

ANEJO I

La congestión en los  
corredores de  
acceso a Madrid

METODOLOGÍA

Febrero 2009

**RACC**

**INDICE**

---

<b>1</b>	<b>DEFINICIÓN DE CONGESTIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>PROCESO METODOLÓGICO.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>CRITERIOS DE ESTABLECIMIENTO DEL ÁMBITO DE ESTUDIO.....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>FUENTES DE INFORMACIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES .....</b>	<b>24</b>

## 1 DEFINICIÓN DE CONGESTIÓN

---

El término congestión, tal como se considera en este trabajo, se define como “la acumulación de pérdidas de tiempo de transporte derivadas de la reducción de velocidad resultado de una demanda de tráfico superior a la capacidad del viario de acceso”.

La condición de “pérdida de tiempo” en relación a dos velocidades determina la relatividad del término. Así, se han establecido dos tipologías de congestión:

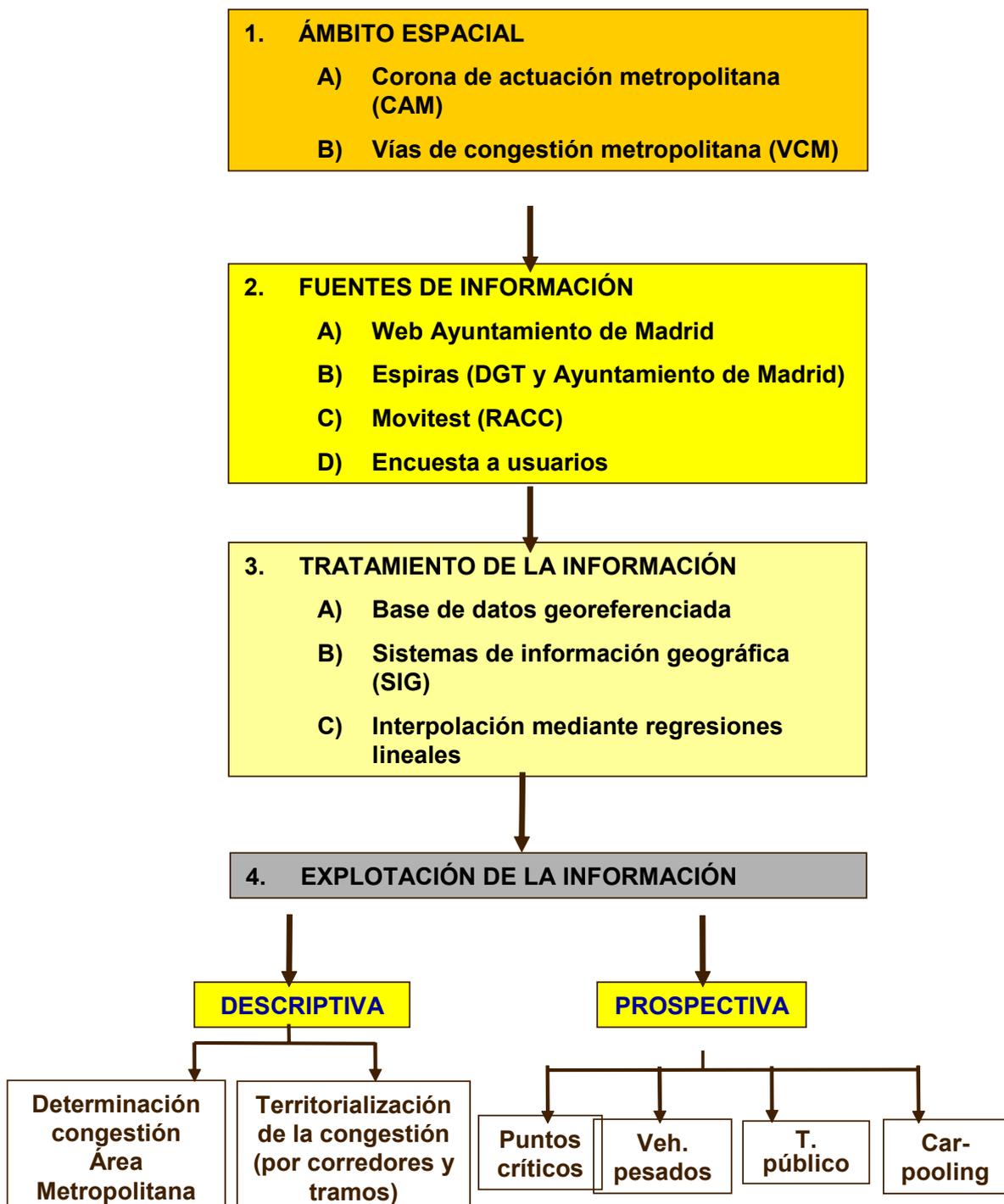
- **Congestión Efectiva:** Es el tiempo de demora resultante de la diferencia entre las duraciones de recorrido reales (en cada periodo del día considerado) y las que se producirían circulando a las seis de la mañana (supuesto de circulación a flujo libre).
- **Congestión Percibida:** Es el tiempo de demora resultante de la diferencia entre las duraciones de recorrido reales y las que el conductor considera como asumibles. Esta percepción del conductor, en términos de velocidad<sup>1</sup>, supone que éste identifica como congestión grave la reducción de velocidad que no supere el 50% de la velocidad de recorrido máxima en la vía correspondiente.

---

<sup>1</sup> En función de los resultados de la encuesta realizada a 2.500 conductores de la Región Metropolitana de Madrid

## 2 PROCESO METODOLÓGICO

El proceso metodológico a desarrollar para alcanzar los anteriores objetivos, que se describe en los siguientes capítulos, se concreta en el siguiente organigrama:



### 3 CRITERIOS DE ESTABLECIMIENTO DEL ÁMBITO DE ESTUDIO

---

Para establecer el ámbito de análisis se considera la conjunción de dos ámbitos de afectación:

- ✓ El ámbito en que residen o trabajan la gran mayoría de los ciudadanos que se ven afectados recurrentemente por la congestión: **Corona de Afectación Metropolitana (CAM)**.
- ✓ Los tramos de vía donde se presumiblemente se produce congestión de forma reiterada: **Vías Metropolitanas de Congestión (VMC)**. Se trata del ámbito territorial de afectación en que se producen reducciones de la velocidad debidas a la congestión.

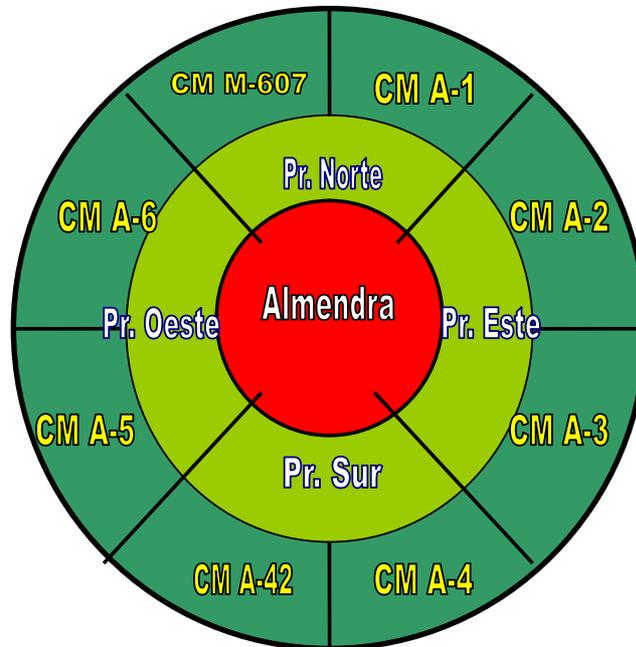
#### a) Corona de Afectación Metropolitana (CAM)

El ámbito definido como CAM incluye el área territorial en la que se insertan **los principales itinerarios del ámbito metropolitano, tanto los radiales** (viajes de acceso al centro metropolitano), **como los transversales/concéntricos y de paso** (de conexión entre las principales ciudades de la periferia).

