autovia de ciudad		7	
	Autovia			102
Klagenfurt	Autovia de ciudad		26	
	Autovia			56
(Frontera)	Autovia			206
Venecia	Autovia de ciudad		6	
	Autovia			20
Padova	Autovia de ciudad		16	
	Autovia			101
Bolonia	Autovia de ciudad		11	
	Autovia			85
Florencia	Autovia de ciudad		20	
	Autovia			246
Roma	Autovia de ciudad		1	
Centro de la ciudad de Roma	Carretera de ciudad	12		
Total Austria		4	39	339
Total Italia		12	54	658
Total	1106 KM	16	93	997

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A16. Composición de la flota Austria 1997.

Combustible, periodo de producción	Nivel de legislación	Proporción
Gasolina menor 1987	Convencional mejorada	4.30%
Gasolina 1987-1990	Catalizador con lazo abierto	11.80%
Gasolina 1991-1995	como Euro 1	29.70%
Gasolina mas de 1996	Euro -2	17.80%
Diesel menor 1987	Convencional (no controlado)	2.8%
Diesel 1988-1996	Euro 1	19.80%
Diesel mayor 1996	Euro 2	14.00%
Gasolina total 63,6%	Total Diesel: 36,6%	100.20%

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A17. Composición de la flota y asunciones de la tecnología actual y mejorada para el modo carretera.

Combustible, nivel de referencia	Nox	CO <sub>2</sub>
Gasolina Euro1 a Euro 2	-40%	no cambia
Diesel XXII a Euro 2	-20%	no cambia

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A18. Correspondencias entre la velocidad media y el tipo de carretera.

Tipo de carretera	Interurbana (carretera en ciudad)	Carretera	Autovía
Velocidad media	40 Km/h	80 Km/h	120 Km/h

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A19. Pendiente.

Tipo de pendiente	Proporción para el tipo de 40 Km/h	Proporción para el tipo de 80 Km/h	Proporción para el tipo de 120 Km/h
-6%	0%	0%	1%
-4%	0%	0%	5%
-2%	0%	0%	10%
0%	100%	100%	68%
2%	0%	0%	10%
4%	0%	0%	5%
6%	0%	0%	1%

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Grafico A3: Comparación de las emisiones de NO<sub>x</sub> entre los seis escenarios

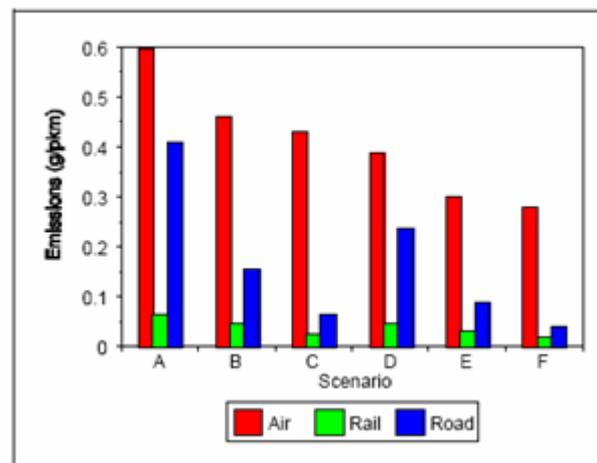
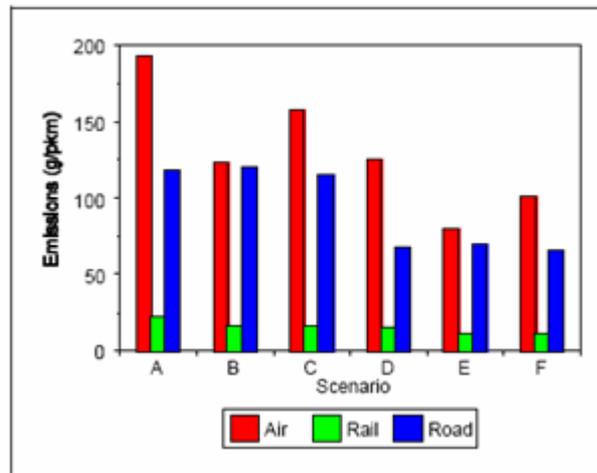


Grafico A4: Comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre los seis escenarios



**El caso de un corredor de Mercancías. El Corredor R´Dam a Zurich.**

En primer lugar este viaje es para vehículos resistentes que transportan mercancías. El tipo de carga no está definida y se compara si esta carga fuera alta o media, para el cálculo de la emisión.

Tabla A20. Definición de escenarios

	Flota con tecnología actual	Flota con tecnología futura
	Enfoque medio	Enfoque medio
Factores de carga altos	Escenario A	Escenario C
Factores de carga moderados	Escenario D	Escenario F

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A21. Definición de factores de carga

	Carretera
Escenario de factores de carga altos	100%
Escenario de factores de carga moderados	50%

Fuente: Meet, 1.999

Tabla A22. Distancias transportadas por modo

	Carretera
Distancia efectiva	680 Km
Distancia adicional en carretera	n.a

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A23. Asunciones de los diferentes carburantes y sus contenidos de sulfuro.

	Tipo de carburante	Precombustión mix	Contenido de sulfuro
Vehículos resistentes	Diesel	Media Europea	0,05w%S

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Tabla A24. Asunciones para los vehículos resistentes para el transporte.

	Transporte por carretera
Carga por camión	20 T
Velocidad media	80 Km/h
Porcentaje del viaje con influencia de la pendiente (0%-4%)	10%
% de corrección de la carga	0%

Fuente: Meet, 1.998 Deliverable 24

Grafico A5: Emisiones de Nox para los cuatro escenarios

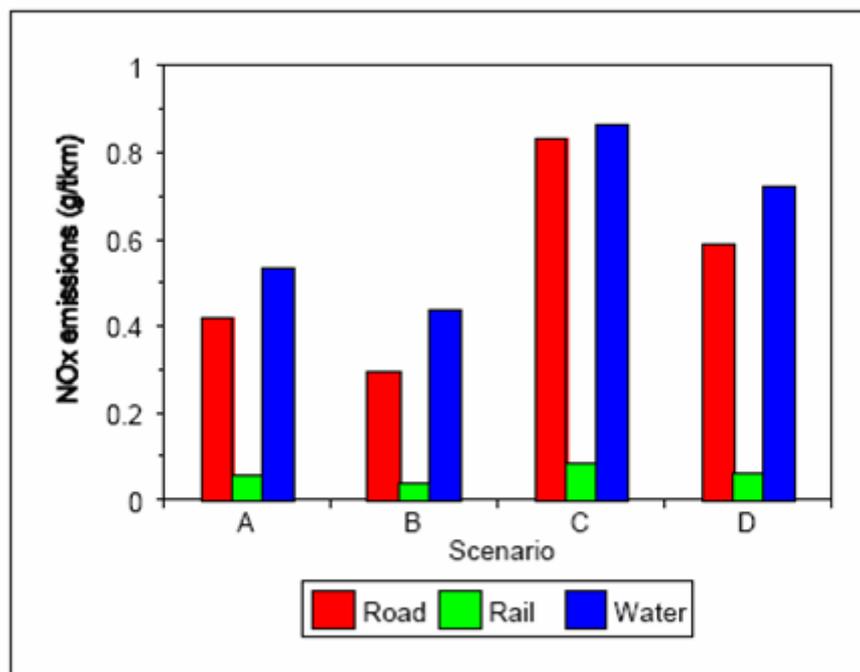
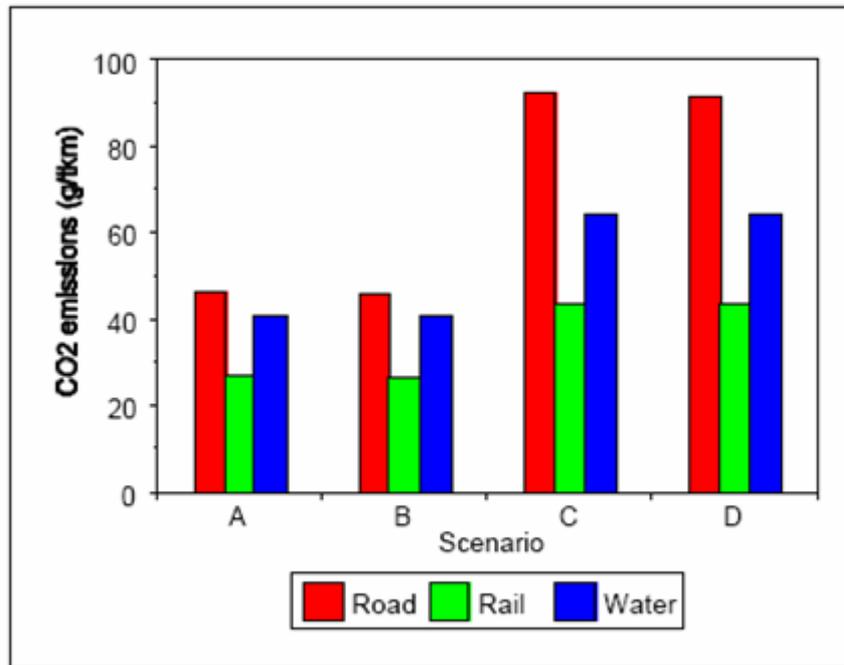


Grafico A6: Emisiones de CO<sub>2</sub> para los cuatro escenarios



## Modo de transporte por ferrocarril

### Resultados estimados para el modo de transporte por ferrocarril

Para determinar los resultados estimados es necesario en primer lugar tener unos valores de referencia en cuanto a:

La ocupación del tren de pasajero

La ocupación de trenes depende de la atracción de una ruta, de la hora, y de la época del año. Como primera aproximación, pueden ser utilizadas las estimaciones siguientes para las tarifas de ocupación en un promedio anual. Se basan sobre todo en datos alemanes y daneses:

Urbano: 30%

Regional: 40%

Inter-ciudad/ internacional: 50%

Los pesos del tren de pasajero

El peso del tren de pasajero varía considerablemente para diversos tipos y dentro de un tipo, dependiendo del tren y de la configuración específica para cada ruta. Algunos valores representativos para los tipos comunes del tren son:

Alta Velocidad: 1.1 toneladas/asiento.

Intercity: 1.0 toneladas/asiento para los trenes convencionales

0.7 toneladas/asiento para modernos de carga ligera

Tráfico regional: 0.8 toneladas/asiento para los trenes convencionales

0.4 toneladas/asiento trenes eléctricos modernos de carga ligera

Transporte Urbano: 0.7 toneladas/asiento para los trenes convencionales

0.4 toneladas/asiento para moderno.

El peso del tren de carga

Para el tráfico de carga, un parámetro de entrada es a menudo la cantidad de carga llevada en toneladas.kilometros. Además del peso de la carga, también se debe considerar el peso de los coches que llevan la carga. La capacidad de la carga de los coches de carga depende en gran parte del cargamento permitido por cada eje (este varía en función del tipo de tren, del país).

De acuerdo con algunos resúmenes de los coches ferroviarios finlandeses y españoles, se han obtenido algunos factores aproximados del peso. Éstos se dan como el cociente de la tara del coche entre la capacidad total del coche cuando esta cargada completamente.

Tabla A25. Ratio del peso del tren

Ratio por eje - Toneladas máximas por eje	WR = Peso Tara / peso total
(trenes más antiguos) 20.0	0.33
(trenes modernos) 22.5	0.27

Fuente: Meet, 1.999 Deliverable 22

El peso real del tren para transportar una cantidad dada de mercancías esta en función del grado de cargamento del tren. Entonces para una fracción dada del cargamento, X, el cociente del peso total del coche al peso de la carga llevada, FR, se da en la siguiente ecuación:

$$FR = 1 + \frac{WR}{(1 - WR)} \times X$$

El peso locomotor

Además del peso de coches, debemos considerar el peso de la tracción. Las correlaciones generales siguientes se pueden utilizar para estimar el peso de las locomotoras:

Locomotoras diesel:

$$\ln(M) = -0,255 + 0,658 \ln(P)$$

Locomotoras eléctricas:

$$\ln(M) = 1,29 + 0,395 \ln(P)$$

Donde:

M es la masa de la locomotora en toneladas

P es la energía de la locomotora en KW

### Ejemplo de cálculos para un tren de pasajeros:

Para el cálculo de las emisiones de la energía consumida usando los factores específicos de energía se utiliza la ecuación, siempre que conozcamos la energía consumida los factores:

$$E_i = F \times FSEF_i$$

Como no conocemos todos los datos, la energía consumida debe ser calculada mediante la ecuación:

$$E = \frac{(N_{stops} + 1) \times v_{max}^2}{2L} + B_0 + B_1 \frac{v_{ave}^2}{L} + \frac{g Ah}{L}$$

Los datos de entrada y sus fuentes para ver los resultados son:

Los cálculos para la estimación se hacen para cuatro trenes de transporte de pasajeros en el Reino Unido y los detalles del tren y los viajes son:

Tabla A26. Detalles de las rutas y trenes para el cálculo del ejemplo.

Ruta	Detalles del viaje					Detalles del tren			
	Viaje	Distancia (km)	Paradas	$v_{max}$ (m/s)	$v_{ave}$ (m/s)	Tipo	Combustible	peso (t)	No. de asientos
1	Lichfield - Reddich	53.1	22	40	11.7	Clase 323	Eléctrico	120	284
2	Manchester- Sheffield	68.8	13	33.3	14.4	Clase 101 Clase 142	Diesel	58 51	124 121
3	Sheffield - London	269.6	5	55.6	31.9	Clase standard 43 Class pullman 43	Diesel	420 420	468 442
4	London - Brussels	350.0	2	83.3	36.1		Diesel	800	766

Fuente: Meet, 1.999 Deliverable 22

Los coeficientes usados (B0, B1, B2) son detallados en la tabla A27 y los factores específicos de emisión para los trenes diesel en la tabla A28.

Tabla A27. Coeficientes usados en el cálculo de la energía

Ruta	B0	B1	B2
1	16.0	0.366	0.0260
2	15.5	0.292	0.0574
3	15.5	0.292	0.0574
4	16.0	0.366	0.0260

Tabla A28. Factores de emisión de energía específica

	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	HC	SO <sub>2</sub>	PM
Diesel (g/kW.h)	640	3.9	10.7	2.0	0.8	0.4
Electricidad(g/GJ)	167800	27.4	631.8	20.2	1445.8	69.9

Fuente: Meet, 1.999 Deliverable 22

Los resultados para los cuatro ejemplos de tipos de tren se dan en la tabla A29.

Tabla A29. Cálculos de las emisiones para los cuatro ejemplos de viajes en tren (50% de ocupación)

Ruta	Tren	Ratios de emisión (g/pasajero.km)					
		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	HC	SO <sub>2</sub>	PM
1	Clase 323	39.8	0.01	0.10	0.10	0.23	0.012
2a	Clase 101	24.1	0.15	0.40	0.08	0.03	0.015
2b	Clase 142	21.7	0.13	0.36	0.07	0.03	0.014
3a	Clase 43 standard	37.5	0.23	0.63	0.12	0.05	0.023
3b	Clase 43 pullman	39.7	0.24	0.66	0.12	0.05	0.025
4		24.7	0.005	0.06	0.06	0.15	0.008

Fuente: Meet, 1.999 Deliverable 22

Esta metodología incluye además el desarrollo de una formulación específica para convertir la energía consumida (Kj/toneladas.Km) en factores de emisión (g/pasajero.Km)<sup>66</sup>.

## Modo de transporte marítimo

### Resultados estimados del modo marítimo

Los datos de las emisiones de los agentes contaminadores se recogen en las tablas siguientes. Los factores de la emisión para los óxidos del sulfuro, y en algunos casos para las partículas, se dan en función del contenido del sulfuro del combustible.

Los datos para las emisiones de partículas se expresan como la masa de partículas total. Sin embargo, hay mayor preocupación por los efectos de partículas más pequeñas, y los estándares de la salud se dan a menudo en términos de PM10 (es decir partículas con un µm de 10 de diámetro menos). Es posible estimar PM10 usando los factores siguientes: 0.86 de P.M. total para los motores residuales del aceite del vapor, 0.5 de P.M. total para los motores del aceite de destilado del vapor y 0.82 de P.M. para los motores diesel.

Las tablas A30 y A31, muestran los factores de emisión revisados una en Kg/T de combustible y la otra en g/kWh, en función del tipo de motor y la carga.

Tabla A30. Factores de emisión revisados (datos en kg/T de combustible)

Tipo de motor	% carga	NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM	SO <sub>x</sub>
Motores diesel a media velocidad <sup>67</sup>		59	8	3250	2.7		21S
Motores diesel a velocidad baja <sup>68</sup>		84	9	3165	2.5		21S

<sup>66</sup> Anexo 1. Meet Deliverable 23

<sup>67</sup> Lloyd's Register (1990) Marine Exhaust Emissions Research Programme: steady stateoperation. Lloyds Register Engineering Services, London, UK.

<sup>68</sup> Lloyd's Register (1993) Marine Exhaust Emissions Research Programme: Phase IISummary Report. Lloyds Register Engineering Services, London, UK.

