



**CONAMA10**  
CONGRESO NACIONAL  
DEL MEDIO AMBIENTE

COMUNICACIÓN TÉCNICA

# **Elaboración de inventarios de emisiones en aeropuertos.**

Autor: Julia Municio Llanes

Institución: Observatorio de la Sostenibilidad en Aviación (SENASA)

e-mail: [jmunicio@senasa.es](mailto:jmunicio@senasa.es)

Otros Autores: Ana Isabel Luengo Rivero; César Velarde Catolfi-Salvoni

## **RESUMEN**

La comunicación tratará sobre la metodología que actualmente se está llevando a cabo para la elaboración de inventarios de emisiones en los aeropuertos españoles. Dentro de dichos inventarios las fuentes de emisión investigadas son tanto las aeronaves, productoras de aproximadamente del 2% de las emisiones globales (según el IPCC), los vehículos de handling que dan soporte a dichas aeronaves y todos aquellos vehículos que acceden a las terminales de los aeropuertos, bien sean privados, públicos, etc.

**Palabras Clave:** Inventario; emisiones; aeropuertos

## 1 INTRODUCCIÓN

En las instalaciones de los aeropuertos se produce una gran actividad diariamente, desde la realizada por las aeronaves, a aquella destinada a dar asistencia a pasajeros, mercancías y aeronaves en tierra (*handling*).

En los aeropuertos, además de registrarse las emisiones procedentes de las aeronaves, se determinan como principales fuentes de emisión las procedentes de los vehículos de transporte en accesos y estacionamientos del aeropuerto, las procedentes de fuentes estacionarias (calderas de gasóleo y depósitos de combustible), las que se generan en las prácticas contraincendios, y aquellas procedentes de vehículos de apoyo en tierra (GSE y GAV).

La presente Comunicación Técnica se centrará en el inventario de emisiones tanto de las aeronaves como de los vehículos y equipos de apoyo en tierra que operan en los aeropuertos.

La actividad de las aeronaves comprende dos fases, la fase LTO (ciclo de aterrizaje-despegue), formada por cuatro periodos, (aproximación, ascenso, despegue y rodadura), y la fase crucero, llevada a cabo cuando la aeronave se encuentra a más de 1.000 m de altura.

El *handling* engloba entre sus operaciones el transporte de pasajeros desde las terminales a las aeronaves y viceversa, los procesos de carga y descarga de mercancías y equipajes, el suministro de energía y combustible a la aeronave, transporte de tripulaciones, así como todas las maniobras que deben realizarse para situar al avión en posición para efectuar el despegue o el inicio de la rodadura según el caso.

## 2 OBJETIVOS

El objetivo principal es proporcionar las pautas necesarias para la elaboración de inventarios de las principales fuentes de emisión en aeropuertos (las aeronaves y los vehículos de asistencia en tierra) así como la cuantificación del efecto ambiental en cuanto a emisiones producidas por dichas actividades.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. **Modo de elaboración del Inventario** de aeronaves y de vehículos de asistencia en tierra que operan en los aeropuertos.
2. **Cálculo de emisiones** y principales contaminantes procedentes de las aeronaves y vehículos de asistencia en tierra:
  - Acidificadores, precursores del ozono y gases de efecto invernadero.
  - Metales pesados y Partículas.

- Contaminantes orgánicos persistentes.
3. **Presentación de los resultados:** en la elaboración del inventario se deberá garantizar la integridad, la exactitud, la coherencia, la comparabilidad y la transparencia de los resultados.
  4. **Cumplimiento de la normativa** vigente en materia de emisiones atmosféricas: el inventario se realiza de forma que puede dar respuesta a los requerimientos de los distintos convenios, directivas y resoluciones firmados por la UE; para lo cual debe seguir la metodología EMEP/EEA-IPCC.

## 2.1 NORMATIVA

La normativa vigente relacionada con emisiones atmosféricas y que debe ser cumplida por las autoridades medioambientales y aeronáuticas son las indicadas a continuación.

Con relación a los **Gases de efecto invernadero:**

- **Decisión 280/2004/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, 11 de Febrero de 2004 relativa al mecanismo para el seguimiento de emisiones de gases de efecto invernadero en la Comunidad y para la aplicación del Protocolo de Kioto.
- **Decisión de la Comisión 2005/166/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 10 de Febrero de 2005, por la que se establecen las disposiciones de la aplicación de la decisión 280/2004/CE, anterior.

Con relación a los **Techos Nacionales de emisión** establecidos por el Parlamento Europeo:

- **Directiva 2001/81/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, 23 de Octubre de 2001. con transposición a la normativa española.
- **Resolución de 14 de Enero de 2008** de la Secretaría General para la Prevención de la Contaminación y el Cambio climático, por la que se publica el Acuerdo de 7 de Diciembre de 2007 del consejo de Ministros y por el que se aprueba el **II Programa Nacional de Reducción de emisiones**. Traspone a la normativa española la Directiva 2001/81/CE.

Por otro lado la UE ha firmado una serie de convenios internacionales, que a su vez han de ser considerados:

- El **Convenio de Ginebra** sobre Contaminación Transfronteriza a Larga Distancia.
- El **Convenio Marco** sobre Cambio climático y el Protocolo de Kioto sobre la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- El **Convenio de Estocolmo** sobre eliminación o reducción de compuestos Orgánicos Persistentes.

