

## **Estudio de la contaminación atmosférica producida por la flota de autobuses urbanos de TUZSA en Zaragoza**

**Autor principal:** Alejandro Rodríguez Vicente

Institución: Fundación San Valero. GIMACES

Teléfono: 976466599

E-mail: ealvarez@inm.es, alex101@telefonica.net

**Otros autores:** Evelio Álvarez Lamata y Carlos Rodríguez Casals

**Resumen**

Este trabajo aborda el estudio atmosférico y medioambiental de las emisiones contaminantes producidas la flota de autobuses de la empresa TUZSA, destinada al transporte urbano de pasajeros en la ciudad de Zaragoza (España).

Sobre el mapa de la ciudad, dividido en 143 cuadrículas, se han estimado los recorridos, así como el número de autobuses que las recorren para cada línea, de acuerdo a las frecuencias horarias definidas. Posteriormente, se calculan las emisiones de los diferentes contaminantes correspondientes a cada cuadrícula aplicando los factores de emisión considerados en la metodología CORINAIR (CORINE Air Emissions Inventory).

El estudio se complementa con un análisis de la dispersión de estos contaminantes por el núcleo urbano. Para ello se ha empleado el Modelo de Dispersión de Gifford-Hanna, también conocido como Air Turbulence and Diffusion Laboratory (ATDL), que ha permitido caracterizar la inmisión de todos los contaminantes inventariados en términos anuales. Los resultados obtenidos se presentan gráficamente sobre el plano de la ciudad empleando un SIG, permitiendo identificar las zonas críticas de emisión de contaminantes y la forma en que se dispersan en las condiciones climáticas más características de la ciudad.

Basándonos en indicadores como la huella ecológica y la cantidad de contaminante tanto por pasajero como por distancia, es posible evaluar la calidad ambiental de la actividad estudiada y compararla con otros modos de transporte.

**Palabras clave:** Emisiones contaminantes, inmisión, autobuses urbanos de Zaragoza, CORINAIR, huella ecológica, Modelo Dispersión de Gifford-Hanna.

**Abstract**

This work describes the atmospheric and environmental study of the pollution produced by the fleet of urban buses belonging to TUZSA, and used for the transport of passengers in the city of Zaragoza (Spain).

A map of the city has been divided into 143 squares. The routes and quantities of urban buses used for each service have been considered according to the established timetables. The emission factors provided by CORINAIR (CORINE Air Emissions Inventory) are then applied to calculate the emissions of the different pollutants in each square.

The study has been complemented by an analysis of the dispersion of these pollutants over the urban area. In order to do this the Gifford-Hanna Dispersion Model, also known as Air Turbulence and Diffusion Laboratory (ATDL), has been used. This model allows the characterisation of the inmission of all the recorded pollutants on an annual basis. The results obtained are presented graphically on a plan of the city using a GIS which allows the identification of critical zones of emission of pollutants and the way in which they are dispersed under the meteorological conditions normally found in the city.

Using indicators such as the ecological footprint and amount of pollution, either per passenger or per unit of distance travelled distance, it is possible to assess the environmental quality of the activity being studied and compare it with other modes of transport.

**Key words:** Pollutant emissions, inmission, metropolitan buses of Zaragoza, CORINAIR, ecological footprint, Gifford-Hanna Dispersion Model.

## **1. Introducción**

El entorno urbano representa uno de los más importantes desafíos dentro del campo de la investigación ambiental, ya que además de la problemática relacionada con la emisión, dispersión e inmisión de contaminantes, se presentan las diferentes facetas que el cambio climático induce en los ambientes urbanos.

Junto con los sistemas de calefacción y las industrias, el tráfico de vehículos en las grandes urbes, es uno de los principales focos de polución en las mismas, con las consecuencias negativas para las personas y el medio.

A este respecto, diferentes organizaciones han desarrollado políticas y propuesto soluciones para intentar paliar los efectos relacionados con la citada problemática. Un ejemplo son las Agendas21, gestionadas por los Departamentos de Medio Ambiente de las Corporaciones Locales, uno de cuyos principales objetivos es inventariar las fuentes y sumideros de los distintos contaminantes, como paso previo a la definición de políticas de acción en aspectos tales como la prevención, adaptación o educación.

En el año 1996 el Ayuntamiento de Zaragoza realizó un estudio con objeto de conocer las emisiones globales en la ciudad (Ayuntamiento de Zaragoza, 2000). Empleando una metodología similar, el presente estudio se centra y profundiza en las emisiones procedentes de la flota de autobuses de la empresa Transportes Urbanos de Zaragoza Sociedad Anónima (TUZSA) destinados al transporte público de personas, que funcionan en su totalidad con gasóleo.

## **2. Objetivos**

- Cuantificar la emisión producida por los vehículos destinados al transporte urbano de pasajeros de la empresa TUZSA en la ciudad de Zaragoza.
- Determinar la superficie de huella ecológica necesaria para absorber el CO<sub>2</sub> emitido por los autobuses.
- Valorar la inmisión producida por esta flota en el área de estudio.

## **3. Localización del área de estudio**

El área de estudio quedando delimitada por el callejero de la ciudad Zaragoza, de coordenadas X (670.820, 680.050) e Y (4.617.570, 4.609.760)

## **4. Metodología**

### **4.1 Caracterización de vehículos y líneas**

El primer paso a la hora de cuantificar las emisiones será caracterizar tanto los vehículos que las producen, como los trayectos que realizan. Por ello, se elabora una ficha con los autobuses que TUZSA dispone, excluyendo los microbuses utilizados en el servicio de transporte para personas con movilidad reducida severa, que contiene: modelo, unidades, clasificación con respecto a la normativa europea en materia de contaminación, plazas, fotografía...

A partir de la información que proporciona la empresa de transportes en su página web ([www.tuzsa.es](http://www.tuzsa.es)), se han recopilado los diferentes trayectos y calculado las distancias recorridas por las todas las líneas de autobuses de la ciudad de Zaragoza.

## 4.2 Encuesta de tráfico

La encuesta de tráfico es un instrumento necesario a la hora de caracterizar el tráfico producido por los vehículos de nuestro estudio en la ciudad, e indispensable para hallar las emisiones. No se considera necesario realizar un muestreo en el exterior, al conocerse a priori el número de autobuses que circulan por la ciudad, dado que los trayectos de las distintas líneas son fijos, y sus frecuencias son conocidas.

Diferenciaremos entre dos tipos de trayectos a la hora de realizar la encuesta de tráfico:

- Con pasajeros (o en servicio)
- Sin pasajeros (sin servicio)

ENCUESTA DE TRÁFICO	
CON PASAJEROS	SIN PASAJEROS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trayecto normal</li> <li>• Trayecto no completo (marcado con asterisco en horario)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Llegada desde cocheras hasta la primera parada, y vuelta desde la última parada hasta cocheras</li> <li>• Vuelta a cocheras de los trayectos cortados (con asterisco)</li> </ul>

### 4.2.1 Recorridos hechos con pasajeros

La información para contabilizar el número de vehículos se obtiene de la página web de TUZSA. En la misma se detalla por cada línea de autobús:

- Los horarios están divididos normalmente en tres períodos: de septiembre a junio, julio y agosto. A su vez, dentro de estos tres períodos encontramos diferenciación entre los días laborables, los sábados y los festivos.
- Dentro de cada apartado se distingue también entre los “primeros” y los “últimos”, que tienen un horario fijo de salida y una frecuencia que no tiene por qué corresponderse a la tipificada para cada línea.

Así, en el caso de los primeros y los últimos autobuses, nos limitamos a contabilizar su número. Para el resto del día, que son la mayoría, se han dividido las horas de servicio entre la frecuencia. Con la suma de estas tres cifras obtenemos la media de trayectos realizados.

Existen algunas líneas en las que una parte o la totalidad de los últimos trayectos no se realizan completamente. Estos trayectos vienen representados por un asterisco en su horario de salida, y finalizan en la mayoría de los casos en el centro de la ciudad (Plaza de España o Paseo Pamplona).

Se procede del mismo modo que en el ejemplo anterior, separando los vehículos que llevan asteriscos. Así, obtenemos la suma diferenciada de los autobuses que realizan el recorrido normal y los que terminan en el centro, ya que a la hora de calcular los kilómetros realizados habrá que distinguirlos, puesto que la distancia recorrida es distinta.

#### 4.2.2. Recorridos sin pasajeros

Aunque la mayor parte del kilometraje es el realizado con pasajeros en su interior, también hay otra distancia que recorren con los autobuses fuera de servicio: es la correspondiente a la que deben realizar para llegar desde cocheras hasta su parada inicial, y viceversa, desde su última parada hasta regresar de nuevo a cocheras.

Para calcular este número de autobuses, tendremos que conocer el promedio por día y línea. Una vez conocido se supone que la mitad de esta cifra corresponden a los que viajan de cocheras a la parada inicial, y la otra mitad a la parada final. El mismo razonamiento se sigue a la hora de volver a cocheras.

También debemos distinguir aquellos autobuses que hacen sólo parte del trayecto (los marcados con un asterisco), ya que la vuelta a cocheras se realiza desde otra parada distinta a la última, normalmente desde el centro de la ciudad.

#### 4.2.3 Encuesta diaria y anual

Una vez obtenido el número de trayectos y de vehículos utilizados en los distintos días de los diferentes periodos, se halla el número total empleado, tomando como periodos de referencia un día o un año. De este modo se obtienen los datos de contaminación para un día concreto, o las emisiones generadas durante un año completo.

Como día de referencia se escoge uno correspondiente al periodo entre septiembre y junio, y de ámbito laboral. Esta elección viene motivada porque este periodo de tiempo comprende un mayor número de días y, además, es cuando la práctica totalidad de las líneas presenta mayores frecuencias, por lo que los datos obtenidos serán más representativos.

Como año de referencia se ha escogido el 2005, diferenciando entre días laborables, sábados y festivos para todos los meses del año y teniendo en cuenta los horarios que facilita la empresa

En el caso de las líneas 35 y 53, que son de reciente creación, sólo se disponen de los horarios correspondientes al periodo entre septiembre y junio. Observando el aumento de tiempo en las frecuencias que en los meses de julio y agosto tienen el resto de líneas, se opta por reducir en estos dos meses un 20% los autobuses en días laborables, y un 10% durante sábados y festivos.

### 4.3 Kilómetros recorridos

Una vez contabilizados los vehículos, hay que calcular las distancias recorridas por los mismos en la zona de estudio.

Tras analizar diferentes alternativas, se optó por realizar las mediciones de forma manual sobre un plano. En el Servicio de Información Geográfica de la Gerencia Municipal de Urbanismo, se obtuvo un mapa de la ciudad de Zaragoza de escala 1:10.000. Sobre él, se imprimieron las mismas cuadrículas que tiene el callejero de Zaragoza, de tal modo que el área de estudio quedó dividida en 143 cuadrículas de 7,1 centímetros de lado cada una: 11 cuadrículas en la vertical (desde la “A” hasta la “K”) y 13 en la horizontal (del 1 al 13).

Trayectos realizados con pasajeros	
<b>a)</b>	Distancia recorrida en trayecto normal
<b>b)</b>	Distancia recorrida por los autobuses en trayecto no completo (asteriscos)
Trayectos realizados sin pasajeros	
<b>c)</b>	Para llegar y volver desde cocheras a la parada inicial
<b>d)</b>	Distancia de vuelta a cocheras de los autobuses con asterisco

Sobre el mapa se van reproduciendo los distintos trayectos, disponibles en la página web de la empresa. Se debe distinguir el sentido en el que se produce el recorrido: ida, vuelta, o ambos en el caso de que seas el mismo para los dos.

Con respecto a los trayectos desde cocheras a la parada inicial, y viceversa, se ha tratado de hacer un reparto equitativo por las calles de la ciudad, intentando siempre que fuera el camino más corto posible. Se supone que es el mismo camino para ir que para volver, por lo que la distancia obtenida se multiplica por dos.

Los trayectos de los autobuses con asteriscos son los mismos que los normales hasta que llegan al centro, y su vuelta a cocheras se hace o bien regresando por Miguel Servet, o por Paseo Constitución y siguiendo por Avenida Cesáreo Alierta.

De este modo, se averigua la distancia que recorre cada línea en cada cuadrícula. Una vez conocida la que cada línea recorre en la cuadrícula, y el número de autobuses que la recorren, simplemente habrá que multiplicar estas dos cifras para saber el total de kilómetros que se hacen en un año en ese espacio.

Consideraciones a tener en cuenta:

- Para realizar las mediciones en grandes avenidas de doble sentido se opta por hacerlo por la mediana central.
- Rotondas: en caso de que el trayecto del autobús se encuentre con una rotonda, esta se salvará con varios puntos, tal y como se muestra en la figura

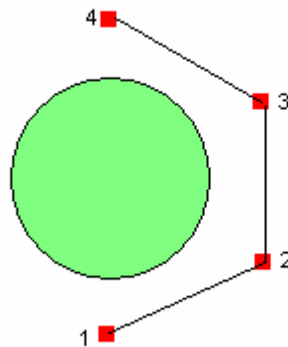


Figura 4.1: Forma de medición de distancia en una rotonda (Fuente: Elaboración propia). La distancia recorrida por el autobús en este caso correspondería a la suma de los segmentos 12, 23 y 34.

- La cuadrícula B7 está dividida en tres subapartados: “B7”, “B7 lectivos” y “B7 no lectivos”. Esto es debido a que las líneas 20, 23 y 42 modifican su recorrido en los días lectivos para llegar a la Escuela de Ingenieros. Por tanto, en esta cuadrícula, los días laborables estas rutas pasan de María Zambrano a Luciano Gracia, y los sábados y festivos giran hacia Gómez de Avellaneda. Para hallar el kilometraje anual se ha procedido como en todos los casos, salvo que esta ocasión no se ha hecho un sumatorio de todos los días, sino que se ha hecho distinción entre los laborables y los que no lo son. La cuadrícula “B7” se ha dejado para las líneas 43, 44 y la lanzadera C2, que realizan el mismo trayecto todo el año

Una vez conocidos los kilómetros realizados, se calculan los litros de combustible necesarios para recorrer esas distancias. Los consumos de la flota de autobuses ha sido proporcionada por la Responsable del Departamento de Calidad y Medio Ambiente de TUZSA.

#### 4.4 Aplicación práctica de CORINAIR

Para el cálculo de las emisiones de contaminantes debidas a los vehículos pesados se utiliza la metodología que establece el programa CORINAIR para la elaboración de un inventario de emisiones para Europa, y, en concreto, el capítulo 7 de la Guía del Inventario de Emisiones a la Atmósfera dedicado al “tráfico rodado”.