Tipo de motor	% carga	NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM	SO <sub>x</sub>
Motores diesel a media velocidad <sup>69</sup>		57	7.4	3170	2.4		20S
Motores diesel a velocidad baja (1) <sup>70</sup>		87	7.4	3170	2.4		20S
Motores diesel con velocidad media-baja(1)	25	88.5	8.3	3270	2.85		56.5
	50	79.6	5.5	3200	2.33		56.2
	85	68.3	3.8	3250	1.92		57.3
Motores diesel con velocidad media-baja(1)						1.2	
Motores de fuel oil con velocidad media-baja (1)						7.6	
Barco a Motor - fuel oil y diesel (2) <sup>71</sup>		70	1.5	3110	3	2.5	
Barco de vapor - fuel oil y diesel (2)		8	0.8	3110	0.3	3.9	
Motores a alta velocidad - diesel (2)		70	9		3	1.5	
Motores a velocidad media- diesel (2)		80	2		2	1.2	
Motores a velocidad baja - diesel (2)		95	1.5		4	3.5	
Todos los motores - Maniabras <sup>72</sup> (3)		47	32		13		
Todos los motores- amarrado (3)		22.2	2.7		0.4		
Navegación interior <sup>73</sup> (4)		76	31		9.1	13	8
Naves de recreo motor interno- diesel(4)		48	20		26		19 S
Naves de recreo con motor interno - Gasolina(4)		21.2	201		13.9		24 S
Naves fueraborda- Gasolina(4)		1.07	540		176		24 S
Barcos motor Diesel - río(4)		39	14		7.0		19 S
Barcos motor Diesel - lago(4)		36	15		8.2		19 S
Barcos motor Diesel - costa(4)		37	15		7.0		19 S

<sup>69</sup> Lloyd's Register (1995) Marine Exhaust Emissions Research Programme. LloydsRegister Engineering Services, London, UK.

<sup>70</sup> (1) Norwegian Marine Technology Research Institute (1989) Emission from ships.

<sup>71</sup> (2) Bouscaren R (1990) Emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in the British Channel by ship traffic. EMEP Workshop on emissions from ships, Oslo, Norway.

<sup>72</sup> (3) Transport Research Institute (1992) Návrh typov'ych radov' zeleznic'ych hnacíchvozidiel motorovej trakcie a riecných plavidiel, pre ktoré budú stanovené prevádzkové limity emisií plyn'ych škodlivín a dymivosti. Výskumn'ý projekt C 12.1.1 Stanovenie limitov emisií produkovan'ych mobilnými zdrojmi zeleznickej a vodnej dopravy, metódy a formy ich kontroly. D3 - Bezpečnosť, Ekológia, Energetika, Zilina.

<sup>73</sup>(4) United States Environmental Protection Agency (1985) Compilation of air pollutant emission factors: Volume II: mobile sources - vessels. AP-42, Fourth Edition

Tipo de motor	% carga	NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM	SO <sub>x</sub>
Barcos de vapor - atracados - subproducto del petróleo(4)		4.55	neg.		0.40	1.25	20 S
Barcos de vapor - crucero - subproducto del petróleo(4)		6.98	0.43		0.09	2.50	20 S
Barcos de vapor - completo- subproducto del petróleo(4)		7.95	0.91		0.22	7.06	20 S
Barcos de vapor - atracados - petróleo destilado(4)		3.11	0.6		0.5	2.11	20 S
Barcos de vapor - crucero - petróleo destilado(4)		3.31	0.6		0.5	2.08	20 S
Barcos de vapor - completo - petróleo destilado(4)		6.25	0.6		0.5	2.08	20 S
Barcos de vapor - crucero y trayecto <sup>74</sup> (5)		8	0.9		0.01	1.25+0.4	20 S
Barcos de vapor - Maniobrando(5)		7	0.4		0.1	1.25+0.4	20 S
Barcos con motores diesel(5)		42	9		3.4	5	22 S
Petrolero descargando(5)		12	1		0.01	1.45+0.4	22 S
Buque de vela - 4 tiempos <sup>75</sup> (6)		55.9					
Buque de vela - 2 tiempos (6)		72.8					
Embarcación diesel - 200HP - Parado (4)		0.9	29.5		54.9		
Embarcación diesel - 200HP - despacio (4)		29.3	20.4		14.5		
Embarcación diesel - 200HP - crucero (4)		59.4	17.7		23.9		
Embarcación diesel - 200HP - pleno (4)		35.8	19.9		8.4		
Embarcación diesel - 300HP - despacio (4)		47.3	8.3		8.0		
Embarcación diesel - 300HP - crucero(4)		54.7	6.7		7.1		
Embarcación diesel - 300HP - pleno(4)		38.6	8.2		2.9		
Embarcación diesel - 500HP - parado(4)		13.9	39.6		16.5		
Embarcación diesel - 500HP - crucero(4)		47.5	13.9		6.2		
Embarcación diesel - 500HP - pleno(4)		37.8	11.8		3.2		
Embarcación diesel - 600HP - parado(4)		43.1	24.1		9.6		
Embarcación diesel - 600HP - despacio(4)		35.2	7.1		2.3		

<sup>74</sup> (5) Scott Environmental Technology Inc (1981) Inventory of emissions from marine operations within the California coastal waters. Scott Environmental Technology Inc, San Bernardino, California

<sup>75</sup> (6) Øyvin M (1990) NOX emission factors from marine diesel engines. EMEP Workshop on emissions from ships, Oslo, Norway

Tipo de motor	% carga	NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM	SO <sub>x</sub>
Embarcación diesel - 600HP - Crucero(4)		48.9	10.9		3.4		
Embarcación diesel - 700HP - parado(4)		34.5	41.1		13.5		
Embarcación diesel - 700HP - Crucero(4)		63.5	5.0		1.3		
Embarcación diesel - 900HP - parado(4)		15.1	31.4		34.9		
Embarcación diesel - 900HP - 2/3(4)		23.4	8.8		2.3		
Embarcación diesel - 900HP - crucero(4)		50.5	11.4		2.5		
Embarcación diesel - 1580HP - despacio(4)		52.1	17.2				
Embarcación diesel - 1580HP - crucero(4)		87.4	6.2				
Embarcación diesel - 1580HP - pleno(4)		66.7	33.4		2.3		
Embarcación diesel - 2500HP - despacio(4)		58.9	8.4		3.2		
Embarcación diesel - 2500HP - 2/3(4)		45.8	17.8		2.1		
Embarcación diesel - 2500HP - Crucero(4)		54.9	11.0		2.3		
Embarcación diesel - 2500HP - Full(4)		56.1	13.5		3.0		
Embarcación diesel - 3600HP - despacio(4)		51.5	20.8		8.4		
Embarcación diesel - 3600HP - 2/3(4)		50.4	4.0		3.5		
Embarcación diesel - 3600HP - Crucero(4)		47.7	5.9		4.7		
Embarcación diesel - 3600HP - pleno(4)		43.1	8.8		4.1		

S es el contenido de sulfuro del combustible

( ) Referencias de los proyectos en los que se encuentran los datos recogidos, ver notas pie de página

Fuente: MEET, Deliverable 22,1999

Tabla A31. Factores de emisión revisados (datos en g/kWh)

Tipo de motor	Carga %	NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM
Velocidad lenta cuatro tiempos (1) <sup>76</sup>	80	17.7	0.2	600	0.8	0.9
	20	17.1	0.6	1000	1.3	0.9
Velocidad media cuatro tiempos (1)	80	14.0	1.0	620	0.2	0.4
	20	21.0	2.2	1120	0.4	0.6
Motores diesel con velocidad media (2) <sup>77</sup> *		12.4	0.73	676	0.2	

<sup>76</sup> (1) Alexandersson A, E Flodström, R Öberg and P Stalberg (1993) Exhaust gasemissions from Sea Transportation. MariTerm AB, Swedish Transport Research Board.

Tipo de motor	Carga %	NOx	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM
Buque de abastecimiento/ rompe hielos (2)*		11.8	0.98	646	0.027	
Motores a velocidad media - ratios de emisión (3) <sup>78</sup> †		9.87			0.42	0.43
Naves a alta velocidad (3) ‡		15.3			0.25	1.18
Barcos de pesca (3)		12.0			0.30	0.25
Turbinas de gas (4) <sup>79</sup>		2 - 4				
Fueraborda Gasolina dos tiempos <3.9 hp		2.4	505		336	
Fueraborda Gasolina dos tiempos 3.9 - 9.9 hp		1.5	571		329	
Fueraborda Gasolina dos tiempos 9.9 - 29.9 hp		1.6	462		185	
Fueraborda Gasolina dos tiempos 29.9 - 49.9 hp		2.2	298		140	
Fueraborda Gasolina dos tiempos 49.9 - 74.9 hp		2.4	299		150	
Fueraborda Gasolina dos tiempos 74.9 - 99.9 hp		2.2	332		155	
Fueraborda Gasolina dos tiempos 99.9 - 149.9 hp		1.7	338		152	
Fueraborda Gasolina dos tiempos 149.9 - 199.9 hp		1.7	380		150	
Fueraborda Gasolina dos tiempos >199.9 hp		1.4	378		165	
Fueraborda Gasolina cuatro tiempos <3.9		8.7	380		47.0	
Fueraborda Gasolina cuatro tiempos 3.9 - 9.9		5.7	300		28.3	
Fueraborda Gasolina cuatro tiempos 9.9 - 29.9		6.5	280		15.6	
Fueraborda Gasolina cuatro tiempos 29.9 - 49.9		10.2	250		10.9	
Fueraborda Gasolina cuatro tiempos 49.9 - 74.9		11.3	250		8.4	
Fueraborda Gasolina cuatro tiempos 74.9 - 99.9		9.2	225		14.5	
Fueraborda Gasolina cuatro tiempos 99.9 - 149.9		11.2	225		11.1	
Fueraborda Gasolina cuatro tiempos 149.9 - 199.9		6.5	200		15.0	
Fueraborda Gasolina cuatro tiempos >199.9		6.5	200		15.0	

<sup>77</sup> (2)Cooper D A, K Peterson K and D Simpson (1996) Hydrocarbon, PAH and PCB emissions from ferries: a case study in the Skagerak-Kattegatt-Öresund Region. Atmospheric Environment, Vol. 30, No. 14, pp. 2463-2473

<sup>78</sup> (3)Klokk S N (1995) Measures for reducing NOX emissions from ships. Workshop on control technology for emissions from off-road vehicles and machines, ships and aircrafts. Oslo, Norway.

<sup>79</sup> (4) Sowman C (1996) Turbines' high-speed spin to popularity. The Motor Ship, December 1996, page 15

Tipo de motor	Carga %	NOx	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM
Embarcación acuática privada Gasolina (2 tiempos) 30 - 50 hp		0.95	346		181	
Embarcación acuática privada Gasolina (4 tiempos) 30 - 50 hp §		6.5	280		15.6	
Embarcación acuática privada Gasolina 50 - 75 hp		1.37	339		206	
Motor interno Gasolina 100 - 150 hp		7.6	175		7.2	
Motor interno Gasolina 150 - 200		7.6	175		7.0	
Motor interno Gasolina >200		10.4	174		5.4	

\* basado solo en medidas de transbordadores

† Media de cuatro transbordadores de coches y pasajeros y dos buques de pesca después de ajustarse y adaptarse a las exigencias de los motores tonel proposito de reducir las emisiones de NOx

¶ media de dos buques de pesca

§ tomado de los factores de emisión de fueraborda de cuatro tiempos

( ) Referencia de los proyectos utilizados, ver notas pie de página

Fuente: MEET, Deliverable 22,1999

Tabla A32. Factores de emisión para motores diesel con generadores eléctricos en buques (kg/t de combustible)

Indice de salida (Generador externo) kW	Carga eléctrica (%indice de salida)	NOx	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM	SOx
20	0	60.89	21.08		36.89		19
20	25	62.30	11.18		28.57		19
20	50	66.98	7.49		20.26		19
20	75	69.44	4.00		11.94		19
40	0	29.98	21.43		81.97		19
40	25	30.68	12.53		51.87		19
40	50	31.73	9.48		40.05		19
40	75	32.67	8.99		32.44		19
200	0	19.91	18.85		18.97		19
200	25	19.79	13.70		4.70		19
200	50	19.67	8.75		2.49		19
200	75	19.20	3.75		2.46		19
500	0	21.43	8.20		29.27		19
500	25	31.15	7.49		15.22		19
500	50	41.10	6.74		11.48		19
500	75	51.05	6.14		8.29		19

Fuente: MEET 1999, United States Environmental Protection Agency (1985).

Los datos de la revisión se han utilizado para especificar los factores de la emisión del defecto para el uso en las metodologías simplificadas y detalladas. Estos datos se muestran en las tablas siguientes:

**Tabla A33. Factores de emisión propuestos (kg/T de combustible) para el uso de una metodología simplificada**

Tipo de motor	NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM	SO <sub>x</sub>
Turbinas de vapor - Motores BFO	6.98	0.431	3200	0.085	2.50	20 S
Turbinas de vapor - Motores MDO	6.25	0.6	3200	0.5	2.08	20 S
Motores de alta velocidad diesel	70	9	3200	3	1.5	20 S
Motores de media velocidad diesel	57	7.4	3200	2.4	1.2	20 S
Motores de baja velocidad diesel	87	7.4	3200	2.4	1.2	20 S
Turbinas de gas	16	0.5	3200	0.2	1.1	20 S

S es el contenido de sulfuro del combustible

Fuente: MEET, 1999

**Tabla A34. Factores de emisión propuestos para modo travesía (kg/t de combustible) para el uso de la metodología detallada**

Tipo de motor	NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM	SO <sub>x</sub>
Turbinas de vapor - Motores BFO	6.98	0.431	3200	0.085	2.50	20 S
Turbinas de vapor- Motores MDO	6.25	0.6	3200	0.5	2.08	20 S
Motores de alta velocidad diesel	70	9	3200	3	1.5	20 S
Motores de media velocidad diesel	57	7.4	3200	2.4	1.2	20 S
Motores de baja velocidad diesel	87	7.4	3200	2.4	1.2	20 S
Turbinas de gas	16	0.5	3200	0.2	1.1	20 S
Motores internos - Barcos de recreo - diesel	48	20	3200	26	neg.	20 S
Motores internos - Barcos de recreo - Gasolina	21.2	201	3200	13.9	neg.	20 S
Motores fuereborda- Gasolina	1.07	540	3000	176	neg.	20 S

S es el contenido de sulfuro del combustible

Fuente: MEET, 1999

**Tabla A35. Factores de emisión propuestos para maniobrar (kg/t de combustible) para el uso de la metodología detallada**

Tipo de motor	NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM	SO <sub>x</sub>
Turbinas de vapor - Motores BFO	6.11	0.19	3200	0.85	2.50	20 S
Turbinas de vapor- Motores MDO	5.47	0.27	3200	5.0	2.08	20 S
Motores de alta velocidad diesel	63	34	3200	4.5	1.5	20 S
Motores de media velocidad diesel	51	28	3200	3.6	1.2	20 S
Motores de baja velocidad diesel	78	28	3200	3.6	1.2	20 S
Turbinas de gas	14	1.9	3200	0.3	1.1	20 S
Motores internos - Barcos de recreo - diesel	48	20	3200	26	neg.	20 S
Motores internos - Barcos de recreo - Gasolina	21.2	201	3200	13.9	neg.	20 S
Motores fuereborda- Gasolina	1.07	540	3000	176	neg.	20 S

S es el contenido de sulfuro del combustible

Fuente: MEET, 1999

**Tabla A36. Factores de emisión propuestos para el atraque (kg/t de combustible) para el uso de la metodología detallada**

Tipo de motor	NO <sub>x</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	VOC	PM	SO <sub>x</sub>
Turbinas de vapor - Motores BFO	4.55	0	3200	0.4	1.25	20 S
Turbinas de vapor- Motores MDO	3.11	0.6	3200	0.5	2.11	20 S
Motores de alta velocidad diesel	28	120	3200	28.9	1.5	20 S
Motores de media velocidad diesel	23	99	3200	23.1	1.2	20 S
Motores de baja velocidad diesel	35	99	3200	23.1	1.2	20 S
Turbinas de gas	6	7	3200	1.9	1.1	20 S
Motores internos - Barcos de recreo - diesel	neg.	neg.	neg.	neg.	neg.	neg.
Motores internos - Barcos de recreo - Gasolina	neg.	neg.	neg.	neg.	neg.	neg.
Motores fuereborda- Gasolina	neg.	neg.	neg.	neg.	neg.	neg.

S es el contenido de sulfuro del combustible

Fuente: MEET, 1999

**Tabla A37. Factores de emisión propuestos para los petroleros descargando (kg/T de combustible) para el uso de la metodología detallada**

NOX	CO	CO2	VOC	PM	SOX
12	1	3200	0.01	2.11	20 S

S es el contenido de sulfuro del combustible

Fuente: MEET, 1999

Tabla A38. Factores de emisión de los motores diesel con generadores eléctricos en los buques (kg/t de combustible)

Agente contaminador	Factor de emisión(kg/ton)	Comentario
NO <sub>x</sub>	$108.6 - 2.47.P + 0.0136.P^2 - 0.000018.P^3 + 0.000684.P.L$	El valor del F test es 117.7
CO	$20.7 - 0.218.L - 0.0231.P + 0.000345.P.L$	El valor del F test es 27.1
CO <sub>2</sub>	3200	
VOC	$3.27 + 2.16.P - 0.0144.P^2 + 0.0000203.P^3 - 0.719.L + 0.00476.L^2$	El valor del F test es 28.5
PM	1.1	
SO <sub>x</sub>	20 S	

P es el kilovatio clasificado de la salida (salida eléctrica del generador);

L es la carga en % de la salida clasificada

S es el contenido de sulfuro del combustible

Fuente: MEET, 1999

### Ejemplo de las dos metodologías recogidas

Se plantean dos ejemplos para mostrar el uso de los métodos simplificados y detallados.

Estos ejemplos demostrar solamente los procedimientos para un número limitado de naves, y solamente se han determinado las emisiones de NO<sub>x</sub>. Sin embargo, las estimaciones para otros tipos de recipiente y de otros agentes contaminadores se derivan exactamente de la misma manera.

Ejemplo1: Uso de la metodología simplificada

Para esta metodología se consideran las siguientes naves:

Tabla A39. Descripción de las naves.