**Los itinerarios se agrupan en corredores de movilidad**, a los cuales pertenecen aquellos municipios que utilizan los mismos itinerarios radiales. En este caso coinciden con los corredores que establece el Consorcio Regional de Transportes, y que prácticamente son uno por cada vía de acceso. Por lo que se refiere a los corredores transversales, únicamente se han considerado en el interior del término municipal de Madrid, distinguiendo la periferia entre las 4



**Ilustración 2. Áreas de influencia de la Corona de actuación metropolitana (CAM)**



**Ilustración 3. Datos demográficos por ámbito de estudio**

Ambito de estudio	Población	%
Madrid+Periferias	3.016.788	51,9%
Total A1	202.770	3,5%
Total A2	481.434	8,3%
Total A3	107.950	1,9%
Total A4	383.195	6,6%
Total A42	413.421	7,1%
Total A5	475.957	8,2%
Total A6	345.817	5,9%
Total A607	80.704	1,4%
<b>TOTAL</b>	<b>5.508.036</b>	<b>94,7%</b>

**Ilustración 4. Municipios objeto de estudio <sup>2</sup>**

MUNICIPIO	corredor	Pob.COM.MAD 5.813.853	%	hombres 2.965.065	mujeres 2.848.788	Distancia a Madrid (Km)	Superficie (km <sup>2</sup> )	Motorización (TUR/1000 Hab)
Madrid	A+P (S-N-E-O)	3.016.788	51,9%	1.538.562	1.478.226	0		
	<b>Total A+P</b>	<b>3.016.788</b>	<b>51,9%</b>				<b>606</b>	<b>546</b>
Alcobendas	A-1	104.118	1,8%	50.765	53.353	15		
Algete	A-1	18.176	0,3%	9.076	9.100	30		
Cobefia	A-1	4.293	0,1%	2.127	2.166	31		
San Agustín del Guadalix	A-1	8.832	0,2%	4.445	4.387	33		
San Sebastián de los Reyes	A-1	67.351	1,2%	33.245	34.106	18		
	<b>Total A1</b>	<b>202.770</b>	<b>3,5%</b>				<b>201</b>	<b>912</b>
Ajalvir	A-2	3.231	0,1%	1.681	1.550	27		
Alcalá de Henares	A-2	201.380	3,5%	101.351	100.029	31		
Coslada	A-2	83.233	1,4%	41.449	41.784	8		
Daganzo de Arriba	A-2	7.340	0,1%	3.735	3.605	31		
Loeches	A-2	5.450	0,1%	2.732	2.718	32		
Mejorada del Campo	A-2	21.052	0,4%	10.618	10.434	24		
Paracuellos de Jarama	A-2	7.586	0,1%	3.923	3.663	28		
San Fernando de Henares	A-2	40.048	0,7%	20.120	19.928	17		
Torrejón de Ardoz	A-2	112.114	1,9%	55.605	56.509	20		
	<b>Total A2</b>	<b>481.434</b>	<b>8,3%</b>				<b>340</b>	<b>510</b>
Arganda del Rey	A-3	45.085	0,8%	23.262	21.823	28		
Rivas-Vaciamadrid	A-3	53.459	0,9%	26.929	26.530	20		
Velilla de San Antonio	A-3	9.406	0,2%	4.816	4.590	32		
	<b>Total A3</b>	<b>107.950</b>	<b>1,9%</b>				<b>162</b>	<b>435</b>
Ciempozuelos	A-4	18.764	0,3%	9.589	9.175	35		
Getafe	A-4	156.320	2,7%	77.584	78.736	14		
Parla	A-4	95.087	1,6%	48.751	46.336	21		
Pinto	A-4	39.432	0,7%	19.895	19.537	21		
San Martín de la Vega	A-4	15.677	0,3%	8.237	7.440	32		
Torrejón de la Calzada	A-4	5.866	0,1%	2.931	2.935	26		
Torrejón de Velasco	A-4	3.532	0,1%	1.823	1.709	29		
Valdemoro	A-4	48.517	0,8%	24.346	24.171	27		
	<b>Total A4</b>	<b>383.195</b>	<b>6,6%</b>				<b>445</b>	<b>464</b>
Arroyomolinos	A-42	9.020	0,2%	4.652	4.368	28		
Fuenlabrada	A-42	193.715	3,3%	98.089	95.626	22		
Griñón	A-42	8.236	0,1%	4.213	4.023	31		
Humanes de Madrid	A-42	15.589	0,3%	8.070	7.519	26		
Leganés	A-42	182.471	3,1%	90.850	91.621	11		
Moraleja de Enmedio	A-42	4.390	0,1%	2.202	2.188	23		
	<b>Total A42</b>	<b>413.421</b>	<b>7,1%</b>				<b>171</b>	<b>519</b>
Alcorcón	A-5	164.633	2,8%	81.380	83.253	13		
Boadilla del Monte	A-5	37.926	0,7%	18.802	19.124	14		
Brunete	A-5	8.645	0,1%	4.333	4.312	33		
Móstoles	A-5	206.301	3,5%	102.998	103.303	18		
Navalcarnero	A-5	17.567	0,3%	8.893	8.674	31		
Villanueva de la Cañada	A-5	14.809	0,3%	7.200	7.609	38		
Villaviciosa de Odón	A-5	26.076	0,4%	12.731	13.345	22		
	<b>Total A5</b>	<b>475.957</b>	<b>8,2%</b>				<b>379</b>	<b>482</b>
Collado Villalba	A-6	52.083	0,9%	25.867	26.216	41		
Colmenarejo	A-6	7.308	0,1%	3.657	3.651	37		
Galapagar	A-6	28.924	0,5%	14.505	14.419	33		
Hoyo de Manzanares	A-6	7.210	0,1%	3.608	3.602	40		
Majadahonda	A-6	62.270	1,1%	29.694	32.576	18		
Pozuelo de Alarcón	A-6	79.581	1,4%	38.291	41.290	15		
Rozas de Madrid (Las)	A-6	75.719	1,3%	36.904	38.815	19		
Torrelodones	A-6	19.843	0,3%	9.647	10.196	29		
Villanueva del Pardillo	A-6	12.879	0,2%	6.396	6.483	27		
	<b>Total A6</b>	<b>345.817</b>	<b>5,9%</b>				<b>354</b>	<b>600</b>
Colmenar Viejo	M-607	40.878	0,7%	20.503	20.375	31		
Tres Cantos	M-607	39.826	0,7%	19.531	20.295	22		
	<b>Total A607</b>	<b>80.704</b>	<b>1,4%</b>				<b>221</b>	<b>431</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>5.508.036</b>	<b>94,7%</b>	<b>2.780.613</b>	<b>2.727.423</b>			

<sup>2</sup> Observatorio de la movilidad 2004, Comunidad de Madrid.

### **b) Vías Metropolitanas de Congestión (VMC)**

Se definen como el conjunto de los tramos de los itinerarios incluidos en la CAM en los cuales de forma recurrente se detecta congestión. Para ello se recoge, durante un período superior a 15 días, la información cualitativa de congestión que la administración proporciona mediante su página web.

El **límite interior** de la CAM se corresponde con el límite urbano semaforizado, donde la velocidad máxima permitida es de **50 Km/h**. Del mismo modo, quedan excluidas deliberadamente del análisis las vías urbanas, es decir, las que tienen velocidades de diseño inferiores a 50 km/h.

En cada corredor se identifican aquellos itinerarios que de forma continua **soportan al menos el 80 % de los vehículos por kilómetro** que discurren dentro del corredor, considerando siempre el itinerario completo. La población comprendida dentro de la CAM, se utilizará para referenciar los datos de congestión obtenidos.

Se consideran los itinerarios tanto de acceso al centro metropolitano, como de conexión con el corredor vecino (vías transversales). En este caso, el límite entre uno u otro corredor será el término municipal. Dentro de estos itinerarios transversales, se consideran las vías de circunvalación de la ciudad.

La red resultante de la aplicación de metodología desarrollada se muestra en el plano siguiente.