El CORINAIR Working Group on Emission Factors for Calculating Emissions from Road Traffic desarrolló inicialmente una metodología que fue aplicada por diversos países europeos. En concreto, esta metodología sirvió de base para el estudio de emisiones a la atmósfera llevado a cabo por el Servicio de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Zaragoza y el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, en el año 1991, así como en el estudio del año 1996 en el que se hizo un inventario de las emisiones a la atmósfera (Ayuntamiento de Zaragoza, 2000)

Con respecto a la técnica utilizada para la aplicación del programa, se opta por realizar el estudio aplicando, en primer lugar, la metodología sencilla, para posteriormente hacerlo con la detallada, de manera que sea posible extraer determinadas conclusiones derivadas de la comparación de ambos métodos.

CORINAIR	
<u>METODOLOGÍA SIMPLE</u>	<u>METODOLOGÍA DETALLADA</u>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO</li> <li>• NO<sub>x</sub></li> <li>• COVNM</li> <li>• CH<sub>4</sub></li> <li>• PM</li> <li>• CO<sub>2</sub></li> </ul>	<p>a) Cont. que dependen de la velocidad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo</li> <li>• CO, COV, NO<sub>x</sub>, PM</li> </ul> <p>b) Contaminantes que dependen del consumo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub></li> <li>• SO<sub>2</sub></li> <li>• Metales pesados</li> </ul> <p>c) Contaminantes no regulados</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metano</li> <li>• NO<sub>2</sub></li> <li>• NH<sub>3</sub></li> <li>• PAHs y POPs</li> <li>• Dioxinas y furanos</li> </ul>

#### 4.4.1 Metodología simple

La emisión de los diferentes contaminantes se halla aplicando la siguiente fórmula:

$$E_{i,j} = \sum_j (FC_j \cdot EF_{i,j})$$

donde

- E<sub>i,j</sub>: emisión de contaminante i procedentes de vehículos de la categoría j (gramos contaminante)
- FC<sub>j</sub>: consumo de combustible del vehículo de categoría j (kg combustible)
- EF<sub>i,j</sub>: factor de emisión específico

Los distintos factores de emisión se muestran en la página siguiente. Los vehículos de nuestro estudio pertenecen a la categoría autobuses urbanos, y estos factores de emisión debemos combinarlos con el consumo de combustible.

Aclaraciones a los factores de emisión:

- Estos factores no han sido calculados en base a datos nacionales, sino siguiendo una metodología uniforme para todos los países.
- Se corresponden a un conjunto mezclado de modos de conducción, desde congestión urbana hasta autopista fluida.
- Los datos fueron estimados para una composición de flota del año 2002. Es de esperar, que con el paso de los años, la tecnología nueva que va apareciendo vaya disminuyendo estas cifras, ya que se va renovando el parque móvil.

*Tabla 4.1: Factores de emisión (g/kg combustible) para España, año 2002*



Categoría	Contaminante					
	CO	NO <sub>x</sub>	COVNM	CH <sub>4</sub>	PM	CO <sub>2</sub> (kg/kg combustible)
Coches pasajeros gasolina <2,5 t	220,75	13,01	22,12	2,01	0,00	2,76
Coches pasajeros diésel <2,5 t	12,60	12,17	3,32	0,12	3,38	3,11
Vehículos de carga ligeros gasolina <3,5 t	301,60	16,83	24,86	1,37	0,00	2,63
Vehículos de carga ligeros diésel < 3,5t	11,82	22,23	2,39	0,08	3,29	3,11
Vehículos de carga pesados diésel <3,5 t	10,99	26,58	6,55	0,28	2,02	3,10
<b>Autobuses urbanos</b>	<b>13,31</b>	<b>41,80</b>	<b>4,31</b>	<b>0,41</b>	<b>1,83</b>	<b>3,10</b>
Autobuses interurbanos	7,08	31,25	3,81	0,31	1,44	3,11
Ciclomotores	357,20	1,20	220,40	5,60	0,00	1,90
Motocicletas	592,76	3,76	178,00	5,81	0,00	1,67

Fuente: EMEP/CORINAIR (2002)

#### 4.4.2 Metodología detallada

La metodología detallada está dirigida a la estimación de las emisiones generadas por el tráfico rodado, en el caso de los contaminantes siguientes:

- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), como suma de NO y NO<sub>2</sub>
- Monóxido de carbono (CO)
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM), que se obtienen restando el metano de los compuestos orgánicos volátiles totales (COV)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)
- Partículas (PM)
- Amoníaco (NH<sub>3</sub>)
- Metales pesados (MP)
- Consumo (Cons)

En la página siguiente se muestra una descripción analítica de la aplicación de la metodología que hay que seguir dependiendo de la categoría de vehículo.

Las emisiones evaporativas (*evaporative emissions*) son las debidas a los vapores de hidrocarburos procedentes del sistema de combustible de un vehículo, pero aunque se dan en cantidades significativas en forma de COVNM, solamente se dan en los vehículos de gasolina, y no en los motores diésel como los de nuestro estudio.

Las emisiones totales son calculadas mediante la suma de dos tipos distintos de fuentes:

- Emisiones en caliente (*hot exhaust emissions*): aquellas que provienen del tubo de escape de los vehículos, cuando los motores alcanzan estabilidad en su temperatura de funcionamiento (temperatura del agua de refrigeración superior a 70°C)
- Emisiones en frío (*cold exhaust emissions*): aquellas que provienen del tubo de escape antes de que el agua de refrigeración del motor haya alcanzado los 70°C

Por tanto,  $E_{TOTAL} = E_{CALIENTE} + E_{FRÍO}$

En siguiente tabla hemos seleccionado, de todas las clases de vehículos que abarca la aplicación, las de interés para el proyecto.

*Tabla 4.2: Resumen de los métodos de cálculo aplicados para los diferentes contaminantes en la categoría de vehículo “autobús urbano”*

<b>Categoría vehículo</b>	<b>NOx</b>	<b>CO</b>	<b>COVNM</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>PM</b>	<b>N<sub>2</sub>O</b>	<b>NH<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Pb</b>	<b>MP</b>	<b>Cons</b>
Autobús convencional	B1	B1	B1	C	B1	C	C	D	D	D	D	B1
Autobús EuroI-EuroV	B1	B1	B1	C	B1	C	C	D	D	D	D	B1

Fuente: EMEP/CORINAIR (2002)

Tabla 4.3: explicación de la codificación usada para los acercamientos metodológicos adoptados para cada categoría del vehículo

Método	Emisiones en caliente	Emisiones en frío	Emisiones evaporativas*
<b>A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kilómetros recorridos por vehículo</li> <li>Proporción de kilómetros hechos en los distintos modos de conducción: urbano, rural, autopista</li> <li>A1: media de la velocidad en los distintos modos de conducción: urbano, rural, autopista</li> <li>A1: factores de emisión en caliente dependientes de la velocidad</li> <li>A2: factores de emisión dependientes del modo de conducción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La longitud media del viaje por trayecto de vehículo</li> <li>La temperatura media mensual</li> <li>Factor de corrección en las emisiones en frío depende de la tecnología catalítica, la longitud del trayecto y la temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Volatilidad del combustible</li> <li>Temperatura media mensual y factor de emisión dependiente de la temperatura</li> </ul>
<b>B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kilómetros recorridos por vehículo</li> <li>Proporción de kilómetros hechos en los distintos modos de conducción: urbano, rural, autopista</li> <li>B1: media de la velocidad en los distintos modos de conducción: urbano, rural, autopista</li> <li>B1: factores de emisión en calor dependientes de la velocidad</li> <li>B2: factores de emisión dependientes del modo de conducción</li> </ul>	No se calculan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Volatilidad del combustible</li> <li>Temperatura media mensual y factor de emisión dependiente de la temperatura</li> </ul>
<b>C</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kilómetros recorridos por vehículo</li> <li>Proporción de kilómetros hechos en los distintos modos de conducción: urbano, rural, autopista</li> <li>Factores de emisión dependientes del modo de conducción</li> </ul>	No se calculan	No se calculan
<b>D</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consumo total por vehículo</li> <li>Factores de emisión dependientes del consumo</li> </ul>	No se calculan	No se calculan

\*Atribuibles sólo para emisiones de COVNM de vehículos a gasolina

Fuente: EMEP/CORINAIR (2002)

Por tanto, observamos que no es necesario hacer una distinción entre emisiones en caliente y en frío para la categoría de vehículos estudiada, puesto que no hay ningún contaminante que se encuentre en el método “A” para autobuses. La diferencia entre emisiones en caliente y en frío se reserva tan sólo para los vehículos ligeros.

La información que debemos de recopilar para aplicar correctamente la metodología detallada de la aplicación CORINAIR es:

- Tipos de vehículos
- Modos de conducción
- Velocidad media
- Pendiente
- Factores de emisión
- Características del combustible
- Algoritmo

#### Tipos de vehículos

De todos los vehículos que cubre la metodología, los de interés para el presente estudio son los denominados como autobuses urbanos (*Urban buses*), con código de actividad 07 03 06 00. En algunas ocasiones hay factores de emisión específicos, y en otras se engloban dentro de la categoría de Vehículos de Carga Pesados (*Heavy Duty Vehicles*).

#### Modos de conducción

Las emisiones de los vehículos están fuertemente influenciadas por las diferentes formas de conducción, y en la metodología CORINAIR se hace distinción entre tres: urbana (*urban*), carretera (*rural*) y autopista (*highway*), siendo

$$E_{TOTAL} = E_{URBANA} + E_{CARRETERA} + E_{AUTOPISTA}$$

Para nuestro caso, todas las emisiones se considerarán como urbanas, ya que los vehículos utilizados hacen sus trayectos en esta condición.

#### Velocidad media

Según fuentes del Departamento de Calidad y Medio Ambiente de TUZSA, la velocidad comercial de los autobuses tiene un valor medio de 14 kilómetros por hora. Este dato es el empleado para los factores de emisión dependientes de la velocidad.

#### Pendiente

El gradiente de la calzada tiene el efecto de incrementar o disminuir la resistencia del vehículo a la tracción, especialmente en los vehículos pesados. Dado que Zaragoza tiene una orografía llana, no se introduce ningún factor de corrección para este aspecto.

#### Factores de emisión

#### a) Factores de emisión dependientes de la velocidad

Los contaminantes cuyos factores de emisión están en función de la velocidad del vehículo son el monóxido de carbono, los compuestos orgánicos volátiles, óxidos de nitrógeno y partículas, además del consumo de combustible.

*Tabla 4.4: Factores de emisión dependientes de la velocidad del autobús*

Contaminante	Rango de velocidad (km/h)	Factor de emisión (g/km)
CO	0-50	$59,003 V^{-0.7447}$
NOx	0-50	$89,174 V^{-0.5185}$
COV	0-50	$43,647 V^{-1.0301}$
PM	0-50	$7,8609 V^{-0.7360}$
Consumo	0-50	$1371,6 V^{-0.4318}$

Fuente: EMEP/CORINAIR (2002)

Las emisiones de estos contaminantes están influenciadas por la normativa europea que posea el vehículo, apreciándose notables disminuciones con la nueva tecnología implementada en los automóviles, reflejadas en la siguiente tabla:

*Tabla 4.5: Reducción de las emisiones en función de la normativa europea para la categoría de vehículo “autobús urbano”*

Norma europea	CO			NOx			COV			PM		
	U	C	A	U	C	A	U	C	A	U	C	A
Euro I	50,0	40,0	45,0	30,0	30,0	10,0	25,0	25,0	25,0	35,0	35,0	35,0
Euro II	60,0	45,0	50,0	50,0	45,0	35,0	30,0	30,0	30,0	60,0	60,0	60,0
Euro III	72,0	61,5	65,0	65,0	61,5	54,5	51,0	51,0	51,0	72,0	72,0	72,0
Euro IV	79,6	71,9	74,5	75,5	73,1	68,2	65,7	65,7	65,7	94,7	94,7	94,7
Euro V	79,6	71,9	74,5	86	84,6	81,8	65,7	65,7	65,7	94,7	94,7	94,7

Leyenda  
 U: reducción en emisiones urbanas.  
 C: reducción en emisiones de carretera.  
 A: reducción en emisiones de autopistas.

Fuente: EMEP/CORINAIR (2002)

Así pues, se debe aplicar esta disminución basándose en la distribución de los vehículos hallada tal y como se expone en el apartado 4.1.

#### b) Factores de emisión de contaminantes no regulados

En la siguiente página se muestran los distintos factores para el resto de contaminantes que cubre la metodología.

Tabla 4.6: Factores de emisión dependientes de la velocidad del autobús

Contaminante	Factor de emisión (mg/km)
Metano	175,00*
N <sub>2</sub> O	30,00
NH <sub>3</sub>	3,00
PAHs	36,00·10 <sup>-9</sup>
COPs	205,86·10 <sup>-9</sup>
Dioxinas	3,00
Furanos	7,90
Metales pesados	
• Cadmio	0,01
• Cobre	1,70
• Cromo	0,05
• Níquel	0,07
• Selenio	0,01
• Zinc	1,00

\*Esta cifra debe ser variada por los factores de reducción de la tabla 3.5 para COV

Fuente: EMEP/CORINAIR (2002)

#### Características del combustible

La mejora en las especificaciones del combustible también puede modificar la emisión de algún contaminante, por lo que es necesario conocer algunas propiedades del diésel para poderlas aplicar en CORINAIR.

Tabla 4.7: Características del gasóleo

Propiedad	Año 1996 (base)	Año 2000	Año 2005
Nº de cetano	51	53	53
Densidad a 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	840	840	835
T95 (°C)	350	330	320
PAH (%)	9	7	5
Azufre (ppm)	400	300	40
Total aromáticos (%)	28	26	24

Fuente: EMEP/CORINAIR (2002)

#### Algoritmos

Para el cálculo de cada una de estas emisiones, el programa CORINAIR describe la aplicación de un algoritmo concreto en función del contaminante de que se trate.

En el caso de los contaminantes monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, partículas, metano, óxido nitroso y amoníaco, se considera que el factor de emisión incluye ya las posibles emisiones adicionales producidas por la conducción con motor en frío (este algoritmo es sólo válido para vehículos pesados).