Barco	Número y tipo de barco	Tonelaje Gruto	Millas Nauticas	Motor
A	2 Pasajeros/Ro-Ro/Carga	3000	3000	Velocidad media diesel
B	1 Pasajeros/Ro-Ro/Carga	8000	3000	Velocidad media diesel

Fuente: Meet, 1999

La ecuación básica para el cálculo es:

$$E_{NOx} = \sum_{j,k,l} S_{j,k} (GT) \times t_{j,k,l} \times F_{NOx,j,l}$$

Donde:

$E_{NOx}$  son las emisiones totales de NO<sub>x</sub> de la actividad del envío considerada,

$j$  es el tipo del combustible,

$k$  es la clase de la nave,

$l$  es el tipo del motor,

$S_{jk} (GT)$  es el consumo diario de combustible  $j$  en clase de la nave que  $k$  en función del tonelaje bruto

$t_{jkl}$  es el número de días en la navegación de naves en la clase  $j$  con un motor del tipo  $l$  usando el combustible  $j$

$F_{NOx,j,l}$  es el factor de la emisión de NOx para el tipo l del motor usando el combustible j  
 Como las naves del tipo A y del tipo B sonde la misma clase, el consumo de combustible diario con plena energía varía solamente debido a los diversos pesos brutos, y se en la tabla A26:

$$C_{JK} = 12.834 + 0.00156 \times GT$$

Para el tipo naves de A, con un tonelaje grueso de 3000, esto evalúa como 17.514 toneladas/día, y para el tipo nave de B, con un tonelaje grueso de 8000, la consumición es 25.314 toneladas/día. La consumición de combustible eficaz Sjk (GT) después es dada multiplicándose por 0.8 y se convierte, para el tipo A envía 14.01 toneladas/día, y para el tipo nave de B, 20.25 toneladas/día.

El número de días en la navegación se deriva de la distancia viajó y la velocidad media para el tipo de nave. La Tabla A29 demuestra que la velocidad media de las naves de Passenger/Ro-Ro/Cargo es 16.49 nudos, y así, para los tipos de A y de B de nave, el tiempo tomado para viajar 3000 millas náuticas es 7.58 días.

Ambos tipos de nave tienen motores diesel de velocidad mediana, y la tabla A33 demuestra el factor de la emisión de NOx para ser 57 kg/tonne del combustible. Sustituir estos valores en la ecuación básica da:

$$E_{NOx} = 2 \times (14.01 \times 7.58 \times 57) + (20.25 \times 7.58 \times 57) = 20855.5 \text{ Kg}$$

Ejemplo.2 Uso de la metodología detallada

En este ejemplo, se han considerado las siguientes naves:

Tabla A40. Descripción de las naves.

Barco	Número y tipo de barco	Tonelaje Gruto	Días parado	Días maniobrando	Días en crucero	Motor
A	2 Pasajeros/Ro-Ro/Carga	3000		18	180	Velocidad media diesel
B	1 Pasajeros/Ro-Ro/Carga	8000		18	180	Velocidad media diesel
C	1 Buque cisterna	80000	45	20	300	Motor de vapor con residuos de petroleo

Fuente: Meet, 1999

La ecuación básica para la metodología detallada es:

$$E_{NOx} = \sum_{jklm} S_{jkm} (GT) \times t_{jklm} \times F_{NOx,jlm}$$

Donde:

$E_{NOx}$ , son las emisiones totales de NOx de la actividad del envío considerada

J, es el combustible

K, es la clase de la nave

L, es el tipo clase del motor

m, es el modo de funcionamiento

$S_{jkm} (GT)$ .-es el consumo diario del combustible j en la clase k de la nave en el modo m en función de tonelaje grueso

$t_{jklm}$ .- es el número de días en la navegación de naves de la clase k con el tipo l del motor usando el combustible j en el modo m

$F_{NOx} J_{lm}$ .- es el factor medio de la emisión de  $NO_x$  del combustible  $j$  en el tipo  $l$  de los motores en el modo  $m$

Las naves de los tipos A y B son iguales que las del ejemplo simplificado, y su consumo de combustible está ya calculado, es decir 17.514 para el tipo A y 25.314 para el tipo B. De la tabla A26, el consumo de combustible con toda la energía para el buque de carga a granel líquido se da como:

$$C_{JK} = 14.685 + 0.00079 \times GT$$

dando, para un tonelaje bruto de 80.000, un consumo de 77.885 toneladas/día.

Las fracciones de consumo de combustible en toda la energía que se utilizan en los diversos modos de funcionamiento se dan en la Tabla A28. Esto demuestra los factores para el consumo de la travesía de 0.8, para maniobrar de 0.4 y para el atraque del petrolero de 0.2. La aplicación de estos factores da las tarifas siguientes de la consumición de combustible para las naves y los modos considerados.

Tabla A41. Consumo de combustible por modos.

Barcos	Ratios de consumo de combustible (t/día)			
	Potencia completa	Constante	Maniobra	Atracado
Tipo A	17514	14011	7006	N/A
Tipo B	25314	20251	10126	N/A
Tipo C	77885	62308	31154	15577

Fuente: Meet, 1999

En este ejemplo, los números de días en la navegación son dados por el modo para los tres tipos de nave. Los factores de la emisión para los tipos del motor se contienen en la tabla A34 para el modo de la travesía, la tabla A35 para maniobrar y la tabla A36 para el atraque. Para las naves en este ejemplo, son:

Tabla A42. Factores de emisión de  $NO_x$ .

Barcos	Factores de emisión $NO_x$ (kg/t de combustible)		
	Constante	Maniobra	Atracado
Tipos A y B (motores diesel velocidad media)	14011	7006	N/A
Tipo C (Motor de vapor con subproductos del petróleo)	62308	31154	15577

Fuente: Meet, 1999

La tabla A37 da el factor de la emisión de  $NO_x$  para el petrolero que saca la carga con 12 kg/t de combustible, y se asume que 100 toneladas de combustible están utilizadas para esta operación. Estos valores se substituyen en la ecuación básica para dar las emisiones para cada nave, en cada modo de operación, y se suman para dar las emisiones totales, como sigue:

Tabla A43. Resultados de emisiones

Barco	Modos	Emisiones
A (2 Barcos)	Constante	$2 \times (14011 \times 180 \times 57) = 287506 \text{ Kg}$
A (2 Barcos)	Maniobras	$2 \times (7006 \times 18 \times 51) = 12863 \text{ Kg}$
B	Constante	$(20251 \times 180 \times 57) = 207775 \text{ Kg}$
B	Maniobras	$(10126 \times 18 \times 51) = 9296 \text{ Kg}$
C	Constante	$(62308 \times 300 \times 6,98) = 130473 \text{ Kg}$
C	Maniobras	$(31154 \times 20 \times 6,11) = 3807 \text{ Kg}$
C	Atracado	$(15577 \times 45 \times 4,55) = 3189 \text{ Kg}$
C	Descarga	$(100 \times 12) = 1200 \text{ Kg}$
	Total	469109 Kg

Fuente: Meet, 1999

## Modo de transporte aéreo

### Resultados del modo de transporte aéreo

Vuelos de IFR

El banco de datos de la emisión de los gases de combustión de un motor de ICAO (organización internacionanl de aviación civil) contiene los datos de la emisión basados en medidas bajo condiciones normales usando el LTO-ciclo (ciclo del despegue/aterrizaje) como procedimiento estándar. Este ciclo representa despegue, travesía, el aterrizaje y la marcha lenta del motor bajo condiciones de tierra. El ciclo de LTO- no incluye las emisiones causadas por:

desgaste del motor

mantenimiento

condición en marcha

reaprovisionar de combustible el avión

unidades de potencia auxiliar para producir energía a bordo

arranque del motor y calentamiento, con keroseno sin quemar o quemado incompleto.

Los agentes contaminadores incluidos en la base de datos de ICAO, de especial interés son  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y la  $\text{SO}_2$ . Las cantidades de estas emisiones dependen fuertemente de la composición del combustible, así que el índice de emisión es casi independiente del funcionamiento de motor. En la tabla siguiente se da un resumen de los factores de emisión para el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{SO}_2$  de diversas fuentes.

Tabla A44. Factores de la emisión (g/kg) para el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> de inventarios nacionales y de estudios

Referencias	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
ECAC <sup>80</sup>	3100	1240	-
TÜV <sup>81</sup>	-	-	0.9789
Olivier <sup>82</sup>	3220	1250	1.0000
Switzerland <sup>83</sup>	-	-	0.9844
Netherlands <sup>84</sup>	3168	1242	0.2070
Guidebook <sup>85</sup>	3133	1266	1.0000
Norway	-	-	0.3200

Fuente: MEET, 1999

Por otro lado, para las emisiones durante las operaciones de tierra se ha realizado un estudio (Scherer) en el aeropuerto de Zurich-Kloten para medir el comienzo del motor de avión, las unidades de potencia auxiliar (APU) y el reaprovisionar de combustible el avión.

Las emisiones de reaprovisionar de combustible del avión y del APU no son cubiertas por el ciclo de LTO. El estudio demuestra que el ciclo de LTO cubre solamente cerca de 1/8 de las emisiones de VOC durante una estancia en el aeropuerto.

---

<sup>80</sup> ECAC (1995) Environmental Policy Statement of the Preparatory Committee of the 1996 Regional Conference on Transport and the Environment (sixth session 4-6 Sep. 1995), informal document no 29.

<sup>81</sup> Umweltbundesamt (1989) Ermittlung der Abgasemissionen aus dem Flugverkehr über der Bundesrepublik Deutschland. UBA Bericht 6/89. Berlin.

<sup>82</sup> Olivier J G J (1991) Inventory of aircraft emissions: a review of recent literature. Report no. 736 301 008. Laboratory for Waste Materials and Emissions

<sup>83</sup> Bundesamt für Zivilluftfahrt (editor) (1993) Die Auswirkungen der Luftfahrt auf die Umwelt - Synthese. Bern

Bundesamt für Zivilluftfahrt (editor) (1993) Die Auswirkungen der Luftfahrt auf die Umwelt - Kurzfassung. Bern

<sup>84</sup> Peper J A and F Asmelash (1992) Emissies in het Nederlandse Luchtruim door de Militaire Luchtvaart in 1992. NLR CR 94413 L. National Lucht- en Ruimvaartlaboratorium.

<sup>85</sup> EEA (editor) (1997) Emission Inventory Guidebook - Sub-Sector Air Traffic, Copenhagen.

Tabla A45. Las emisiones de VOC por el motor durante el motor comienzan y calentándose-para arriba (VOC total) y las emisiones de VOC registradas en el LTO-ciclo (LTO-VOC)

Avión (Número de motores)	Tipo de motor	Cantidad de datos	Total VOC	Tiempo de comienzo del arranque	LTO-VOC
MD-11 (3)	PW 4460	6 - 1992	1100 g	4.5 s	280 g
MD-11 (3)	PW 4460	6 - 1992	1500 g	4.9 s	310 g
Airbus A 340 (4)	CF M56-5C2	8 - 1993	1500 g	3.9 s	110 g
Airbus A 340 (4)	CF M56-5C2	8 - 1993	1500 g	3.8 s	360 g
Airbus A 310 (2)	JT 9D-7R 4E1	8 - 1993	1800 g	4.7 s	510 g

Fuente: MEET, 1999

Tabla A46. Emisiones VOC en tierra de un McDonnell Douglas MD-11

Motor en comienzo de 3 PW-4460 de motores	2600 g	Suma de las emisiones VOC del LTO
Re-abastecimiento (del tanque completo) a 19 °C	3800 g	
Motor de arranque de las unidades de energía auxiliar (APU)	150 g	
Operación de APU en 10 minutos	15 g	
Suma de las emisiones VOC adicionales	6565 g	880 g

Fuente: MEET, 1999

Hüttig y otros prepararon un estudio similar para el aeropuerto de Francfort en emisiones de APU. El E-I fue derivado de este informe así como un consumo de combustible específico por hora de funcionamiento.

Tabla A47. Índices de emisión de las unidades de potencia auxiliar

	CO <sub>2</sub> (g/kg)	SO <sub>2</sub> (g/kg)	NO <sub>x</sub> (g/kg)	VOC (g/kg)	CO (g/kg)
APU comienzo	3149.86	1.00	2.24	0.18	3.01
APU - parado	3149.74	1.01	7.96	1.70	21.12
APU (A/C)	3150.00	1.00	8.47	0.60	9.17

Fuente: MEET, 1999

Las emisiones de reaprovisionar de combustible son descritas en un estudio por Olivier<sup>86</sup>. Por último el MEET realiza una comparación entre los dos inventarios seleccionados, entre los datos de entrada del ANCAT/EC y el ATEMIS.

<sup>86</sup> Olivier J G J (1991) Inventory of aircraft emissions: a review of recent literature. Report no. 736 301 008. Laboratory for Waste Materials and Emissions

El grupo ANCAT/EC produjo un inventario de la emisión del avión de NO<sub>x</sub> con la ayuda del proyecto de investigación de las emisiones del avión de AERONOX. El proyecto de AERONOX era el sistema que determinaba, entre otras cosas, las emisiones de NO<sub>x</sub> de los motores del avión y del tráfico aéreo global en las altitudes de travesía, y fue apoyado por la CCE así como las instituciones nacionales. El inventario de ANCAT/EC se basa en los perfiles de la emisión calculados con los modelos similares a ATEMIS.

Los datos comprensivos sobre longitud y tiempo de la subida, la travesía y la pendiente y sobre el consumo de combustible y las emisiones de NO<sub>x</sub> están disponibles, así que se realizó una comparación entre los resultados del método del MEET y de perfiles de ANCAT/EC para cuatro tipos de avión (B727, B737, A310, A320) en un vuelo de 1000 kilómetros. Los resultados se dan en la tabla A48.

Las dos metodologías llegan a un consumo de combustible específico más o menos igual. Sin embargo, algunas variaciones son evidentes:

El perfil de ANCAT/EC tiende a tener un consumo de combustible más bajo que el perfil del MEET. Eso es debido a diversas asunciones en los parámetros de los modelos:

El peso (el máximo de las aplicaciones de ATEMIS saca el peso, ANCAT solamente el 70% de la carga útil),

funcionamiento de motor (ATEMIS utiliza diversas tarifas de la subida) y

la mezcla del motor usada para el tipo de avión (Boeing B 737).

Una comparación para el área de Austria se realizó utilizando los resultados del inventario de ANCAT/EC y el cálculo de ATEMIS los cuales muestran en este nivel de resolución, una diferencia de casi el 10% entre estos dos inventarios.

Tabla A48. Comparación de resultados del MEET y de ANCAT/EC

Tipo de vuelo	Estado de la operación	MEET		ANCAT/EC		Diferencias	
		Combustible /distancia (kg/NM)	Combustible /tiempo (kg/s)	Combustible /distancia (kg/NM)	Combustible /tiempo (kg/s)	Combustible /distancia (%)	Combustible Tiempo (%)
Boeing B727	Subida	17.131	1.801	17.359	1.991	+1	+11
	Crucero	7.899	0.839	7.340	0.933	-7	+11
	Descenso	3.262	0.324	1.439	0.140	-56	-57
	Viaje total	9.295	0.979	8.020	0.984	-14	0
Boeing B737	Subida	12.743	1.345	10.520	1.060	-17	-21
	Crucero	6.724	0.715	4.635	0.534	-31	-25
	Descenso	2.491	0.244	1.581	0.151	-37	-38
	Viaje total	14.590	0.798	5.119	0.569	-65	-29
Airbus A-310	Subida	17.556	2.048	25.039	2.883	+43	+41
	Crucero	10.787	1.149	8.159	1.052	-24	-9
	Descenso	3.103	0.312	3.089	0.320	0	+3
	Viaje total	11.801	1.278	8.865	1.104	-25	-14
Airbus A-320	Subida	11.601	1.262	9.881	1.047	-15	-17
	Crucero	6.151	0.653	4.510	0.564	-27	-14
	Descenso	1.782	0.178	1.414	0.138	-21	-23
	Viaje total	6.689	0.709	5.016	0.592	-25	-16

Fuente: MEET, 1999

### Vuelos militares

La calidad de datos públicos disponibles sobre funcionamiento del avión/de motor, sobre el consumo de combustible específico y sobre los factores específicos de la emisión para los vuelos militares es relativamente pobre. El banco de datos de la emisión del extractor del motor de ICAO no proporciona ninguna información puesto que no hay certificación de ICAO para los motores militares.

Los índices medios de la emisión se dan en la tabla siguiente. Se basan en datos de inventarios nacionales del tráfico aéreo y del proyecto de ANCAT/EC. Debe ser observado que las figuras están basadas en la situación nacional especial o en un promedio global.

Tabla A49. Tarifas de emisión para los vuelos militares en diversos países

	Naturaleza del vuelo	CO	VOC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
Alemania	LTO-ciclo	39,3	10,9	8,3	1,1		
	Helicóptero constante	38,8	8,0	2,6	1,0		
	Jet de combate	10,0	1,2	10,9	0,9		
	Constante 0.46-3 km	12,4	1,6	10,7	0,9		
	Constante >3 km	8,2	1,1	8,5	0,9		
Holanda	Total	126	4,0	15,8	0,2	1250	2942
	F-16	102	3.36	15,3	0,2	1224	2959
Suiza	LTO-Ciclo	33,9	2,59	4,631	1,025		
	Constante	14,95	0,67	5,034	0,999		

Fuente: MEET, 1999

### Vuelos de VFR

Un sistema de los índices de la emisión para los vuelos de VFR se da en las tablas siguientes usando datos de diversos inventarios nacionales.

Tabla A50. Ratios de la emisión para los vuelos de VFR - Alemania.