**Ilustración 5. Vías de congestión metropolitana (VMC)****Fuentes de información para obtener la CAM y el VMC**

- **Para la definición de la CAM:**
  - Datos de movilidad obligada
  - Datos de población por municipio
- **Para la definición de los itinerarios:**
  - Intensidades de tráfico de las vías de acceso y de paso (Datos de aforos de diferentes administraciones).
  - Datos de congestión recogidos en la web de la administración correspondiente.

**Ilustración 6. Vías de alta capacidad incluidas en las VCM**

Vía	Desde	Hasta	ENTRE PK		Total KM
A-1	Fuente del Fresno *	M30	24	10	14
A-2	Alcala de Henares *	M30	34	5	29
A-3	Perales de Tajuña *	M30	34	4	30
A-4	Ciempozuelos *	M30	28	6	22
A-42	Torrejon de la calzada *	M30	27	3	24
A-5	Navalcarnero *	M30	28	2	26
A-6	Torrelodones *	M30	27	7	20
M-607	Colmenar Viejo *	M30	32	9	23
M-501	Villaviciosa de Odon *	M40	8	0	8
M-511	M40	A5	5	0	5
M30	Circunvalación	-----	30	0	30
M40	Circunvalación	-----	60	0	60
M45	Circunvalación	-----	26	0	26
R2 (+Tramo M50)	Meco *	M40	30	0	30
R5	Navalcarnero *	M40	16	0	16
R4	Ciempozuelos *	M50	13	0	13
R3	Perales de Tajuña *	M40	29	0	29
M50	A6	A1	85	0	85
				<b>TOTAL</b>	<b>490</b>

(\*) Municipios más próximos

## 3.1 FUENTES DE INFORMACIÓN

---

### Información de tráfico

En España, excepto las comunidades autónomas de Cataluña y el País Vasco, la administración competente que proporciona la información de tráfico es la Dirección General de Tráfico.

La información abierta al público, puntualmente mediante servicios de información (radio, televisión..) pero de forma continua a través de Internet ([www.dgt.es](http://www.dgt.es)) es básicamente de **tipo cualitativo**.

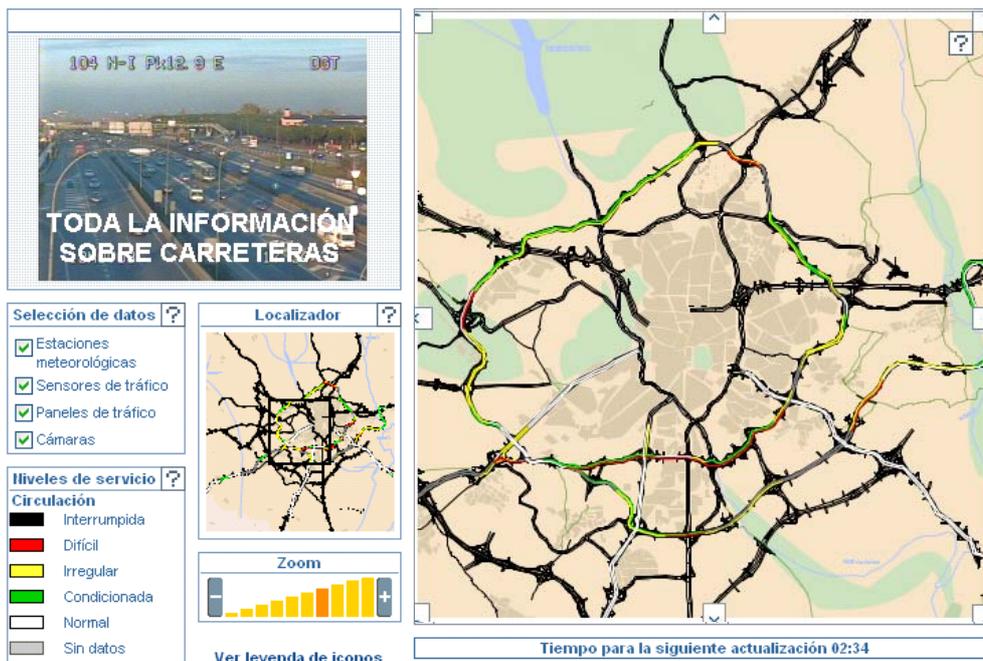
Una base de datos en continua actualización identifica los episodios de congestión en diferentes vías que no se encuentran relacionados con la saturación propia o natural de la vía, es decir, lo que se conoce como **incidencias**, como por ejemplo accidentes, averías o causas meteorológicas. Constituye un procedimiento importante para descartar episodios derivados de la congestión de otros con origen esporádico y así determinar correctamente las VMC.

Ilustración 7. Ejemplo de información de la Dirección general de tráfico, DGT

Tipo de Incidencia	Causas y observaciones	Provincia	Población	Fecha-Hora Inicial	Nivel	Nivel	Carretera	Km de-hasta	Sentido	Hacia
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	ALCOBENDAS	06/02/2007 8:50	●	AMARILLO	A-1	9.0 - 12.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	LAS ROZAS	06/02/2007 8:08	●	AMARILLO	A-6	13.0 - 17.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	ACCIDENTE	MADRID	MADRID	06/02/2007 8:24	●	ROJO	M-45	23.1 - 7.0	CRECIENTE DE LA KILOMETRICA	EXTERIOR
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	06/02/2007 9:17	●	AMARILLO	A-3	7.0 - 14.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	06/02/2007 9:05	●	AMARILLO	A-6	10.0 - 7.0	CRECIENTE DE LA KILOMETRICA	CORUÑA
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	06/02/2007 8:13	●	AMARILLO	M-607	14.0 - 10.0	CRECIENTE DE LA KILOMETRICA	COLMENAR
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	06/02/2007 9:12	●	AMARILLO	M-40	12.0 - 30.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	NORTE
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	06/02/2007 8:48	●	AMARILLO	A-2	5.0 - 10.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	06/02/2007 8:23	●	AMARILLO	M-40	36.0 - 34.0	CRECIENTE DE LA KILOMETRICA	A-6
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	06/02/2007 8:10	●	AMARILLO	A-6	5.0 - 11.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	06/02/2007 7:19	●	ROJO	A-5	4.0 - 5.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	06/02/2007 9:12	●	AMARILLO	M-50	32.0 - 44.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	A-3
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	06/02/2007 8:53	●	AMARILLO	A-4	5.0 - 13.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID

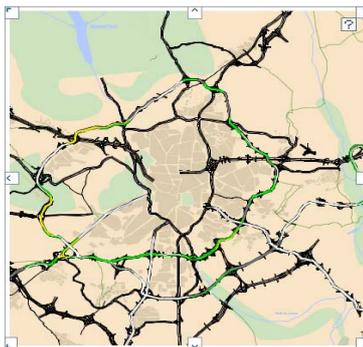
También se dispone de un Mapa continuo de tráfico donde los colores determinan el nivel de velocidad cualitativo de la vía (fluido, denso, congestión, etc.).