### 3 FASES DE ELABORACIÓN DE UN INVENTARIO DE EMISIONES DEL TRANSPORTE AÉREO

Dentro del transporte aéreo y en particular en los aeropuertos españoles las principales fuentes de emisión son las procedentes de los siguientes focos:

- **Las operaciones de las aeronaves.**
- **Los vehículos de apoyo en tierra (GSE) y unidades auxiliares de energía (APU).**
- **Los vehículos de transporte en los accesos a las terminales de los aeropuertos y estacionamientos del aeropuerto:** autobuses, lanzaderas, taxis, vehículos privados, etc.
- **Las fuentes estacionarias:** calderas de gasóleo y depósitos de combustible.
- **Las prácticas contraincendios.**

Debido a la amplitud del estudio, se seleccionan como fuentes de emisión prioritarias, a la hora de realizar los inventarios de emisiones, las procedentes de las **aeronaves**, así como las originadas por los vehículos de asistencia en tierra o **handling**. Esto se debe a que el porcentaje de emisiones procedentes de ambas fuentes es significativamente mayor que las emitidas por el resto de fuentes aeroportuarias de forma global, tal como se indica en la modelización efectuada con el programa EDMS (*Emissions and Dispersion Modeling System*<sup>1</sup>) en la tabla siguiente:

<b>%Aeronaves</b>	<b>%GSE/APU</b>	<b>%Accesos</b>	<b>%Aparcamientos</b>	<b>%Fuentes estacionarias y extinción de incendios</b>
<b>59,09</b>	<b>25,57</b>	5,43	4,08	5,83

Tabla: Porcentaje de emisión global de contaminantes según fuente de emisión. Los contaminantes considerados fueron: CO, HC, NOx, CO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub>.

Fuente: Estudios de Modelización de la Contaminación Atmosférica de 14 aeropuertos españoles (Diferentes años). AENA.

Por tanto en el presente informe se indicará la metodología para llevar a cabo un inventario de emisiones en aeropuertos, cuyas fases son las indicadas a continuación:

<sup>1</sup> El modelo EDMS de emisiones y dispersión de contaminantes fue desarrollado junto con la FAA (*Federal Aviation Administration*) y las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos (USAF). Los GSE y APU considerados por el programa son aquellos asignados por defecto a una combinación aeronave-motor determinada, adaptadas a las características del aeropuerto.

- **FASE 1:** Recopilación de datos.
- **FASE 2:** Análisis de datos.
- **FASE 3:** Metodología de cálculo de emisiones.
- **FASE 4:** Presentación de resultados.

A continuación se explica cada una de las fases de las que consta un inventario de emisiones del transporte aéreo.

### 3.1 FASE 1: RECOPIACIÓN DE DATOS

En esta fase del inventario se identifican los datos necesarios para el cálculo posterior de emisiones y las fuentes de información para la obtención de los mismos, tanto para las actividades relacionadas con las aeronaves, como para los equipos de asistencia en tierra.

#### 3.1.1 AERONAVES

Para la realización del inventario de las aeronaves, hay que considerar gran diversidad de parámetros y de fuentes de información externas.

Los parámetros a tener en cuenta para posteriormente poder realizar el cálculo de las emisiones son los siguientes:

1. **Las variables de actividad:** en el caso del tráfico aéreo la variable de actividad puede ser, dependiendo de la metodología a emplear alguna de las siguientes:
  - **Combustible vendido** al tráfico aéreo tanto en vuelos domésticos como internacionales.
  - Número de **ciclos LTO**, divididos en ciclos LTO nacionales e internacionales.
  - Número de **ciclos LTO por tipo de aeronave**, divididos de nuevo en vuelos nacionales e internacionales.
  - Datos **vuelo a vuelo** con información detallada a cerca del tipo de aeronave utilizada en cada vuelo concreto y la distancia realizada, en trayectos tanto nacionales como internacionales.

La información debe ser lo más detallada posible de forma que, dependiendo del grado de desagregación de los datos conseguidos, se podrá emplear diferentes metodologías más o menos detalladas.

Las fuentes de información de las que se pueden obtener los datos y las estadísticas del transporte aéreo, relativas a las variables de actividad son:

- **Ministerio de Fomento:** anuarios estadísticos.
- **AENA:** estadísticas procedentes de la web siguiente <http://www.aena.es/csee/Satellite?pagename=Estadisticas/Home>

- **OACI:** datos procedentes su *data website* (<http://www.icaoata.com/>).
- **EUROCONTROL:** datos procedentes de *Prisme*: ([http://www.eurocontrol.int/prisme/public/subsite\\_homepage/homepage.html](http://www.eurocontrol.int/prisme/public/subsite_homepage/homepage.html)).
- **OAG (Official Airline Guide):** guía que dispone de datos relativos a los horarios de los vuelos regulares efectuados durante años concretos, sin incluir los vuelos chárter (<http://www.oagaviation.com>).

## 2. Los factores de emisión de los contaminantes:

Las fuentes de información para la obtención de los factores de emisión son:

- **Agencia Europea de Medioambiente (EEA):**
  - Libro guía EMEP/CORINAIR de inventario de emisiones a la atmósfera 2007.
  - Libro guía EMEP/EEA de inventario de emisiones a la atmósfera 2009.
- **Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC).**
  - IPCC 2006: 2006 *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- **CEPMEIP:** *Co-ordinated European Programme on Particulate Matter Emission Inventories, Projections and Guidance*. ([http://www.air.sk/tno/cepmeip/em\\_factors.php](http://www.air.sk/tno/cepmeip/em_factors.php))
- **ICAO Database Emissions Databank:** (<http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702&pagetype=90>)

La información básica que se necesita en la elaboración de un inventario debe estar referida a años concretos para proporcionar datos y cifras sobre las emisiones realizadas anualmente para cada uno de los contaminantes que sean de interés.

### 3.1.2 VEHÍCULOS DE ASISTENCIA EN TIERRA

La recopilación de la información necesaria para realizar el inventario de vehículos de asistencia en tierra en los aeropuertos es una tarea complicada debido al gran volumen de datos que se deben recopilar y la cantidad de fuentes de información a las que se debe acudir para su obtención.