	CO (g/kg)	VOC (g/kg)	NO <sub>x</sub> (g/kg)	SO <sub>2</sub> (g/kg)
VFR-vuelos	798	18.867	3.140	0.420

Fuente: MEET, 1999

Tabla A51. Ratios de emisión de Helicópteros- Alemania, Holanda y Suiza

	VOC (g/kg)	CO (g/kg)	NO <sub>x</sub> (g/kg)	CO <sub>2</sub> (g/kg)	SO <sub>2</sub> (g/kg)	H <sub>2</sub> O (g/kg)
Alemania- velocidad constante	7.99	38.79	2.65		0.99	
Holanda- velocidad constante	3.65	11.06	3.14	3.14	0.20	1.25
Suiza	0.26	1.10	13.31		0.97	

Fuente: MEET, 1.999

Tabla A52. Ratios de emisión para vuelos VFR- Holanda

	VOC (g/kg)	CO (g/kg)	NO <sub>x</sub> (g/kg)	CO <sub>2</sub> (g/kg)	SO <sub>2</sub> (g/kg)	H <sub>2</sub> O (g/kg)
<b>Nivel de vuelo 0 - 30</b>						
- Hélices ligeras	20.09	1054.07	2.70	0.21	1255.81	0.21
- Reactores turbo ligeros	18.30	35.10	7.30	0.20	1300.00	0.20
- Reactores turbo medios	7.05	21.84	7.19	0.19	1245.61	0.19
<b>Nivel de vuelo 30 - 180</b>						
- Hélices ligeras	12.50	1080.00	4.00	0.17	1333.33	0.17
- Reactores turbo ligeros	0.89	2.89	13.05	0.21	1263.16	0.21
- Reactores turbo medios	1.04	5.13	8.04	0.20	1254.10	0.20
<b>Nivel de vuelo 180 - 360</b>						
- Reactores turbo medios	0.79	4.59	7.64	0.21	1256.41	0.21

Fuente: MEET, 1999

### Resultados de la metodología basada en los aviones de mercancías

El EcoTransIT en sus cálculos simplifica las emisiones de este modo de transporte a través de una tabla en la que incluyen los distintos factores de contaminación.

Los factores de la emisión de la tabla para el avión de carga (los vuelos interurbanos), se recogen en la tabla siguiente:

Tabla A53. Factores de emisión para el avión de carga.

g/Kg	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NMHC	PM <sub>dir</sub>
Carga del aeroplano	3154	16,1	0,4	0,62	0,02

Fuente: Lufthansa 2004, TREMOD (IFEU 2005), valoraciones IFEU Heidelberg 2005 de IFEU

## 7.4. Anexos de Tablas

### Factores de emisión en caliente para coches utilitarios y de carga ligera.

Anexo del punto 5.1.4.1 Factores de emisión en caliente por tipo de vehículo:

En las tablas siguientes aparecen las ecuaciones en forma de variables en función de la velocidad media del vehículo y se presentan también los coeficientes de correlación ( $R^2$ ) de las curvas que mejor se ajustan.

Las tablas que se muestran a continuación son los factores de emisión para los vehículos de pasajeros y los vehículos de carga ligera.

Tabla A54. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión de CO Para coches de pasajeros de gasolina.

Tipo de vehículo	Capacidad de cilindrada	Rango de velocidad	CO (g/km)	R2
PRE ECE	Todas categorías	10-100	$281V^{-0.630}$	0.924
	Todas categorías	100-130	$0.112V + 4.32$	-
ECE 15-00/01	Todas categorías	10-50	$313V^{-0.760}$	0.898
	Todas categorías	50-130	$27.22 - 0.406V + 0.0032V^2$	0.158
ECE 15-02	Todas categorías	10-60	$300V^{-0.797}$	0.747
	Todas categorías	60-130	$26.260 - 0.440V + 0.0026V^2$	0.102
ECE 15-03	Todas categorías	10-20	$161.36 - 45.62 \ln(V)$	0.790
	Todas categorías	20-130	$37.92 - 0.680V + 0.00377V^2$	0.247
ECE 15-04	Todas categorías	10-60	$260.788V^{-0.910}$	0.825
	Todas categorías	60-130	$14.653 - 0.220V + 0.001163V^2$	0.613
Convencional mejorado	CC < 1.4 l	10-130	$14.577 - 0.294V + 0.002478V^2$	0.781
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$8.273 - 0.151V + 0.000957V^2$	0.767
Lazo abierto	CC < 1.4 l	10-130	$17.882 - 0.377V + 0.002825V^2$	0.656

	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$9.446 - 0.230V + 0.002029V^2$	0.719
EURO I	CC < 1.4 l	10-130	$9.846 - 0.2867V + 0.0022V^2$	0.133
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$9.617 - 0.245V + 0.001729V^2$	0.145
	CC > 2.0 l	10-130	$12.826 - 0.2955V + 0.00177V^2$	0.109

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A55. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión de VOC para los coches de pasajeros de gasolina

Tipo de vehículo	Capacidad cilindrada	de	Rango de velocidad	Factores de emisión VOC (g/km)	R <sup>2</sup>
PRE ECE	Todas categorías	las	10-100	$30.34V^{-0.693}$	0.980
	Todas categorías	las	100-130	1.247	-
ECE 15-00/01	Todas categorías	las	10-50	$24.99V^{-0.704}$	0.901
	Todas categorías	las	50-130	$4.85V^{0.318}$	0.095
ECE 15-02/03	Todas categorías	las	10-60	$25.75V^{-0.714}$	0.895
	Todas categorías	las	60-130	$1.95 - 0.019V + 0.00009V^2$	0.198
ECE 15-04	Todas categorías	las	10-60	$19.079V^{-0.693}$	0.838
	Todas categorías	las	60-130	$2.608 - 0.037V + 0.000179V^2$	0.341
Convencional mejorado	CC < 1.4 l		10-130	$2.189 - 0.034V + 0.000201V^2$	0.766
	1.4 l < CC < 2.0 l		10-130	$1.999 - 0.034V + 0.000214V^2$	0.447
Lazo abierto	CC < 1.4 l		10-130	$2.185 - 0.0423V + 0.000256V^2$	0.636
	1.4 l < CC < 2.0 l		10-130	$0.808 - 0.016V + 0.000099V^2$	0.49
EURO I	CC < 1.4 l		10-130	$0.628 - 0.01377V + 8.52E-05V^2$	0.207
	1.4 l < CC < 2.0 l		10-130	$0.4494 - 0.00888V + 5.21E-05V^2$	0.197
	CC > 2.0 l		10-130	$0.5086 - 0.00723V + 3.3E-05V^2$	0.043

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A56. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión de NO<sub>x</sub> para los coches de pasajeros de gasolina

Tipo de vehículo	Capacidad de cilindrada de	Rango de velocidad de	Factores de emisión NO <sub>x</sub> (g/km)	R <sup>2</sup>
PRE ECE	CC < 1.4 l	10-130	$1.173 + 0.0225V - 0.00014V^2$	0.916
ECE 15-00/01	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.360 + 0.0217V - 0.00004V^2$	0.960
	CC > 2.0 l	10-130	$1.5 + 0.03V + 0.0001V^2$	0.972
ECE 15-02	CC < 1.4 l	10-130	$1.479 - 0.0037V + 0.00018V^2$	0.711
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.663 - 0.0038V + 0.00020V^2$	0.839
	CC > 2.0 l	10-130	$1.87 - 0.0039V + 0.00022V^2$	-
ECE 15-03	CC < 1.4 l	10-130	$1.616 - 0.0084V + 0.00025V^2$	0.844
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.29 e^{0.0099V}$	0.798
	CC > 2.0 l	10-130	$2.784 - 0.0112V + 0.000294V^2$	0.577
ECE 15-04	CC < 1.4 l	10-130	$1.432 + 0.003V + 0.000097V^2$	0.669
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.484 + 0.013V + 0.000074V^2$	0.722
	CC > 2.0 l	10-130	$2.427 - 0.014V + 0.000266V^2$	0.803
Convencional mejorado	CC < 1.4 l	10-130	$-0.926 + 0.719 \ln(V)$	0.883
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1.387 + 0.0014V + 0.000247V^2$	0.876
Lazo abierto	CC < 1.4 l	10-130	$-0.921 + 0.616 \ln(V)$	0.791
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$-0.761 + 0.515 \ln(V)$	0.495
EURO I	CC < 1.4 l	10-130	$0.5595 - 0.01047V + 1.08E-04V^2$	0.122
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$0.526 - 0.0085V + 8.54E-05V^2$	0.077
	CC > 2.0 l	10-130	$0.666 - 0.009V + 7.55E-05V^2$	0.014

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A57. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión de Dioxido de carbono para los coches de pasajeros

Tipo de vehículo	de Capacidad cilindrada	de Rango velocidad	de Factores de emisión CO <sub>2</sub> (g/km)	R <sup>2</sup>
PRE ECE	CC < 1.4 l	10-130	$768 + 3.13V - 199\ln(V)$	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1005 + 4.15V - 263\ln(V)$	-
	CC > 2.0 l	10-130	$1498 + 8.21V - 0.0133V^2 - 421\ln(V)$	-
ECE 15-00/01	CC < 1.4 l	10-130	$173 - 2.52V + 0.0182V^2 + 1930/V$	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1065 + 4.00V - 284 \ln(V)$	-
	CC > 2.0 l	10-130	$835 + 3.71V + 2297/V - 229\ln(V)$	-
ECE 15-02	CC < 1.4 l	10-130	$345 + 0.0106V^2 + 1275/V - 68.6\ln(V)$	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$835 + 3.93V + 986/V - 231\ln(V)$	-
	CC > 2.0 l	10-130	$879 + 4.32V + 2298/V - 244\ln(V)$	-
ECE 15-03	CC < 1.4 l	10-130	$664 + 2.09V + 0.00449V^2 - 167\ln(V)$	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$1074 + 5.49V - 0.00461V^2 - 305\ln(V)$	-
	CC > 2.0 l	10-130	$957 + 4.51V + 1832/V - 264\ln(V)$	-
ECE 15-04	CC < 1.4 l	10-130	$614 + 2.56V - 157\ln(V)$	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$264 + 0.0103V^2 + 2049/V - 49.8\ln(V)$	-
	CC > 2.0 l	10-130	$1173 + 4.83V - 315\ln(V)$	-
Convencional mejorado	CC < 1.4 l	10-130	$226 - 3.91V + 0.0368V^2$	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$333 - 6.11V + 0.0518V^2$	-
Lazo abierto	CC < 1.4 l	10-130	$238 - 3.67V + 0.0319V^2$	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	10-130	$331 - 5.88V + 0.0499V^2$	-
EURO I	CC < 1.4 l	5-130	$157 - 2.07V + 0.0172V^2 + 1835/V$	-
	1.4 l < CC < 2.0 l	5-130	$231 - 3.62V + 0.0263V^2 + 2526/V$	-
	CC > 2.0 l	5-130	$294 - 5.50V + 0.0393V^2 + 3513/V$	-

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A58. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión para los vehículos diesel incontrolados <2.5 t

Agente contaminador	Capacidad de cilindrada de	Rango de velocidad de	Factor de emisión en (g/km)	R <sup>2</sup>
CO	Todas las categorías	10-130	$5.413V^{-0.574}$	0.745
NOX	CC < 2.0l	10-130	$0.918 - 0.014V + 0.000101V^2$	0.949
	CC > 2.0l	10-130	$1.331 - 0.018V + 0.000133V^2$	0.927
VOC	Todas las categorías	10-130	$4.61V^{-0.937}$	0.794
PM	Todas las categorías	10-130	$0.45 - 0.0086V + 0.000058V^2$	0.439
CO <sub>2</sub>	Todas las categorías	10-130	$374 - 6.58V + 0.0442V^2 - 30.3/V$	-

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A59. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión para los vehículos diesel incontrolados <2.5 t, completado con la directiva del EURO I Directive

Agente contaminador	Capacidad de cilindrada de	Rango de velocidad de	Factor de emisión en (g/km)	R <sup>2</sup>
CO	Todas las categorías	10-120	$1.4497 - 0.03385V + 2.1E-04V^2$	0.550
NO <sub>x</sub>	Todas las categorías	10-120	$1.4335 - 0.026V + 1.785E-04V^2$	0.262
VOC	Todas las categorías	10-130	$0.1978 - 0.003925V + 2.24E-05V^2$	0.342
PM	Todas las categorías	10-130	$0.1804 - 0.004415V + 3.33E-05V^2$	0.294
CO <sub>2</sub>	Todas las categorías	10-130	$286 - 4.07V + 0.0271V^2$	-

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A60. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión para los vehículos LPG convencionales <2.5 t

Agente contaminador	Capacidad de cilindrada de	Rango de velocidad de	Factor de emisión en (g/km)	R <sup>2</sup>
CO	Todas las categorías	10-130	$12.523 - 0.418V + 0.0039V^2$	0.893
NOX	Todas las categorías	10-130	$0.77V^{0.285}$	0.598
VOC	Todas las categorías	10-130	$26.3V^{-0.865}$	0.967
CO <sub>2</sub>	Todas las categorías	10-130	$283 - 4.15V + 0.0291V^2$	-

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A61. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión para los vehículos LPG <2.5 t, completado con la Directiva de EURO I

Agente contaminador	Capacidad de cilindrada	Rango de velocidad	Factor de emisión en (g/km)	R <sup>2</sup>
CO	Todas las categorías	10-130	$0.00110V^2 - 0.1165V + 4.2098$	n/a
NOX	Todas las categorías	10-130	$0.00004V^2 - 0.0063V + 0.5278$	n/a
VOC	Todas las categorías	10-130	$0.00010V^2 - 0.0166V + 0.7431$	n/a
CO2	Todas las categorías	10-130	$0.0208V^2 - 2.70V + 228$	n/a

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A62. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión en los vehículos de carga ligera de gasolina <3.5 t

Agente contaminador	Capacidad de cilindrada	Rango de velocidad	Factor de emisión en (g/km)	R <sup>2</sup>
CO	Incontrolado	5-110	$0.01104V^2 - 1.5132V + 57.789$	0.732
	EURO I	5-120	$0.0037V^2 - 0.5215V + 19.127$	0.394
NOX	Incontrolado	5-110	$0.0179V + 1.9547$	0.159
	EURO I	5-120	$7.55E-05V^2 - 0.009V + 0.666$	0.014
VOC	Incontrolado	5-110	$0.000677V^2 - 0.1170V + 5.4734$	0.771
	EURO I	5-120	$5.77E-05V^2 - 0.01047V + 0.5462$	0.358
CO2	Incontrolado	5-110	$0.0541V^2 - 8.4326V + 514.5$	0.787
	EURO I	5-120	$0.0621V^2 - 9.8381V + 601.2$	0.723

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A63. Dependencia de la velocidad en los factores de emisión para los vehículos de carga ligera diesel <3.5 t

Agente contaminador	Capacidad de cilindrada	Rango de velocidad	Factor de emisión en (g/km)	R <sup>2</sup>
CO	Incontrolado	10-110	$0.00020V^2 - 0.0256V + 1.8281$	0.136
	EURO I	10-110	$0.000223V^2 - 0.026V + 1.076$	0.301
NOX	Incontrolado	10-110	$0.000816V^2 - 0.1189V + 5.1234$	0.402
	EURO I	10-110	$0.000241V^2 - 0.03181V + 2.0247$	0.072
VOC	Incontrolado	10-110	$0.000066V^2 - 0.0113V + 0.6024$	0.141
	EURO I	10-110	$0.0000175V^2 - 0.00284V + 0.2162$	0.037
PM	Incontrolado	10-110	$0.0000125V^2 - 0.000577V + 0.2880$	0.023
	EURO I	10-110	$0.000045V^2 - 0.004885V + 0.1932$	0.224
CO2	Incontrolado	10-110	$0.066V^2 - 8.2756V + 464.4$	0.486
	EURO I	10-110	$0.0617V^2 - 7.8227V + 429.51$	0.422

Fuente: MEET (1999), informe final

## Factores de emisión para vehículos de carga pesada (VCPó HGV)

Tabla A64. Coeficientes de las funciones de emisión para vehículos de carga pesada con un peso bruto de 3.5 a 7.5t

	K	a	b	c	d	e	f
CO	1.50	-0.0595	0.00119	-6.16E-6	58.8	0	0
CO <sub>2</sub>	110	0	0	0.000375	8702	0	0
VOC	0.186	0	0	-2.97E-7	61.5	0	0
NO <sub>x</sub>	0.508	0	0	3.87E-6	92.5	-77.3	0
PM	0.0506	0	0	1.22E-7	12.5	0	-21.1

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A65. Coeficientes de las funciones de emisión para vehículos de carga pesada con un peso bruto de 7.5 a 16t

	K	a	b	c	d	e	f
CO	3.08	-0.0135	0	0	-37.7	1560	-5736
CO <sub>2</sub>	871	-16.0	0.143	0	0	32031	0
VOC	1.37	0	-8.10E-5	0	0	870	-3282
NO <sub>x</sub>	2.59	0	-0.000665	8.56E-6	140	0	0
PM	0.0541	0.00151	0	0	17.1	0	0

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A66. Coeficientes de las funciones de emisión para vehículos de carga pesada con un peso bruto de 16 a 32 t

	K	a	b	c	d	e	f
CO	1.53	0	0	0	60.6	117	0
CO <sub>2</sub>	765	-7.04	0	0.000632	8334	0	0
VOC	0.207	0	0	0	58.3	0	0
NO <sub>x</sub>	9.45	-0.107	0	7.55E-6	132	0	0
PM	0.184	0	0	1.72E-7	15.2	0	0

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A67. Coeficientes de las funciones de emisión para vehículos de carga pesada con un peso bruto de 32 a 40

	K	a	b	c	d	e	f
CO	0.349	0.0101	0	0	79.6	0	0
CO <sub>2</sub>	1576	-17.6	0	0.00117	0	36067	0
VOC	0.254	0	0	0	53.9	0	0
NO <sub>x</sub>	5.27	0	0	0	343	-552	0
PM	0.246	0	0	0	18.2	0	0

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A68. Coeficientes de las funciones de emisión para autobuses urbanos

	K	a	b	c	d	e	f
CO	1.64	0	0	0	132	0	0
CO <sub>2</sub>	679	0	0	-0.00268	9635	0	0
VOC	0.0778	0	0	0	41.2	0	184
NO <sub>x</sub>	16.3	-0.173	0	0	111	0	0
PM	0.0694	0	0.000366	-8.71E-6	13.9	0	0

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A69. Coeficientes de las funciones de emisión para autocares