**Ilustración 8. Información de la Dirección general de tráfico, DGT**



### Ilustración 9. Ejemplo de base de datos generada.

Tipo de Incidencia	Causas y observaciones	Provincia	Población	Fecha-Hora Inicial	Nivel	Carretera	Km de-hasta	Sentido	Hacia
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	COLMENAR VIEJO	19/02/2007 9:21	AMARILLO	M-607	26.0 - 34.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	LAS ROZAS	19/02/2007 9:16	AMARILLO	A-6	14.0 - 18.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	19/02/2007 8:33	AMARILLO	A-6	7.0 - 10.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	19/02/2007 8:30	AMARILLO	A-2	6.0 - 10.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	19/02/2007 7:56	AMARILLO	M-45	23.0 - 20.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	A-2
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	MADRID	19/02/2007 9:19	AMARILLO	M-40	57.0 - 55.0	CRECIENTE DE LA KILOMETRICA	NORTE
RETENCION	ACCIDENTE	MADRID	MOSTOLES	19/02/2007 9:18	AMARILLO	A-5	20.0 - 26.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	POZUELO DE ALJARCON	19/02/2007 8:44	AMARILLO	M-503	6.0 - 10.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID
RETENCION	CIRCULACION	MADRID	TORREJON DE ARDOZ	19/02/2007 9:14	AMARILLO	A-2	25.0 - 29.0	DECRECIENTE DE LA KILOMETRICA	MADRID



### Aforos permanentes

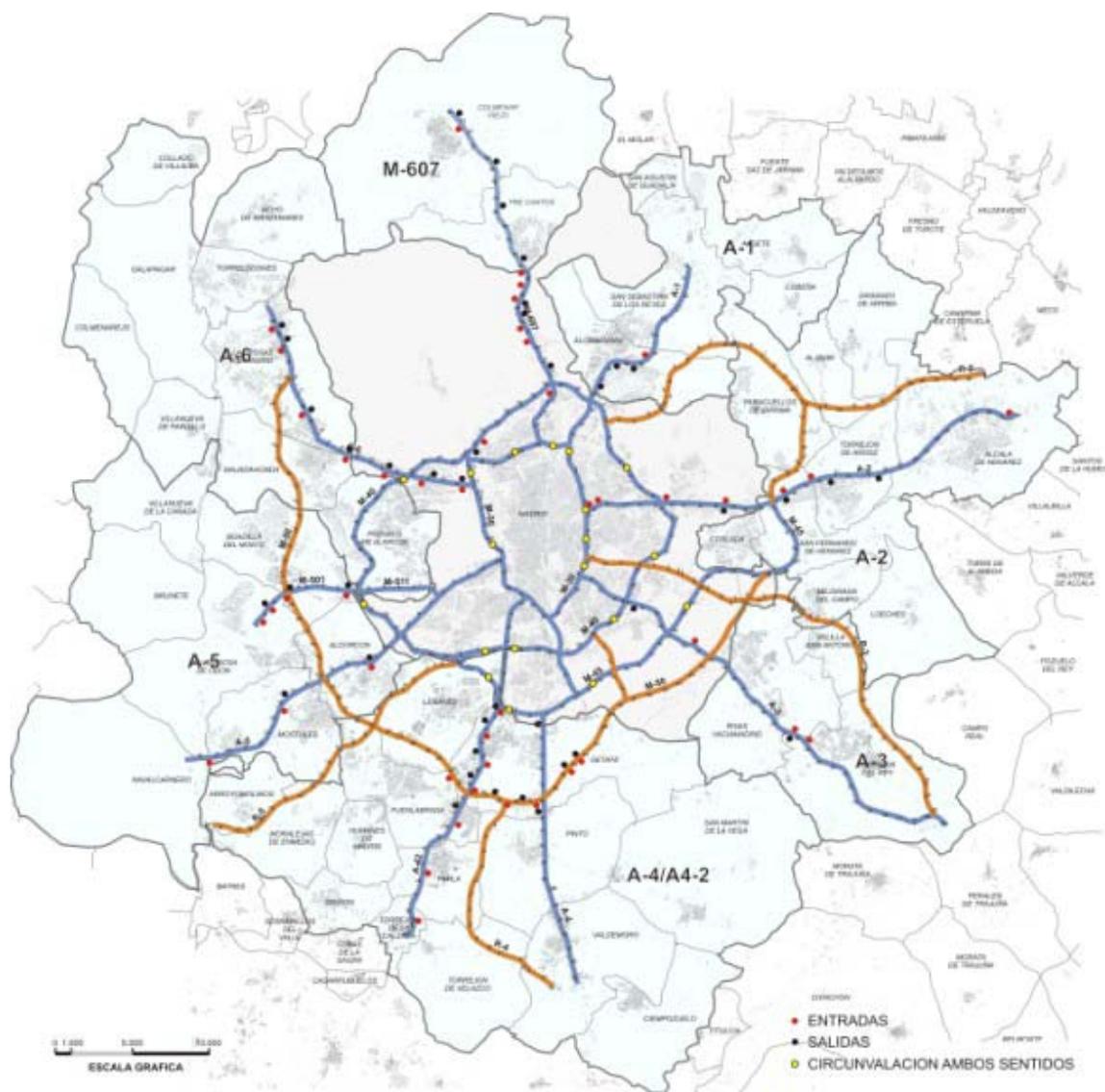
Sin embargo, la información base para el estudio la constituye la proporcionada por las estaciones de aforo permanente, ya que se trata de **información cuantitativa**. Más conocidas como **espiras**, se trata de aparatos conectados a unos filamentos metálicos situados debajo de la calzada que por inducción magnética son capaces de contabilizar el paso de un vehículo, su velocidad e incluso su tamaño. De este modo, a lo largo de las vías, se ubican estas estaciones a distancias más o menos regulares o en puntos estratégicos, situando en cada estación una espira por vía y carril.

La estación puede proporcionar de forma agregada el número de vehículos que pasan (denominada Intensidad Media de vehículos cuando se calcula para determinados períodos de tiempo), su

velocidad media o la proporción de vehículos pesados. Esta información puede agregarse para períodos determinados de 15 minutos (utilizado en este estudio) como de hora o de un día completo.

A continuación se detallan las espiras consideradas

### ***Ilustración 10. Plano ubicación espiras***



Los datos facilitados corresponden a los meses de febrero, abril, mayo y noviembre del 2007 por lo que se refiere a los aforos de la DGT y abril-mayo del 2007 por lo que respecta a la información facilitada por el Ayuntamiento de Madrid.

### **Movitest (Información de campo)**

El Movitest es un vehículo-laboratorio especialmente creado por la Fundación RACC para registrar datos de tráfico, medio ambiente y estado del pavimento. Permite recoger con facilidad la información de velocidades por tramo mediante la técnica del vehículo flotante (vehículo que circula dentro de la corriente de tráfico a una velocidad media de circulación). Estas mediciones empíricas se contrastan con los datos extraídos de las espiras sobre el terreno, con el doble objetivo de calibrar esa información y de permitir la interpolación en puntos en donde no existen espiras, o donde, simplemente, por cualquier motivo no funcionan correctamente.

Los itinerarios del *Movitest* se han iniciado con una antelación mínima de tres Km. desde donde se detectan evidencias de congestión (VCM). Se han controlado todas las vías comprendidas del ámbito VCM.