Para la recopilación de datos de los vehículos de asistencia en tierra, en primer lugar se debe proceder a la identificación de las operadoras de handling que operan en el/los aeropuertos objeto de estudio. Son dichas compañías de handling la principal fuente de información para la elaboración del inventario de vehículos y equipos.

Las operadoras trabajan en régimen de concesión durante un periodo de 7 años en los aeropuertos. Los aeropuertos en función de su tamaño y del número de movimientos de aeronaves de que disponga, dispone de una operadora o hasta tres compañías de *handling*.

Las compañías de asistencia en tierra que están actualmente trabajando en España son las siguientes:

Iberia Handling, Flightcare, Groundforce, Swissport Menzies, Newco, Clever Handling, Atlántica de Handling, Acciona, Lesma Handling e EAT.

Cada una de las operaciones *handling* se realizan por medio de equipos específicos cuyas características están relacionadas con la función que desempeñan dentro de la pista.

Algunos de ellos son vehículos convencionales, como turismos y furgonetas, empleados fundamentalmente para el transporte de personas. Son los vehículos denominados **GAV (Ground Acces Vehicles)**.

Hay otro tipo de vehículos cuyas características están relacionadas con la función que desempeñan dentro de la pista como elemento de apoyo a la aeronave, a la carga y al pasajero. Entre los más importantes se encuentran: cintas transportadoras, escaleras de pasajeros, tractores auxiliares y los de arrastre de aviones, plataformas elevadoras, equipos de deshielo, transportadores, transferidores, autobuses jardineras, grupos neumáticos y eléctricos. Estos vehículos solamente operan en el lado aire<sup>2</sup> del aeropuerto y se denominan **GSE (Ground Support Equipment)**.

Los datos a obtener hacen referencia al número y tipología de los equipos que conforman el parque de las compañías de *handling*, además de los datos precisos para calcular las emisiones en fases posteriores tales como: número de horas de funcionamiento medio, antigüedad de los motores, etc.

Los datos necesarios por tanto, para la elaboración del inventario de equipos y el consecuente inventario de emisiones son los siguientes:

- **Propietario** de los equipos.
- **Descripción del equipo:** características del motor, tipo de vehículo handling (turismo, plataforma elevadora, jardinera, cinta transportadora, tractor...).
- **Número de equipos** de cada familia/**flota de vehículos** (marcas, modelos).
- Tipo de **combustible** utilizado.

---

<sup>2</sup> El "lado aire" se refiere al espacio restringido al público dentro de los aeropuertos. Se encuentra ubicado tras los controles de seguridad y a él sólo acceden los particulares que van a volar o acaban de desembarcar y los empleados que desempeñan allí su función. Está constituido básicamente por las pistas, plataformas y calles de rodaje, así como por la parte de la terminal de acceso restringido o controlado.



- **Potencia de homologación del vehículo (Kw).**
- **Año de fabricación del motor.**
- **Volumen de combustible consumido por cada vehículo.**
- **Horas de funcionamiento medio.**
- **Distancias medias y totales recorridas.**

Con dichos datos se procede a la caracterización de la flota del parque de vehículos y equipos en los aeropuertos objeto de estudio.

## 3.2 FASE 2: ANÁLISIS DE DATOS

Una vez se hayan recopilado los datos según se ha indicado en el apartado anterior, se analizarán y estructurarán los mismos con el objetivo de decidir la metodología de cálculo a llevar a cabo.

### 3.2.1 AERONAVES

De forma general, la elección de la metodología (más o menos detallada) depende de las conclusiones a las que se llegue teniendo en cuenta los pasos indicados en el diagrama siguiente:

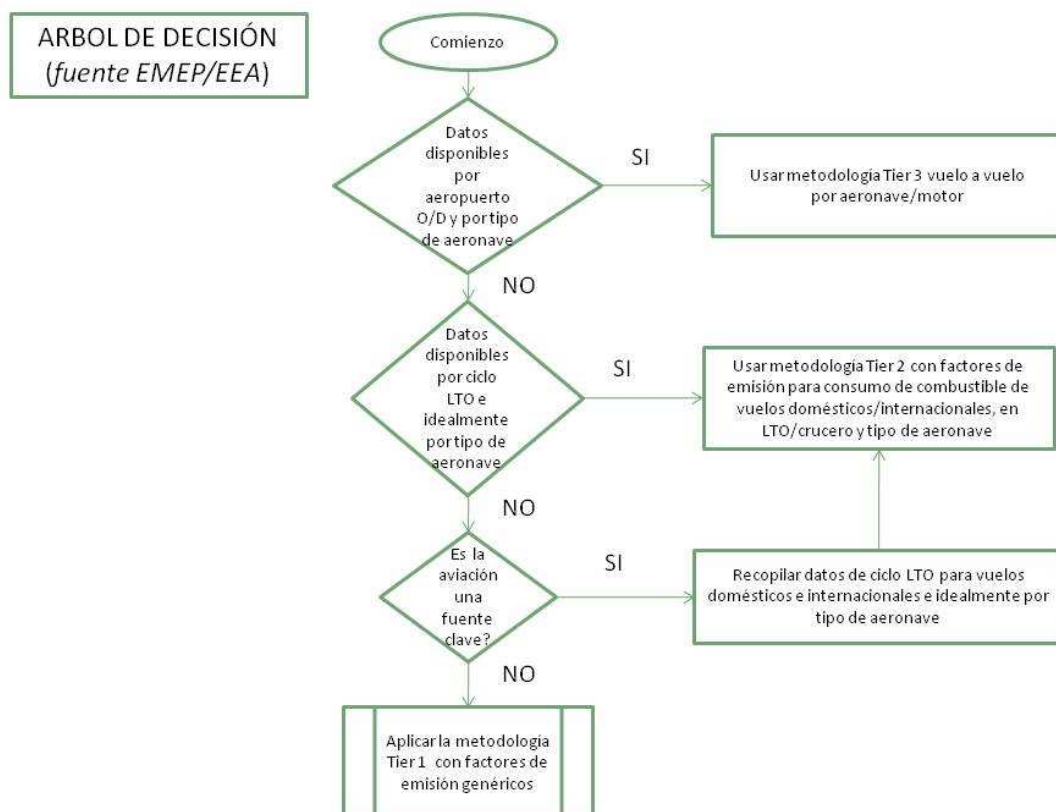


Figura: Árbol de decisión de empleo de metodología.