	K	a	b	c	d	e	f
CO	0.930	0	-4.00E-5	0	99.2	0	0
CO <sub>2</sub>	523	0	-0.0487	0.000527	12501	0	0
VOC	0.632	-0.00402	0	0	59.3	0	254
NO <sub>x</sub>	6.12	0	-0.000651	7.23E-6	181	0	0
PM	0.193	0	0	0	15.6	0	29.6

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A70. Factores de corrección del peso para los vehículos que transportan mercancías mayores a 40 t de peso bruto

Tipo de peso	(aplicable a las funciones para HGVs 32 - 40 t)		
	NO <sub>x</sub>	PM	CO <sub>2</sub>
40 - 50 t	1.18	1.12	1.17
50 - 60 t	1.41	1.24	1.35

Fuente: MEET (1999), informe final

## Factores de emisión en caliente Ciclomotores y motocicletas

Tabla A71. Factores de emisión para los ciclomotores

	CO (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	VOC (g/km)	CO <sub>2</sub> (g/km)
Incontrolados	15.0	0.03	9.00	27.3
Controlados Escenario 1	9	0.03	5	49.4
Controlados Escenario 2	5	0.01	2	65.2

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A72. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión para las motocicletas de dos tiempos con una capacidad de motor de más de 50cm<sup>3</sup>

Agente contaminante	Tipo de vehículo	Rango de velocidad	Factor de emisión (g/km)
CO	Incontrolado	10 - 60	$-0.00100V^2 + 0.1720V + 18.10$
		60 - 110	$0.00010V^2 + 0.0500V + 21.50$
	Controlado	10 - 60	$-0.00630V^2 + 0.7150V - 6.900$
		60 - 110	$-0.00070V^2 + 0.1570V + 6.000$
NO <sub>x</sub>	Incontrolado	10 - 60	$0.00003V^2 - 0.0020V + 0.064$
		60 - 110	$-0.00002V^2 + 0.0049V - 0.157$
	Controlado	10 - 60	$0.00002V^2 - 0.0010V + 0.032$
		60 - 110	$0.00002V^2 + 0.0041V - 0.152$
VOC	Incontrolado	10 - 60	$0.00350V^2 - 0.4090V + 20.10$
		60 - 110	$0.00030V^2 - 0.0524V + 10.60$
	Controlado	10 - 60	$-0.00100V^2 + 0.0970V + 3.900$
		60 - 110	$-0.00030V^2 + 0.0325V + 5.200$
CO <sub>2</sub>	Incontrolado	10 - 110	$88.2 + 0.616V - 22.3\ln(V)$
	Controlado	10 - 110	$33.3 + 0.00164V^2 + 155/V$

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A73. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión par alas motocicletas de 4 tiempos con una capacidad de motor de más de 50cm<sup>3</sup>

Agente contaminante	Capacidad de cilindrada	Velocidad	Factor de emisión (g/km)
CO	Incontrolado <250cm <sup>3</sup>	10 - 60	$0.01930V^2 - 1.9200V + 68.30$
		60 - 110	$0.00170V^2 + 0.1210V + 9.500$
	Incontrolado 250<cc<750cm <sup>3</sup>	10 - 60	$0.01390V^2 - 1.4200V + 55.00$
		60 - 110	$0.00090V^2 - 0.0099V + 17.80$
	Incontrolado >750cm <sup>3</sup>	10 - 60	$0.01230V^2 - 1.1900V + 42.80$
		60 - 110	$0.00050V^2 + 0.1240V + 6.900$
	Controlado - Todas las capacidades	10 - 60	$0.00760V^2 - 0.7300V + 23.50$
		60 - 110	$0.00100V^2 + 0.0510V + 0.800$
NO <sub>x</sub>	Incontrolado <250cm <sup>3</sup>	10 - 60	$0.00005V^2 - 0.0010V + 0.090$
		60 - 110	$0.00002V^2 + 0.0006V + 0.102$
	Incontrolado 250<cc<750cm <sup>3</sup>	10 - 60	$0.00005V^2 - 0.0009V + 0.092$
		60 - 110	$0.00002V^2 + 0.0007V + 0.104$
	Incontrolado >750cm <sup>3</sup>	10 - 60	$0.00005V^2 - 0.0008V + 0.100$
		60 - 110	$0.00002V^2 + 0.0008V + 0.112$
	Controlado - Todas las capacidades	10 - 60	$0.00005V^2 - 0.0007V + 0.137$
		60 - 110	$0.00002V^2 + 0.001V + 0.143$
VOC	Incontrolado <250cm <sup>3</sup>	10 - 60	$0.00190V^2 - 0.2110V + 6.950$
		60 - 110	$0.00090V^2 - 0.1410V + 6.420$
	Incontrolado 250<cc<750cm <sup>3</sup>	10 - 60	$0.00150V^2 - 0.1640V + 5.510$
		60 - 110	$0.00001V^2 + 0.0005V + 0.860$
	Incontrolado >750cm <sup>3</sup>	10 - 60	$0.00220V^2 - 0.2570V + 9.280$
		60 - 110	$0.00010V^2 - 0.0310V + 3.290$
	Controlado - Todas las capacidades	10 - 60	$0.00050V^2 - 0.0755V + 2.630$
		60 - 110	$0.00007V^2 - 0.0152V + 1.190$
CO <sub>2</sub>	Incontrolado <250cm <sup>3</sup>	10 - 110	$155 + 0.843V - 41.3\ln(V)$
	Incontrolado 250<cc<750cm <sup>3</sup>	10 - 140	$397 + 1.78V - 111\ln(V)$
	Incontrolado >750cm <sup>3</sup>	10 - 140	$423 + 0.00693V^2 - 92.5\ln(V)$
	Controlado - Todas las capacidades	10 - 140	$340 + 1.28V - 85.4\ln(V)$

Fuente: MEET (1999), informe final

## Factores de corrección de la pendiente (pág 84).

Tabla A74. Coeficientes para coches de pasajeros y vehículos de carga ligera con motor de gasolina convencional

A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	Agente contaminante	Gradiente (%)	Vmin (km/h)	Vmax (km/h)
2.94E-11	-1.41E-08	2.56E-06	-2.21E-04	9.34E-03	-1.66E-01	2.20E+00	VOC	6	18.6	120.0
2.76E-11	-9.63E-09	1.14E-06	-5.00E-05	1.68E-04	2.97E-02	1.33E+00		-6	18.6	127.8
-1.85E-11	8.28E-09	-1.44E-06	1.22E-04	-5.34E-03	1.36E-01	-4.23E-01		4	18.6	120.0
-1.19E-11	7.85E-09	-1.79E-06	1.85E-04	-9.23E-03	2.10E-01	-1.73E-01		-4	18.6	127.8
1.05E-11	-4.37E-09	7.44E-07	-6.75E-05	3.40E-03	-7.90E-02	1.68E+00		2	18.6	130.0
-6.92E-12	3.88E-09	-7.76E-07	6.91E-05	-2.80E-03	5.07E-02	6.63E-01		-2	18.6	130.0
3.46E-10	-1.36E-07	2.04E-05	-1.49E-03	5.56E-02	-9.70E-01	7.57E+00	CO	6	18.6	120.0
1.21E-11	-2.13E-09	-2.09E-07	6.57E-05	-4.74E-03	1.33E-01	-7.58E-01		-6	18.6	127.8
3.43E-10	-1.25E-07	1.71E-05	-1.10E-03	3.48E-02	-4.88E-01	3.40E+00		4	18.6	120.0
-3.89E-11	2.10E-08	-4.29E-06	4.20E-04	-2.05E-02	4.73E-01	-3.04E+00		-4	18.6	127.8
1.22E-10	-4.73E-08	6.91E-06	-4.86E-04	1.77E-02	-3.17E-01	3.27E+00		2	18.6	130.0
3.14E-12	1.51E-10	-2.79E-07	4.13E-05	-2.26E-03	5.08E-02	4.41E-01		-2	18.6	130.0
0.00E+00	1.30E-09	-4.95E-07	7.29E-05	-5.14E-03	1.57E-01	9.33E-01	NO <sub>x</sub>	6	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.42E-08	2.56E-05	-3.90E-03	2.81E-01		-6	18.6	127.8
0.00E+00	-5.03E-10	1.41E-07	-9.72E-06	-3.18E-04	3.92E-02	1.16E+00		4	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.60E-07	2.36E-05	-5.97E-03	5.09E-01		-4	18.6	127.8
0.00E+00	-8.59E-12	-8.39E-09	4.05E-06	-5.55E-04	2.43E-02	1.12E+00		2	18.6	130.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.79E-07	-1.15E-04	6.32E-03	5.94E-01		-2	18.6	130.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-4.74E-05	1.17E-02	1.40E+00	CO <sub>2</sub>	6	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.26E-05	-7.28E-03	6.15E-01		-6	18.6	127.8
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.11E-06	4.72E-03	1.23E+00		4	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.34E-05	-1.08E-02	9.52E-01		-4	18.6	127.8
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.63E-06	2.25E-03	1.09E+00		2	18.6	130.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.04E-05	-3.49E-03	9.06E-01		-2	18.6	130.0

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A75. Coeficientes de gradiente de las funciones de emisión para coches de pasajeros y vehículos de carga ligera con motor con catalizador regulado

A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	Agente contaminante	Gradiente (%)	Vmin (km/h)	Vmax (km/h)
4.99E-10	-1.98E-07	3.01E-05	-2.23E-03	8.55E-02	-1.64E+00	1.42E+01	VOC	6	18.6	120.0
1.51E-10	-5.06E-08	5.78E-06	-2.42E-04	7.16E-04	1.59E-01	-1.27E+00		-6	18.6	127.8
3.82E-10	-1.49E-07	2.23E-05	-1.62E-03	6.07E-02	-1.13E+00	9.59E+00		4	18.6	120.0
-6.61E-11	3.44E-08	-6.81E-06	6.46E-04	-3.04E-02	6.69E-01	-4.32E+00		-4	18.6	127.8
6.71E-11	-2.54E-08	3.55E-06	-2.28E-04	7.30E-03	-1.07E-01	1.54E+00		2	18.6	130.0
-2.86E-11	1.38E-08	-2.55E-06	2.22E-04	-9.37E-03	1.73E-01	1.24E-01		-2	18.6	130.0
7.67E-10	-2.96E-07	4.33E-05	-3.01E-03	1.03E-01	-1.62E+00	1.15E+01	CO	6	18.6	120.0
1.14E-11	-6.25E-11	-9.08E-07	1.57E-04	-1.01E-02	2.69E-01	-1.97E+00		-6	18.6	127.8
2.87E-10	-1.01E-07	1.29E-05	-6.92E-04	1.39E-02	1.10E-02	-2.23E-01		4	18.6	120.0
-7.12E-11	3.55E-08	-6.84E-06	6.44E-04	-3.06E-02	6.80E-01	-4.49E+00		-4	18.6	127.8
9.97E-12	-1.19E-10	-8.36E-07	1.44E-04	-8.55E-03	2.09E-01	-6.10E-01		2	18.6	130.0
-2.70E-11	1.24E-08	-2.20E-06	1.88E-04	-8.00E-03	1.54E-01	8.85E-02		-2	18.6	130.0
8.05E-11	-2.56E-08	2.91E-06	-1.50E-04	4.22E-03	-8.46E-02	3.13E+00	NO <sub>x</sub>	6	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.95E-08	-1.31E-05	1.55E-03	2.08E-01		-6	18.6	127.8
1.22E-10	-4.82E-08	7.38E-06	-5.59E-04	2.21E-02	-4.30E-01	4.91E+00		4	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-9.67E-07	2.77E-04	-2.69E-02	1.31E+00		-4	18.6	127.8
-3.17E-11	1.51E-08	-2.77E-06	2.44E-04	-1.06E-02	2.13E-01	-5.83E-01		2	18.6	130.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.17E-07	1.55E-05	-4.92E-04	7.40E-01		-2	18.6	130.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-8.04E-05	1.58E-02	1.36E+00	CO <sub>2</sub>	6	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.29E-05	-8.72E-03	6.32E-01		-6	18.6	127.8
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-6.38E-05	1.32E-02	1.05E+00		4	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.36E-05	-8.86E-03	8.28E-01		-4	18.6	127.8
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.36E-05	7.17E-03	9.94E-01		2	18.6	130.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.72E-05	-5.14E-03	9.89E-01		-2	18.6	130.0

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A76. Coeficientes de gradiente de las funciones de emisión para coches de pasajeros y vehículos de carga ligera con motor diesel

A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	Agente contaminante	Gradiente (%)	Vmin (km/h)	Vmax (km/h)
-6.00E-12	1.07E-08	-3.14E-06	3.67E-04	-2.00E-02	4.99E-01	-2.68E+00	VOC	6	18.6	120.0
6.40E-11	-2.65E-08	4.28E-06	-3.47E-04	1.54E-02	-3.68E-01	4.75E+00		-6	18.6	127.8
1.26E-10	-4.62E-08	6.47E-06	-4.39E-04	1.51E-02	-2.51E-01	3.17E+00		4	18.6	120.0
2.20E-11	-4.83E-09	-2.43E-08	7.02E-05	-5.30E-03	1.29E-01	3.89E-01		-4	18.6	127.8
-3.58E-12	2.79E-09	-6.43E-07	5.98E-05	-2.26E-03	3.06E-02	1.02E+00		2	18.6	130.0
3.35E-11	-1.36E-08	2.18E-06	-1.77E-04	7.78E-03	-1.73E-01	2.63E+00		-2	18.6	130.0
7.61E-11	-2.48E-08	2.90E-06	-1.51E-04	3.55E-03	-3.33E-02	1.66E+00	CO	6	18.6	120.0
1.11E-11	-4.83E-09	8.50E-07	-7.87E-05	4.10E-03	-1.15E-01	2.25E+00		-6	18.6	127.8
5.65E-11	-2.19E-08	3.25E-06	-2.36E-04	8.79E-03	-1.51E-01	2.11E+00		4	18.6	120.0
2.48E-11	-9.20E-09	1.30E-06	-9.11E-05	3.53E-03	-7.80E-02	1.93E+00		-4	18.6	127.8
1.86E-11	-7.45E-09	1.17E-06	-9.33E-05	4.06E-03	-8.54E-02	1.62E+00		2	18.6	130.0
2.71E-11	-1.16E-08	1.93E-06	-1.62E-04	7.00E-03	-1.45E-01	2.25E+00		-2	18.6	130.0
-6.48E-11	3.16E-08	-5.78E-06	4.99E-04	-2.12E-02	4.23E-01	-9.42E-01	NO <sub>x</sub>	6	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.51E-07	6.12E-05	-7.28E-03	5.26E-01		-6	18.6	127.8
-5.06E-11	2.28E-08	-4.05E-06	3.64E-04	-1.77E-02	4.48E-01	-2.74E+00		4	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.34E-08	8.82E-05	-1.47E-02	1.02E+00		-4	18.6	127.8
-1.56E-11	6.73E-09	-1.10E-06	8.69E-05	-3.47E-03	7.30E-02	5.31E-01		2	18.6	130.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.91E-07	-1.13E-04	4.59E-03	7.77E-01		-2	18.6	130.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-6.42E-05	9.60E-03	1.89E+00	CO <sub>2</sub>	6	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.58E-05	-4.81E-03	4.82E-01		-6	18.6	127.8
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.56E-05	6.99E-03	1.52E+00		4	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.91E-05	-1.62E-02	1.12E+00		-4	18.6	127.8
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-7.87E-06	3.92E-03	1.11E+00		2	18.6	130.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.48E-05	-3.12E-03	8.85E-01		-2	18.6	130.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.07E-07	-7.24E-05	2.78E-02	1.60E+00	PM	6	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.37E-05	-5.19E-03	9.53E-01		-6	18.6	127.8
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.77E-07	1.71E-05	1.01E-02	1.35E+00		4	18.6	120.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.40E-05	-2.93E-03	9.84E-01		-4	18.6	127.8
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.33E-07	-6.85E-05	7.71E-03	1.09E+00		2	18.6	130.0
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.61E-05	-3.51E-03	9.43E-01		-2	18.6	130.0

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A77. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para vehículos de carga pesada de <7.5 t

A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	Agente contaminante	Gradiente (%)	Vmin (km/h)	Vmax (km/h)
0.00E+00	-4.33E-09	1.40E-06	-1.53E-04	6.22E-03	-1.01E-01	1.63E+00	VOC	4... 6	13.0	39.3
0.00E+00	-5.14E-08	9.90E-06	-7.17E-04	2.39E-02	-3.57E-01	2.95E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-2.05E-08	4.25E-06	-3.30E-04	1.18E-02	-1.92E-01	2.16E+00		0... 4	15.1	69.9
0.00E+00	4.02E-09	-9.36E-07	8.39E-05	-3.66E-03	7.99E-02	3.98E-01		-4... 0	15.1	86.2
0.00E+00	1.51E-07	-1.93E-05	9.26E-04	-2.11E-02	2.57E-01	6.58E-02	CO	4... 6	13.0	39.3
0.00E+00	-7.00E-08	1.25E-05	-8.51E-04	2.71E-02	-3.96E-01	2.86E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-1.18E-08	2.49E-06	-1.95E-04	6.78E-03	-9.28E-02	1.52E+00		0... 4	15.1	69.9
0.00E+00	-5.54E-10	1.80E-07	-1.82E-05	6.42E-04	-5.54E-03	8.14E-01		-4... 0	15.1	86.2
0.00E+00	1.82E-08	-1.85E-06	3.32E-05	1.28E-03	-4.14E-03	1.43E+00	NO <sub>x</sub>	4... 6	13.0	39.3
0.00E+00	-7.94E-08	1.37E-05	-9.08E-04	2.83E-02	-4.13E-01	2.78E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-6.87E-09	1.37E-06	-1.06E-04	3.74E-03	-4.19E-02	1.23E+00		0... 4	15.1	69.9
0.00E+00	-3.00E-10	8.69E-08	-7.87E-06	2.26E-04	-2.07E-03	7.03E-01		-4... 0	15.1	86.2
0.00E+00	4.27E-07	-5.74E-05	2.97E-03	-7.43E-02	9.35E-01	-3.03E+00	CO <sub>2</sub>	4... 6	13.0	39.3
0.00E+00	-7.74E-08	1.33E-05	-8.78E-04	2.72E-02	-3.93E-01	2.65E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-3.01E-09	5.73E-07	-4.13E-05	1.13E-03	8.13E-03	9.14E-01		0... 4	15.1	69.9
0.00E+00	-1.39E-10	5.03E-08	-4.18E-06	1.95E-05	3.68E-03	6.69E-01		-4... 0	15.1	86.2
0.00E+00	-2.54E-07	3.58E-05	-1.99E-03	5.42E-02	-6.89E-01	4.54E+00	PM	4... 6	13.0	39.3
0.00E+00	-5.34E-08	9.97E-06	-7.05E-04	2.32E-02	-3.48E-01	2.71E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-1.96E-08	4.11E-06	-3.22E-04	1.16E-02	-1.83E-01	2.08E+00		0... 4	15.1	69.9
0.00E+00	-1.89E-10	8.23E-08	-9.49E-06	3.25E-04	-2.54E-04	8.21E-01		-4... 0	15.1	86.2