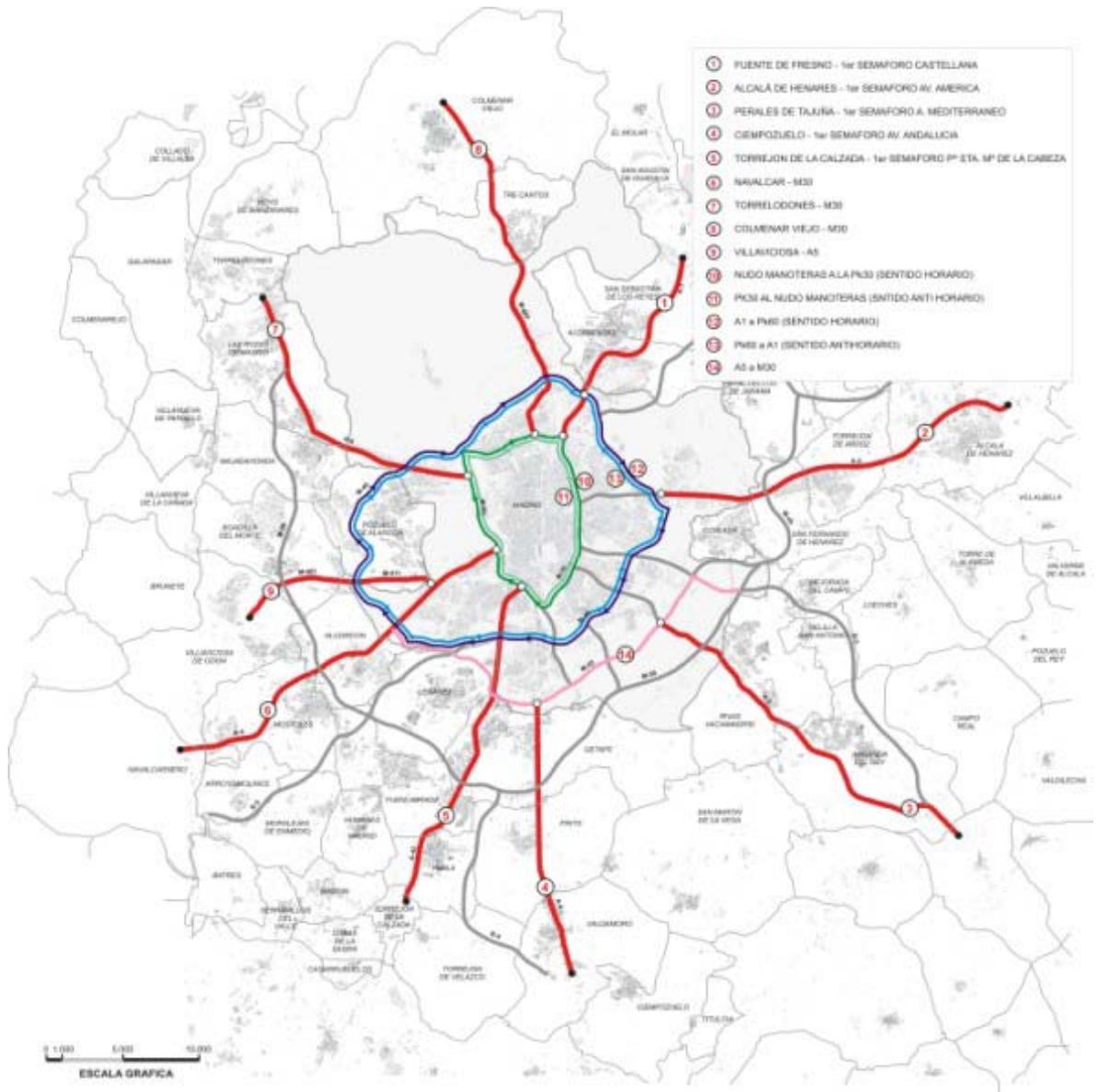
Los itinerarios se han realizado tanto de entrada como de salida, (ida y vuelta) con una duración aproximada de 1h, entre lunes y viernes en periodos de mañana y tarde.

El procedimiento para la toma de datos incluye las siguientes fases:

- Inventario vial: En la primera pasada se completa el inventario vial con objeto de determinar las especificaciones de velocidad autorizadas y las características morfológicas (número de carriles, existencia de arcén, etc.).
  
- Inventario de control: Para cada tramo definido se controla el tiempo trayecto (cada 1 km.) así como el número de paradas mediante un cinemómetro instalado en el vehículo que vía GPS transmitía la información a un ordenador central.

El periodo de recogida de información del *Movitest* se realizó en tres etapas: semana del **11 al 13**, del **16 al 19** y del **23 y 24 de abril** del 2007.

**Ilustración 11. Relación de itinerarios movitest**



### **Encuesta telefónica**

Se realiza una encuesta telefónica a usuarios regulares y cotidianos de la red viaria metropolitana que habitan dentro del ámbito de análisis (CAM) con intención de disponer de un valor aproximado de la congestión percibida por estos así como de su grado de aceptación de determinadas actuaciones o propuestas.

Es por este motivo que, la encuesta se diseñó para captar las opiniones de los conductores sobre determinados aspectos conflictivos del tráfico al que se enfrentan diariamente en los diversos corredores madrileños.

Los resultados que contiene este informe se refieren a ocho corredores que abarcan: los accesos desde cada una de las carreteras: Burgos, Madrid, Valencia, Andalucía, Toledo, Extremadura, Coruña y la ciudad de Madrid. En total se han realizado 3.200 encuestas a conductores.

Los principales objetivos que cubre la información recogida a partir de las entrevistas telefónicas a conductores habituales del corredor son los siguientes:

- ✓ Principales características socioeconómicas de los conductores
- ✓ Accesos y uso de vías para llegar a Madrid
- ✓ Determinar a partir de qué momento el usuario percibe que hay congestión
- ✓ Averiguar porque no utiliza el transporte público
- ✓ Recoger las propuestas de nuevas infraestructuras para el corredor

## 4 TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

---

### **Creación de un sistema georeferenciado de información: Sistema de Información Geográfica (SIG) de la red viaria a analizar**

La información cuantitativa de tráfico recogida por los Aforos permanentes o **espiras**, o cualquier otro dato geométrico referido a la vía, conforma una *Base de Datos alfanumérica*, cuyos registros deben corresponderse de forma biunívoca con elementos de una *Base de datos gráfica*, es decir, con fragmentos de la representación gráfica referenciada geográficamente de la red viaria.

La asociación de ambas bases constituye lo que se denomina un Sistema de Información Geográfica (SIG). La representación gráfica se obtiene de cartografía ya existente a la cual se le pueden crear o añadir modificaciones pertinentes para ajustar ambas bases de datos. Tanto los registros numéricos como los gráficos deben tener un elemento en común para poder ser correlacionados.

### **La base de datos gráfica**

En general se puede comenzar ya trabajando sobre una base georeferenciada ya existente de la red viaria metropolitana, al cual se le realizan las siguientes modificaciones.

- ✓ Se realiza una segmentación de la red en unidades de análisis correspondiente a **tramos de 1 km**, coincidente cada extremo del tramo con puntos kilométricos oficiales (denominados *PK*). En el caso de que alguna vía tuviera un doble kilometraje como consecuencia de una doble terminología de la vía se considera la que se refleja sobre el terreno. Cada tramo se codifica de forma única con el nombre de la vía y PK según el sentido de circulación.

- ✓ La conexión entre las diferentes vías, especialmente en los enlaces múltiples se simplifica considerando el enlace como un solo tramo.
- ✓ En cada tramo queda desagregado el sentido de circulación de **entrada** o **salida** del corredor hacia la población centro de la corona de actuación metropolitana (CAM). En **las vías transversales** se diferencian en base a los puntos cardinales.

### **Creación de la Base de Datos del SIG**

La base de datos numérica está formada por registros cuyos distintivos identificadores esenciales están formados por un código mixto constituido por la denominación de la vía y los PK de inicio y final según el sentido de circulación, correspondiente a cada tramo de vía de 1km.

El periodo temporal para evaluar la congestión se circunscribe a los días laborables de lunes a viernes<sup>3</sup>, durante el periodo diurno comprendido entre las 6h y 22h, es decir, la congestión evaluada es la correspondiente a un día laborable en periodo lectivo. Por lo que se refiere a las unidades temporales, se establece como unidad de análisis el periodo de 15 minutos.

Como campos adicionales de cada tramo definido aparecen las variables de información de **velocidad (km/h)** y **la intensidad (vehículos por cuarto de hora) para cada cuarto de hora**, lo cual obliga a disponer dos archivos de valores por cuarto de hora durante un total de 18 horas, uno para cada variable de información.

---

<sup>3</sup> En el caso del viernes se considera únicamente el periodo de mañana.

Archivo de intensidades de vehículos por tramo y períodos de 15 minutos. Los campos introducidos son los siguientes:

**Archivo 1** *Intensidad media de tráfico cada 15'*

TRAMOS	H/6:00	H/6:15	H/...	H/22:00
A2-pk <sub>i</sub>	Num. Vehíc(*)			
A2-pk <sub>(i+1)</sub>				
....				
A2-pk <sub>f</sub>				

**Archivo 2** *Velocidad media de circulación*

TRAMOS	H/6:00	H/6:15	H/...	H/22:00
A2-pk <sub>i</sub>	Velocidad media (*)			
A2-pk <sub>(i+1)</sub>				
....				
A2-pk <sub>f</sub>				

(\*) Se registra la media de los días considerados, descartando aquellas incidencias recogidas de la información de tráfico ya que modificarían las medias reales de un día tipo.