Fuente EMEP/EEA

La palabra en inglés *Tier* se puede traducir al español por *nivel*, en referencia a la metodología, donde a mayor nivel se requiere mayor precisión en la fuente de datos de partida.

Se pueden resumir los requerimientos de cada metodología de la siguiente forma:

	<b>Actividad</b>	<b>Tecnología</b>
<b>Tier 1</b>	Ventas de combustible divididas en uso doméstico e internacional. Nº ciclos LTO para tráfico doméstico e internacional.	Uso de mezcla de una flota media, con factores de emisión genéricos y factores medios para las fases de LTO y Crucero.
<b>Tier 2</b>	Ventas de combustible dividido en uso doméstico e internacional. Nº ciclos LTO para vuelos domésticos e internacionales, por tipo de aeronave.	Uso de factores de emisión específicos para LTO y factores de emisión medios para crucero.
<b>Tier 3</b>	Datos de vuelo a vuelo por tipo de aeronave y distancia volada, divididos en doméstico e internacional	Uso de datos específicos por tipo de aeronave, disponibles en la web de EEA.

Tabla: Metodologías.

Fuente: EMEP/EEA.

### 3.2.2 VEHÍCULOS DE ASISTENCIA EN TIERRA

Una vez recopilados los datos de los vehículos y equipos de asistencia en tierra, se debe analizar los mismos y homogeneizarlos.

Los GSE son equipos diseñados específicamente para realizar tareas dentro de un aeropuerto, no son vehículos que puedan circular por vías públicas.

A continuación se realiza una descripción de los equipos más utilizados en la plataforma aeroportuaria.

Dentro del grupo de vehículos GSE se pueden catalogar los siguientes tipos:



- **Autobús de pasajeros/Jardinera:** transportan pasajeros desde las terminales a los aviones que estén situados en remoto y viceversa. También se emplean para transportar tripulaciones y en cambios de turno del personal del aeropuerto.
- **Ambulift/Plataforma de elevación para minusválidos:** permite trasladar a personas en silla de ruedas o en camilla desde la terminal hasta el avión o viceversa.
- **ASU (Air Starter Unit):** durante la puesta en marcha de los motores del avión, proporciona aire (energía neumática) para arrancarlos.
- **Camiones:** de agua potable, de aguas residuales, de *catering*, cisterna, portaequipajes/maletas y camionetas de pista.
- **Cintas transportadoras:** ayudan a cargar las maletas o mercancías que viajen sin contenedor desde el vehículo de transporte en tierra a la aeronave y viceversa.
- **Dispenser:** vehículos dotados de equipos de medición, filtración y control de presión que abastecen a las aeronaves con las redes de hidrantes (queroseno); sistemas de tuberías situadas bajo la zona de estacionamiento de las aeronaves con puntos de conexión en cada estacionamiento.
- **Grupo aire acondicionado:** vehículo que dispone de una manguera que introduce aire frío dentro del avión.
- **Grupo calefactor:** vehículo encargado de la climatización de la cabina. El grupo calefactor se dedica a controlar la temperatura, humidificación, etc.
- **Grupo eléctrico (GPU):** abastecen de energía eléctrica a las aeronaves cuando están estacionadas.
- **Grupo neumático:** se utiliza a petición del piloto cuando no se dispone de sangrado neumático del APU.
- **Plataformas/Highloader:** equipo cuya función consiste en subir y bajar contenedores alojados en las bodegas de carga de la aeronave.
- **Transferidor/Transelevador:** empleados para transferir los contenedores desde las plataformas hasta los carros de transporte para los tractores auxiliares y viceversa.

- **Elevadores/*Forklift*/Toro:** equipos preparados para elevar, descender y transferir la carga en bodegas altas, tanto de *pallets* como de contenedores.
- **Equipo de deshielo:** camiones, que llevan incorporado un depósito con una mezcla de agua y glicol, y una caldera con un quemador que hace que la mezcla se caliente y salga por el cañón a alta temperatura. En el camión van instaladas unas bombas que elevan el agua a la presión necesaria para que caiga sobre el avión
- **Escaleras:** proporcionan acceso a los pasajeros y a la tripulación a las aeronaves desde tierra.
- **Furgonetas (rampa, *pick-up*, tripulación, inválidos, protocolo):** automóvil de carga utilizado para transportar bienes o grupos de personas.
- **Tractores de equipaje/Carga y de aeronaves/*Push-back*.**
- **Microbús.**
- **Vehículos ligeros/Móvil.**

\*\*Algunos de estos equipos pueden funcionar como vehículos comerciales, pero al operar en el lado aire del aeropuerto se incluyen en los GSE al ser su régimen de funcionamiento similar.

Una vez catalogados los vehículos en las tipologías indicadas antes, se procede a la elaboración de tablas con los datos obtenidos de forma que el cálculo de las emisiones sea sencillo y rápido.

### 3.3 FASE 3: METODOLOGÍA DE CÁLCULO

El objetivo de esta fase del estudio es el cálculo de las emisiones contaminantes emitidas por las aeronaves y vehículos GSE.