La fórmula para la estimación de las emisiones es:

$$E = e \cdot s$$

- e: factor de emisión (en gramos por kilómetro)
- s: distancia recorrida (en kilómetros)

Para los contaminantes dióxido de azufre y dióxido de carbono, las emisiones dependen de la composición y de la cantidad de carburante utilizado y, secundariamente, de las condiciones de utilización del vehículo. El cálculo de las emisiones se basa en las siguientes fórmulas:

$$E_{SO_2} = 2 \cdot c \cdot k_{SO_2}$$

$$E_{CO_2} = 44,011 \left[ \frac{c}{(12,011 + 1,008 r_{H/C})} - \frac{E_{CO}}{28,011} - \frac{E_{COV}}{13,85} - \frac{E_{part}}{12,001} \right], \text{ donde:}$$

- c: carburante consumido (Kg)
- $k_{SO_2}$ : contenido en azufre del carburante (kg/kg carburante)
- $r_{H/C}$ : ratio número de átomos de hidrógeno/número de átomos de carbono en el carburante
- $E_{CO}$ : emisiones de CO (Kg)
- $E_{COV}$ : emisiones de COV (Kg)
- $E_{part}$ : emisiones de partículas (Kg)

Estas fórmulas se basan en la suposición de que, para el dióxido de azufre, todo el azufre contenido en el carburante se transforma en  $SO_2$ . Las emisiones de  $CO_2$  se calculan a partir del resto de las emisiones de carbono, suponiendo que el carbono no emitido en forma de monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles y partículas, se emite en forma de dióxido de carbono.

El contenido de azufre por litro de carburante en  $\mu g/l$  se obtiene a partir de la cantidad de azufre en ppm (ver tabla 4.7 Características del gasóleo) mediante la siguiente expresión:

$$\text{Contenido azufre/litro combustible} = d_s \cdot N^{\circ} \text{ppm} \cdot 10^{-6} = 33.400 \mu g \text{ azufre/litro gasóleo}$$

donde  $d_s$ : densidad media del gasóleo  
 $N^{\circ} \text{ppm}$ : partes por millón de azufre en gasóleo

El ratio del número de átomos de hidrógeno entre el número de átomos de carbono en el carburante es de 2 para los vehículos diésel, según la propia Guía.

- Mapas

Para la representación gráfica de los valores estimados para las distintas emisiones se utiliza la aplicación comercial ArcView 3.2. De este modo, obtenemos un conjunto de capas georreferenciadas para el conjunto de los contaminantes tratados que nos permiten relacionar fácilmente las distintas emisiones producidas en los distintos puntos de la ciudad.

#### 4.5 Cálculo de la huella ecológica y otros indicadores

La “huella ecológica” es el área de territorio biológicamente productivo necesaria para producir los recursos utilizados y asumir los residuos producidos por una población definida, con un nivel de vida específico, indefinidamente donde sea que se encuentre esa área. Este concepto será utilizado en su parte de territorio relativo a la energía; es decir, la cantidad del mismo necesario para absorber el dióxido de carbono generado para producir energía.

El método de cálculo empleado para determinar la tasa de absorción de CO<sub>2</sub> por parte de los bosques es el propuesto por Wackernagel y Rees (1996). Este dato, conjuntamente con las emisiones totales de dióxido de carbono, obtenidas mediante la metodología detallada de CORINAIR, permite saber el número de hectáreas de bosque necesarias para absorber el gas emitido por los vehículos que forman parte de nuestro estudio.

$$\text{Emisiones (kg)} / \text{Tasa de absorción (kg/Ha)} = \text{N}^{\circ} \text{ de hectáreas de bosque}$$

Otros indicadores que se estiman son los datos de contaminación en función del número de viajeros y de los kilómetros recorridos.

#### 4.6 Cálculo de inmisión: método de Gifford-Hanna

Conocida la emisión de los distintos contaminantes provocada por los vehículos, se procede a calcular cómo se distribuye por la atmósfera. De todas las metodologías disponibles se opta por la desarrollada por Gifford y Hanna; se trata de un modelo de difusión para zona urbana de fácil aplicación y de cálculo simple, ampliamente utilizado. Este modelo se conoce con el nombre de ATDL (Air Turbulance and Diffusion Laboratory, Oak Ridge, Tennessee).

El modelo se fundamenta en que la concentración en el suelo de un contaminante debido a las emisiones de una fuente superficial es función de la distribución de las emisiones de la fuente superficial, de la dirección y la velocidad del viento, y de la estabilidad atmosférica.

Se supone que la distribución de la fuente superficial es relativamente uniforme, es decir, que la emisión Q (g/m<sup>2</sup> s) varía en menos de un factor de diez en distancias de algunos kilómetros. Esta hipótesis permite despreciar la difusión vertical. Se supone también que la distribución vertical de contaminante es gaussiana, con una desviación típica  $\sigma_z$ , dada en la forma potencial

$$\sigma_z = a \cdot x^b$$

Las desviaciones típicas dependen de la categoría de estabilidad asignada (Pasquill y Smith, 1983) Los valores a y b serán valores que se asignarán en función de la estabilidad atmosférica.

El método empleado para el cálculo de la desviación típica será el de Brookhaven. De acuerdo con él, los índices de los coeficientes de difusión según las clases de estabilidad son los mostrados en la tabla 4.8.

Las categorías de estabilidad que se dan en el área de estudio se obtienen a partir de las series estadísticas proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología. También



debe recopilarse información acerca de las características de los vientos de la ciudad, para conocer mejor como es la dispersión de los contaminantes emitidos.

Tabla 4.8: Índices de los coeficientes de difusión según clases de estabilidad

Clase de estabilidad	a	b
A	0,41	0,91
B	0,33	0,86
C	0,30	0,86
D	0,22	0,78
E	0,16	0,74
F	0,06	0,71

Fuente: Pasquill y Smith (1983)

La ciudad se divide en cuadrículas, cada una de las cuales de lado  $\Delta x$ , siendo su valor entre 1 y 10 kilómetros. Cada cuadrícula tendrá una emisión  $Q$ , que se supone constante, y que habrá sido hallada mediante CORINAIR. Esta emisión  $E$  (gr/año) se divide por la superficie en  $m^2$  de la cuadrícula, por los segundos contenidos en un año (31.536.000) y se multiplica por  $10^6$ , obteniendo de este modo la emisión  $Q$  en  $\mu g/m^2s$ , tal como se requiere para realizar Gifford-Hanna

Para una dirección y una velocidad de viento  $u$ , la concentración en el suelo en la cuadrícula "0", se calcula con la fórmula:

$$\chi_s = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{u} \cdot \frac{\left(\frac{\Delta x}{2}\right)^{1-b}}{a(1-b)} \left\{ Q_0 + \sum_{i=1}^N Q_i \cdot [(2i+1)^{1-b} - (2i-1)^{1-b}] \right\}$$

donde:

- $Q_0$  es la emisión de la cuadrícula para la que se calcula la concentración
- $u$  es la velocidad del viento en m/s
- $a$  y  $b$  son los valores de los coeficientes por Brookhaven
- $Q_i$  es la emisión de la cuadrícula adyacente a barlovento de la cuadrícula problema, siendo  $N$  el número de cuadrículas a barlovento que se tienen en cuenta en el cálculo.

La contribución relativa de las cuadrículas a barlovento en la concentración de la cuadrícula problema es, para las cuadrículas 0, 1, 2, 3, 4, 5... de 1; 0,31; 0,19; 0,13; 0,10, 0,09;... por lo que consideramos suficiente tomar sólo 4 cuadrículas a barlovento ( $N=4$ )

El reticulado de la zona de estudio se hace siguiendo la dirección Norte-Sur; para las direcciones intermedias (NNE, NE, ENE, ESE, etc.), las cuatro cuadrículas que se eligen a barlovento de la cuadrícula receptora se hace siguiendo el esquema del siguiente gráfico:

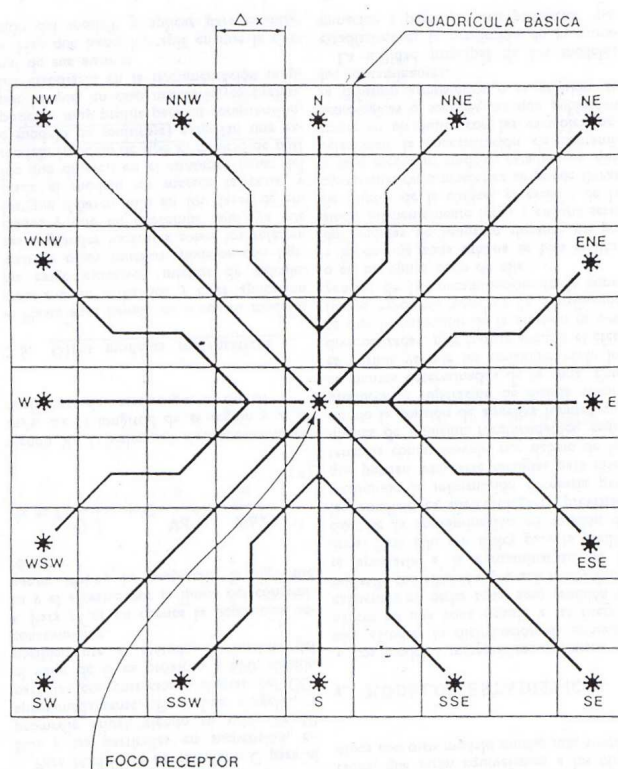


Figura 4.2: Esquema para la selección de cuadrículas emisoras según la dirección del viento (Fuente: Mantero, 1983). Para hallar la inmisión en la cuadrícula central de la imagen (foco receptor), se sigue la línea que marca el viento correspondiente.

Este modelo se puede utilizar para el cálculo de concentraciones horarias, o para concentraciones en un periodo largo, como una semana, un mes o un año. Este periodo estará caracterizado por una matriz probabilística de estabildades  $f(i,j,k)$ , siendo  $i$  la dirección del viento,  $j$  la velocidad y  $k$  el tipo de estabilidad. Todos estos datos pueden ser proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología.

La concentración para el periodo será:

$$\chi = \sum f(i,j,k) \cdot \chi(i,j,k)$$

siendo  $\chi(i,j,k)$  la concentración en la cuadrícula receptora debida a cada conjunto de condiciones meteorológicas.

Se hallarán los datos de inmisión estadísticos para un año teniendo en cuenta la serie climática que relaciona dirección del viento – estabilidad – velocidad del viento de la ciudad, proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología.

## 5. Resultados

### 5.1 Caracterización de los vehículos

La flota de TUZSA cuenta con alrededor de 300 autobuses, distribuidos de la siguiente manera:

*Tabla 5.1: Distribución de los autobuses de TUZSA (enero 2006)*

MODELOS	UNIDADES
Iveco Cityclass Noge	39
Iveco Cityclass Habit	45
Man NG-313 F	17
Mercedes Citaro O-530	45
Mercedes Benz O-405	10
Mercedes Benz O-405 GN2	25
Mercedes Benz O-405 N2	30
Renault Citybus	60
Renault R-312	25
<b>TOTAL</b>	<b>296</b>

Fuente: TUZSA (2006)

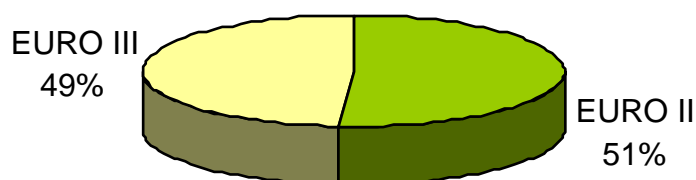


Figura 5.1. Distribución de los autobuses de TUZSA atendiendo a la normativa de contaminación europea (Fuente: Elaboración propia). Esta categoría, que depende de la antigüedad del vehículo, tiene influencia directa en la reducción de las emisiones de determinados contaminantes

### 5.2 Encuesta de tráfico

#### 5.2.1 Datos diarios

Los resultados obtenidos en la encuesta diaria, en la que se recogen los trayectos realizados un día laborable del período comprendido entre septiembre y junio, son los siguientes:

*Tabla 5.3: Número de trayectos realizados por los autobuses de TUZSA en un día laboral correspondiente al período entre septiembre y junio.*

Línea	Autobuses			Línea	Autobuses		
	Ida	Vuelta	Ambos		Ida	Vuelta	Ambos
<b>20</b>	113	114	227	<b>36</b>	95	101	196
<b>21</b>	143	146	289	<b>38</b>	157	155	312
<b>22</b>	139	141	280	<b>39</b>	129	126	255
<b>23</b>	171	167	338	<b>40</b>	214	216	430
<b>24</b>	168	169	337	<b>41</b>	41	41	82
<b>25</b>	70	75	145	<b>42</b>	149	153	302
<b>27</b>	14	14	28	<b>43</b>	32	32	64
<b>28</b>	47	46	93	<b>44</b>	75	75	150
<b>29</b>	94	100	194	<b>45</b>	60	61	121
<b>30</b>	145	146	291	<b>50</b>	54	54	108
<b>31</b>	86	87	173	<b>51</b>	82	82	164
<b>32</b>	141	146	287	<b>53</b>	139	140	279
<b>33</b>	205	202	407	<b>C1</b>	48	48	96
<b>34</b>	129	129	258	<b>C2</b>	99	101	200
<b>35</b>	178	176	354				

Fuente: Elaboración propia

*Tabla 5.4: Número de trayectos no completos realizados por los autobuses de TUZSA en un día laboral correspondiente al período entre septiembre y junio:*

Línea	Autobuses			Línea	Autobuses		
	Ida	Vuelta	Ambos		Ida	Vuelta	Ambos
<b>20</b>	4	4	8	<b>35</b>	8	6	14
<b>23</b>	3	11	14	<b>36</b>	3	4	7
<b>25</b>	7			<b>38</b>	8		
<b>29</b>	7	3	10	<b>39</b>	2	6	8
<b>32</b>	7	6	13	<b>40</b>	4		
<b>33</b>	5	6	11	<b>45</b>	4	1	5
<b>34</b>	8						

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.1 Datos anuales

Como período de referencia hemos escogido el año 2005, y en este año hemos diferenciado entre días laborables, sábados y festivos, dado que los horarios de los autobuses se modifican en función de esta clasificación.

Tabla 5.5 Resumen de tipos de días durante el año 2005

	Laborables	Sábados	Festivos
Enero	20	3	8
Febrero	20	4	4
Marzo	21	3	7
Abril	21	4	5
Mayo	22	4	5
Junio	22	4	4
Julio	21	5	5
Agosto	22	4	5
Septiembre	22	4	4
Octubre	20	5	6
Noviembre	21	4	5
Diciembre	19	5	7

Fuente: Elaboración propia

Aplicando esta distribución de días, obtenemos los trayectos realizados anualmente, tanto para trayectos normales como para los que se realizan parcialmente:

Tabla 5.6: Número de trayectos realizados por los autobuses de TUZSA durante el año 2005.