*En el proceso de selección de datos se desestiman los errores en la información recogida por las espiras, los datos con valor negativo y los estadísticamente desviados (superiores a la desviación estándar del periodo comprendido).*

### Ilustración 12. Creación codificación de tramos para la vía A-1 (Madrid)

E/S		6:00	6:15	6:30	6:45	7:00	7:15	7:30	7:45	8:00
E	A1_24-23	100	99	97	96	95	93	92	90	87
E	A1_23-22	101	98	94	91	88	84	81	78	74
E	A1_22-21	102	98	93	89	85	80	76	72	68
E	A1_21-20	103	99	94	90	86	81	77	75	73
E	A1_20-19	104	99	94	89	83	78	73	68	64
E	A1_19-18	105	91	77	63	48	34	20	20	19
E	A1_18-17	106	107	107	92	80	62	33	42	43
E	A1_17-16	105	95	85	75	66	56	46	45	45
E	A1_16-15	103	96	89	82	75	68	61	59	56
E	A1_15-14	102	95	89	82	75	69	62	62	61
E	A1_14-13	101	95	88	82	76	70	64	60	55
E	A1_13-12	99	94	90	85	80	75	70	62	53
E	A1_12-11	98	89	80	71	62	53	44	39	33
E	A1_11-10	97	85	74	63	52	40	29	26	22
E	Enlace_A1-M30	98	84	70	57	43	29	15	14	13

### Interpolación de datos

Una de los aspectos fundamentales para viabilizar la cuantificación del fenómeno de congestión es la recopilación estratégica de los datos de velocidad de circulación y la adecuada interpolación en los tramos y franjas temporales en que no se disponen datos de espiras o del información de campo (Movitest).

El proceso de interpolación recomendado es lineal, en base al siguiente protocolo:

- Se consideran las mediciones medias proporcionadas por las *Espiras* en periodos de 15 minutos, por cada tramo kilométrico sobre el que se dispone de información. Ello genera matrices de 65 periodos horarios por día: segmentos de 15 minutos durante 16 horas. (ver anejo VII)
- Se utilizan los datos recogidos por el vehículo *Movitest* como calibrador del sistema, descartando aquellas espiras en que tras una doble medición del *Movitest* se obtienen diferencias acusadas. El valor de referencia será el obtenido por el

*Movitest*. Este valor también es el que se considera para los enlaces, al no disponer de información de las espiras.

- En concreto para la interpolación de los datos se utiliza:

$$V_{tn} = V_{Te} \cdot F_m$$

(1)

Donde:

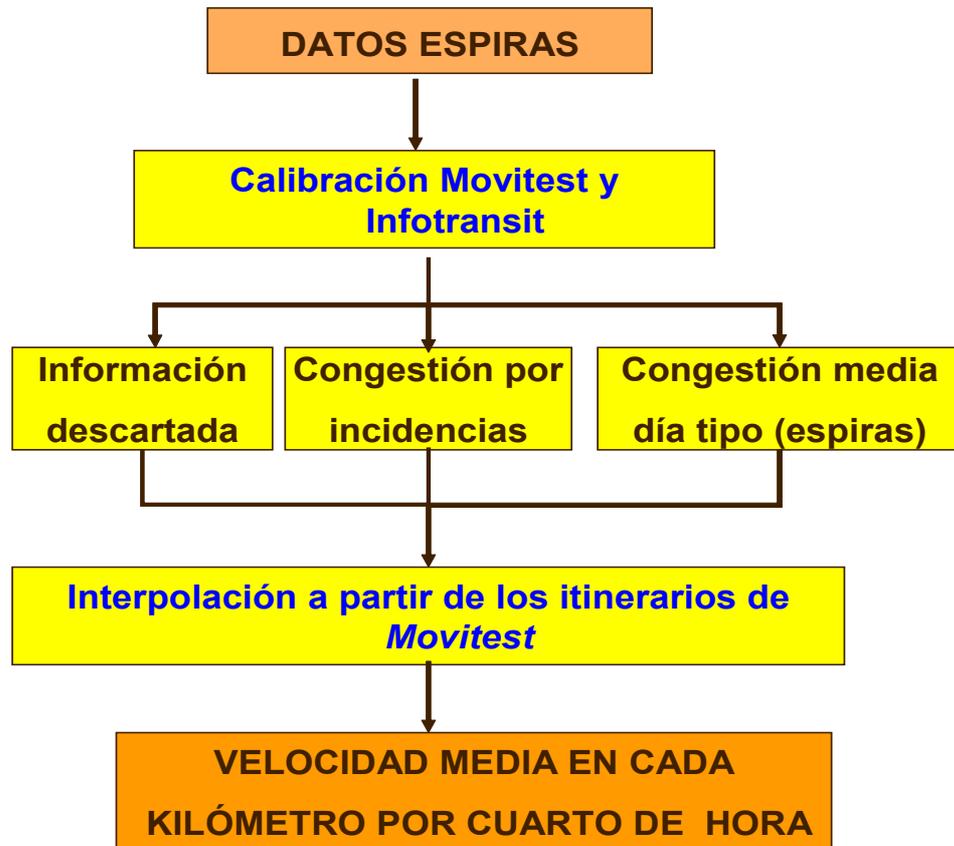
$V_{tn}$ : Velocidad en el tramo en que no se dispone de información de espiras

$V_{Te}$ : Velocidad de la espira más próxima

$F_m$ : Factor *Movitest*: Porcentaje de variación de la velocidad del *Movitest* del tramo objeto de estudio ( $V_{Tn}$ ) respecto a la velocidad del *Movitest* del tramo de que se dispone de información de espiras ( $V_{Te}$ ). Si no se dispone de información del periodo concreto, se aplica el porcentaje de variación del periodo horario más próximo.

- Por lo que se refiere a las interpolaciones de intensidades de tráfico, se aplica la misma **IMD** de la sección más próxima, siempre y cuando no haya salidas o incorporaciones. Si las hubiera, se aplicará la media de los datos de espiras disponibles, anteriores y posteriores.

Una vez calibrados, se construye la base de datos que conforma la parte alfanumérica del sistema de información geográfica (GIS), como se detalla en el esquema siguiente:

**Ilustración 13 Proceso de tratamiento de la información**

## 5 DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES

---

Un objetivo fundamental es la definición de un conjunto de Indicadores capaces de describir de forma sintética el estado de la congestión de una red viaria determinada, en un determinado momento y sus consecuencias sobre los usuarios o sobre el entorno.

Los Indicadores deben constituir valores cuantitativos (con unidades o normalizados como índices) contruidos a partir de las variables de intensidad y velocidad media pero cuya interpretación permite realizar conclusiones cualitativas.

El SIG permite realizar agregaciones geográficas específicas de los indicadores, constituyendo así una herramienta muy eficaz de análisis o evaluación para diferentes escalas. Por ejemplo pueden realizarse valoraciones por tramo de vía, para una vía específica completa, para un conjunto de vías que conforman un corredor, para varios corredores o para el conjunto del ámbito metropolitano.

Así, los indicadores se definen geográficamente utilizando como unidad básica cada tramo de la vía. Su agregación permite Indicadores de mayor alcance territorial. Por otra parte su contenido atiende a los parámetros principales de **Tiempo** perdido y **Coste**, tanto en **términos absolutos geográficos (tramos, vías, corredores...)** para el conjunto de la red, como en términos individuales, es decir, relativos además cada usuario o vehículo que utiliza la red de determinada parte de esta.

### **Definición de variables básicas:**

- ✓ **Intensidad Media de vehículos por 15' (IM15):** Núm. de vehículos que circulan por un tramo determinado de vía de longitud **I** durante un período de 15 minutos (15')

- ✓ **Velocidad media por tramo a 15' (vt):** velocidad media detectada por espiras del núm. de vehículos que circulan por un tramo determinado de vía de longitud  $l$  durante un período de 15 minutos (15')
- ✓ **Velocidad de referencia (vm):** velocidad media registrada en una vía determinada a las 6:00 (flujo libre, sin congestión) para el caso de considerar congestión efectiva. El caso de congestión percibida sería la mitad de la anterior.