Fuente: MEET (1999), informe final

**Tabla A78. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para vehículos de carga pesada de 7.5 - 16 t**

A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	Agente contaminante	Gradiente (%)	Vmin (km/h)	Vmax (km/h)
0.00E+00	1.28E-07	-1.65E-05	7.96E-04	-1.82E-02	2.04E-01	3.24E-01	VOC	4... 6	13.1	39.5
0.00E+00	-4.01E-08	8.12E-06	-6.01E-04	2.01E-02	-3.01E-01	2.76E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-1.82E-08	3.70E-06	-2.78E-04	9.60E-03	-1.51E-01	1.94E+00		0... 4	15.1	70.3
0.00E+00	1.10E-09	-3.38E-07	3.94E-05	-2.13E-03	5.25E-02	6.52E-01		-4... 0	15.1	86.4
0.00E+00	3.28E-07	-4.35E-05	2.21E-03	-5.46E-02	6.73E-01	-1.88E+00	CO	4... 6	13.1	39.5
0.00E+00	-6.79E-08	1.21E-05	-8.24E-04	2.58E-02	-3.67E-01	2.89E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-1.09E-08	2.16E-06	-1.56E-04	4.85E-03	-5.79E-02	1.34E+00		0... 4	15.1	70.3
0.00E+00	-1.11E-10	-3.21E-08	1.19E-05	-1.09E-03	3.34E-02	6.97E-01		-4... 0	15.1	86.4
0.00E+00	-2.42E-07	3.49E-05	-1.96E-03	5.28E-02	-6.52E-01	4.60E+00	NO <sub>x</sub>	4... 6	13.1	39.5
0.00E+00	-9.71E-08	1.70E-05	-1.14E-03	3.57E-02	-5.30E-01	3.81E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-1.21E-08	2.39E-06	-1.77E-04	6.00E-03	-8.29E-02	1.56E+00		0... 4	15.1	70.3
0.00E+00	-8.49E-11	1.17E-08	3.94E-07	-1.38E-04	2.18E-03	9.09E-01		-4... 0	15.1	86.4
0.00E+00	3.21E-07	-4.29E-05	2.23E-03	-5.75E-02	7.62E-01	-1.98E+00	CO <sub>2</sub>	4... 6	13.1	39.5
0.00E+00	-1.24E-07	2.08E-05	-1.33E-03	4.00E-02	-5.65E-01	3.57E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-9.78E-10	-2.01E-09	1.91E-05	-1.63E-03	5.91E-02	7.70E-01		0... 4	15.1	70.3
0.00E+00	-6.04E-11	-2.36E-08	7.76E-06	-6.83E-04	1.79E-02	6.12E-01		-4... 0	15.1	86.4
0.00E+00	8.06E-09	3.61E-07	-1.27E-04	5.99E-03	-8.25E-02	1.76E+00	PM	4... 6	13.1	39.5
0.00E+00	-5.44E-08	1.01E-05	-7.06E-04	2.28E-02	-3.38E-01	2.86E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-1.61E-08	3.27E-06	-2.45E-04	8.30E-03	-1.18E-01	1.72E+00		0... 4	15.1	70.3
0.00E+00	-7.69E-10	1.50E-07	-7.72E-06	-8.94E-05	1.04E-02	8.95E-01		-4... 0	15.1	86.4

Fuente: MEET (1999), informe final

**Tabla A79. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para vehículos de carga pesada de 16 - 32 t**

A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	Agente contaminante	Gradiente (%)	Vmin (km/h)	Vmax (km/h)
0.00E+00	0.00E+00	6.18E-06	-6.51E-04	2.39E-02	-3.66E-01	3.24E+00	VOC	4... 6	12.5	36.5
0.00E+00	-4.96E-08	9.03E-06	-6.37E-04	2.11E-02	-3.22E-01	3.08E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-2.11E-08	4.32E-06	-3.30E-04	1.17E-02	-1.91E-01	2.25E+00		0... 4	14.9	64.7
0.00E+00	3.21E-09	-7.41E-07	6.58E-05	-2.82E-03	5.69E-02	7.55E-01		-4... 0	15.1	86.1
0.00E+00	0.00E+00	-1.50E-05	1.43E-03	-4.92E-02	7.32E-01	-2.31E+00	CO	4... 6	12.5	36.5
0.00E+00	-7.70E-08	1.30E-05	-8.51E-04	2.62E-02	-3.80E-01	3.15E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-2.46E-08	4.79E-06	-3.44E-04	1.13E-02	-1.66E-01	2.12E+00		0... 4	14.9	64.7
0.00E+00	1.44E-09	-3.32E-07	3.06E-05	-1.45E-03	2.91E-02	8.76E-01		-4... 0	15.1	86.1
0.00E+00	0.00E+00	2.30E-06	-2.49E-04	9.39E-03	-1.26E-01	2.51E+00	NO <sub>x</sub>	4... 6	12.5	36.5
0.00E+00	-1.09E-07	1.84E-05	-1.20E-03	3.70E-02	-5.49E-01	3.83E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-2.00E-08	3.87E-06	-2.81E-04	9.57E-03	-1.43E-01	2.08E+00		0... 4	14.9	64.7
0.00E+00	5.72E-11	1.59E-08	-4.09E-06	2.73E-04	-1.18E-02	9.79E-01		-4... 0	15.1	86.1
0.00E+00	0.00E+00	-6.69E-06	6.55E-04	-2.31E-02	3.69E-01	1.07E-01	CO <sub>2</sub>	4... 6	12.5	36.5
0.00E+00	-1.22E-07	2.03E-05	-1.30E-03	3.94E-02	-5.70E-01	3.75E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-5.25E-09	9.93E-07	-6.74E-05	2.06E-03	-1.96E-02	1.45E+00		0... 4	14.9	64.7
0.00E+00	-8.24E-11	2.91E-08	-2.58E-06	5.76E-05	-4.74E-03	8.55E-01		-4... 0	15.1	86.1
0.00E+00	0.00E+00	-1.05E-05	9.88E-04	-3.35E-02	5.10E-01	-1.09E+00	PM	4... 6	12.5	36.5
0.00E+00	-6.72E-08	1.16E-05	-7.82E-04	2.50E-02	-3.79E-01	3.23E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-3.60E-08	7.00E-06	-5.07E-04	1.69E-02	-2.49E-01	2.59E+00		0... 4	14.9	64.7
0.00E+00	2.40E-11	3.95E-08	-6.78E-06	3.25E-04	-9.46E-03	1.12E+00		-4... 0	15.1	86.1

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A80. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para vehículos de carga pesada de >32 t

A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	Agente contaminante	Gradiente (%)	Vmin (km/h)	Vmax (km/h)
0.00E+00	5.68E-08	-5.40E-06	1.24E-04	1.11E-03	-6.09E-02	1.80E+00	VOC	4... 6	12.4	35.0
0.00E+00	-2.50E-08	5.91E-06	-4.88E-04	1.79E-02	-2.98E-01	3.08E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-2.02E-08	4.10E-06	-3.11E-04	1.09E-02	-1.76E-01	2.18E+00		0... 4	14.8	66.3
0.00E+00	1.95E-09	-4.68E-07	4.26E-05	-1.84E-03	3.52E-02	9.32E-01		-4... 0	15.1	86.3
0.00E+00	1.43E-06	-1.75E-04	8.27E-03	-1.89E-01	2.09E+00	-7.12E+00	CO	4... 6	12.4	35.0
0.00E+00	-6.48E-08	1.17E-05	-7.95E-04	2.51E-02	-3.71E-01	3.10E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-8.63E-09	1.50E-06	-9.50E-05	2.65E-03	-2.44E-02	1.35E+00		0... 4	14.8	66.3
0.00E+00	1.28E-09	-3.07E-07	2.99E-05	-1.48E-03	3.00E-02	8.54E-01		-4... 0	15.1	86.3
0.00E+00	2.42E-08	3.11E-06	-4.50E-04	1.79E-02	-2.70E-01	3.56E+00	NO <sub>x</sub>	4... 6	12.4	35.0
0.00E+00	-9.96E-08	1.73E-05	-1.15E-03	3.63E-02	-5.48E-01	3.85E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-1.31E-08	2.49E-06	-1.82E-04	6.46E-03	-1.01E-01	1.94E+00		0... 4	14.8	66.3
0.00E+00	-7.69E-10	2.13E-07	-2.19E-05	1.06E-03	-2.84E-02	1.08E+00		-4... 0	15.1	86.3
0.00E+00	5.88E-07	-7.24E-05	3.45E-03	-7.86E-02	8.63E-01	-9.76E-01	CO <sub>2</sub>	4... 6	12.4	35.0
0.00E+00	-1.18E-07	2.00E-05	-1.29E-03	3.96E-02	-5.78E-01	3.72E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-2.04E-09	4.35E-07	-3.69E-05	1.69E-03	-3.16E-02	1.77E+00		0... 4	14.8	66.3
0.00E+00	-1.10E-09	2.69E-07	-2.38E-05	9.51E-04	-2.24E-02	9.16E-01		-4... 0	15.1	86.3
0.00E+00	-3.23E-07	3.70E-05	-1.70E-03	3.89E-02	-4.15E-01	3.36E+00	PM	4... 6	12.4	35.0
0.00E+00	-4.37E-08	8.63E-06	-6.36E-04	2.17E-02	-3.46E-01	3.17E+00		-6... -4	13.5	49.9
0.00E+00	-1.83E-08	3.60E-06	-2.65E-04	8.95E-03	-1.30E-01	1.92E+00		0... 4	14.8	66.3
0.00E+00	4.10E-10	-7.06E-08	4.33E-06	-1.28E-04	-1.87E-03	1.11E+00		-4... 0	15.1	86.3

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A81. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para los autobuses urbanos

A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	Agente contaminante	Gradiente (%)	Vmin (km/h)	Vmax (km/h)
0.00E+00	-2.12E-06	2.15E-04	-8.50E-03	1.62E-01	-1.49E+00	6.19E+00	VOC	4... 6	11.4	31.2
0.00E+00	-3.13E-07	3.32E-05	-1.37E-03	2.70E-02	-2.45E-01	1.72E+00		-6... -4	11.7	35.3
0.00E+00	1.75E-08	-4.51E-06	3.08E-04	-8.79E-03	1.11E-01	5.33E-01		0... 4	13.1	37.5
0.00E+00	4.15E-07	-5.26E-05	2.59E-03	-6.16E-02	7.06E-01	-2.13E+00		-4... 0	13.2	39.5
0.00E+00	-1.59E-06	1.57E-04	-6.04E-03	1.14E-01	-1.03E+00	4.91E+00	CO	4... 6	11.4	31.2
0.00E+00	-3.26E-07	3.80E-05	-1.71E-03	3.64E-02	-3.61E-01	2.05E+00		-6... -4	11.7	35.3
0.00E+00	-3.21E-07	3.94E-05	-1.92E-03	4.65E-02	-5.57E-01	3.78E+00		0... 4	13.1	37.5
0.00E+00	2.75E-07	-3.56E-05	1.79E-03	-4.36E-02	5.09E-01	-1.46E+00		-4... 0	13.2	39.5
0.00E+00	7.96E-07	-9.09E-05	3.83E-03	-7.42E-02	6.63E-01	-2.96E-01	NO <sub>x</sub>	4... 6	11.4	31.2
0.00E+00	-3.27E-07	4.10E-05	-2.00E-03	4.65E-02	-5.18E-01	2.99E+00		-6... -4	11.7	35.3
0.00E+00	1.85E-07	-2.28E-05	1.08E-03	-2.47E-02	2.79E-01	9.98E-02		0... 4	13.1	37.5
0.00E+00	4.52E-08	-5.67E-06	2.75E-04	-6.43E-03	6.72E-02	5.15E-01		-4... 0	13.2	39.5
0.00E+00	1.25E-07	-1.82E-05	7.87E-04	-1.32E-02	7.18E-02	2.07E+00	CO <sub>2</sub>	4... 6	11.4	31.2
0.00E+00	-3.77E-07	4.59E-05	-2.16E-03	4.83E-02	-5.14E-01	2.76E+00		-6... -4	11.7	35.3
0.00E+00	8.21E-08	-9.61E-06	4.20E-04	-8.55E-03	8.22E-02	1.05E+00		0... 4	13.1	37.5
0.00E+00	2.13E-07	-2.78E-05	1.41E-03	-3.45E-02	4.00E-01	-1.06E+00		-4... 0	13.2	39.5
0.00E+00	-7.39E-07	5.92E-05	-1.83E-03	2.80E-02	-2.18E-01	1.78E+00	PM	4... 6	11.4	31.2
0.00E+00	2.54E-07	-2.61E-05	1.01E-03	-1.81E-02	1.54E-01	3.83E-01		-6... -4	11.7	35.3
0.00E+00	1.39E-07	-1.87E-05	9.46E-04	-2.26E-02	2.60E-01	-1.14E-01		0... 4	13.1	37.5
0.00E+00	2.02E-07	-2.43E-05	1.14E-03	-2.60E-02	2.86E-01	-3.34E-01		-4... 0	13.2	39.5

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A82. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para los autocares

A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	Agente contaminante	Gradiente (%)	Vmin (km/h)	Vmax (km/h)
0.00E+00	0.00E+00	4.15E-06	-5.14E-04	2.17E-02	-3.76E-01	3.43E+00	VOC	4... 6	9.7	34.8
0.00E+00	0.00E+00	3.03E-06	-4.09E-04	1.94E-02	-3.75E-01	3.98E+00		-6... -4	11.7	49.9
2.49E-10	-8.50E-08	1.14E-05	-7.66E-04	2.65E-02	-4.41E-01	3.80E+00		0... 4	13.1	95.3
1.42E-10	-5.47E-08	8.20E-06	-6.05E-04	2.27E-02	-4.01E-01	3.89E+00		-4... 0	13.1	102.9
0.00E+00	0.00E+00	5.20E-06	-6.07E-04	2.51E-02	-4.28E-01	3.56E+00	CO	4... 6	9.7	34.8
0.00E+00	0.00E+00	2.24E-06	-3.21E-04	1.61E-02	-3.30E-01	3.25E+00		-6... -4	11.7	49.9
2.22E-10	-7.88E-08	1.10E-05	-7.63E-04	2.73E-02	-4.69E-01	3.99E+00		0... 4	13.1	95.3
1.09E-10	-4.42E-08	6.93E-06	-5.33E-04	2.09E-02	-3.87E-01	3.60E+00		-4... 0	13.1	102.9
0.00E+00	0.00E+00	-1.15E-05	9.84E-04	-3.02E-02	3.89E-01	7.29E-01	NO <sub>x</sub>	4... 6	9.7	34.8
1.65E-08	-3.13E-06	2.39E-04	-9.44E-03	2.02E-01	-2.22E+00	1.04E+01		-6... -4	11.7	49.9
2.97E-10	-9.51E-08	1.18E-05	-7.16E-04	2.18E-02	-3.07E-01	3.21E+00		0... 4	13.1	95.3
1.27E-10	-4.61E-08	6.56E-06	-4.66E-04	1.71E-02	-3.00E-01	2.75E+00		-4... 0	13.1	102.9
0.00E+00	0.00E+00	-1.34E-05	1.12E-03	-3.31E-02	4.00E-01	9.84E-01	CO <sub>2</sub>	4... 6	9.7	34.8
1.61E-08	-3.07E-06	2.37E-04	-9.43E-03	2.04E-01	-2.25E+00	1.04E+01		-6... -4	11.7	49.9
1.99E-10	-6.52E-08	8.32E-06	-5.20E-04	1.65E-02	-2.43E-01	3.02E+00		0... 4	13.1	95.3
1.15E-10	-4.23E-08	6.16E-06	-4.48E-04	1.69E-02	-3.05E-01	2.70E+00		-4... 0	13.1	102.9
0.00E+00	0.00E+00	4.91E-07	-1.88E-04	1.17E-02	-2.47E-01	3.11E+00	PM	4... 6	9.7	34.8
-3.03E-09	4.76E-07	-2.59E-05	4.46E-04	6.68E-03	-2.90E-01	3.25E+00		-6... -4	11.7	49.9
2.83E-10	-9.69E-08	1.30E-05	-8.68E-04	2.97E-02	-4.88E-01	4.21E+00		0... 4	13.1	95.3
1.40E-10	-5.29E-08	7.85E-06	-5.78E-04	2.18E-02	-3.91E-01	3.54E+00		-4... 0	13.1	102.9

Fuente: MEET (1999), informe final

## Coeficientes de corrección de la carga. (pág 86)

Tabla A83. Coeficientes de corrección de la carga para la función de HGVs de 3.5 a 7.5 t