Línea	Autobuses			Línea	Autobuses		
	Ida	Vuelta	Ambos		Ida	Vuelta	Ambos
<b>20</b>	36.040	35.750	71.790	<b>36</b>	29.549	30.725	60.274
<b>21</b>	48.376	48.936	97.312	<b>38</b>	48.952	48.564	97.516
<b>22</b>	48.090	48.574	96.664	<b>39</b>	44.653	43.579	88.232
<b>23</b>	55.787	54.673	110.460	<b>40</b>	67.204	67.457	134.661
<b>24</b>	53.253	53.544	106.797	<b>41</b>	14.218	14.218	28.436
<b>25</b>	22.767	24.207	46.974	<b>42</b>	46.684	47.627	94.311
<b>27</b>	5.110	5.110	10.220	<b>43</b>	10.126	10.176	20.302
<b>28</b>	15.690	15.374	31.064	<b>44</b>	23.525	23.525	47.050
<b>29</b>	28.816	30.354	59.170	<b>45</b>	20.484	20.914	41.398
<b>30</b>	70.055	67.747	137.802	<b>50</b>	18.847	18.847	37.694
<b>31</b>	28.941	28.958	57.899	<b>51</b>	29.930	29.930	59.860
<b>32</b>	47.807	49.345	97.152	<b>53</b>	46.004	46.320	92.324
<b>33</b>	70.284	69.920	140.204	<b>C1</b>	17.520	17.520	35.040
<b>34</b>	43.831	43.887	87.718	<b>C2</b>	31.227	31.643	62.870
<b>35</b>	57.710	56.619	114.329				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.7: Número de trayectos realizados por los autobuses de TUZSA en un día laboral correspondiente al período entre septiembre y junio:

Línea	Autobuses			Línea	Autobuses		
	Ida	Vuelta	Ambos		Ida	Vuelta	Ambos
20	1.146	1.303	2.449	35	3.083	1.799	4.882
23	1.041	3.654	4.695	36	809	1.676	2.485
25	2.265		2.265	38	3.104		3.104
29	1.899	1.085	2.984	39	776	1.977	2.753
32	2.384	1.589	3.973	40	1.381		1.381
33	1.871	1.787	3.658	45	1.662	512	2.124
34	2.664		2.664				

Fuente: Elaboración propia

### 5.3 Kilómetros recorridos

El total de kilómetros recorridos por los vehículos del estudio son el resultado de multiplicar, en las 143 casillas en las que se ha dividido la ciudad, el nº de trayectos por la distancia recorrida en cada una de ellas. A continuación mostramos el resumen con los datos obtenidos en cuanto a kilometraje se refiere:

Tabla 5.8: Resumen de los kilómetros anuales realizados por los autobuses de TUZSA en las diferentes cuadrículas de la ciudad de Zaragoza.

Casilla	Km	Casilla	Km	Casilla	Km	Casilla	Km
E1	14.403	J5	185.693	D8	321.881	F10	225.737
J1	8.969	K5	20.474	E8	264.826	G10	502.453
E2	107.604	D6	14.288	F8	844.119	H10	298.321
F2	66.473	E6	136.799	G8	1.044.276	I10	35.876
J2	25.000	F6	580.365	H8	453.209	J10	24.513
D3	7.256	G6	252.786	I8	311.317	K10	31.444
E3	52.075	H6	233.712	J8	251.927	B11	1.412
F3	202.897	I6	455.582	K8	46.422	C11	35.758
G3	38.972	J6	143.845	A9	125.873	D11	225.759
H3	121.578	K6	22.866	B9	68.150	E11	189.955
I3	4.297	A7	107.920	C9	125.093	F11	172.757
J3	22.422	B7	209.883	D9	144.417	G11	264.975
E4	90.031	C7	141.676	E9	282.310	H11	44.097
F4	214.392	D7	25.791	F9	817.990	I11	316.724
G4	420.217	E7	219.541	G9	290012	C12	38.835
H4	84.004	F7	711.988	H9	357858	D12	105.915
I4	35.382	G7	463.969	I9	334.154	E12	5.037
J4	32.804	H7	640.101	J9	256.726	F12	5.256
K4	1.706	I7	198.586	K9	60.427	G12	3.285
E5	7.386	J7	23.170	A10	172.704	J12	43.263
F5	587.399	K7	9.402	B10	191.328	C13	132.394
G5	160.654	A8	45.266	C10	112.823	J13	9.614
H5	237.299	B8	42.712	D10	182.928	K13	25.957
I5	29.740	C8	195.969	E10	329.976	TOTAL	17.785.427

Fuente: Elaboración propia

### 5.3 Kilogramos de combustible consumidos

A fecha de enero de 2006, según Responsable del Departamento de Calidad y Medio Ambiente de TUZSA (com. pers.) el consumo medio de los autobuses de 12 metros era de 60 litros/100 Km, y el de los articulados de 78 litros/100 km. Las únicas líneas que utilizan autobuses articulados son la 20, 23 y la 33. Mientras que las dos primeras los utilizan en todos sus servicios, la línea 33 emplea 11 autobuses articulados a lo largo del día de los 16 que realizan el servicio. Por tanto, su consumo medio será:

$$\text{Consumo medio línea 33} = \frac{11}{16} \cdot 78 + \frac{5}{16} \cdot 60 = 72,38 \text{ litros/100 km.}$$

En la siguiente tabla se puede observar el consumo de todas las líneas.

*Tabla 5.9: Consumo medio de las diferentes líneas de autobuses de TUZSA*

CONSUMO DE LOS AUTOBUSES DE TUZSA	
LINEAS	CONSUMO
21, 22, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 50, 51, 52, 53, C1, C2	60,00 litros/ 100 Km
20, 23	78,00 litros/ 100 Km
33	72,38 litros/ 100 Km

Fuente: Elaborado a partir de TUZSA

Multiplicando por la densidad del diésel (835 kg/m<sup>3</sup>) obtenemos los kilogramos de combustible utilizados.

Tabla 5.10: Kilogramos de combustible utilizados por los autobuses de TUZSA en las diferentes cuadrículas de la ciudad de Zaragoza.

Casilla	Kg	Casilla	Kg	Casilla	Kg	Casilla	Kg
E1	7.215	J5	103.571	D8	187.877	F10	113.094
J1	4.493	K5	10.257	E8	144.351	G10	252.818
E2	53.909	D6	7.158	F8	451.871	H10	151.761
F2	33.303	E6	68.537	G8	558.131	I10	18.532
J2	12.944	F6	302.413	H8	248.857	J10	12.521
D3	3.635	G6	126.646	I8	167.444	K10	17.061
E3	26.089	H6	117.090	J8	131.951	B11	707
F3	101.651	I6	237.455	K8	23.497	C11	17.915
G3	19.525	J6	76.598	A9	63.062	D11	113.105
H3	60.911	K6	11.455	B9	34.142	E11	95.168
I3	2.153	A7	59.276	C9	62.670	F11	86.552
J3	11.599	B7	119.769	D9	75.557	G11	132.752
E4	45.105	C7	81.158	E9	147.395	H11	22.441
F4	107.410	D7	15.206	F9	413.396	I11	162.759
G4	216.269	E7	117.350	G9	146.921	C12	19.457
H4	42.097	F7	376.066	H9	190.414	D12	53.064
I4	230.44	G7	234.970	I9	184.677	E12	2.524
J4	17.860	H7	330.119	J9	151.040	F12	2.633
K4	855	I7	101.136	K9	33.638	G12	1.646
E5	3.700	J7	11.835	A10	86.524	J12	21.675
F5	305.630	K7	4.802	B10	95.856	C13	65.314
G5	80.488	A8	22.678	C10	56.524	J13	4.817
H5	118.887	B8	24.297	D10	91.647	K13	13.004
I5	18.218	C8	108.829	E10	165.318	TOTAL	9.279.741

Fuente: Elaboración propia

## 5.4 Resultados de la aplicación práctica de CORINAIR

### 5.4.1 Metodología simple:

Para la aplicación de esta metodología, en la que los factores de emisión están expresados en gramos por kilogramo de combustible, nos hemos basado en los datos de consumo expresados en la tabla 5.10 (*Kilogramos de combustible utilizados por los autobuses de TUZSA en las diferentes cuadrículas de la ciudad de Zaragoza*).

Tabla 5.11: Emisión de los distintos contaminantes obtenidos por la metodología simple

Contaminante	Emisión diaria (kg)	Emisión anual (kg)
CO	371,6	123.367
NOx	1.166,8	387.434
COVNM	120,4	39.948
CH <sub>4</sub>	11,5	3.800
PM	51,1	16.962
CO <sub>2</sub>	86.527,8	28.733.237

Fuente: Elaboración propia



#### 5.4.2 Metodología detallada:

##### a) Contaminantes dependientes de la velocidad del vehículo

*Tabla 5.12: Emisión de los distintos contaminantes obtenidos por la metodología detallada tras aplicar reducción por Normativa Europea del vehículo*

Contaminante	Emisión diaria (kg)	Emisión anual (kg)
CO	154,2	51.267
NOx	516,6	171.791
COV	91,7	30.492
PM	20,5	6.828
Consumo	23466,6	7.779.399

Fuente: Elaboración propia

##### b) Contaminantes dependientes del consumo

*Tabla 5.14: Emisión de contaminantes dependientes del consumo*

Contaminante	Emisión diaria	Emisión anual
Dióxido de azufre (kg)	1,86	620,45
Dióxido de carbono (kg)	86.946,57	28.906.371,52
Metales Pesados (g)		
- Cadmio	0,28	92,79
- Cobre	47,45	15.775,56
- Cromo	1,39	463,98
- Níquel	1,95	649,58
- Selenio	0,28	92,79
- Zinc	27,91	9.279,74

Fuente: Elaboración propia

##### c) Contaminantes no regulados

*Tabla 5.15: Emisión de los distintos contaminantes no regulados*

	Emisión diaria	Emisión anual
Metano (CH <sub>4</sub> )	5.572 g	1.853,1 kg
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	1.602g	533,0 kg
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	160 g	53,3 kg
PAHs	$1.923.266 \cdot 10^{-12}$ g	$639.621,2 \cdot 10^{-6}$ kg
POPs	$10.997.875 \cdot 10^{-12}$ g	$3.657.567,5 \cdot 10^{-6}$ kg
Dioxinas	$160.272 \cdot 10^{-12}$ g	$53.301,7 \cdot 10^{-6}$ kg
Furanos	$422.049 \cdot 10^{-12}$ g	$140.361,3 \cdot 10^{-6}$ kg

Fuente: Elaboración propia

## 5.5 Indicadores

### 5.5.1 Huella ecológica

Los gases que son considerados que tienen efecto invernadero, tal y como se recoge en el Protocolo de Kyoto (Naciones Unidas, 1998) son:

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)

De estos seis gases, tres han sido calculados mediante CORINAIR (dióxido de carbono, metano y óxido nitroso)

Los datos de emisión de los gases de efecto invernadero se muestran en unidades de CO<sub>2</sub> equivalente, debido a que no todos ellos tienen el mismo poder para retener la radiación infrarroja.

Tabla 5.16: Emisión de CO<sub>2</sub> equivalente (kg/año)

	CO <sub>2</sub> equivalente	Emisión anual	TOTAL
Dióxido de carbono	1	28.906.371	28.906.371
Metano	25	1.977	49.425
Óxido nitroso	230	533	122.590
			<b>29.078.386</b>

Fuente: Elaboración propia

Según fuente de la Agenda Local 21 de Zaragoza, la tasa de absorción de dióxido de carbono de los bosques es de 5,2 Tm CO<sub>2</sub>/Ha bosque.

$$\frac{28.906,4}{5,2} = 5558,9\text{Ha}$$

Para hallar la ratio por habitante basta con dividir por el número de ciudadanos. Según el último censo de 2001 realizado por el Instituto Nacional de Estadística, Zaragoza tiene 614.905 habitantes (INE, 2006).

$$\frac{5.558,9}{614.905} = 0,009\text{Ha} = 90,40\text{m}^2$$

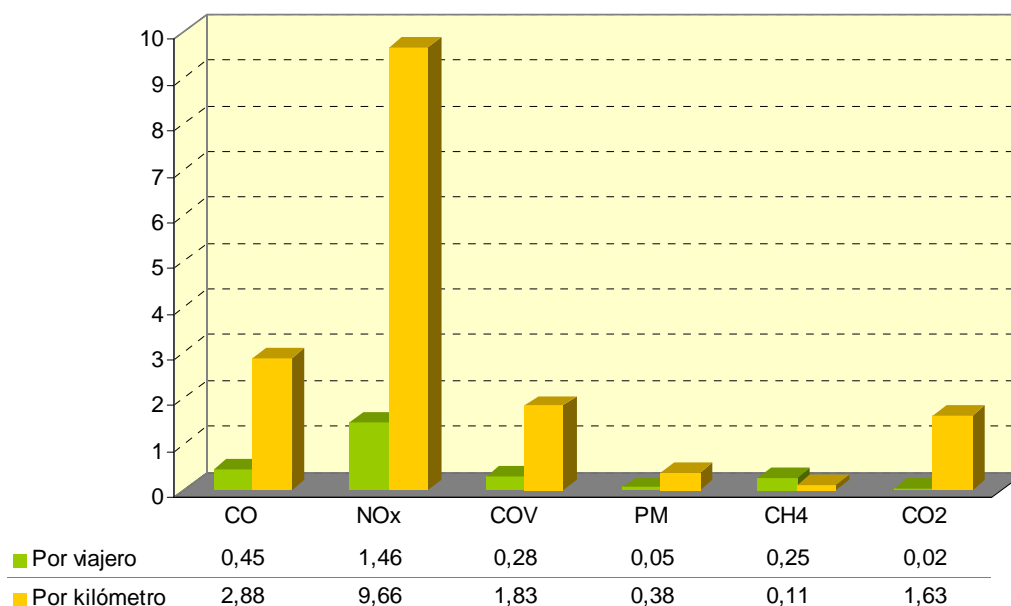
### 5.5.2 Otros indicadores

Durante el año 2005, se realizaron 117 millones de trayectos con los autobuses urbanos de TUZSA (Departamento de Calidad y Medio Ambiente de TUZSA, com. pers.), que recorrieron un total de 17.785.427 kilómetros, de acuerdo con nuestras mediciones. La emisión de contaminantes en función de estos dos parámetros es la siguiente

Tabla 5.18: Emisión de contaminantes por usuario y por kilómetro recorrido

Contaminante	Total anual 2005 (kg)	Por usuario 2005 (gr)	Por kilómetro (gr)
CO	51.267	0,45	2,88
NOx	171.791	1,46	9,66
COV	30.492	0,28	1,83
PM	6.828	0,05	0,38
CO <sub>2</sub>	28.906.371	247,06	1625,28
CH <sub>4</sub>	1.977	0,02	0,11
Consumo	9.279.741	79,31	521,76

Fuente: Elaboración propia



Fi

gura 5.2: Indicadores de los distintos contaminantes expresados en gramos, exceptuando el dióxido de carbono, en kg (Fuente: Elaboración propia). Estos indicadores permiten una mejor evaluación de los distintos modos de transporte desde el punto de vista medioambiental.