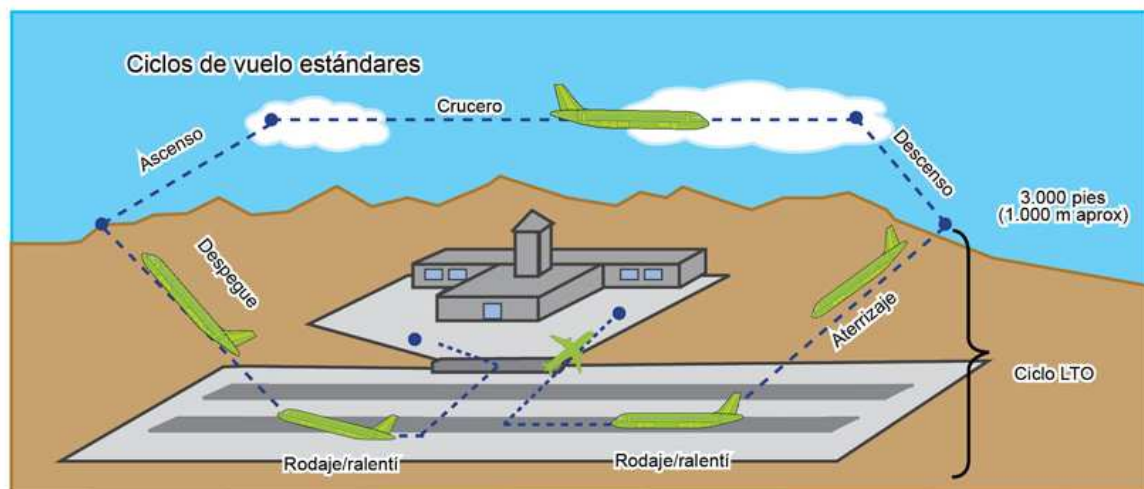
Se consideran contaminantes a aquellas sustancias emitidas al aire por los vehículos y que son ajenas a este. Se trata de sustancias que no forman parte de manera natural del aire, cuya emisión continuada ocasiona cambios importantes en su concentración en la atmósfera.

#### 3.3.1 AERONAVES

Las metodologías de cálculo que recomiendan la Decisión de la Comisión 2005/166/CE y la Directiva 2001/81/CE en su Anexo III, son las guías elaboradas por el IPCC y EMEP/EEA.

La actividad del transporte aéreo se divide a su vez en cuatro subactividades, atendiendo a la fase de operación ciclo LTO y crucero y al tipo de tráfico, nacional e internacional.

En la figura siguiente se muestran las distintas fases en las que se divide un vuelo:



El **ciclo LTO** (*Landing Take Off*) comprende cinco fases de vuelo:

- *Landing* o aterrizaje, son todas aquellas operaciones que se realizan desde los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto hasta que alcanza la superficie de la pista.
- *Taxi in* o rodaje de entrada, son las maniobras que realiza el avión hasta llegar al punto de desembarque.
- *Taxi out* o rodaje de salida, son las maniobras que realiza el avión desde el punto de embarque hasta la cabecera de pista.
- *Take off* o despegue, son las operaciones que realiza el avión en la pista para lograr el despegue.

- *Climb out* o subida inicial son las operaciones que realiza el avión hasta alcanzar los 1.000 metros de altura sobre la cota del aeropuerto.

El **crucero** comprende tres fases de vuelo:

- *Climb* o subida, es el ascenso que se realiza desde los 1.000 metros, hasta la altitud máxima o altitud de crucero.
- *Cruise* o crucero, es la fase en la que predomina el desplazamiento sin ascenso ni descenso.
- *Descent* o descenso, es el descenso desde la altitud de crucero hasta los 1.000 metros.

El resumen de los contaminantes que se producen como resultado de la combustión del combustible en la aviación, son:

Contaminante	Base Inventario Nacional	Convenio Marco Cambio Climático	Comisión de seguimiento GEI	Convenio de Ginebra	Comisión UE Directiva Techos
Óxido de azufre, SO <sub>2</sub>	X	X	X	X	X
Óxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> +NO), NO <sub>x</sub>	X	X	X	X	X
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	X	X	X		
Metano, CH <sub>4</sub>	X	X	X		
Óxido nitroso, N <sub>2</sub> O	X	X	X		
Compuestos orgánicos volátiles no-metano, COVNM	X	X	X	X	X
Monóxido de carbono, CO	X	X	X	X	
Partículas	X			X	
Metales pesados	X			X	

Existen diferentes nomenclaturas para denominar el mismo tipo de emisión por los diferentes organismos, es por ello, que a continuación se explica las correspondencias.

Tráfico aéreo 08.05	SNAP 97	CMCC/CRF	CLRTAP-EMEP/NFR
Tráfico doméstico LTO	080501	1.A.3.a	1.A.3.a.ii(i)
Tráfico internacional LTO	080502	Memo item	1.A.3.a.i(i)
Tráfico doméstico en crucero	080503	1.A.3.a	1.A.3.a.ii(ii)
Tráfico internacional en crucero	080504	Memo item	1.A.3.a.i(ii)
Aviación Militar(*)	080100		

(\*) Este SNAP que ha sido incluido en la versión del 2009 de EMEP/EEA no se va a desarrollar en este documento.

La decisión a tomar sobre la metodología de cálculo se va a basar en los datos de actividad que se hayan podido recopilar, así como en su desagregación.

Cuando una **fuerza de emisión es clave** dentro del inventario nacional de emisiones se precisa usar metodologías de niveles superiores de precisión. Por ejemplo la metodología Tier 1 sólo se puede emplear si la actividad del transporte aéreo no es una fuerza clave; por lo que en el caso de España no sería posible.

No obstante se pasan a describir los tres niveles de metodologías existentes, para conocer cómo se desarrollan.