	κ	n	p	q	r	s	t	u
--	---	---	---	---	---	---	---	---

CO	1.09	0.0370	0	-5.29E-4	0	0	-1.52E-7	0
CO <sub>2</sub>	1.27	0.0614	0	-0.00110	-0.00235	0	0	-1.33
VOC	0.990	-0.0141	0	4.04E-4	0	0	1.16E-7	0
NO <sub>x</sub>	1.26	0.0672	0	-0.00117	0	-1.90E-5	0	-1.60
PM	1.14	0.0306	-0.00278	-9.14E-4	0	0	0	-0.988

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A84. Coeficientes de corrección de la carga para la función de HGVs de 7.5 a 16 t

	κ	n	p	q	r	s	t	u
CO	1.03	0.0345	0	-7.55E-4	9.77E-4	0	0	0
CO <sub>2</sub>	1.26	0.0790	0	-0.00109	0	0	-2.03E-7	-1.14
VOC	0.985	0.00367	0	0	0.00135	0	0	0.201
NO <sub>x</sub>	1.19	0.0594	0	-9.69E-4	0	0	0	-0.977
PM	1.02	0.0437	0	-9.16E-4	0.00234	0	0	0

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A85. Coeficientes de corrección de la carga para la función de HGVs de 16 to 32 tonnes

	κ	n	p	q	r	s	t	u
CO	1.17	0.0563	0	-8.19E-4	0	0	0	-0.755
CO <sub>2</sub>	1.27	0.0882	0	-0.00101	0	0	0	-0.483
VOC	1.01	-0.00660	0	2.09E-4	8.89E-4	0	-2.54E-7	0
NO <sub>x</sub>	1.28	0.0795	-0.00105	-0.00117	0	0	0	-0.874
PM	1.24	0.0727	0	-0.00113	0	0	0	-1.06

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A86. Coeficientes de corrección de la carga para la función de HGVs de 32 a 40 t

	κ	n	p	q	r	s	t	u
CO	1.20	0.0849	0	-0.00184	0	0	0	-1.19
CO <sub>2</sub>	1.43	0.121	0	-0.00125	0	0	0	-0.916
VOC	1.07	0.0150	0	-1.70E-4	0	0	-9.49E-8	-0.220
NO <sub>x</sub>	1.42	0.116	0	-0.00160	0	0	0	-1.62
PM	1.22	0.0709	0	-0.00119	0	0	0	-0.968

Fuente: MEET (1999), informe final

## Coeficientes de corrección del kilometraje (pág 89)

Tabla A87. Funciones de corrección del kilometraje

Agente	Case	de	Kilometraje	a	b	c	d	Valor	a
--------	------	----	-------------	---	---	---	---	-------	---

contaminante	capacidad (l)	medio (km)					120000 km
Función de corrección Urbano (v < 19 km/h)							
CO	< 1.4	29057	0.557	0	1.523E-05	0	2.39
	1.4 - 2.0	39837	0.543	0	1.148E-05	0	1.92
	>2.0	47028	0.565	0	9.243E-06	0	1.67
NO <sub>x</sub>	< 1.4	29057	0.478	0	1.798E-05	0	2.64
	1.4 - 2.0	39837	0.207	0	1.990E-05	0	2.59
	>2.0	47028	0.839	0	3.416E-06	0	1.25
HC	< 1.4	29057	0.647	0	1.215E-05	0	2.10
	1.4 - 2.0	39837	0.509	0	1.232E-05	0	1.99
	>2.0	47028	0.432	0	1.208E-05	0	1.88
Función de corrección inintermedia (v entre 19 and 63 km/h)							
CO	< 1.4	29057	0.578	-1.091E-03	1.451E-05	3.773E-08	
	1.4 - 2.0	39837	0.511	1.682E-03	1.229E-05	-4.257E-08	n/a
	>2.0	47028	0.432	7.000E-03	1.207E-05	-1.486E-07	
NO <sub>x</sub>	< 1.4	29057	0.551	-3.841E-03	1.548E-05	1.318E-07	
	1.4 - 2.0	39837	0.116	4.795E-03	2.219E-05	-1.205E-07	n/a
	>2.0	47028	0.941	-5.364E-03	1.246E-06	1.142E-07	
HC	< 1.4	29057	0.577	3.682E-03	1.456E-05	-1.268E-07	
	1.4 - 2.0	39837	0.466	2.273E-03	1.340E-05	-5.693E-08	n/a
	>2.0	47028	0.313	6.250E-03	1.461E-05	-1.331E-07	
Función de corrección extraurbana (v > 63 km/h)							
CO	< 1.4	29057	0.509	0	1.689E-05	0	2.54
	1.4 - 2.0	39837	0.617	0	9.607E-06	0	1.77
	>2.0	47028	0.873	0	2.704E-06	0	1.20
NO <sub>x</sub>	< 1.4	29057	0.309	0	2.378E-05	0	3.16
	1.4 - 2.0	39837	0.418	0	1.460E-05	0	2.17
	>2.0	47028	0.603	0	8.442E-06	0	1.62
HC	< 1.4	29057	0.809	0	6.570E-06	0	1.60
	1.4 - 2.0	39837	0.609	0	9.815E-06	0	1.79
	>2.0	47028	0.707	0	6.224E-06	0	1.45

Fuente: MEET (1999), informe final

## Funciones de corrección de la temperatura (pág 90).

Tabla A88. Funciones de corrección de la temperatura (vañor de -20 a +22.5°C)

Agente contaminante	Fase FTP75	A	B	Valor a -20°C
---------------------	------------	---	---	---------------

CO	s	-0.0249	1.58	2.08
	ht	-0.0155	1.37	1.68
	average	-0.0202	1.48	1.88
NO <sub>x</sub>	s	-0.0101	1.26	1.46
	ht	-0.0143	1.28	1.57
	average	-0.0122	1.27	1.51
HC	s	-0.0201	1.47	1.87
	ht	-0.0126	1.31	1.56
	average	-0.0164	1.39	1.72
Corrección de la temperatura TC = A × temperatura (oC) + B				

Fuente: MEET (1999), informe final

## Factores de corrección de las emisiones de arranque (Pág 97)

Tabla A89. Distancia caliente dc (Km) como una función de la velocidad media V (km/h)

Tecnología	Agente contaminante	Distancia caliente dc	Límite de la distancia
Coches de gasolina con catalizador	CO <sub>2</sub>	dc = 0.29V - 0.05	dc 0
	CO	dc = 0.24V - 0.14	dc 0
	HC	dc = 0.06V + 2.19	-
	NO <sub>x</sub>	dc = 0.19V + 3.4	-
	FC	dc = 0.24V + 0.54	-
Coches Diesel Sin catalizador	CO <sub>2</sub>	dc = 0.24V + 0.09	-
	CO	dc = 0.08V + 4.83	-
	HC	dc = 0.08V + 4.83	-
	NO <sub>x</sub>	dc = -0.07V + 7.50	dc 0
	FC	dc = 0.13V + 3.42	-
Coches gasolina sin catalizador	CO <sub>2</sub>	dc = 0.15V + 2.68	-
	CO	dc = 0.04V + 5.42	-

	HC	$dc = 0.09V + 1.94$	-
	NO <sub>x</sub>	$dc = 0.02V + 2.83$	-
	FC	$dc = 0.28V + 0.47$	-

Fuente: MEET, 1999

Tabla A90. Coeficientes a usados para calcular los factores de corrección de distancia h(d)

Tecnología	Agente contaminante	Coeficiente a
Coches de gasolina con catalizador	CO <sub>2</sub>	3.01
	CO	10.11
	HC	7.02
	NO <sub>x</sub>	2.30
	FC	7.55
Coches Diesel Sin catalizador	CO <sub>2</sub>	3.95
	CO	3.43
	HC	2.48
	NO <sub>x</sub>	0.89
	FC	11.46
Coches gasolina sin catalizador	CO <sub>2</sub>	2.85
	CO	6.70
	HC	10.96
	NO <sub>x</sub>	2.54
	FC	7.97

Fuente: MEET, 1999

## Factores de emisión por evaporación (pág 104)

Tabla A91. Factores de emisión de evaporación del CORINAIR

Factor de emisión (unidades)	Vehículos incontrolados	Vehículos controlados
Diurna (g/día)	$9.1 \exp(0.0158 (RVP - 61.2) + 0.0574 (ta, \min - 22.5) + 0.0614 (ta, \text{rise} - 11.7))$	0.2 × Incontrolados
Absorción media (g/procedimiento)	$\exp(-1.644 + 0.01993 RVP + 0.07521 ta)$	$0.2 \exp(-2.41 + 0.02302 RVP + 0.09408 ta)$
Absorción alta(g/procedimiento)	$3.0042 \exp(0.02 RVP)$	$0.3 \exp(-2.41 + 0.02302 RVP + 0.09408 ta)$
Absorción media y alta para vehículos de inyección de	0.7	ninguno

combustible (g/procedimiento)		
Pérdidas por el funcionamiento a temperatura media (g/km)	$0.1 \exp (-5.967 + 0.04259 RVP + 0.1773 ta)$	0.1 × incontrolados
Pérdidas por el funcionamiento a temperatura media (g/km)	$0.136 \exp (-5.967 + 0.04259 RVP + 0.1773 ta)$	0.1 × incontrolados
Claves: RVP = volatilidad del combustible en kPa ta = temperature ambiente media manual en °C ta,min = temperatura ambiente minima durante el día °C ( promedio para el mes) ta,rise = aumento de la temperature durante el día en °C (promedio para el mes)		

Fuente: MEET (1999), informe final

Tabla A92. Datos de Emisiones por evaporación para los ciclomotores

	Diurnas (g/día)	Absorción media y alta (g/test)
Dos tiempos pequeña(125 cc)	5.7	7.5
Cuatro tiempos largo (1000 cc)	17.3	26.1

Fuente: MEET (1999), informe final

## 8. LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1. Consumos energéticos .....	9
Tabla 1. Consumo energéticos por sectores .....	9
Tabla 2. Consumo energético por sectores respecto al total .....	9
Figura 2: Tipos de modelos E3 .....	14
Figura 3. Modelos tecnológicos .....	15
Tabla 3. Modelos tecnológicos .....	16
Tabla 4. Resultados obtenidos con modelos tecnológicos .....	17
Figura 4. Estructura genérica de un modelo de equilibrio general .....	19
Tabla 5. Modelos de equilibrio general .....	20
Tabla 6. Resultados de algunos modelos de equilibrio parcial .....	21
Tabla 7. Resultados de algunos modelos macroeconómicos .....	22
Tabla 8. Resultados obtenidos de algunos modelos de equilibrio general estáticos ..	23
Tabla 9. Resultados obtenidos de algunos modelos de equilibrio general dinámico ..	25
Figura 5. Estructura genérica de un modelo de evaluación integrada .....	27
Tabla 10. Modelos de evaluación integrada .....	28
Tabla 11. Características generales de los modelos agregados .....	30
Tabla 12. Métodos para el cálculo de emisiones contaminantes según modo de transporte y tipología del motor. ....	33
Tabla 13: Estudios Europeos de relevancia en el ámbito de los costes externos (cambio climático) .....	39
Tabla 14. Valores recomendados para los costes externos en el capítulo de cambio climático (en €/tonelada de CO <sub>2</sub> ). ....	41
Gráfico 1. Consumos externos del transporte en España. Año 2000. ....	42
Tabla 15. Costes medios €/viajero-km y €/tonelada-km. Año 2000. ....	43
Tabla 16. Ahorros de costes externos generados por RENFE Operadora .....	43
Gráfico 2. Detalle por conceptos .....	44
Gráfico 3. Consumos externos del transporte en España. Año 2000 .....	44
Tabla 17. Agentes contaminantes para el modo carretera .....	50
Figura 6. Comparación de la velocidad de un vehículo con un ciclo urbano típico de la EU y un ciclo de conducción urbana real. ....	52
Tabla 18. Índices de reducción de las emisiones para vehículos de gasolina de EURO II a EURO IV. ....	57
Tabla 19. Índices de reducción de las emisiones para vehículos diesel EURO II a EURO IV. ....	59
Tabla 20. Objetivos y situación actual de las características de la batería para vehículos .....	61

---

Tabla 21. Porcentajes estimados del reparto del mercado para los vehículos de nueva tecnología para el 2010 y el 2020. ....	63
Tabla 22. Factores de emisiones corregido. Modo carretera. ....	74
Tabla 23. Referencias de exceso de emisiones de arranque en frío a 20 °C y 20 km/h (ω) .....	75
Tabla 24. Coeficientes de corrección de la velocidad f(V) y los límites .....	76
Tabla 25. Coeficientes de corrección de la temperatura y los límites .....	77
Tabla 26. Promedio de uso diario de los coches utilitarios. ....	83
Tabla 27. Emisiones típicas y los factores de consumo de combustible para las locomotoras diesel. ....	87
Tabla 28. Correlaciones para el estudio en estado constante de la energía del tren en kN/toneladas por la velocidad en m/s para diferentes tipos de tren .....	90
Tabla 29. Factores de carga para los distintos tipos de carga. Ejemplos especiales de transportes sin viajes vacíos .....	92
Tabla 30. Factores de carga para los distintos tipos de carga. Valores estimados ....	92
Gráfico 4. Energía consumida de los trenes eléctricos.....	93
Tabla 31. Consumo de energía final específica para trenes eléctricos.....	93
Gráfico 5. Energía consumida de los trenes diesel .....	94
Tabla 32. Factores de emisión para los trenes diesel. ....	94
Figura 7. Consumo de energía de la central. ....	99
Emisiones contaminantes consideradas .....	100
Tipología de buque .....	101
Clasificación por tipo de motor .....	101
Clasificación por combustible.....	101
Modos de operación.....	102
Tabla 33. Distribución de la muestra de la nave por el tipo de la propulsión.....	103
Tabla 34. Distribución de la muestra de las naves por tipo de velocidad.....	103
Tabla 35. Distribución de la muestra por tipo de nave .....	104
Tabla 36. Consumo de combustible medio en las ecuaciones con plena energía y de la regresión lineal del consumo con energía plena en función del tonelaje bruto	105
Tabla 37. Porcentaje de potencia total para diversos ajustes de la aceleración....	105
Tabla 38. Fracción del consumo de combustible máximo en los distintos modos ...	106
Tabla 39. Velocidad media en función del tipo de nave.....	107
Tabla 40. Relación entre el peso muerto (t), el consumo de combustible (Kg. /Km.) y las GT para diferentes tipos de buques así como los valores de correlación. ..	108
Tabla 41. Categorías en que el EUROSTAT y TRENDS agrupa a los barcos. ....	109
Tabla 42. Consumo de combustible (Kg./Km.) para graneleros arribados al puerto de Helsinki en el primer trimestre del año 2.000.....	110

Tabla 43. Consumos específicos de combustible en g GT/tm por tonelada de mercancía transportada en buques de graneles sólidos en el puerto de Helsinki durante el año 2000. ....	110
Tabla 44. Relación entre GT y DWT.....	112
Figura 9. Evolución de los consumos en motores principales. ....	113
Figura 10. Distribución por edades de los diferentes tipos de buques (Lloyds Register 1.994) .....	113
Figura 11. TORM ALICE .....	114
Figura 12. TORM GOTLAND .....	115
Tabla 45. Datos de los dos Buques objeto de estudio. ....	115
Tabla 46. Media de los factores de carga para diferentes tipos de buques, trabajando bajo condiciones normales de operación.....	116
Figura 13. Evolución de la velocidad media del servicio por tamaño del buque. ....	117
Figura 14. Consumo de combustible para buques tanques. ....	118
Figura 15. Consumo de combustible para Graneleros. ....	118
Figura 16. Consumo de combustibles para portacontenedores .....	119
Figura 17. Consumo de combustible para buques de carga generales.....	119
Figura 18. Consumo de combustible para RORO/Ferry/Cargo Vessels .....	120
Tabla 47. Tipo de buque de acuerdo a la nomenclatura Eurostat y su correlación en TRENDS .....	122
Tabla 48. Correspondencia entre los modelos de buques considerados en el EUROSTAT y TRENDS.....	123
Tabla 49. Consumo de combustible por kilómetro de graneleros por rango de tonelaje, entrados en el Puerto de Helsinki durante el primer trimestre del año 2.000. ....	124
Tabla 50. Consumo específico de combustible de graneleros, entrados en el Puerto de Helsinki con respecto al peso de las mercancías, en el año 2.000. ....	125
Tabla 51. Consumo total de combustible asignado al Puerto de Helsinki desde diferentes rutas para buques de transporte de graneles secos en el año 2.000. ....	125
Tabla 52. Participación de cada tipo de buque en el transporte de mercancías sobre la base de tonelaje. Estados miembros de la UE para el año 2.000. ....	126
Tabla 53. División de la capacidad entre los buques con motores lentos y semirrápidos para el año 2.000. ....	127
Tabla 54. Carga media por tipo de buque en toneladas para el año 2.000.....	128
Tabla 55. Participación de los buques con motores lentos y semirrápidos, basado en el número de buques que hagan escala en cada estado miembro para el año 2.000. ....	129
Tabla 56. Distancia recorrida por tipo de buque y país en el año 2.000 (en millas náuticas).....	130
Tabla 57. EPA Categories for Compression ignition (CI) Marine Engines .....	132
Tabla 58. Número Estimado de buques de bandera U.S. por tipo y categoría E.P.A.	132