## 5.6 Cálculo de la inmisión

### 5.6.1 Base de Datos utilizadas

La fuente de los datos meteorológicos con la que se alimenta el modelo de dispersión procede del Observatorio que el Instituto Nacional de Meteorología (INM) posee en el Aeropuerto de Zaragoza, caracterizado por los siguientes parámetros:

- Latitud: 41° 39'43'' N
- Longitud: 01° 00'29'' W
- Altitud: 245 m
- Altitud del jardín meteorológico: 245 m.
- Altura desde el suelo de la cubeta del barómetro: 11 m
- Referencia barométrica: 258 m

- Altura del sensor del viento: 10 m

Los sensores meteorológicos se ubican en una zona libre de obstáculos y los edificios más próximos se localizan en unos 100 metros. La información que a continuación se muestra está recogida en el documento *Rosas de viento de Observatorios Meteorológicos principales. Zaragoza "Aeropuerto" (periodo 1987-1996)*, elaborado por Juan Carlos Tudela (1999)

#### a) Direcciones medias:

El cierzo, viento seco característico de la ciudad, es el predominante en la rosa anual de frecuencias medias. Este viento, consecuencia del gradiente de presión existente entre el Cantábrico y el Mediterráneo, se adapta al sentido del cauce del río Ebro con una dirección WNW, y abarca el 21% de las frecuencias, seguido de los rumbos adyacentes NW y W. Casi la mitad de las observaciones (48%) son debidas a estos tres vientos.

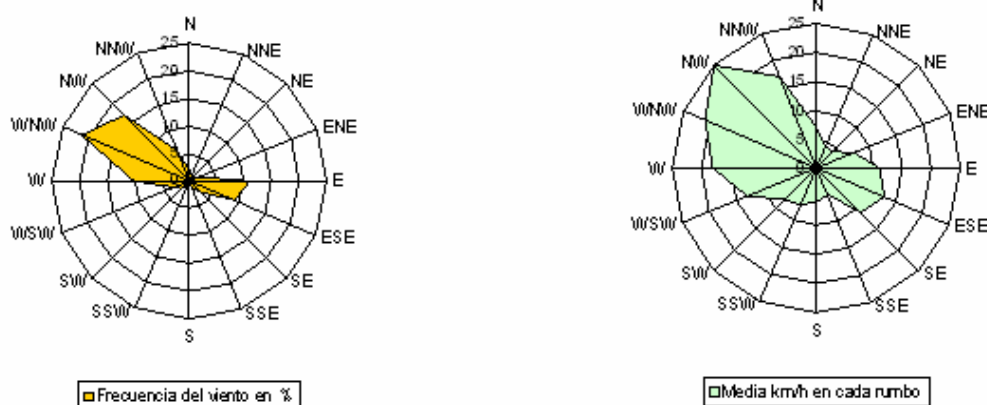


Figura 5.3: Rosas de viento anuales. Zaragoza "Aeropuerto" (Elaboración a partir de Tudela, 1999). El cierzo principalmente, junto con el bochorno en menor medida, copan la mayoría de las frecuencias en Zaragoza.

El bochorno es el causante de la mitad de las habituales direcciones secundarias. Es un viento de características opuestas al cierzo: proviene del Mediterráneo, con rumbos E y ESE, siendo mucho menos persistente y con tendencia a debilitarse a lo largo del día.

El resto de direcciones del viento son muy poco frecuentes y se asocian generalmente a situaciones de transición. Las calmas no son una situación muy habitual ya que tan sólo representan un 9%.

#### b) Velocidades medias:

La velocidad media mensual es de 11 km/h, siendo las medias más elevadas (25 km/h) las que están asociadas al cierzo con el rumbo NW. En general, la rosa de velocidades medias se asemeja a la de rumbos

### 5.6.2 Resultados de la aplicación práctica del modelo de Gifford-Hanna

Las cifras obtenidas de cada contaminante son resultado de aplicar, para cada una de las 143 cuadrículas en las que hemos dividido la ciudad, el algoritmo de difusión de

contaminación propuesto por Gifford-Hanna. Estos resultados han sido multiplicados por la probabilidad estadística de que suceda cada una de las condiciones meteorológicas, por lo que con el sumatorio de todos ellos obtenemos los niveles de inmisión ( $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ s}$ ) medios para condiciones climáticas medias anuales.

Así, en las siguientes tablas a efectos de comparación se muestran en cada casilla, separados por una línea de puntos, la emisión de partida y la inmisión después de aplicar el modelo matemático.

Tabla 5.19: Resultados por cuadrícula de la emisión/inmisión para el CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^2 \text{ s}$  y  $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ s}$ )

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A	0,0000 0,0020	0,0000 0,0113	0,0000 0,0426	0,0000 0,0977	0,0000 0,1590	0,0000 0,2536	0,0201 0,9546	0,0084 0,6523	0,0234 1,1616	0,0321 1,3706	0,0000 0,2590	0,0000 0,1215	0,0000 0,0799
B	0,0000 0,0468	0,0000 0,0437	0,0000 0,0964	0,0000 0,1811	0,0000 0,2383	0,0000 0,4187	0,0391 1,7421	0,0080 0,7670	0,0127 0,9012	0,0356 1,6036	0,0003 0,3961	0,0000 0,2085	0,0000 0,1383
C	0,0000 0,0378	0,0000 0,1017	0,0000 0,1380	0,0000 0,2509	0,0000 0,3282	0,0000 0,5423	0,0264 1,4596	0,0365 1,9383	0,0233 1,4621	0,0210 1,2740	0,0067 0,7036	0,0072 0,6520	0,0246 1,0599
D	0,0000 0,1810	0,0000 0,1810	0,0014 0,3411	0,0000 0,4146	0,0000 0,5682	0,0027 0,6590	0,0048 1,0544	0,0599 2,8352	0,0269 1,8886	0,0341 1,9866	0,0420 2,1516	0,0197 1,1943	0,0000 0,3311
E	0,0027 0,3148	0,0200 1,0885	0,0097 0,9532	0,0168 1,3843	0,0014 1,0472	0,0255 2,1209	0,0409 2,7042	0,0493 2,9991	0,0526 3,0737	0,0614 3,1719	0,0354 2,0648	0,0009 0,6297	0,0000 0,3096
F	0,0000 0,3118	0,0124 0,9597	0,0378 2,1396	0,0399 2,7394	0,1090 5,4748	0,1077 5,8803	0,1321 6,8515	0,1567 7,7706	0,1520 7,1700	0,0420 3,1597	0,0322 2,1384	0,0010 0,7588	0,0000 0,3707
G	0,0000 0,1497	0,0000 0,3577	0,0073 0,9624	0,0780 3,6331	0,0299 2,5093	0,0471 3,2805	0,0864 5,1829	0,1944 8,5810	0,0538 4,0739	0,0933 4,7415	0,0493 2,9377	0,0006 0,8360	0,0000 0,3405
H	0,0000 0,1380	0,0000 0,2612	0,0226 1,2075	0,0156 1,3556	0,0442 2,5382	0,0435 3,0039	0,1192 5,5980	0,0844 4,6049	0,0666 3,9021	0,0552 3,1786	0,0081 1,3208	0,0000 0,5751	0,0000 0,3761
I	0,0000 0,0475	0,0000 0,1584	0,0008 0,2928	0,0066 0,6338	0,0055 0,9977	0,0848 3,7686	0,0370 2,4578	0,0580 3,1781	0,0622 3,1882	0,0067 1,4044	0,0585 2,6510	0,0000 0,7081	0,0000 0,2462
J	0,0017 0,1341	0,0047 0,2639	0,0042 0,3278	0,0061 0,5444	0,0346 1,6077	0,0268 1,4081	0,0043 0,8553	0,0469 2,2909	0,0478 2,3969	0,0046 0,7792	0,0000 0,5387	0,0081 0,6238	0,0018 0,3143
K	0,0000 0,0116	0,0000 0,0459	0,0000 0,0548	0,0003 0,1190	0,0038 0,2561	0,0043 0,3362	0,0018 0,2997	0,0086 0,5938	0,0112 0,6583	0,0059 0,5470	0,0000 0,2545	0,0000 0,2183	0,0048 0,2974

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.20: Resultados por cuadrícula de la emisión/inmisión para el SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>2</sup> s y µg/m<sup>3</sup> s)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A	0,0000 0,0000	0,0000 0,0002	0,0000 0,0008	0,0000 0,0019	0,0000 0,0031	0,0000 0,0048	0,0003 0,0183	0,0001 0,0118	0,0003 0,0207	0,0004 0,0244	0,0000 0,0047	0,0000 0,0022	0,0000 0,0014
B	0,0000 0,0009	0,0000 0,0008	0,0000 0,0018	0,0000 0,0036	0,0000 0,0046	0,0000 0,0081	0,0005 0,0346	0,0001 0,0149	0,0001 0,0163	0,0004 0,0287	0,0000 0,0071	0,0000 0,0038	0,0000 0,0025
C	0,0000 0,0007	0,0000 0,0018	0,0000 0,0026	0,0000 0,0047	0,0000 0,0063	0,0000 0,0103	0,0003 0,0289	0,0005 0,0375	0,0003 0,0265	0,0002 0,0229	0,0001 0,0127	0,0001 0,0116	0,0003 0,0186
D	0,0000 0,0033	0,0000 0,0033	0,0000 0,0062	0,0000 0,0078	0,0000 0,0106	0,0000 0,0123	0,0001 0,0203	0,0008 0,0570	0,0003 0,0354	0,0004 0,0358	0,0005 0,0385	0,0002 0,0214	0,0000 0,0059
E	0,0000 0,0056	0,0002 0,0194	0,0001 0,0171	0,0002 0,0251	0,0000 0,0193	0,0003 0,0386	0,0005 0,0506	0,0006 0,0568	0,0006 0,0568	0,0007 0,0570	0,0004 0,0370	0,0000 0,0114	0,0000 0,0055
F	0,0000 0,0056	0,0001 0,0172	0,0004 0,0383	0,0005 0,0494	0,0013 0,1010	0,0013 0,1088	0,0016 0,1280	0,0019 0,1461	0,0017 0,1296	0,0005 0,0569	0,0004 0,0385	0,0000 0,0138	0,0000 0,0066
G	0,0000 0,0027	0,0000 0,0065	0,0001 0,0173	0,0009 0,0663	0,0003 0,0453	0,0005 0,0591	0,0010 0,0941	0,0024 0,1612	0,0006 0,0744	0,0011 0,0853	0,0006 0,0527	0,0000 0,0152	0,0000 0,0061
H	0,0000 0,0025	0,0000 0,0047	0,0003 0,0216	0,0002 0,0244	0,0005 0,0456	0,0005 0,0542	0,0014 0,1026	0,0011 0,0879	0,0008 0,0732	0,0006 0,0582	0,0001 0,0243	0,0000 0,0106	0,0000 0,0068
I	0,0000 0,0009	0,0000 0,0030	0,0000 0,0055	0,0001 0,0129	0,0001 0,0192	0,0010 0,0697	0,0004 0,0451	0,0007 0,0601	0,0008 0,0615	0,0001 0,0263	0,0007 0,0488	0,0000 0,0131	0,0000 0,0045
J	0,0000 0,0025	0,0001 0,0049	0,0000 0,0061	0,0001 0,0104	0,0004 0,0314	0,0003 0,0267	0,0000 0,0160	0,0006 0,0429	0,0006 0,0484	0,0001 0,0149	0,0000 0,0101	0,0001 0,0115	0,0000 0,0058
K	0,0000 0,0002	0,0000 0,0009	0,0000 0,0010	0,0000 0,0022	0,0000 0,0047	0,0000 0,0062	0,0000 0,0056	0,0001 0,0109	0,0001 0,0127	0,0001 0,0104	0,0000 0,0049	0,0000 0,0041	0,0001 0,0054

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.21: Resultados por cuadrícula de la emisión/inmisión para Partículas (µg/m<sup>2</sup> s y µg/m<sup>3</sup> s)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A	0,0000 0,0003	0,0000 0,0015	0,0000 0,0055	0,0000 0,0127	0,0000 0,0206	0,0000 0,0329	0,0026 0,1240	0,0011 0,0847	0,0030 0,1509	0,0042 0,1780	0,0000 0,0336	0,0000 0,0158	0,0000 0,0104
B	0,0000 0,0061	0,0000 0,0057	0,0000 0,0125	0,0000 0,0235	0,0000 0,0310	0,0000 0,0544	0,0051 0,2262	0,0010 0,0996	0,0016 0,1170	0,0046 0,2083	0,0000 0,0514	0,0000 0,0271	0,0000 0,0180
C	0,0000 0,0049	0,0000 0,0132	0,0000 0,0179	0,0000 0,0326	0,0000 0,0426	0,0000 0,0704	0,0034 0,1895	0,0047 0,2517	0,0030 0,1899	0,0027 0,1655	0,0009 0,0914	0,0009 0,0847	0,0032 0,1376
D	0,0000 0,0235	0,0000 0,0235	0,0002 0,0443	0,0000 0,0538	0,0000 0,0738	0,0003 0,0856	0,0006 0,1369	0,0078 0,3682	0,0035 0,2453	0,0044 0,2580	0,0055 0,2794	0,0026 0,1551	0,0000 0,0430
E	0,0003 0,0409	0,0026 0,1414	0,0013 0,1238	0,0022 0,1798	0,0002 0,1360	0,0033 0,2754	0,0053 0,3512	0,0064 0,3895	0,0068 0,3992	0,0080 0,4119	0,0046 0,2681	0,0001 0,0818	0,0000 0,0402
F	0,0000 0,0405	0,0016 0,1246	0,0049 0,2779	0,0052 0,3558	0,0142 0,7110	0,0140 0,7637	0,0172 0,8898	0,0204 1,0091	0,0197 0,9311	0,0055 0,4103	0,0042 0,2777	0,0001 0,0985	0,0000 0,0481
G	0,0000 0,0194	0,0000 0,0464	0,0009 0,1250	0,0101 0,4718	0,0039 0,3259	0,0061 0,4260	0,0112 0,6731	0,0252 1,1144	0,0070 0,5291	0,0121 0,6158	0,0064 0,3815	0,0001 0,1086	0,0000 0,0442
H	0,0000 0,0179	0,0000 0,0339	0,0029 0,1568	0,0020 0,1760	0,0057 0,3296	0,0057 0,3901	0,0155 0,7270	0,0110 0,5980	0,0087 0,5068	0,0072 0,4128	0,0011 0,1715	0,0000 0,0747	0,0000 0,0488
I	0,0000 0,0062	0,0000 0,0206	0,0001 0,0380	0,0009 0,0823	0,0007 0,1296	0,0110 0,4894	0,0048 0,3192	0,0075 0,4127	0,0081 0,4140	0,0009 0,1824	0,0076 0,3443	0,0000 0,0920	0,0000 0,0320
J	0,0002 0,0174	0,0006 0,0343	0,0005 0,0426	0,0008 0,0707	0,0045 0,2088	0,0035 0,1829	0,0006 0,1111	0,0061 0,2975	0,0062 0,3113	0,0006 0,1012	0,0000 0,0700	0,0010 0,0810	0,0002 0,0408
K	0,0000 0,0015	0,0000 0,0060	0,0000 0,0071	0,0000 0,0155	0,0005 0,0333	0,0006 0,0437	0,0002 0,0389	0,0011 0,0771	0,0015 0,0855	0,0008 0,0710	0,0000 0,0331	0,0000 0,0283	0,0006 0,0386

Fuente: Elaboración propia

### 5.7 Representación de la emisión/inmisión mediante una aplicación SIG

Con el fin visualizar de forma rápida los resultados calculados para los diferentes contaminantes se han representado mediante un Sistema de Información Geográfica. Los mapas generados se encuentran en el apartado 6.3 (Representación gráfica de los valores de emisión e inmisión)

## 6. Interpretación de resultados

### 6.1 Metodología CORINAIR

Con respecto al consumo de combustible, se puede apreciar una disminución en esta cifra comparada con los datos obtenidos a partir de los consumos medios de los autobuses (información proporcionada por TUZSA), y que se recoge en la tabla 5.10 (*Kilogramos de combustible utilizados por los autobuses de TUZSA en las diferentes cuadrículas de la ciudad de Zaragoza*).