### TIER 1 O METODOLOGÍA MUY SIMPLIFICADA

Para poder realizar los cálculos de un inventario con la metodología Tier 1 se va a precisar la siguiente información:

- **Ventas de combustible** en el sector, obtenido de los cuestionarios internacionales de productos petrolíferos de la Secretaría General de Hidrocarburos, de las estadísticas de la Agencia Internacional de la Energía y de los balances energéticos de EUROSTAT. Se toma como hipótesis de cálculo que todo el combustible vendido se consume.
- **Desagregación del combustible** en tráfico nacional e internacional.
- **Número de ciclos LTO** del país y **conocimientos generales de la aeronave** empleada, para tráfico nacional e internacional.
- Con relación al **tráfico internacional** es preferible conocer el destino de los vuelos para corto radio (vuelos a pequeña distancia) y largo radio (vuelos a grandes distancias) así como el tipo de aeronave volada.

El algoritmo de cálculo será el siguiente:

**Emisiones = Combustible \* Factor de Emisión**

**Combustible = nº de ciclos LTO \* factor de consumo/LTO**

Siendo:

**Emisiones:** emisiones anuales para el ciclo LTO y crucero de los vuelos domésticos e internacionales.

**Combustible:** consumo de combustible para cada fase de vuelo y tipo de tráfico.

**Factor de emisión:** para cada fase de vuelo y tipo de tráfico.

En la tabla 3-3 de la Guía de EMEP/EEA de 2009 se muestran los valores de factores de emisión y consumo de combustible para una edad de flota media y antigua.

## TIER 2 O METODOLOGÍA SIMPLIFICADA

Para poder realizar los cálculos de un inventario con la metodología Tier 2 se va a precisar la siguiente información:

- **Ventas de combustible** en el sector, obtenido de las mismas fuentes señaladas en el Tier 1.
- **Desagregación del combustible** en tráfico nacional e internacional.
- Número de ciclos LTO por tipo de aeronave para tráfico nacional e internacional, sin tener en cuenta el destino.

El algoritmo de cálculo es el siguiente:

$$\text{Emisiones} = \sum \text{aeronaves} \text{ Combustible} * \text{Factor de Emisión}$$

$$\text{Combustible LTO aeronave} = n^{\circ} \text{ ciclos LTO aeronave} * \text{combustible por LTO}$$

$$\text{Combustible Crucero} = \text{Combustible total vendido} - \text{combustible LTO}$$

Siendo:

**Emisiones:** emisiones anuales para el ciclo LTO y crucero de los vuelos domésticos e internacionales.

**Combustible:** consumo para cada fase de vuelo, tipo de tráfico y para cada tipo de aeronave.

**Factor de emisión:** para cada fase de vuelo, tipo de tráfico y para cada tipo de aeronave

Se deben tener en cuenta ciertas consideraciones tanto en la fase LTO como en la fase crucero para poder utilizar esta metodología.

Concretamente en el ciclo LTO los valores de factores de consumo y factores de emisión por tipo de aeronave, están incluidos en la tabla 3-5 de la guía EMEP/EEA 2009.



En el caso de que haya aeronaves no contempladas en la tabla anterior, será necesario asimilar las aeronaves que forman parte de nuestra base de datos a dichas aeronaves para lo cual se puede emplear la tabla 3-6 relativa a la correspondencia entre aeronaves.

Con respecto a la fase de crucero, el **combustible considerado**, tanto nacional como internacional, se obtiene como la diferencia entre el combustible vendido y el combustible que ha sido calculado como consumido en el ciclo LTO.

### **TIER 3 O METODOLOGÍA DETALLADA**

La metodología Tier 3 a diferencia de la Tier 1 y Tier 2, es una metodología considerada de “abajo-arriba”, por lo que en esta ocasión, no se precisa del dato de ventas de combustible en su cálculo.

Esta metodología es la idónea si se dispone de todos los vuelos con información relativa a los aeropuertos origen/destino y el tipo de aeronave; de forma que, se pueden calcular las emisiones y el consumo de combustible en crucero en función de la distancia volada por la aeronave.

No obstante, para el empleo de esta metodología se suele requerir el uso de un modelo de cálculo de emisiones específico, debido al volumen de datos implicados.

Esta metodología se divide a su vez en dos, dependiendo tanto de la precisión de los datos de partida como del modelo de cálculo del cual se disponga:

**Tier 3A:** empleado cuando se dispone de los datos relativos a los aeropuertos origen/destino y tipo de aeronave operada.

**Tier 3B:** utilizado cuando se dispone de toda la trayectoria del vuelo, la configuración aerodinámica de la aeronave y el motor operado. Esta metodología requiere de una herramienta de cálculo muy potente.

A continuación se pasa a describir la metodología Tier 3A.

#### **Metodología Tier 3A**

El **algoritmo de cálculo** considera lo siguiente:

Los factores de emisión, en el ciclo LTO y por tipo de motor, de NO<sub>x</sub>, HC, CO e índice de humo y el consumo de combustible, se obtienen de la base de datos de OACI mantenida por la CAA: <http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702&pagetype=90>.

Los factores de emisión, en el crucero y por tipo de aeronave, de NO<sub>x</sub>, HC, CO y el consumo de combustible en función de la distancia, se obtienen de la base de datos de EMEP/EEA: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>.

Para calcular la distancia recorrida en el vuelo se puede emplear la distancia ortodrómica o arco de círculo máximo, (distancia más corta entre dos puntos), no obstante hay que tener en cuenta que empleando esta distancia no se tienen en cuenta posibles circuitos de espera por acumulación de tráfico o desviaciones de la trayectoria más corta por la existencia de áreas restringidas.

Entre los modelos existentes en el mercado para el cálculo de emisiones destacan los indicados a continuación, que además fueron seleccionados por el CAEP (*Committee on Aviation Environmental Protection*) para su utilización por el mismo:

- **AEDT/SAGE** (*Aviation Environmental Design Tool/System for assessing Aviation's Global Emissions*) de la FAA.
- **AEM** (*Advanced Emission Model*) de EUROCONTROL.
- **AERO2k** (*Aviation Emissions & Evaluation of Reduction Options*): modelo desarrollado por el laboratorio Aeroespacial Nacional de los Países Bajos (*Nationaal Lucht en Ruimtevaartlaboratorium – NLR*).
- **FAST**: de la Administración del Reino Unido.

Para el caso español, se ha hecho uso del **Modelo Español de Cuantificación de Emisiones (MECETA)** en el cálculo de la revisión del inventario de emisiones 1990-2009 del sector aéreo.

El modelo **MECETA** permite realizar el cálculo de emisiones mediante la metodología Tier 3A, empleando algunas mejoras metodológicas que están descritas y aceptadas en la metodología EMEP/EEA, y que son:

- En el ciclo LTO:
  - Se permite el uso de tiempos de rodaje característicos de los aeropuertos españoles (*time-in-mode*).
  - Además permite el cálculo para cada aeronave de uno o varios tipos de motores, en este último caso, se aplica un porcentaje de utilización de cada motor.
- En la fase de crucero:
  - Calcula la distancia volada, con la información del aeropuerto de origen y destino, y realiza una estimación independiente del consumo de combustible.
  - Para el cálculo del consumo y emisiones en crucero emplea las tablas de EMEP/CORINAIR corregidas con consumos reales de vuelos realizados por las principales compañías españolas. De esta forma se disminuye el error que se puede cometer empleando la distancia ortodrómica.
  - Empleo en el ciclo LTO del *derate* o empuje reducido en el despegue (según punto 4.8 de la guía EMEP/CORINAIR 2009). El *derate* depende de los siguientes factores:
    - Tipo de aeronave (utilizada en corto o largo alcance).
    - Características de la pista (longitud, cota del aeropuerto).
    - Condiciones meteorológicas (temperatura, estado de las pistas - hielo, mojada, seca).



- MTOW, *Maximum Take-Off Weight* (peso máximo al despegue) (combustible, carga de pago).
- Obstáculos, pendientes mínimas de ascenso.
- Demanda de tráfico.

### 3.3.2 VEHÍCULOS DE ASISTENCIA EN TIERRA

Una vez recopilada y analizada la información, se procede al cálculo de las emisiones.

Los contaminantes que se emiten y deben ser calculados durante el funcionamiento de los vehículos<sup>3</sup>, son los recogidos en la siguiente tabla:

Contaminante	Descripción
NO <sub>x</sub> (NO y NO <sub>2</sub> )	Óxidos de nitrógeno
CO	Monóxido de carbono
PM	Partículas
PM <sub>2,5</sub>	Partículas de diámetro inferior o igual a 2,5 micrómetros
COVNM	Compuestos orgánicos volátiles del metano (COV-CH <sub>4</sub> )
CH <sub>4</sub>	Metano
NH <sub>3</sub>	Amoniaco
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre

<sup>3</sup> No se tienen en cuenta aquellos producidos durante la fase de fabricación y montaje con todos los procesos industriales asociados, ni lo que pudieran causar los procesos de retirada, desguace o reciclaje del vehículo una vez finalizada su vida útil.

Para caracterizar adecuadamente las emisiones de un equipo de *handling* particular, se requiere información detallada en cuanto a **factores de emisión por unidad de actividad** y en cuanto al grado de uso del vehículo o **factor de carga**.

En ocasiones las condiciones de homologación no se ajustan totalmente a las de operación del vehículo, ya que pueden circular a velocidades reducidas (con máximos de 30Km/h) ó bien pasan gran parte de su tiempo trabajando al ralentí. Por ello debe ser considerado el factor de carga antes mencionado.

Dado que los niveles de emisión son bastante sensibles al régimen de giro del motor y a su factor de carga, los factores de emisión de motores industriales se miden dentro de un amplio rango de modos de operación a régimen y carga constantes para ponderarlos posteriormente, en función del tiempo que se estima puede invertir en su operación en cada uno de esos modos, y de esta forma obtener los factores de emisión medios del motor.

Actualmente los motores se ensayan según 2 tipos de normativas: la J1088 de la SAE para motores por debajo de los 25 CV (~19 Kw) de potencia y la ISO 8178 C1 para motores mayores de 25 CV, o también conocido como 8 modos. Casi la totalidad de los motores son de una potencia superior a 25 CV con lo que en cualquier caso los motores modernos de la flota deberán estar sometidos al criterio de homologación ISO 8178 C1, criterio aceptado y recomendado a su vez por la metodología CORINAIR.

Puesto que los factores de emisión de los GSE se miden en términos de trabajo realizado, es de gran importancia medir la cantidad de trabajo realizado durante el periodo de interés, y así poder evaluar correctamente las emisiones de un equipo. Para periodos de operación cortos y aislados es suficiente con conocer las condiciones de velocidad y grado de carga del motor. No obstante, cuando se pretende evaluar periodos de tiempo superiores, el funcionamiento del equipo generalmente comprende una serie de condiciones diferentes de operación y la cantidad de trabajo realizado se define frecuentemente como una parte del máximo trabajo que se puede realizar con ese motor durante el tiempo de interés. Comúnmente nos referimos a esta fracción del trabajo máximo como factor de carga teniendo que el 100% de carga se produce cuando trabajamos todo el tiempo a la potencia y régimen nominales.

Los factores de emisión obtenidos con los ciclos de homologación, están calculados para **factores de carga de 0,56** con el ensayo ISO 8178 C1 **y de 0,39** para el ensayo J1088 de la SAE.

Una vez establecido el factor de carga para un funcionamiento típico se pueden estimar las emisiones para cualquier motor similar a partir de los factores de emisión y el número de horas de funcionamiento.