---

Tabla 59. Consumo de fuel estimado para motores de ignición por compresión en la flota U.S. (tpd) .....	133
Tabla 60. Resumen de Movimientos de Carga en 1993 por Major Waterway .....	134
Tabla 61. Velocidad media (nudos) Buques de carga de la flota U.S. (Ajustada al ciclo de actividad).....	135
Tabla 62. Velocidad media (nudos) Flota Mundial de Buques Mercantes (Ajustada al ciclo de actividad) .....	135
Figura 19. Mapa del área del estudio mostrando las rutas marítimas. ....	137
Tabla 63. Categorías de los buques por tipo de máquina .....	137
Tabla 64. Velocidades medias (nudos) y Potencias de motores auxiliares (kW) por tipo de buque y tamaño. ....	138
Tabla 65. Categorías EPA para las máquinas basadas en el la capacidad de los cilindros.....	140
Tabla 66. Resumen de la información de emisiones utilizada. ....	140
Figura 20. Consumo específico de combustible por carga completa. ....	141
Figura 21. Consumo específico de combustible por carga fraccionada. ....	141
Tabla 67. Categorías de diseño. ....	142
Tabla 68. Potencias del motor por modo de operación. ....	142
Tabla 69. Carga de energía por modo de operación. ....	143
Tabla 70. Carga de la máquina por tipo de buque para cada modo de operación. .	143
Tabla 71. Resultados de regresiones entre Potencia y Tonelaje de Peso Muerto ...	144
Tabla 72. Regresiones de Potencia frente a Peso Muerto y Velocidad de crucero ..	145
Tabla 73. Tipos de buques recomendados y regresiones de Potencia a Peso Muerto. ....	145
Tabla 74. Potencias recomendadas por Modo de Operación .....	146
Tabla 75. Porcentaje de carga y potencia de AE (%) .....	147
Tabla 76a. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.....	147
Tablas 76b. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.....	148
Tablas 76c. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.....	149
Tablas 76d. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.....	150
Tablas 76e. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.....	150
Tablas 76f. Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.....	151
Tablas 76g: Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex.....	151

---

Tablas 76h: Clasificación de buques con información de peso muerto, BHP consumo específico por tipo de buque según Acurex. ....	152
Tabla 77. Reducciones potenciales de consumo de combustible/ CO2 por medidas técnicas.....	153
Tabla 78. Consumos mundiales de combustible marino en los años 1990-1995 según diferentes fuentes y separando fuel de diesel oil. ....	154
Tabla 79. Potencial reducción de Energía para buques nuevos-medición casco/hélice .....	154
Tabla 80. Energy reduction potential for existing ships - hull/propeller measures ..	155
Tabla 81. Power, fuel consumption and cost of various fast transatlantic freight concepts .....	156
Tabla 82. Case ship description, based on Emission Inventory Analysis.....	157
Figura 22. Comparativa modal de un mismo recorrido. ....	157
Figura 23. Consumo de combustible de los distintos modos. ....	158
Tabla 83. Consumo mundial según distintas fuentes de información.....	163
Figura 24. Consumo mundial según distintas fuentes de información. ....	164
Tabla 84. Perfiles operacionales de transporte. ....	165
Tabla 85. Perfiles operacionales de no transporte. ....	165
Tabla 86. Rangos de las variables. ....	166
Tabla 87. Potencia y velocidad por ciclo de actividad para el transporte.....	166
Tabla 88. Potencia y velocidad por ciclo de actividad para el no transporte. ....	166
Tabla 89. Resumen de los tipos de buques. ....	168
Tabla 90. Resumen del número de horas de funcionamiento del buque.....	168
Tabla 91. Resumen del número de días de actividad. ....	169
Tabla 92. Resumen del consumo de fuel estimado. ....	169
Tabla 93. Resumen del consumo de fuel estimado. ....	170
Tabla 94. Modo de operación crucero. ....	171
Tabla 95. Modo de operación maniobra. ....	172
Tabla 96. Modo de operación en puerto.....	172
Tabla 97. Modo de operación crucero para ME.....	172
Tabla 98. Resumen de los buques analizados. ....	174
Figura 26. Relación entre datos observados y estimados. ....	175
Tabla 99. Resumen reconsumo de energía y potencia estimada. ....	176
Tabla 100. Clasificación de los tipos de motores principales. ....	178
Tabla 101. Clasificación de los tipos de motores auxiliares. ....	178
Tabla 102. Distribución de la potencia de un buque entre motores.....	179
Tabla 103. Factores de carga por modo de operación. ....	179
Tabla 104. Horas por modo de operación. ....	179

Tabla 105. . Potencia usada (kWh/año) del motor principal por buque. ....	180
Tabla 106. . Potencia usada (kWh/año) del motor auxiliar por buque. ....	180
Tabla 107. Potencia total usada (kWh/año) por buque. ....	180
Tabla 108. Consumos específicos de motores principales y auxiliares. ....	181
Tabla 109. Consumo anual de motores auxiliares para buques en la etapa de actividad atracado y por tamaño. ....	181
Tabla 110. Consumo anual de los buques, por etapa de actividad y por tamaño. ...	181
Tabla 111. Tiempo de estancia del buque atracado por año y tiempo de este funcionando los motores auxiliares, así como reducción posible utilizando corriente de tierra. ....	181
Figura 27. Incremento de la potencia (%) en función del tiempo (meses) desde el diqueado para diferentes tipos de pinturas anti-suciedad del casco en un buque rápido (tipo porta-contenedores). ....	182
Tabla 112. El consumo de energía (petróleo crudo) del mar: ....	183
Tabla 113. Consumo de energía (petróleo crudo) para tres tipos de carga específica .....	184
Tabla 114. Factores de emisión para las naves marítimas .....	184
Tabla 115. El consumo de energía para la carga específica para ferry. ....	184
Tabla 116. Factores de emisión de los ferry.....	185
Tabla 117. Consumo de energía de las naves interiores en función de la condición de la operación y de flujo libre o con las esclusas. ....	186
Tabla 118. Valores del consumo de energía para la navegación interior .....	187
Tabla 119. Factores de la emisión para las naves interiores.....	187
Figura 28. Las.....	188
Figura 29. AERO- modelo [NLR, 1996]. ....	189
Tabla 120. Datos del tráfico aéreo en Austria.....	194
Tabla 121. Consumo de combustible y emisiones del tráfico aéreo militar y total .	195
Tabla A1: Resumen de las categorías y tipos de vehículos .....	206
Tabla A2: Clasificación de los vehículos en función del motor, tamaño, años y nivel de regulación del vehículo.....	207
Tabla A3. Clasificación de los vehículos de acuerdo con UN-ECE.....	212
Tabla A4. Composición de la flota en España. ....	213
Tabla A5. Características del tráfico en España .....	215
Tabla A6. Vehículos de viajeros gasolina- Factores Emisiones en caliente CO <sub>2</sub> (g/Km) .....	219
Tabla A7. Vehículos de viajeros diesel- Factores Emisiones en caliente CO <sub>2</sub> (g/Km)	219
Tabla A8. Definición de las divisiones modales (solo los transportes motorizados) .	220
Tabla A9. Definición de los escenarios en función de la tecnología y del tipo de división modal. ....	220
Tabla A10. Factores de carga asumidos por modos.....	220

Tabla A11. Composición de la flota y asunciones de la tecnología actual y mejorada por modos. ....	221
Tabla A12. Composición de la flota y asunciones de la tecnología actual y mejorada por modos. ....	221
Gráfico A1: Emisiones medias por cercanía motorizado (suma para todos los modos). ....	222
Gráfico A2: Emisiones de NO, PM10, CO <sub>2</sub> , por pasajero/km , por modos y por escenarios. ....	223
Tabla A13. Definición de escenarios .....	224
Tabla A14. Definición de parámetros.....	224
Tabla A15. Trayecto por carretera Viena-Roma. ....	225
Tabla A16. Composición de la flota Austria 1997.....	225
Tabla A17. Composición de la flota y asunciones de la tecnología actual y mejorada para el modo carretera. ....	226
Tabla A18. Correspondencias entre la velocidad media y el tipo de carretera.....	226
Tabla A19. Pendiente.....	226
Gráfico A3: Comparación de las emisiones de NO <sub>x</sub> entre los seis escenarios.....	226
Gráfico A4: Comparación de las emisiones de CO <sub>2</sub> entre los seis escenarios.....	227
Tabla A20. Definición de escenarios .....	227
Tabla A21. Definición de factores de carga.....	227
Tabla A22. Distancias transportadas por modo.....	227
Tabla A23. Asunciones de los diferentes carburantes y sus contenidos de sulfuro. ...	228
Tabla A24. Asunciones para los vehículos resistentes para el transporte.....	228
Gráfico A5: Emisiones de Nox para los cuatro escenarios .....	228
Gráfico A6: Emisiones de CO <sub>2</sub> para los cuatro escenarios .....	229
Tabla A25. Ratio del peso del tren .....	230
Tabla A26. Detalles de las rutas y trenes para el cálculo del ejemplo.....	231
Tabla A27. Coeficientes usados en el cálculo de la energía .....	231
Tabla A28. Factores de emisión de energía específica .....	231
Tabla A29. Cálculos de las emisiones para los cuatro ejemplos de viajes en tren (50% de ocupación).....	232
Tabla A30. Factores de emisión revisados (datos en kg/T de combustible) .....	232
Tabla A31. Factores de emisión revisados (datos en g/kWh) .....	235
Tabla A32. Factores de emisión para motores diesel con generadores eléctricos en buques (kg/t de combustible).....	237
Tabla A33. Factores de emisión propuestos (kg/T de combustible) para el uso de una metodología simplificada .....	238
Tabla A34. Factores de emisión propuestos para modo travesía (kg/t de combustible) para el uso de la metodología detallada .....	238

---

Tabla A35. Factores de emisión propuestos para maniobrar (kg/t de combustible) para el uso de la metodología detallada .....	239
Tabla A36. Factores de emisión propuestos para el atraque (kg/t de combustible) para el uso de la metodología detallada .....	239
Tabla A37. Factores de emisión propuestos para los petroleros descargando (kg/T de combustible) para el uso de la metodología detallada .....	239
Tabla A38. Factores de emisión de los motores diesel con generadores eléctricos en los buques (kg/t de combustible).....	240
Tabla A39. Descripción de las naves. ....	240
Tabla A40. Descripción de las naves. ....	241
Tabla A41. Consumo de combustible por modos.....	242
Tabla A42. Factores de emisión de NOx.....	242
Tabla A43. Resultados de emisiones .....	243
Tabla A44. Factores de la emisión (g/kg) para el CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub> de inventarios nacionales y de estudios .....	244
Tabla A45. Las emisiones de VOC por el motor durante el motor comienzan y calentándose-para arriba (VOC total) y las emisiones de VOC registradas en el LTO-ciclo (LTO-VOC).....	245
Tabla A46. Emisiones VOC en tierra de un McDonnell Douglas MD-11 .....	245
Tabla A47. Índices de emisión de las unidades de potencia auxiliar .....	245
Tabla A48. Comparación de resultados del MEET y de ANCAT/EC .....	247
Tabla A49. Tarifas de emisión para los vuelos militares en diversos países .....	248
Tabla A50. Ratios de la emisión para los vuelos de VFR - Alemania. ....	248
Tabla A51. Ratios de emisión de Helicópteros- Alemania, Holanda y Suiza .....	248
Tabla A52. Ratios de emisión para vuelos VFR- Holanda .....	249
Tabla A53. Factores de emisión para el avión de carga. ....	249
Tabla A54. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión de CO Para coches de pasajeros de gasolina.....	250
Tabla A55. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión de VOC para los coches de pasajeros de gasolina.....	251
Tabla A56. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión de NOX para los coches de pasajeros de gasolina.....	252
Tabla A57. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión de Dioxido de carbono para los coches de pasajeros .....	253
Tabla A58. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión para los vehículos diesel incontrolados <2.5 t .....	254
Tabla A59. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión para los vehículos diesel incontrolados <2.5 t, completado con la directiva del EURO I Directive	254
Tabla A60. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión para los vehículos LPG convencionales <2.5 t.....	254
Tabla A61. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión para los vehículos LPG <2.5 t, completado con la Directiva de EURO I.....	255

---

Tabla A62. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión en los vehículos de carga ligera de gasolina <3.5 t .....	255
Tabla A63. Dependencia de la velocidad en los factores de emisión para los vehículos de carga ligera diesel <3.5 t .....	256
Tabla A64. Coeficientes de las funciones de emisión para vehículos de carga pesada con un peso bruto de 3.5 a 7.5t .....	256
Tabla A65. Coeficientes de las funciones de emisión para vehículos de carga pesada con un peso bruto de 7.5 a 16t .....	256
Tabla A66. Coeficientes de las funciones de emisión para vehículos de carga pesada con un peso bruto de 16 a 32 t .....	257
Tabla A67. Coeficientes de las funciones de emisión para vehículos de carga pesada con un peso bruto de 32 a 40 .....	257
Tabla A68. Coeficientes de las funciones de emisión para autobuses urbanos .....	257
Tabla A69. Coeficientes de las funciones de emisión para autocares .....	257
Tabla A70. Factores de corrección del peso para los vehículos que transportan mercancías mayores a 40 t de peso bruto .....	258
Tabla A71. Factores de emisión para los ciclomotores .....	258
Tabla A72. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión para las motocicletas de dos tiempos con una capacidad de motor de más de 50cm <sup>3</sup> ...	259
Tabla A73. Dependencia de la velocidad de los factores de emisión para las motocicletas de 4 tiempos con una capacidad de motor de más de 50cm <sup>3</sup> .....	260
Tabla A74. Coeficientes para coches de pasajeros y vehículos de carga ligera con motor de gasolina convencional .....	261
Tabla A75. Coeficientes de gradiente de las funciones de emisión para coches de pasajeros y vehículos de carga ligera con motor con catalizador regulado .....	262
Tabla A76. Coeficientes de gradiente de las funciones de emisión para coches de pasajeros y vehículos de carga ligera con motor diesel .....	263
Tabla A77. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para vehículos de carga pesada de <7.5 t .....	264
Tabla A78. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para vehículos de carga pesada de 7.5 - 16 t .....	265
Tabla A79. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para vehículos de carga pesada de 16 - 32 t .....	266
Tabla A80. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para vehículos de carga pesada de >32 t .....	267
Tabla A81. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para los autobuses urbanos .....	268
Tabla A82. Coeficientes de gradiente de la función de emisión para los autocares .....	269
Tabla A83. Coeficientes de corrección de la carga para la función de HGVs de 3.5 a 7.5 t .....	269
Tabla A84. Coeficientes de corrección de la carga para la función de HGVs de 7.5 a 16 t .....	270

Tabla A85. Coeficientes de corrección de la carga para la función de HGVs de 16 to 32 tonnes.....	270
Tabla A86. Coeficientes de corrección de la carga para la función de HGVs de 32 a 40 t.....	270
Tabla A87. Funciones de corrección del kilometraje .....	270
Tabla A88. Funciones de corrección de la temperatura (vañor de -20 a +22.5°C) ...	271
Tabla A89. Distancia caliente dc (Km) como una function de la velocidad media V (km/h) .....	272
Tabla A90. Coeficientes a usados para calcular los factores de corrección de distancia h(d).....	273
Tabla A92. Datos de Emisiones por evaporación para los ciclomotores .....	274

## Documentos del Proyecto EnerTrans

### Monografías EnerTrans

Monografía 1: “El sistema español de transporte y sus impactos sobre la sostenibilidad”: José Ignacio Pérez Arriaga, Eduardo Pilo de la Fuente, Ignacio de L. Hierro Ausín

Monografía 2: “Usos de la energía en el transporte”: Alberto García Álvarez, M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares

Monografía 3: “Modelos de consumos y emisiones: Estado del arte”: Timoteo Martínez Aguado, Aurora Ruiz Rúa, Ana Isabel Muro

Monografía 4: “Análisis de las estadísticas de consumos energéticos y emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte”: Alberto Cillero, Paula Bouzada Outeda

Monografía 5: “Tablas input-output relacionadas con las estadísticas de consumos y emisiones en el transporte”: Timoteo Martínez Aguado, Aurora Ruiz Rúa, Ana Isabel Muro Rodríguez

Monografía 6: “Métrica y estandarización de los consumos y emisiones en el transporte”: Alberto Cillero Hernández, Paula Bouzada Outeda, Alberto García Álvarez, M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares

Monografía 7: “Incremento de recorrido en el transporte por longitud de caminos, operación y gestión”: Alberto Cillero Hernández, Paula Bouzada Outeda, Alberto García Álvarez, M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares

Monografía 8: “Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte”: José M<sup>a</sup> López Martínez, Javier Sánchez Alejo, Álvaro Gómez, Ángel Fernández.

Monografía 9: “Flujos de la energía de la electricidad para el transporte”: Eduardo Pilo de la Fuente, José Ignacio Pérez Arriaga, Ignacio de L. Hierro Ausín, Jesús Jiménez Octavio

Monografía 10: “Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de infraestructuras”: Timoteo Martínez Aguado, M<sup>a</sup> José Calderón Milán, Ana Isabel Muro Rodríguez

Monografía 11: “Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de vehículos”: José M<sup>a</sup> López Martínez, Javier Sánchez Alejo

Monografía 12: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por coche y camión”: José María López Martínez, Javier Sánchez Alejo

Monografía 13: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por autobús y autocar”: Alberto Cillero Hernández, Gustavo Martinelli, Paula Bouzada Outeda

Monografía 14: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por avión”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Monografía 15: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por barco”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Monografía 16: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril”: Alberto García Álvarez, M<sup>a</sup> del Pilar Martín Cañizares

Monografía 17: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Monografía 18: “ENERTRANS: Modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión del sistema de transporte que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructura y de política de transporte”: Grupo de investigación del proyecto Enertrans

### Notas técnicas EnerTrans

Nota técnica 1: “Introducción al transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Nota técnica 2: “Informe sobre el tráfico internacional y el consumo de carburante en el sector aeronáutico”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 3: “Informe sobre el suministro de combustible en los aeropuertos en España”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 4: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte aéreo”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 5: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte ferroviario”: Alberto García Álvarez, Eduardo Fernández González

Nota técnica 6: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Nota técnica 7: “Informe sobre el tráfico español y el consumo de carburante en el sector marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 8: “Análisis de documentación referida al transporte marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 9: “Aspectos generales del transporte marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 10: “Características de la navegación marítima”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 11: “Consumo de los servicios auxiliares en el automóvil”: José M<sup>a</sup> López Martínez, Juan José Herrero

Nota técnica 12: “Notas sobre los valores del coeficiente de resistencia a la rodadura”: José M<sup>a</sup> López Martínez, Juan José Herrero

Nota técnica 13: “Tipos de aeronaves según su compañía constructora”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