*Tabla 6.1 Comparación de los consumos obtenidos por distintas fuentes*

	Diario	Anual
Consumo con datos TUZSA (kg)	27.912	9.279.741
Consumo CORINAIR (kg)	23.446	7.779.399
Diferencia	4.466	1.500.342

Fuente: Elaboración propia

Varios son los motivos que pueden justificar este desfase, que ronda el 16%:

- En la flota de TUZSA encontramos dos tipos de vehículos: autobuses que gastan una media de 60 litros a los 100 km, mientras que los articulados (18 metros) consumen aproximadamente 78 litros/100 km. Esta clasificación no es necesaria para la aplicación de CORINAIR, ya que engloba a todos los autobuses en la misma categoría.
- La velocidad media comercial es de 14 km/h, pero el consumo aumenta ostensiblemente con las continuas paradas y aceleraciones que deben hacer los autobuses. Aunque se haya tenido en cuenta a la hora de formular el algoritmo, es difícil establecer exactamente cómo afecta.
- La propia limitación de la metodología CORINAIR

También se ha creído conveniente analizar los datos obtenidos de las dos metodologías, dado que se observan diferencias significativas:

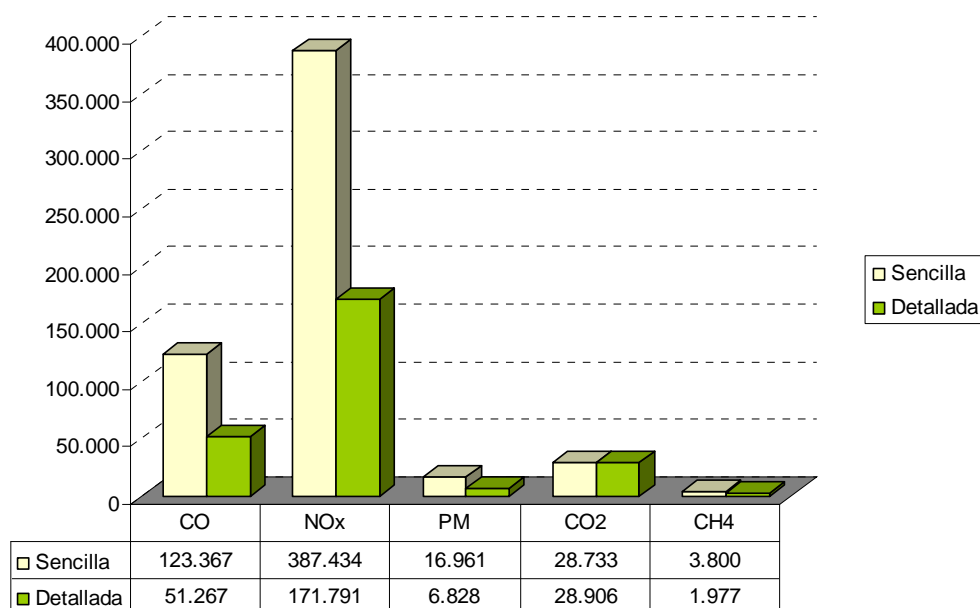


Figura 6.1: Comparativa de resultados obtenidos mediante metodología sencilla y detallada. Datos en kg/año, exceptuando el CO<sub>2</sub>, en Tm/año (Fuente: Elaboración propia). Se observa un aumento en las emisiones de la metodología sencilla en comparativa con la detallada, exceptuando el dióxido de carbono, cuyos registros son similares.

En concreto, las variaciones de la sencilla con respecto a la detallada son las siguientes:

- Monóxido de carbono: + 58,4%
- Óxidos de nitrógeno: + 55,7%
- Partículas: + 59,9%
- Metano: + 47,9%
- Dióxido de carbono: -0,6%

En principio, las diferencias observadas se podrían justificar si consideramos que la metodología detallada hace distinciones que la simple no realiza, como puede ser la velocidad, si bien es cierto que para la categoría de vehículos estudiada (autobuses urbanos), se conoce previamente que van a ser emisiones tipo “urbanas” (descartando carretera y autopista), y la velocidad de los autobuses está bien determinada en todos los casos, variando en diferencias mucho menores que la diferencia resultante en las emisiones.

Observemos la reducción por la mejora en los vehículos que se ha aplicado a CO (65,9%), NOx (54,7%), PM (65,9%) y CH<sub>4</sub> (40,4%). Si eliminamos ese porcentaje, la diferencia entre ambos métodos sería mucho menor:



Tabla 6.2: Emisiones anuales (kg) resultado de eliminar la disminución por Normativa Europea Euro.

Contaminante	Emisión anual sin reducciones por normativa europea(kg)
CO	146.897
NOx	403.265
PM	20.023
CH <sub>4</sub>	3.109

Fuente: Elaboración propia

De este modo, las diferencias entre las emisiones deducidas de la metodología sencilla en comparativa con la metodología detallada quedarían de la siguiente manera:

- Monóxido de carbono: -19,3%
- Óxidos de nitrógeno: -4,1%
- Partículas: -18,3%
- Metano: 18,4%

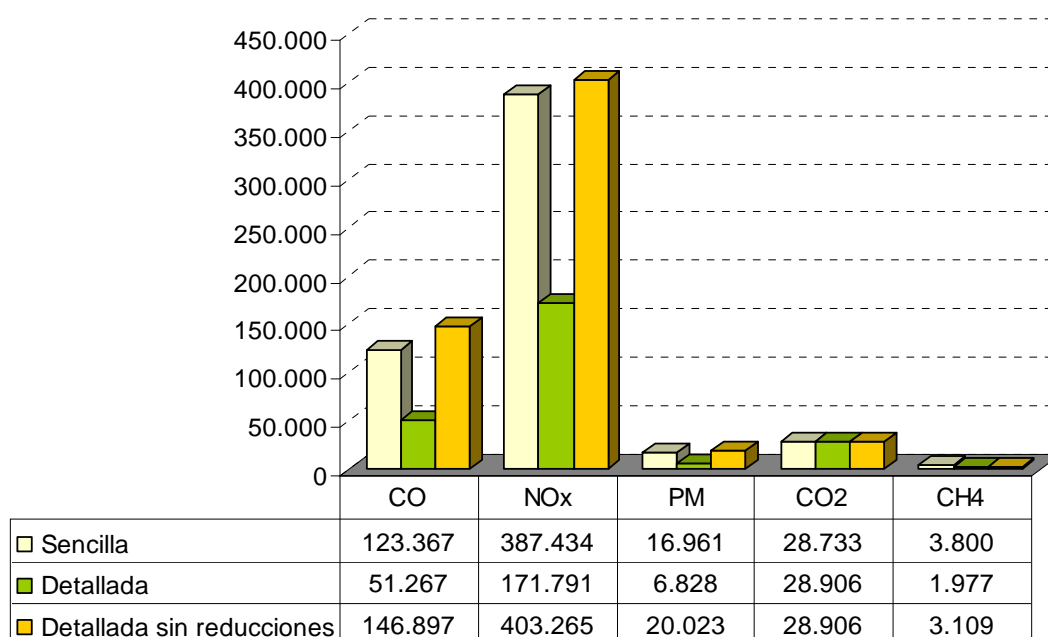


Figura 6.2: Comparativa entre las distintas metodologías (Fuente: Elaboración propia). Se observa que si no se aplica las reducciones por la Normativa Europea del autobús, los valores registrados entre el método sencillo y detallada son mucho más próximos.

## 6.2 Comparativa con datos obtenidos en 1996

En el año 1996 se realizó un inventario de las emisiones a la atmósfera en Zaragoza (Ayuntamiento de Zaragoza, 2000), procedentes de industrias, sistemas de calefacción y tráfico rodado. Incluidas dentro de este último apartado se encuentran las procedentes de “autobuses”, calculadas también mediante la metodología CORINAIR.

La diferencia entre aquel estudio y el presente se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 6.3: Diferencia en la emisión entre datos de 1996 y 2005 (kg/día)*

	<b>Autobuses 1996</b>	<b>% Autobuses 1996 respecto total</b>	<b>Autobuses 2005</b>	<b>Diferencia 1996-2005 (%)</b>
<b>SO<sub>2</sub></b>	13,93	7,28	1,86	-86,65
<b>NO<sub>x</sub></b>	836,92	17,24	527,80	-38,27
<b>CO</b>	1770,01	3,39	158,09	-91,29
<b>CO<sub>2</sub></b>	64337,78	8,98	86946,57	+35,14
<b>COVNM</b>	249,31	4,43	144,49	-41,93
<b>CH<sub>4</sub></b>	7,93	2,73	5,94	-25,09
<b>N<sub>2</sub>O</b>	2,94	3,42	1,60	-45,57
<b>PM</b>	91,19	35,56	19,42	-77,48
<b>NH<sub>3</sub></b>	0,29	0,41	0,16	-44,82
<b>Pb</b>	0,00024	0,05	0	100

Fuente: Elaboración propia y Ayuntamiento de Zaragoza (2000)

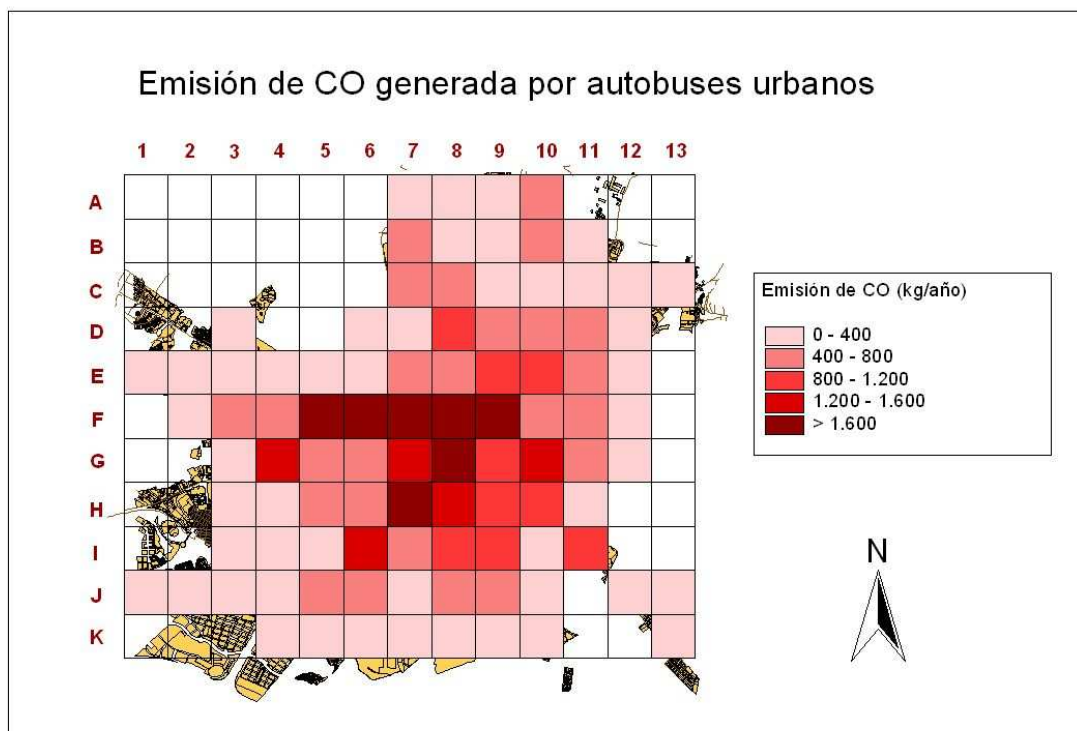
Los resultados de 1996 proceden de un inventario de emisiones, en el que para el apartado de tráfico, los datos fueron resultado de un muestreo en el exterior. Se entiende, aunque no viene reflejado, que en la categoría autobuses no sólo están incluidos los de la empresa TUZSA, aunque estos representan la gran mayoría

Por tanto, a la hora de establecer comparaciones, no se puede hacer de una manera estricta, a pesar de emplear la misma metodología en ambos estudios, la manera de alimentar el modelo ha sido distinta. De todos modos, sí que se pueden observar tendencias, algunas de las cuales ya han sido reflejadas a lo largo del trabajo:

- Actualmente no aparece plomo ya que no se utiliza ningún combustible con este metal pesado. De todos modos, la presencia de plomo en el estudio de 1996 puede deberse a una errata, ya que el plomo tan sólo está presente en la gasolina “súper”, ya desaparecida, mientras que todos los vehículos pesados (incluidos autobuses) utilizan gasóleo, que no contiene ninguna traza del metal.
- En los últimos 10 años, y según nos informaron fuentes de TUZSA, se ha producido un aumento en el tráfico de autobuses, puesto que se han incrementado tanto el número de líneas como la frecuencia de las mismas. Esta tendencia se ve reflejada en el aumento de emisiones de dióxido de carbono
- La obligatoriedad para el año 2005 de reducir en casi un 90% el contenido de azufre del gasóleo se ve claramente reflejada en la comparación, con una disminución que podemos considerar casi proporcional.
- La introducción de tecnología más desarrollada para cumplir las distintas Normativas Euro también ha repercutido en el descenso de la mayoría de contaminantes. En

especial, destacan la disminución para el monóxido de carbono y para partículas. Para éstas, es especialmente positivo, ya que tan sólo son emitidas por los motores diésel, por lo que un descenso en las emisiones de las partículas procedentes de los autobuses tiene una gran repercusión en la calidad del aire de la ciudad.