A partir de las variables básicas y su relación con el territorio (donde) con el tiempo (cuando) y con el usuario que se ve afectado (quien) permite configurar la relación de indicadores que permiten analizar el fenómeno de la congestión en un área determinada.

Parámetros considerados para crear los Indicadores

ÁMBITO (donde)	PERIODO (cuando)	CAMPO ( de quien)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Red total</li> <li>▪ Corredor</li> <li>▪ Vía</li> <li>▪ Funcional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Franja horaria</li> <li>• Día</li> <li>• Año</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vehículos</li> <li>• Usuarios</li> <li>• Habitantes</li> </ul>

A) POR TRAMO

(A1)  $T_{pt}$  : **Tiempo medio perdido por franja horaria (por vehículo en un tramo determinado y por periodo (i) de 15' )**

$$T_{pt} = (l / V_{ti} - l / V_{mi}); \equiv V_m > V_t \quad (2)$$

$$T_{pt} = 0; \equiv V_m \geq V_t$$

(3)

Donde:

 $l$  = Longitud del tramo  $j$  $V_m$  = Velocidad de referencia <sup>4</sup> (km/h) $V_t$  = Velocidad media de circulación registrada en espiras (km/h) $i$  = Número de periodos o intervalos de tiempo de 15' ( $i=1, 2, \dots, 65$ ), correspondiendo  $i=1$  a las 6:00;  $i=65$  a las 22:00 $j$  = Número de tramo de cada vía ( $j= 1, 2, \dots, n$ )

**(A2)  $T_{ptm}$  : Tiempo perdido por franja horaria y tramo (al día)**

$$T_{ptm} = \sum_{i=1}^{65} (T_{pt_i} \cdot Vh_i) \quad (4)$$

Donde:

 $i$  = Número de periodos o intervalos de tiempo de 15' ( $i=1, 2, \dots, 65$ ), correspondiendo  $i=1$  a las 6:00;  $i=65$  a las 22:00 $Vh(IM 15)$  = Vehículos que circulan por un determinado tramo de vía durante 15'

**(A3)  $T_{ptd}$  : Tiempo total perdido al día, en un determinado tramo.**

$$T_{ptd} = \sum_{i=1}^{65} (T_{pt_i} \cdot Vh_i) \cdot Omv$$

(5)

Donde:

<sup>4</sup> Está dependerá en función de considerar la congestión efectiva (velocidad media registrada en la vía a las 6h.) o la congestión percibida (velocidad media registrada en la vía a las 6h. x 0,5)

$i$  = Número de periodos o intervalos de tiempo de 15' ( $i=1,2,\dots,65$ ), correspondiendo  $i=1$  a las 6:00;  $i=65$  a las 22:00

$Vh(IM\ 15)$  = Vehículos que circulan por un determinado tramo de vía durante 15'

$Omv$  = Ocupación media del vehículo

## B) POR CORREDOR

**(B1)  $Hpc$  : Horas perdidas al día por corredor**

$$Tpt = \sum_{i=a}^n (Tpt_a + Tpt_{b+\dots} + Tpt_n) \quad (6)$$

Donde:

$a,b,\dots,n$ . = Números de tramos

**(B2)  $Vac$  : Vehículos afectados por la congestión**

$$Vac = Vh_e + Vh_t \quad (7)$$

Donde:

$Vh$  = Vehículos que a lo largo del día sufren congestión percibida en un tramo determinado.

$e$  = Tramo en que un mayor número de vehículos sufre congestión de cada uno de los itinerarios de entrada a la ciudad

$t$  = Tramo en que un mayor número de vehículos sufre congestión en el itinerario transversal de conexión con otros corredores.

**(B2)  $Vacp$  : Vehículos afectados por la congestión en hora punta**

$$Vacp = Vhp_e + Vhp_t \quad (7)$$

Donde:

$V_{hp}$  = Vehículos que de 8h. a 9h. circulan por un tramo determinado.

$e$  = Tramo en que un mayor número de vehículos sufre congestión de cada uno de los itinerarios de entrada a la ciudad

$t$  = Tramo en que un mayor número de vehículos sufre congestión en el itinerario transversal de conexión con otros corredores.

**(B3)  $V_{bc}$  : % de coches afectados por la congestión**

$$V_{bc} = \frac{V_{ac}}{(C_{t_e} + C_{t_t})} \quad (8)$$

Donde:

$C_t$  = Vehículos que circulan entre las 6h. y las 22 h.

**(B4)  $T_{pc}$  : Tiempo medio perdido por conductor afectado por la congestión**

$$T_{pc} = \frac{H_{pc} \cdot f}{V_{ac}} \quad (9)$$

Donde:

$f$  = % de factor de corrección para determinar las horas pérdidas efectivas de los usuarios afectados por la congestión percibida.

**(B5)  $T_{pcp}$  : Tiempo medio perdido por conductor afectado por la congestión en hora punta**

$$T_{pcp} = \frac{H_{pm} + H_{pt}}{V_{acp}} \quad (9)$$

Donde:

$H_{pm}$  = Horas perdidas por la congestión de 8h. a 9h en el sentido de entrada.

$H_{pt}$  = Horas perdidas por la congestión de 18h. a 19h en el sentido de salida.

**(B6)  $ICV$  : Índice de congestión viaria**

$$ICV = \sum_{i=1}^{65} (T_{40} / T_t) \quad (9)$$

Donde:

$T_{40}$  = Tramos de la VCM (vías de congestión metropolitana) en que la velocidad media de circulación es inferior a 40 km/h.

$T_t$  = Total de tramos de la VCM (vías de congestión metropolitana)

**(B7)  $IES$  : Índice de eficiencia social**

$$IES = \sum_{i=1}^{65} (T_{40-80} / T_t) \quad (9)$$

Donde:

$T_{40-80}$  = Tramos de la VCM (vías de congestión metropolitana) en que se circula entre 40 km/h y 80 km/h

$T_t$  = Total de tramos de la VCM (vías de congestión metropolitana)

**(B8)  $IES$  : Índice de eficiencia individual**

$$IES = \sum_{i=1}^{65} (T_{80} / T_t) \quad (9)$$

Donde:

$T80$  = Tramos de la VCM (vías de congestión metropolitana) en que se circula a más de 80 km/h

$Tt$  = Total de tramos de la VCM (vías de congestión metropolitana)

C) GLOBALES

(C1)  $Hpg$  : **Horas perdidas en el acceso a la ciudad X**

$$Hpg = \sum_{i=1}^n (Hpc_1 + Hpc_{2+\dots} + Hpc_n) \quad (10)$$

Donde:

1,2.....n= Número del corredor

(C2)  $Hpgh$  : **Horas perdidas por habitante**

$$Hpgh = \frac{Hpg}{Hm} \quad (11)$$

Donde:

$Hm$  = Número habitantes de la CAM

(C3)  $Vagc$  : **Vehículos totales afectados por la congestión**

$$Vagc = \sum_{i=1}^n (Vac_1 + Vac_{2+\dots} + Vac_n) \quad (12)$$

Donde:

1,2.....n= Número del corredor

(C4)  $Vbgc$  : **% de Vehículos afectados por la congestión**

$$Vbgc = \frac{Vagc}{(Ct_1 + Ct_2 + \dots Ct_n)} \quad (13)$$

(C5)  $T_{pg}$  : **Tiempo medio perdido por conductor afectado por la congestión**

$$T_{pg} = \frac{(H_{pg} / O_{mv})}{V_{agc}} \quad (14)$$

Donde:

$O_{mv}$  = Ocupación media del vehículo

#### D) ÍNDICES DE CONGESTIÓN

El **Índice de Congestión Metropolitano (ICM)** es un indicador que permite evaluar el nivel de congestión dentro de la corona de actuación metropolitana (CAM) y que orienta sobre la eficiencia del sistema viario relacionando costes y número de habitantes de la zona en estudio.