La metodología utilizada para el cálculo de las emisiones es la metodología establecida por CORINAIR en su apartado *Non-road mobile sources and machinery*, SNAP 0808 *Oher mobile sources and machinery-Industry*.

La elección, como en el caso de las aeronaves de la metodología a emplear, dependerá principalmente de el grado de detalle que se hay obtenido de los datos necesarios para el cálculo.

De menor a mayor grado de detalle, en la metodología CORINAIR para el cálculo de las emisiones de los vehículos de *handling* disponemos de diferentes Tier, pero desde el OBSA se propone la utilización de la Tier 3, la más completa.

La cantidad de trabajo producido durante el periodo a estudiar se calcula multiplicando la potencia nominal del motor por el número total de horas de funcionamiento y por el factor de carga representativo del modo de operación. Multiplicando este resultado por los factores de emisión por unidad de trabajo obtendremos las emisiones totales producidas en el periodo de interés. Algebraicamente esto se expresa como:

$$\text{EMISIONES (g)} = N * H * Pn * F * e$$

Siendo cada uno de los miembros de la ecuación los siguientes:

**N** = número de vehículos.

**H** = número de horas de funcionamiento medio de cada vehículo (h).

**Pn** = potencia nominal del motor (Kw).

**F** = factor de carga o grado de uso del vehículo.

**e** = factor de emisión (g/kw\*h).

Aunque conceptualmente es simple, cada variable de cálculo de las emisiones de los equipos GSE lleva asociada una incertidumbre inherente a excepción de la potencia nominal. El grado de carga es sin duda la variable con más incertidumbre en este cálculo, ya que, por ejemplo, el tiempo de funcionamiento a ralentí puede influir en este factor.

La metodología detallada de CORINAIR es considerada significativamente de mejor calidad que la metodología simple (Tier 1), excepto para el caso del CO<sub>2</sub>, cuya metodología de cálculo se describe posteriormente, por ser más transparente, debido a que la mayoría de los parámetros que influyen sobre la emisión de contaminantes, están cubiertos, de ahí la elección de la misma.

Los **factores de emisión** a utilizar proceden también de la guía CORINAIR. Dichos factores de emisión, son para motores controlados puesto que dependiendo del año de

homologación de los vehículos, a los mismos se les aplica Directivas distintas de emisión que deben cumplir cuando se les pasa las Inspecciones Técnicas o ITVs.

La metodología utilizada para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>, es la metodología simple de CORINAIR. No se ha seguido la metodología detallada como para el resto de contaminantes considerados, por no existir la misma para el dióxido de carbono, puesto que su emisión, es directamente proporcional al consumo de combustible y no a la potencia del motor.

Por tanto las emisiones de CO<sub>2</sub> se estiman en base al consumo de combustible exclusivamente, asumiendo que el carbono contenido en el fuel es totalmente oxidado en CO<sub>2</sub>.

La fórmula aplicada es la siguiente:

$$\text{CO}_2 \text{ (g)} = 44,011 \cdot (\text{MASA DE COMBUSTIBLE} / (12,011 + 1,008 \cdot \text{rH/C}))$$

Siendo:

**MASA DE COMBUSTIBLE** = cantidad de combustible consumido por el equipo al año (g/cm<sup>3</sup>). Se considera la densidad del diesel 0,832 g/cm<sup>3</sup>, media de las densidades proporcionadas por la EN ISO 12185.

**rH/C** = ratio de átomos de hidrógeno y carbono en el combustible (~1.8 para gasolina y ~2,0 para diesel).

### 3.4 FASE 4: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En esta fase en función de los objetivos previos por los cuales se vaya a efectuar el inventario de emisiones, los datos se presentarán de una determinada manera o de otra.

Según la metodología empleada, la estructura de los datos de emisiones resultantes es diferente. En el caso español, al haberse empleado la metodología Tier 3A para las aeronaves, la estructura obtenida correspondió a la seguida por el SNAP-97 (*Selected Nomenclature for Air Pollution*) que incluye todos los contaminantes de la Base del Inventario Nacional.

A partir de esta información base se elaborarán los diferentes formularios para ser remitidos a los organismos:

- Formulario CRF (*Common Reporting Format*) para las emisiones de GEI del Convenio Marco de Cambio Climático.
- NFR (*Nomenclature for Reporting*) para presentar los inventarios requeridos por EMEP CLRTAP.

En la web del Ministerio de Medio Ambiente y Rural y Marino, así como en la red de EIONET se publican los resultados del inventario de emisiones para CLRTAP/EMEP, UNFCCC-GHG y Techos de emisión.

A la vista de los resultados que se obtengan, serán diferentes los planteamientos para poder reducir las emisiones procedentes de las distintas fuentes de emisión aeroportuaria.

#### 4 ACRÓNIMOS

AENA: **Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea.**

APU: **Auxiliary** Power Unit.

CAA: **Civil Aviation Authority.**

**CAEP:** *Committee on Aviation Environmental Protection*

CEPMEIP: *Co-ordinated European Programme on Particulate Matter Emission Inventories, Projections and Guidance.*

EDMS: *Emissions and Dispersion Modeling System.*

EEA: Agencia Europea de Medioambiente.

GAV: *Ground Acces Vehicles.*

GSE: *Ground Support Equipment.*

IPCC: Panel Intergubernamental del Cambio Climático.

LTO: ciclo de aterrizaje-despegue.

MECETA: Modelo Español de Cuantificación de Emisiones.

OACI: **Organización de Aviación Civil Internacional.**

OAG: *Official Airline Guide.*

OBSA: Observatorio de la Sostenibilidad en Aviación.

SENSA: Servicios y Estudios para la Navegación Aérea y la Seguridad Aeronáutica.

#### 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EMEP/EEA *Emission Inventory Guidebook 2009, updated june 2010.*
- ICAO *Emissions Database* de la CAA
- IPCC 2006: *2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*