### 6.3 Representación gráfica de los valores de emisión e inmisión



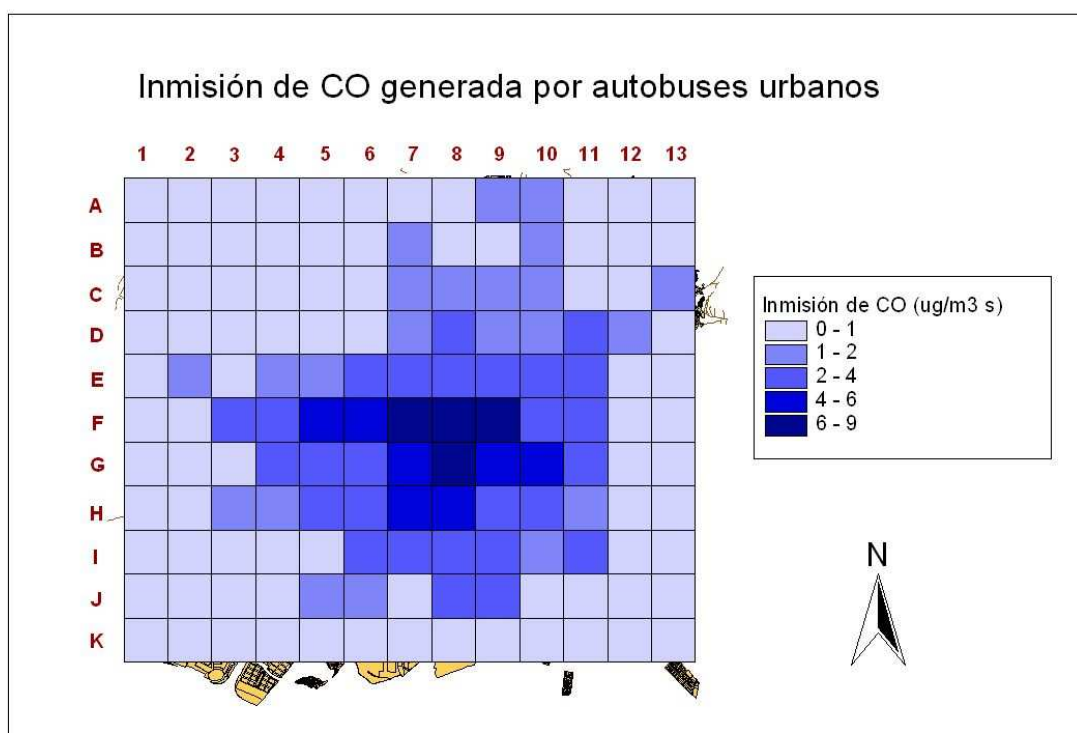
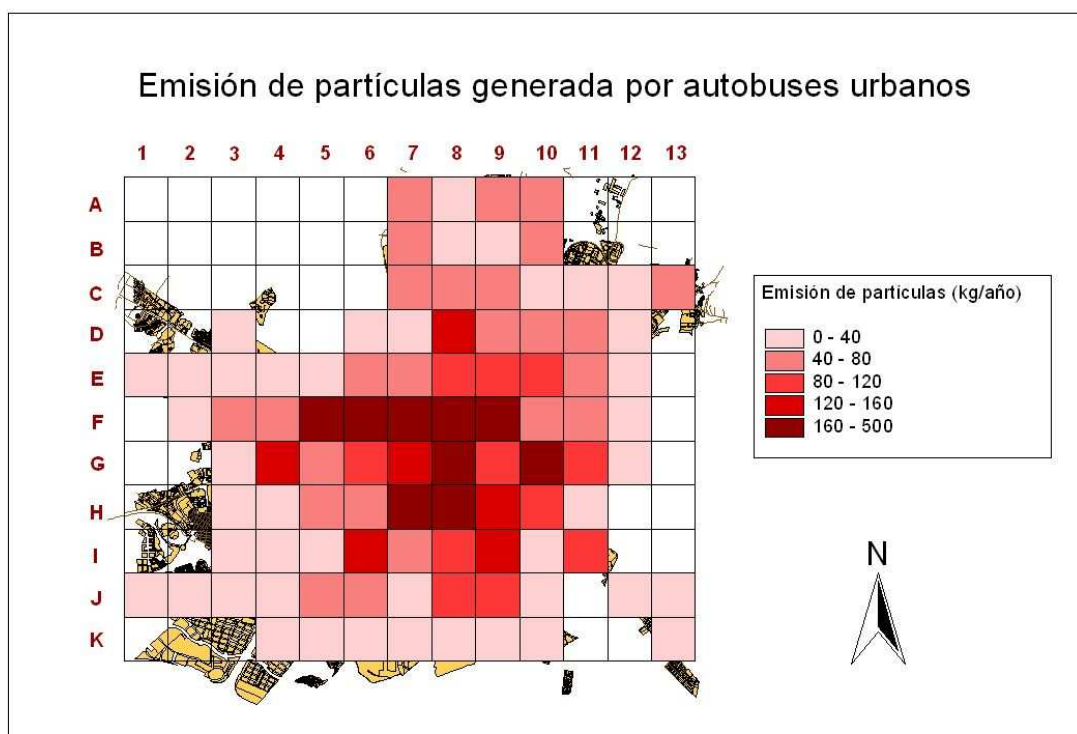


Figura 6.3 Mapas de emisión e inmisión de CO generadas por la flota de autobuses de la ciudad de Zaragoza (Fuente: Elaboración propia)



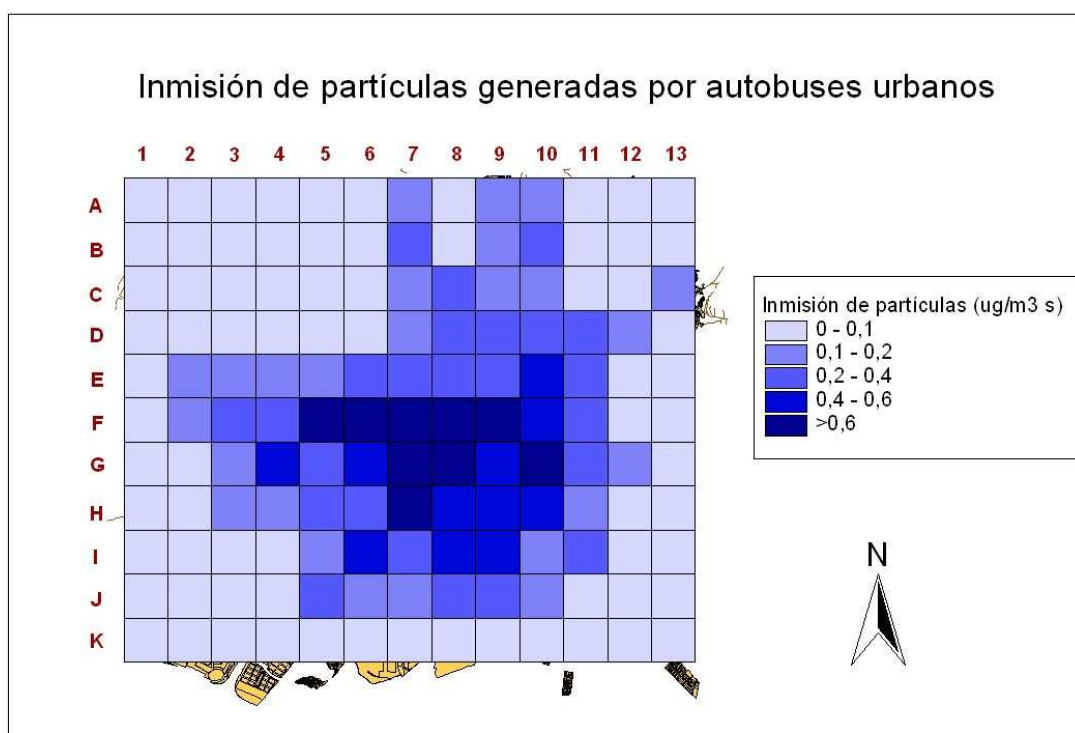


Figura 6.4 Mapas de emisión e inmisión de partículas generadas por la flota de autobuses de la ciudad de Zaragoza (Fuente: Elaboración propia).

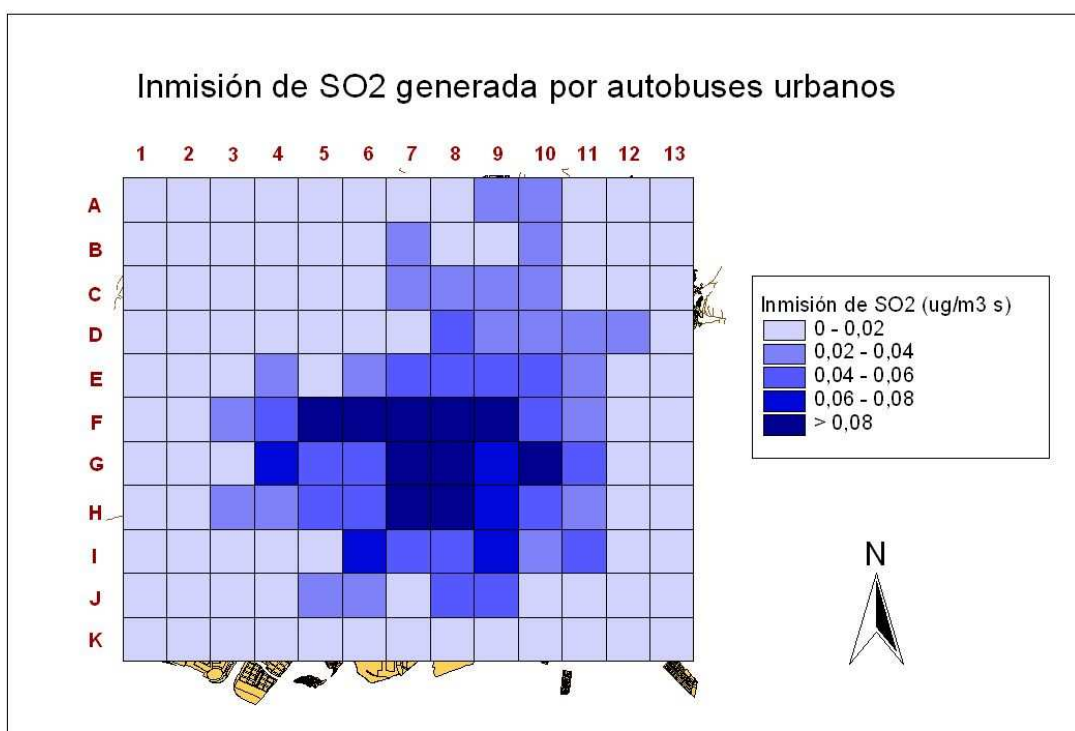
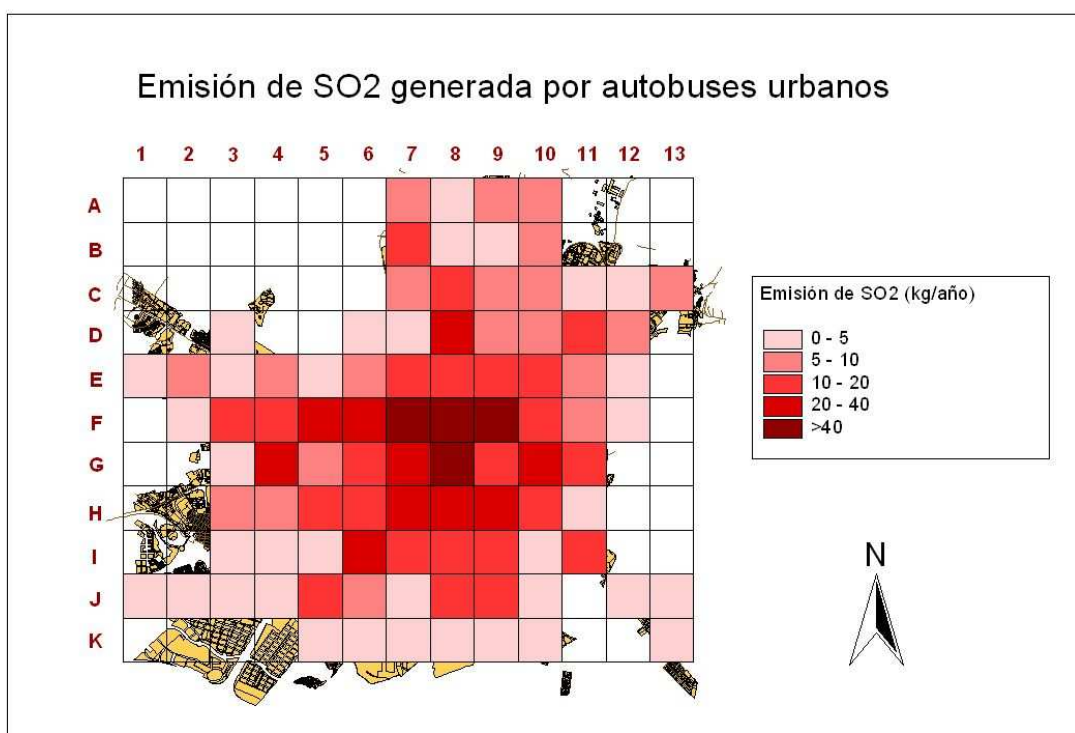


Figura 6.5 Mapas de emisión e inmisión de SO<sub>2</sub> generadas por la flota de autobuses de la ciudad de Zaragoza (Fuente: Elaboración propia)

En las capas SIG correspondientes a la emisión se observa como las cuadrículas F8, F9, F10 y G8 son las mayores emisoras, siendo esta última la que presenta los valores más altos de todas. En concreto corresponde a la Plaza Paraíso y todas las calles que

confluyen en ella: Paseo Pamplona, Paseo Gran Vía, Paseo Sagasta, Paseo Constitución y Paseo Independencia.