**D1 (ICM) Índice de Congestión Metropolitano (€/habitante)**

$$ICM = \frac{T_{pv} + Ac + Co^2 + T_{pt}}{H_m} \quad (15)$$

Donde:

$T_{pv}$  : Coste por tiempo perdido en vehículo privado; (€)

$Ac$  : Coste por aumento del consumo de combustible; (€)

$Co^2$  : Coste contaminación por emisiones de CO<sub>2</sub>; (€)

$T_{pt}$  : Coste por tiempo perdido en transporte público (€)

Para el coste del tiempo perdido, tanto en vehículo privado como en transporte público se ha aplicado un valor de 9,36 €/hora, de acuerdo con los resultados de las encuestas a conductores (2.400) sobre preferencias declaradas (**Opinómetro, Diciembre 2006**) realizada por la Fundación RACC. Este coste hora se ha de multiplicar por el número de ocupantes de cada tipología de vehículo.

**Además del coste de tiempo perdido por la congestión se han considerado:**

- Los costes derivados del incremento en los consumos de carburante,
- La generación de gases de efecto invernadero (mayor emisiones de CO<sub>2</sub>).

Los costes más indirectos producidos por el incremento de ruido, siniestralidad y afectación del paisaje no se han tenido en cuenta.

### **Incremento del consumo de carburante debido a la congestión**

Se utiliza el criterio de cuantificación aprobado por la Autoridad Metropolitana de Transporte (ATM) de Barcelona, desarrollado en el marco de la redacción del Plan Director Metropolitano (PdM) de la Región Metropolitana de Barcelona, con respecto al consumo variable en función de la velocidad y con un valor medio de combustible de 1 euro por litro. (ICAEN). Por lo que se refiere al consumo se ha considerado el siguiente algoritmo:

$$C_c = \left( \frac{8,65 \cdot (0,804 + 12,66/V_c)}{100} \right) * P_c \quad (16)$$

Donde:

C<sub>c</sub>: Coste de carburante (€)

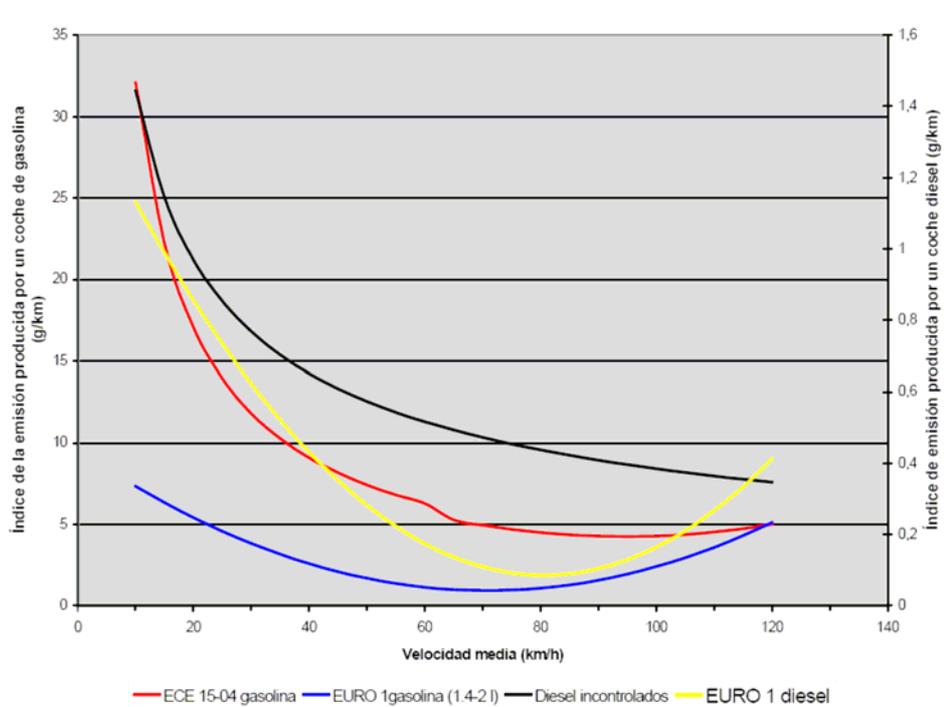
$V_c$ : Velocidad media circulación (Km/h)

$P_c$ : Precio Combustibles (€/litro)

- **Gases de efecto invernadero-CO<sub>2</sub>**

Se establece el valor de 140 euros por tonelada por emisiones de CO<sub>2</sub> como efecto en los aumentos en la generación de gases de efecto invernadero. Este valor es obtenido del informe de INFRAS/IWW sobre los costes externos del transporte en la Unión Europea,. Asimismo para establecer la relación entre velocidad y emisiones de CO<sub>2</sub> se ha utilizado como referencia la información del informe de *Research for Sustainable Mobility*, para la UE del año 2003 (vid gráfica), estableciéndose una curva media de los diferentes tipologías de vehículos.

**Ilustración 8. Relación entre velocidad y emisiones de CO<sub>2</sub>**



**Fuente:** *Research for Sustainable Mobility*, para la UE del año 2003

La fórmula para calcular el **coste de las emisiones de CO<sub>2</sub>** es la siguiente:

$$Cco^2 = (157,88 \cdot e^{((-0,005 \cdot Vc)/1000)}) \cdot Pt \quad (17)$$

$Cco^2$  : Coste de generación de emisiones de  $CO^2$

$Vc$ : Velocidad media de circulación (Km/h)

$Pt$ : Precio de tonelada de  $CO^2$  (140 € por Ton.)

La relación de coste de congestión con otros parámetros, permite establecer los siguientes indicadores:

- **Índice de Congestión Metropolitano Usuario (ICCMu).** Relaciona el coste de congestión con el número de usuarios afectados por esta.
- **Índice de Coste Congestión Metropolitano territorial (ICCMkm).** Relaciona el coste de congestión con la longitud de la red viaria analizada.

Los indicadores de congestión descritos se han centrado básicamente en la afectación de este fenómeno, en tiempo y dinero, al usuario afectado. Para determinar el grado de congestión de una red se ha considerado otro indicador, **nivel de eficiencia**, que es objeto de un análisis especial en el anejo correspondiente.

**Tabla 1. Sintética de denominaciones**

<b>POR TRAMO</b>	
<i>T<sub>pt</sub></i>	<b>Tiempo medio perdido por franja horaria</b>
<i>T<sub>ptm</sub></i>	<b>Tiempo medio perdido por tramo y franja horaria</b>
<i>T<sub>ptd</sub></i>	<b>Tiempo total perdido al día</b>
<b>POR CORREDOR / VIA</b>	
<i>H<sub>pc</sub></i>	<b>Horas perdidas al día</b>
<i>V<sub>ac</sub></i>	<b>Número vehículos afectados por la congestión</b>
<i>V<sub>bc</sub></i>	<b>% Número vehículos afectados por la congestión</b>
<i>T<sub>pc</sub></i>	<b>Tiempo medio perdido por conductor afectado por la congestión</b>
<b>GLOBAL-TERRITORIAL</b>	
<i>H<sub>pg</sub></i>	<b>Horas perdidas en el acceso a la ciudad X</b>
<i>H<sub>pg<sub>h</sub></sub></i>	<b>Horas perdidas en el acceso a la ciudad por habitante</b>
<i>V<sub>agc</sub></i>	<b>Vehículos totales afectados por la congestión</b>
<i>V<sub>bgc</sub></i>	<b>% Vehículos totales afectados por la congestión</b>
<i>T<sub>pg</sub></i>	<b>Tiempo medio perdido por conductor afectado por la congestión</b>
<b>CONGESTIÓN</b>	
<i>ICM</i>	<b>Índice de congestión metropolitana (€/año)</b>
<i>ICM<sub>h</sub></i>	<b>Índice de Congestión Metropolitano por habitante (€/año/hab.)</b>
<i>ICM<sub>u</sub></i>	<b>Índice de Congestión Metropolitano por usuario (€/año/usuario afectado por la congestión)</b>
<i>ICM<sub>km</sub></i>	<b>Índice de Congestión Metropolitano Territorial (€/año por km de vía analizada)</b>