En otro escalafón menor estarían otras casillas localizadas en zonas también céntricas, la mayoría contiguas a las citadas. Por orden de mayor emisión situamos el cruce de María Agustín con Anselmo Clavé (F7) y la Plaza San Francisco (H7).

En un tercer nivel se encontrarían las casillas que envuelven a las anteriores, y que abarcan a los barrios de Torrero y Las Fuentes. En estas cifras también está la calle Miguel Servet, representada por la diagonal formada por las cuadrículas H10 e I11 cuyos valores son claramente superiores a los de las calles contiguas. Pese a que no tiene una gran concentración de líneas (hasta su cruce con Compromiso de Caspe tan sólo circula la línea 38), esta arteria es utilizada dada la situación de las cocheras de TUZSA (final de la misma), por lo que muchas líneas la emplean para volver o regresar.

Las emisiones en el norte de la ciudad son menores y son debidas principalmente a las líneas que cubren la Escuela de Ingenieros (B7) en el ACTUR, y a las que circulan por San Juan de la Peña y adyacentes

Asimismo, se observa un mismo patrón de distribución para los distintos contaminantes, como consecuencia de las características de la metodología CORINAIR.

Como comparación, en los mapas SIG generados para la inmisión deducida para los diferentes contaminantes, las casillas correspondientes al centro de la ciudad siguen teniendo los valores máximos, aunque se observa un ligero desplazamiento de la contaminación hacia las cuadrículas situadas más al sureste de las más emisoras. Los valores más altos se siguen obteniendo en la cuadrícula G8.

Esto es debido a la acción de los flujos del tercer cuadrante cuando actúan como vector de dispersión, proviniendo de rumbos WNW, NW y W mayoritariamente y desplazando ligeramente la polución hacia el este y sureste, pues además de las situaciones con fuertes intensidades de viento del tercer cuadrante (cierzo) en las que la fuerte ventilación es capaz de limpiar eficazmente cualquier contaminante en el área urbana, también en aquellas otras situaciones con un débil gradiente bórico, por las noches se establece un flujo catabático nocturno canalizado en el valle del Ebro que compensa y supera el flujo del sureste diurno, lo que da lugar al drenaje y desplazamiento de los núcleos más fuertes de contaminación hacia el sureste.

A su vez, observamos un incremento del área afectada por los contaminantes, a la par que una homogeneización de los valores calculados para las distintas cuadrículas, como es lógico tras aplicar un modelo de dispersión a las emisiones iniciales.

De todos los contaminantes tratados, la legislación vigente establece valores límites para las partículas, monóxido de carbono y dióxido de azufre; motivo por el que han sido seleccionados para su representación. Las directivas establecen diferentes límites de inmisión, habiéndose elegido los que resultan más restrictivos:

- Directiva 1999/30/CE:
  - o SO<sub>2</sub>: 20 µg/m<sup>3</sup> (promedio en año civil en invierno, para protección de los ecosistemas)
  - o PM<sub>10</sub>: 20 µg/m<sup>3</sup> (en un año civil de período promedio, para el año 2010)
- Directiva 2000/69/CE:
  - o CO: 10 mg/m<sup>3</sup> (Media de ocho horas máxima en un día)



Se observa que los resultados obtenidos están muy alejados del límite marcado por la ley. Incluso para partículas, que es un contaminante cuyo valor máximo es rebasado en algunas ocasiones en la ciudad, las cifras obtenidas son muy inferiores.

Esto se debe a que tan sólo estamos valorando una de todas las pueden considerarse nunca totalmente exactos. De todos modos, para la precisión en los objetivos de partida los posibles fuentes contaminantes. Además, los episodios de contaminación en Zaragoza suelen producirse con fenómenos meteorológicos concretos, como pudieran ser la persistencia de nieblas varios días consecutivos durante el invierno o días de verano en los que sopla bochorno.

## **7. Discusión y conclusiones**

Como resumen de los resultados mostrados, pasamos a considerar los siguientes aspectos:

- Respecto a metodología utilizada

El hecho de que el estudio se haya focalizado en una categoría de vehículos facilita el desarrollo de la metodología detallada de CORINAIR, ya que el proceso de recopilación de datos se simplifica notablemente. Esta metodología permite hacer un inventario general de las emisiones, válido para poder ser comparado en estudios posteriores, aunque en la emisión de contaminantes intervienen muchos factores de difícil cuantificación que no se tienen en cuenta.

No ha sido necesario realizar un muestreo de los vehículos en el exterior dado que son conocidos tanto los itinerarios como el número de autobuses que circulan. Esta forma de trabajo resulta laboriosa, pero creemos que es mucho más precisa. Además, es fácilmente extrapolable a otras ciudades, ya que se puede realizar con la información disponible en las páginas web de la mayoría de las empresas municipales de transporte, por lo que podría servir de ayuda en el proceso de toma de decisiones de otros ayuntamientos.

- Modelo de dispersión

El modelo de dispersión de contaminantes de Gifford-Hanna es un sencillo método de carácter empírico para relacionar las emisiones con las características meteorológicas de un área urbana, aunque no tiene en cuenta otros factores, como pudiera ser el papel de barrera de vientos de las aglomeraciones de edificios y consiguiente retención. Los resultados obtenidos tienen un carácter orientativo pero pueden servir para futuras comparaciones, aunque para una modelización más precisa sería necesario utilizar otros tipos de modelos más complejos basados por ejemplo, en la dinámica de fluidos. No obstante, es capaz de mostrar unos patrones en las concentraciones que son fácilmente interpretables en función de los datos de partida y los vectores dispersantes.

Los valores de inmisión (cantidad de contaminante que respira el individuo) obtenidos para emisiones procedentes de los autobuses, como era de esperar, son menores que los fijados por la legislación, ya que tan sólo estamos valorando una fuente de todas las posibles. Además, los episodios de contaminación en Zaragoza suelen producirse con fenómenos meteorológicos concretos, como pudieran ser la persistencia de nieblas varios días consecutivos durante el invierno. Estas situaciones son las más potencialmente



peligrosas, pues no sólo tienen un carácter local sino que toda la cubeta del valle medio del Ebro se ve afectada por la inversión térmica, con una ventilación prácticamente nula y una vez establecidas solo se destruyen con llegada de un sistema frontal con fuertes vientos de componente oeste asociados.

Asimismo, los periodos de verano en los que se mantiene una continuidad de vientos del sureste con poca o nula ventilación nocturna por los flujos del tercer cuadrante, se puede agravar el fenómeno puramente urbano por el transporte de una contaminación de fondo móvil que se traslada según el curso del río Ebro advectada por estos flujos de variación diurna.

- Respecto a los mapas generados

Los mapas SIG son una herramienta muy útil para interpretar de una manera más sencilla y visual los datos obtenidos en la metodología CORINAIR. Además, y con la misma cuadrícula generada, se podrían ver las variaciones en las emisiones para futuras líneas y comparar el esquema de emisiones de los autobuses con el general de la ciudad, añadiendo capas sobre el plano existente.

Mediante estos planos generados, se puede concluir que las emisiones procedentes de los autobuses urbanos siguen un esquema concéntrico, donde el núcleo, situado en el corazón comercial y bancario de la ciudad, recibe las mayores emisiones, y a su alrededor se van disponiendo casillas con menor emisión conforme se van alejando de este centro. De todos modos, una gran concentración de autobuses en la zona céntrica, con la contaminación atmosférica que ello supone, no debe considerarse perjudicial, ya que puede evitar muchas procedentes de vehículos privados. De hecho, las políticas actuales suelen ir ligadas a la potenciación del transporte público, acompañadas de una restricción al vehículo particular

- Respecto a estudios anteriores

En comparación con el inventario de emisiones a la atmósfera de 1996, y a pesar de que no se ha seguido el mismo esquema de trabajo, si que podemos extraer las siguientes conclusiones:

- La disminución en el contenido de azufre del gasóleo ha producido un espectacular descenso de las emisiones de dióxido de azufre
- La mejora de los motores ha permitido también disminuir las emisiones de varios contaminantes, especialmente de monóxido de carbono y partículas
- El aumento en el número de vehículos y la frecuencia de las líneas ha repercutido en el incremento de las emisiones de dióxido de carbono

- Respecto a la huella ecológica

Los resultados obtenidos nos muestran que la práctica totalidad de emisión de CO<sub>2</sub> equivalente procede del propio dióxido de carbono (casi el 99,5%). Las emisiones tanto del metano, como el dióxido de nitrógeno, a pesar de su superior capacidad para generar efecto invernadero, se pueden considerar insignificantes con respecto al dióxido de carbono. En relación con este último gas, la huella ecológica hallada para el transporte público de autobuses ha sido muy pequeña

Creemos que es un buen indicador mostrar los datos de contaminación en función de estos parámetros, ya que, de este modo, los datos obtenidos en futuros inventarios de emisiones serán más fáciles de comparar: por ejemplo, un aumento en el número de autobuses, si va acompañado del número de usuarios, no supondrá un aumento de las emisiones, ya que las estaremos cuantificando *per cápita*. Además, este indicador permite comparar las diferentes modalidades de viaje, y de este modo se puede hacer una aproximación de cuál es más sostenible.

## **8. Propuesta de medidas preventivas y correctoras**

Un estudio como el actual nos ha permitido conocer las emisiones debidas a la flota de autobuses urbanos en la ciudad de Zaragoza y compararla con la situación de hace 10 años.

Dado el actual momento de encrucijada, en que debido a la necesidad de adaptación a la nueva situación mundial derivada de la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto, que en España fue aprobado mediante el Real Decreto 5/2004, se prevé que los cambios tanto en los combustibles, como en el tipo de vehículos se van a producir con una mayor frecuencia y sin duda afectarán progresivamente a un alto porcentaje de la flota. Por lo tanto, este tipo de estudios sería conveniente volver a realizarlos en estos nuevos escenarios para poder cuantificar la idoneidad o no de las elecciones realizadas y medidas adoptadas, así como poder ser utilizados como documentos base para la toma de decisiones por parte de los Organismos competentes en la materia. Asimismo, deberán ser tenido en cuenta aquellos contaminantes para los que la actual metodología CORINAIR no se encuentra totalmente desarrollada o es presumible que se van a realizar modificaciones en su tratamiento y cuantificación.

A pesar de los bajos valores obtenidos, pasaremos a enumerar una posible lista de las actuaciones a realizar de cara a la reducción de la contaminación atmosférica, considerado los siguientes agentes:

- Administración: fijando límites cada vez más restrictivos en emisión e inmisión.
- Sector refino: mediante la mejora en la composición del combustible permite reducir notablemente las emisiones. De hecho, el gasóleo comercializado a partir de 2005 disminuye las emisiones de dióxido de azufre en un 90%
- Fabricantes: con la puesta en el mercado de tecnología más novedosa en los motores ha disminuido notablemente la emisión de la mayoría de contaminantes.
- Gestores: entendiendo como tales a las empresas de transporte municipal, apostando por la compra de vehículos o de combustibles menos contaminantes, así como una mejora en los hábitos de conducción.

Zaragoza es una de las pocas grandes ciudades españolas que no cuenta en su flota de autobuses con tecnología a gas o propulsados con biocombustible. En mayor o menor medida, Madrid, Barcelona, Valencia, Burgos, Salamanca, Valladolid, Málaga, Santander y más ciudades han incorporado tanto gas como biocombustibles.

En nuestro caso, el servicio de transporte público de autobuses, que está adjudicado a la empresa TUZSA perteneciente al grupo Avanza, cuenta con una subvención de casi un tercio de su coste por parte del Ayuntamiento de Zaragoza. Por tanto, creemos que es éste quien tiene la responsabilidad de cambiar el sistema de autobuses de la ciudad. La

entrada en vigor de la normativa europea sobre calidad del aire en los próximos años, cuyos límites son más restrictivos, justificaría más si cabe esta elección.

Además, la ciudad va a ser sede en 2008 de una exposición internacional, que si bien va a estar enfocada en los recursos hídricos, también se pretende mostrar una ciudad que apuesta por el desarrollo sostenible y que cuida el medio ambiente. El transporte público es un buen indicador de ambas, por lo que se podría mejorar la imagen de la ciudad de cara al exterior.

Estas medidas en absoluto serían contrarias a otras que actualmente se están planteando, como la implantación de una línea de tranvía o la propia reestructuración de las líneas de autobús urbano. Al contrario, creemos que es perfectamente complementario estudiar estas alternativas en estos momentos que parece que se está rediseñando el futuro del transporte público en la ciudad. Entendemos que los aspectos medioambientales deben ser incorporados en estas políticas de movilidad y tener la misma consideración a la hora de la planificación como los aspectos económicos o funcionales.

## Bibliografía

- Ayuntamiento de Zaragoza (2000): *Cuadernos Técnicos de Medio Ambiente 3. Estudio de las emisiones a la atmósfera en la ciudad de Zaragoza*. Edita Ayuntamiento de Zaragoza y Fundación San Valero. Zaragoza. 127 pp.
- Directiva 1999/30/CE del consejo de 22 de abril de 1999 relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente
- Directiva 2000/69/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de noviembre de 2000, sobre los valores límite para el benceno y el monóxido de carbono en el aire ambiente
- EMEP/CORINAIR (2002): *Atmospheric Emission Inventory Guidebook*. European Environment Agency. Third Edition.
- Instituto Nacional de Estadística (2006): *Censo de Población y Viviendas 2001. Cifras de población a 1-11-2001*.  
Accesible: <http://www.ine.es/inebase/cgi/axi>  
Acceso: 4/03/06
- Instituto Nacional de Meteorología. (1995): *Valores normales y estadísticos de estaciones principales (1961-1990)*. Observatorio Meteorológico de Zaragoza "Aeropuerto". Edita Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. 31 pp.
- Mantero, F. J. (1983): *Quaderns d'ecologia aplicada*. Barcelona. Pp:33-54
- Oficina de la Agenda 21 local de Zaragoza (2004): *Zaragoza y su huella ecológica*. Ayuntamiento de Zaragoza. 24 pp.
- Pasquill, F. y Smith, F. B. (1983): *Atmospheric diffusion*, Ellis Horwood Limited. West Sussex
- Tudela, J. C. (1999): *Rosas de viento de observatorios meteorológicos principales. Zaragoza "Aeropuerto" (período 1987-1996)*. Edita Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. 56 pp.
- TUZSA (2006): *"Información corporativa. Los autobuses de TUZSA."*. TUZSA.  
Accesible: [http://www.tuzsa.es/tuzsa\\_info\\_empresa/index.html](http://www.tuzsa.es/tuzsa_info_empresa/index.html)  
Acceso: 3/1/2006.
- Wackernagel, M. y Rees, W. (1996). *Our Ecological Footprint. Reducing human impact on Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers.