



NOTA DE SERVICIO 5/2014

Prescripciones y recomendaciones técnicas
para la realización de estudios de tráfico de los
Estudios Informativos, Anteproyectos y
Proyectos de carreteras.



NOTA DE SERVICIO 5/2014 SOBRE PRESCRIPCIONES Y RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS DE TRÁFICO DE LOS ESTUDIOS INFORMATIVOS, ANTEPROYECTOS Y PROYECTOS DE CARRETERAS

*“Optimista es aquel que cree poder resolver un atasco de tráfico tocando el claxon”
(anónimo).*

El tráfico, es tal vez el parámetro “crítico” para determinar la rentabilidad de una inversión destinada a la construcción de una infraestructura viaria.

El conocimiento de la IMD y el nivel de servicio esperado en: el año base, el año de puesta en servicio, el año horizonte y en los años intermedios en los que se haya modelado la demanda de cada tramo de carretera objeto de estudio, es necesario para la redacción de los estudios informativos, anteproyectos y proyectos de la Dirección General de Carreteras.

Los estudios de tráfico son, por tanto, de gran importancia desde un punto de vista macroeconómico y de planificación, garantizando la homogeneidad, compatibilidad y continuidad de este tipo de inversiones en el tiempo.

La Nota de Servicio 5/2014 “Prescripciones y recomendaciones técnicas para la realización de estudios de tráfico de los Estudios Informativos, Anteproyectos y Proyectos de carreteras”, introduce mejoras y novedades entre las que destacan las siguientes recomendaciones:

- La aplicación de la metodología del Manual de Capacidad 2010 del Transportation Research Board de los Estados Unidos de América (HCM 2010) para el cálculo de los niveles de servicio (teniendo en cuenta que los algoritmos utilizados son con unidades del sistema inglés y no con unidades del sistema internacional).
- El estudio detallado del tráfico en nudos, ya que desde la selección del tipo de nudo resulta imprescindible conocer: las intensidades horarias de la circulación, la composición del tráfico (sobre todo en zonas urbanas), la velocidad de los vehículos y la evolución de todos los parámetros hasta el año horizonte.
- La utilización de modelos de previsión de la demanda de tráfico, basados en la experiencia internacional (modelo logit, modelo de generación-atracción y modelo de asignación a la red).



- La utilización de gráficos para la representación de resultados, especialmente en la calibración de los modelos y en los resultados de los modelos de evolución del tráfico.

A continuación se incluye el contenido de esta Nota de Servicio que deberá aplicarse, en la medida de lo posible, en la elaboración de los Estudios de Tráfico incluidos en los Estudios Informativos, Anteproyectos y Proyectos de actuaciones en la Red de Carreteras del Estado.

Madrid, 11 de julio de 2014
LA SUBDIRECTORA GENERAL
DE ESTUDIOS Y PROYECTOS

Fdo.: Fuencisla Sancho Gómez



NOTA DE SERVICIO 5/2014

Prescripciones y recomendaciones técnicas para la realización de estudios de tráfico de los Estudios Informativos, Anteproyectos y Proyectos de carreteras.

CONTENIDO

MEMORIA

Introducción.....	3
1. Datos básicos.....	4
2. Análisis del tráfico actual.....	9
3. Prognosis de tráfico.....	17
4. Niveles de servicio	21
5. Estudio de tráfico en nudos.....	26
6. Modelización del tráfico.....	38
7. Alcance del estudio y presentación de resultados.....	48

ANEXO 1: Enlaces de interés y referencias bibliográficas.

ANEXO 2: Tablas de intensidades de servicio generalizadas.

Prescripciones y recomendaciones técnicas para la realización de estudios de tráfico de los Estudios Informativos, Anteproyectos y Proyectos de carreteras.

Introducción

Esta Nota de Servicio 5/2014 tiene por objeto establecer las prescripciones y recomendaciones que deben tenerse en cuenta para la redacción de los estudios de tráfico en los estudios informativos, anteproyectos y proyectos de la Subdirección General de Estudios y Proyectos.

En ella se establecen las bases metodológicas, reglas de aplicación práctica y requisitos que deben cumplir los estudios de tráfico incluidos en los estudios y proyectos de la red estatal de carreteras competencia del Ministerio de Fomento.

El contenido se estructura en siete capítulos y dos anexos, que en su conjunto contemplan todos los aspectos relevantes que deben considerarse para redactar un estudio de tráfico:

- El capítulo 1 “Datos básicos”: Describe las fuentes de información para la recopilación de datos de tráfico, movilidad y socioeconómicos de utilidad para la modelización.
- El capítulo 2 “Análisis del tráfico actual”: Describe los criterios para establecer el ámbito del estudio y tramificación, la realización de la campaña complementaria de toma de datos en campo (aforos y encuestas) y la metodología para el cálculo de la IMD y la caracterización del tráfico a partir de los aforos.
- El capítulo 3 “Modelos de crecimiento de tráfico”: Describe los tipos de modelos más utilizados para analizar el crecimiento del tráfico y los métodos para determinar el tráfico inducido y el periodo de transición.
- El capítulo 4 “Niveles de servicio”: Describe la metodología a utilizar para el cálculo de los niveles de servicio.
- El capítulo 5 “Estudio de tráfico en nudos”: Describe los criterios para analizar el tráfico en nudos, integrando y actualizando lo establecido en la Guía de Nudos Viarios (Orden Circular 32/2012) y añadiendo los criterios metodológicos para analizar el tráfico en glorietas.
- El capítulo 6 “Modelización del tráfico”: Describe los criterios para establecer escenarios y periodos de modelización, las tipologías de modelos más utilizados y los criterios para aplicación de los mismos.
- El capítulo 7 “Alcance del estudio y presentación de resultados”: Describe el alcance de las actividades a realizar en los estudios de tráfico dependiendo del tipo de estudio o proyecto en el que se integre y los criterios para la presentación de resultados, con el fin de asegurar la transparencia y facilidad de consulta posterior del Estudio de tráfico.

El anexo nº 1 contiene los enlaces de interés y referencias bibliográficas.

El anexo nº 2 contiene tablas de intensidades de servicio generalizadas utilizadas para el cálculo simplificado de niveles de servicio.

1. Datos básicos

1.1. Datos de tráfico

El Ministerio de Fomento y gran parte de las comunidades autónomas tienen publicaciones electrónicas con los datos de aforos de tráfico de sus redes y en algunos casos publican los mismos en sus páginas web.

En los párrafos siguientes se describen las fuentes de información del Ministerio de Fomento que están disponibles en el momento de redacción de este documento.

Mapa de tráfico con DVD del Ministerio de Fomento

Desde 2011 el Ministerio de Fomento publica anualmente un DVD que acompaña al mapa de tráfico, que contiene una base de datos de tráfico gestionada mediante un sistema de información geográfica (GIS), con la información obtenida en las estaciones de aforo de la Red de Carreteras del Estado (RCE) y la Red Prioritaria Autonómica (RPA).

El sistema de consulta permite acceder a los datos de las estaciones de aforo de forma aislada y por itinerarios definidos por el usuario.

Los datos se refieren a tráfico, velocidades y accidentes. En particular y referido a la RCE están contenidas tablas en las que figuran las distribuciones de tráfico en 10 tipos de vehículo para cualquier período temporal (24 horas del día de cada día de la semana, la semana media, los 12 meses y los 84 días representativos del año, 12 meses x 7 días). También se incluyen medidas de capacidad y congestión.

El gráfico 1 muestra un ejemplo de matriz de 84 días de vehículos ligeros contenida en el DVD correspondiente a una estación primaria, a partir de la cual se pueden expandir los datos de aforos.

Calzada 1+2		IMD Definitivo	Num Días	Nº Días Validos	Nº Días Validos 84	Afin	Calzada 1	Afin	Calzada 2
Motos:	34	127	127	127	127		22		12
Ligeros:	7.240	127	127	127	127	E-324-0	3.882	E-324-0	3.558
Pesados:	655	127	127	127	127	E-324-0	320	E-324-0	335
Total:	7.929	127	127	127	127		4.024		3.905

Ligeros	Mes	L	M	X	J	V	S	D	T
	ENERO	5081	5112	5121	5226	7907	6125	7953	6090
	FEBRERO	6383 ****	6172 ****	6490 ****	6641 ****	10396 ****	7511 ****	9732 ****	7638
	MARZO	6659	5286	5287	5693	9599	7411	9042	7015
	ABRIL	7241 ****	6408 ****	6334 ****	6687 ****	8438 ****	7140 ****	7734 ****	7159
	MAYO	5468	5348	5682	5886	7275	6212	6701	6097
	JUNIO	6668 ****	6315 ****	6448 ****	6734 ****	9617 ****	7256 ****	8377 ****	7363
	JULIO	7582	6844	6908	7137	11280	10058	13216	9026
	AGOSTO	9629	8785	8781	8643	11009	11525	11945	10070
	SEPTIEMBRE	5949	5570	5558	5887	8687	7517	9216	6929
	OCTUBRE	6392 ****	6241 ****	6556 ****	6976 ****	8090 ****	6744 ****	7659 ****	6968
	NOVIEMBRE	5100	5016	4777	5013	7009	5691	6580	5613
	DICIEMBRE	5992 ****	6193 ****	6519 ****	7030 ****	8499 ****	7210 ****	6821 ****	6910
	TOTAL	6506	6104	6208	6468	9061	7524	8611	7240

Gráfico 1. Ejemplo de matriz de 84 días de vehículos ligeros

Portal Web del Ministerio de Fomento

La tabla 1 resume las fuentes de datos de tráfico disponibles en el portal web del Ministerio de Fomento

DATOS DE TRÁFICO EN EL PORTAL WEB DEL MINISTERIO DE FOMENTO		
Página	Contenido de interés	Enlace web
Tráfico, velocidades y accidentes en la RCE	<p><i>Mapas de tráfico:</i> del último año disponible y serie desde 1960.</p> <p><i>Evolución histórica:</i> datos de tráfico de la serie histórica de la RCE y conjunto de redes desde 2000 y características en detalle del tráfico en la RCE desde el año 2007.</p> <p><i>Variación del tráfico en los últimos años:</i> variaciones mensuales por tipo de vía, ámbito y tipos de vehículos en el conjunto de la RCE en los últimos años y datos provisionales del año en curso. Crecimientos mensuales, anuales e interanuales</p>	(1)
Tráfico en autopistas estatales de peaje	Series históricas mensuales y anuales de tráfico para cada una de las autopistas estatales de peaje.	(2)

Tabla 1. Datos de tráfico en el portal web del Ministerio de Fomento

1.2. Datos de movilidad

La tabla 2 resume las fuentes de datos de movilidad disponibles en el portal web del Ministerio de Fomento.

DATOS DE MOVILIDAD EN EL PORTAL WEB DEL MINISTERIO DE FOMENTO		
Página	Contenido de interés	Enlace web
Encuesta de movilidad de las personas residentes en España (MOVILIA)	Datos sobre encuestas realizadas en los años 2000/2001 y 2006/2007 que contienen información sobre pautas de movilidad de la <i>población residente en España en viviendas familiares</i> ¹ sus características y determinantes.	(3)
Transporte de mercancías por carretera (EPTMC)	Resultados de la Encuesta Permanente de Transporte de Mercancías por Carretera (EPTMC).	(4)
Base de Datos del Observatorio del Transporte y la Logística en España (OTLE)	Información sobre oferta y demanda de los distintos modos de transporte en España y sobre información socioeconómica útil para analizar la movilidad.	(5)

Tabla 2. Datos de movilidad en el portal web del Ministerio de Fomento

(Los enlaces web están en el Anexo 1)

¹ MOVILIA no incluye información sobre movilidad de visitantes extranjeros, por lo que si el tráfico originado por estos es importante, las pautas de movilidad de los mismos debe ser analizada de forma complementaria.

1.3. Datos socioeconómicos

Instituto Nacional de Estadística (INE)

En su portal web [\[Error! No se encuentra el origen de la referencia.\]](#) se puede acceder a datos de población, empleo y económicos.

De especial utilidad para facilitar la zonificación del territorio es el Visor del Censo del INE^[2], que contiene la delimitación a nivel geográfico hasta el nivel de secciones censales.

En el gráfico 2 se puede ver un ejemplo de la zonificación del Visor del Censo del INE con nivel de sección censal.

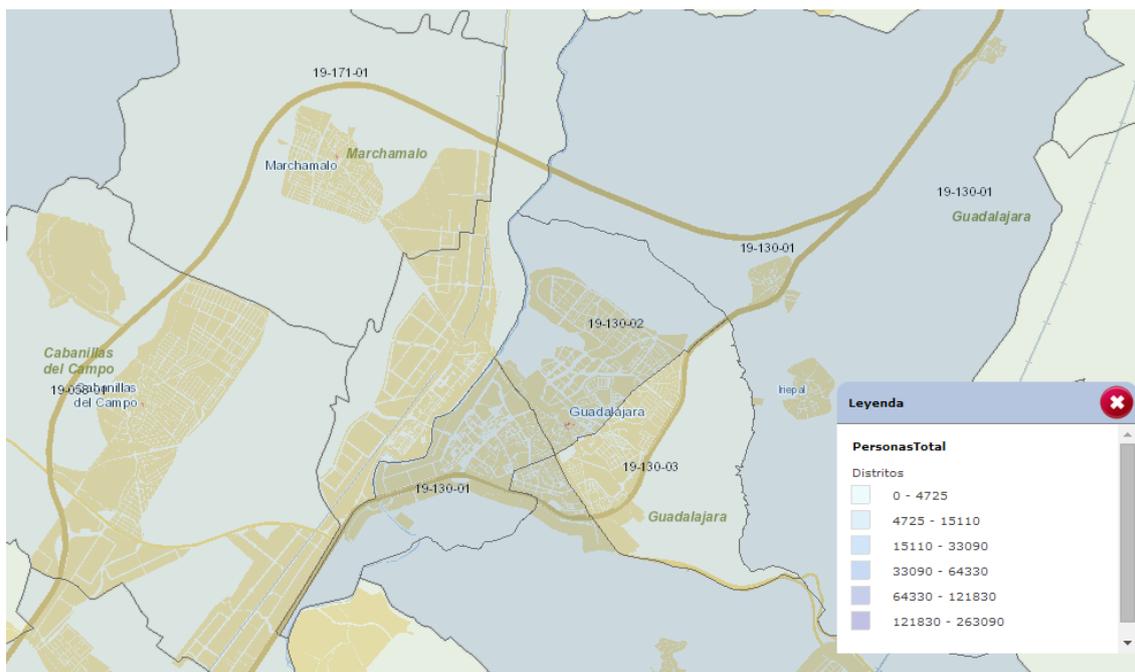


Gráfico 2. Zonificación utilizando el visor del Censo del INE

1.4. Otras fuentes no oficiales

Anuario económico de España de La Caixa^[3]

El contenido de este Anuario se estructura en torno a dos grandes bloques:

a) *Datos estadísticos municipales:*

Base de datos que contiene el valor de diferentes datos estadísticos e indicadores económico-comerciales para cada uno de los 3.245 municipios de más de 1.000 habitantes, cuya población representa el 96,8% del total de España, así como los totales provinciales, agrupados por comunidades autónomas, incluyendo en este caso el resto de municipios, es decir, los de población inferior a 1.000 habitantes.

Cabe destacar que en esta base de datos también se facilita información relativa a la evolución en los últimos cinco años de 25 variables e indicadores económico-comerciales sobre los siguientes temas: población (porcentaje de variación y ritmo de crecimiento medio anual de la población en el periodo), paro registrado, parque de vehículos de motor (total y desglose en automóviles, camiones y furgonetas, y otros vehículos de motor), teléfonos fijos, entidades de depósito, número de actividades industriales, número de actividades comerciales mayoristas, número de actividades

comerciales minoristas, superficie de Centros Comerciales, número de actividades de restauración y bares, cuota de mercado, índice turístico e índice de actividad económica.

Asimismo, se ofrece una serie histórica de los siguientes indicadores correspondiente a los últimos 5 años:

- Población
- Paro registrado
- Total vehículos de motor
- Automóviles
- Camiones y furgonetas
- Otros vehículos de motor
- Entidades financieras
- Teléfonos fijos
- Número de actividades comerciales minoristas
- Superficie Centros Comerciales
- Cuota de mercado

b) *Áreas comerciales y mercado potencial:*

Base de datos que contiene los datos básicos sobre la distribución geográfica de los flujos comerciales de los consumidores. Dado que ni el municipio ni la provincia ni la comunidad autónoma son divisiones territoriales apropiadas para un análisis de esta naturaleza, para la confección de este apartado se ha determinado qué municipios ejercen atracción comercial sobre otros y cuáles se sienten atraídos o gravitan comercialmente sobre aquéllos. Identificándose así 77 áreas comerciales y 268 subáreas comerciales - espacios geográficos cuya población se siente atraída comercialmente por el municipio de mayor equipamiento comercial de la zona-.

La base de datos de las áreas comerciales se completa con los indicadores del mercado potencial, o volumen de ventas del comercio minorista de los municipios cabecera de área comercial (volumen total de ventas) y cabecera de subárea comercial (ventas realizadas únicamente a los consumidores residentes en el municipio).

En este segundo bloque, se ofrece también información a nivel de cabecera de área, provincial y autonómico, relativa a la actividad turística, presentándose cifras sobre el número de pernoctaciones.

Servicio de Estudios del Banco de Bilbao

El portal web BBVA RESEARCH^[4] contiene información de los tres últimos años y previsiones de los dos años próximos, relativa a variables socioeconómicas de interés para la modelización de la demanda y las previsiones de tráfico. Estas variables son las descritas a continuación:

- *Actividad económica:*
 - PIB real y nominal.
 - Consumo público y privado.
 - Formación bruta de capital.
 - Actividad por sectores:
 - Bienes de equipo y otros productos
 - Construcción
 - Vivienda

- Demanda interna (contribución al crecimiento)
- Exportaciones
- Importaciones
- Demanda externa (contribución al crecimiento)
- **Mercado de Trabajo:**
 - Empleo
 - Tasa de paro (% población activa)
 - Empleo CNTR (equivalente a tiempo completo)
 - Productividad aparente del factor trabajo
- **Precios y Costes**
 - IPC (%)
 - Deflactor del PIB
 - Deflactor del consumo privado
 - Remuneración por asalariado
 - Coste laboral unitario
- **Hogares**
 - Renta disponible nominal
 - Tasa de ahorro (% renta nominal)

El gráfico 3 extraído de la fuente citada contiene los datos del PIB real de 2011 a 2013 y las previsiones para 2014 y 2015 realizadas en febrero de 2014.

Previsiones



Gráfico 3. Evolución y previsiones del PIB Real en España y la UEM febrero de 2014. Fuente: BBVA Research

2. Análisis del tráfico actual

2.1. Ámbito del estudio de tráfico y tramificación

2.1.1. Ámbito del estudio

Se distinguirán dos situaciones, según se trate de una nueva carretera o del proyecto de una actuación sobre una carretera existente.

2.1.1.1. Nuevas carreteras

La red de carreteras a analizar incluirá al menos:

- Todos los tramos de carreteras pertenecientes a corredores, de los cuales la nueva carretera pueda captar tráfico de forma significativa.
- Todos los tramos de carretera que puedan conectar la nueva carretera con los corredores alternativos.
- Todas las carreteras que puedan cruzar la nueva carretera.
- Todas las conexiones con los centros de generación/atracción de tráfico del entorno inmediato.

2.1.1.2. Carreteras existentes

El ámbito del estudio estará definido al menos por:

- El tramo de carretera directamente afectado
- Los tramos anterior y posterior hasta el siguiente nudo (enlace o intersección), incluyendo los nudos iniciales/finales de los tramos contiguos.
- Los nudos de conexión con el resto de carreteras.
- Los tramos que cruzan el tramo objeto de estudio y que enlazan con el mismo.
- Los accesos a núcleos poblados, si estos se encuentran a menos de 1 km del tramo objeto de estudio y/o como consecuencia de la actuación se puede producir una reordenación significativa del tráfico que accede a los mismos.

2.1.2. Tramificación

La tramificación a realizar dependerá del tipo de estudio a realizar.

Si se trata de un Estudio Informativo de una nueva carretera, en general será suficiente con la consideración de tramos básicos entre nudos, con el nivel de detalle que se necesita para definir el grafo de la red a utilizar por el modelo de asignación de tráfico.

Si se trata de un proyecto o anteproyecto, se deberán considerar dos niveles:

- En el tramo de carretera directamente afectado y sus nudos de conexión con la red de carreteras, se realizará una tramificación funcional detallada con los criterios del Manual de Capacidad HCM 2010 (tramos básicos, tramos de trenzado, convergencia/divergencias, ramales, intersecciones, etc.).
- En el resto de tramos, del ámbito de estudio, sobre los que no se proponga actuar se podrán considerar únicamente los tramos básicos de conexión entre nudos.

2.2. Toma de datos complementaria (aforos y encuestas)

Para determinar la necesidad de realizar una toma de datos complementaria y determinar su alcance, se procederá, de la siguiente forma:

- 1) Se recopilarán y analizarán los estudios de tráfico realizados anteriormente. Se actualizarán los datos de aforos y previsiones de crecimiento contenidos en estos estudios.

- 2) Se realizará un análisis crítico sobre la calidad de la información disponible, determinando si es necesario complementarla con mediciones directas en campo.
- 3) Se diseñará y programará una campaña de campo que cubra las lagunas de información detectadas.

En los proyectos y anteproyectos se analizará si se dispone información actualizada suficiente para caracterizar el tráfico en todos los elementos que puedan ser relevantes. En general esta información procederá de procesos de tomas de datos y modelización realizados en etapas anteriores complementados con los datos de planes de aforos.

En los estudios de tráfico de proyectos de nuevas carreteras se deberá analizar si la modelización realizada en el Estudio Informativo permite obtener la información necesaria para el diseño, determinando si es suficiente con actualizar el modelo de tráfico o si es aconsejable crear un nuevo modelo.

En los Estudios Informativos de nuevas carreteras los estudios de tráfico incluirán la modelización de la demanda, por lo que la toma de datos complementaria estará orientada a obtener las variables básicas necesarias para la calibración del modelo. En general en estos estudios será necesario realizar aforos con clasificación de vehículos, encuestas (origen/destino y/o preferencias declaradas) y toma de datos de velocidades medias de recorrido en tramos de la red del área de estudio.

Determinando el alcance de la campaña de datos complementaria, deberá definirse la campaña de campo y programarse su realización.

2.2.1. Aforos

Se realizará un gráfico que contenga la situación y denominación de las estaciones de aforos para la campaña complementaria.

La campaña propuesta se resumirá en un cuadro que contendrá todas las estaciones de aforo propuestas indicando para cada una de ellas la siguiente información:

- Su *situación*: indicando la carretera, P.K., calzada o intersección e incluyendo un croquis del tramo en el que se sitúa.
- El *tipo de aforo*: automático (con o sin clasificación de vehículos), manual.
- El *método de aforo*: indicando el tipo y características de aparato de aforo a utilizar y/o los medios de realización del aforo manual (estadillos, aplicaciones sobre equipos informáticos móviles, etc.).
- La *programación temporal*: periodo de tiempo durante el cual se realizará el aforo.
- La *estación afín*: que se utilizará para expandir los datos.

2.2.2. Encuestas

Las encuestas de tráfico a utilizar en los estudios y proyectos de carreteras serán en general de dos tipos: encuestas de origen/destino realizadas a la vera del camino en puntos de parada de los vehículos (estaciones de servicio, peajes, etc.) y encuestas de preferencias declaradas en el caso que se haya optado por utilizar un modelo de elección discreta (en general en estudios de vías de peaje).

Excepcionalmente, en medio urbano pueden utilizarse encuestas domiciliarias, aunque en este caso se suelen utilizar encuestas existentes realizadas normalmente para planes de ordenación urbana.

2.2.2.1. Encuestas de preferencias reveladas

Las encuestas de preferencias reveladas² (PR), también denominadas encuestas origen-destino (O/D), permitirán conocer la manera como cada individuo hizo la elección de modo en el último viaje. Las variables asociadas con la PR incluirán al menos: origen, destino, hora de realización del viaje, frecuencia del mismo, número de acompañantes, motivo del viaje y caracterización socioeconómica del viajero. En transporte de mercancías se recabará además información sobre tipo de carga que transportan, frecuencia con la que se realiza el viaje y capacidad ocupada en el trayecto.

Las encuestas de preferencias reveladas son necesarias para contrastar y complementar la información de aforos y para construir las matrices origen/destino.

2.2.2.2. Encuestas de preferencias declaradas

Las encuestas de preferencia declaradas (PD), recopilarán además información sobre la disponibilidad de los viajeros a utilizar una nueva alternativa en distintos escenarios (combinando hipótesis tarifarias, costes generalizados de transporte) y relacionándolos con las circunstancias personales del usuario (edad, sexo, disponibilidad de vehículo privado, nivel de renta, motivo de viaje, etc.).

Las encuestas de preferencias declaradas son necesarias para calibrar modelos Logit de elección discreta que se describen en el apartado 9.3.4.

2.2.2.3. Diseño y realización de encuestas

El gráfico 4 muestra el proceso de diseño y realización de las encuestas.

Previamente a la realización de las encuestas se deberá redactar un documento que se someterá a la aprobación de la Dirección del Estudio o Proyecto en el que recoja los criterios utilizados para el diseño de la campaña de encuestas y la metodología a utilizar para el tratamiento de los resultados.

El contenido del documento deberá contemplar los siguientes aspectos:

- *Criterios utilizados para la selección de los puntos de encuesta*, acompañando de un gráfico con su situación en un esquema de la red del área de estudio.
- *Segmentos de la demanda a considerar*. Al menos deberá distinguirse entre automóviles particulares, vehículos de transporte público y vehículos de transporte de mercancías. En el caso de vías de peaje, deberán considerarse una subdivisión de estos tipos básicos, atendiendo a variables explicativas de la disponibilidad a pagar por el uso de la vía de peaje.
- *Diseño de los cuestionarios*, describiendo las características del viaje a obtener para cada segmento de la demanda.
- *Tamaño de la muestra* a obtener para cada segmento utilizando técnicas de muestreo estadísticas (ver apartado 2.2.2.4.)
- *Técnicas de tratamiento de datos*: mecanismos de expansión y sistemas para eliminar la doble observación.
- *Programación de las encuestas y medios a utilizar*: fechas y periodos horarios en los que se realizarán las encuestas y descripción del personal, medios técnicos y organización que se utilizarán.

² Se recomienda la consulta del MANUAL DE ENCUESTAS DE MOVILIDAD (Preferencias Reveladas). Angel Ibeas Portilla. Universidad de Cantabria Ministerio de Fomento.

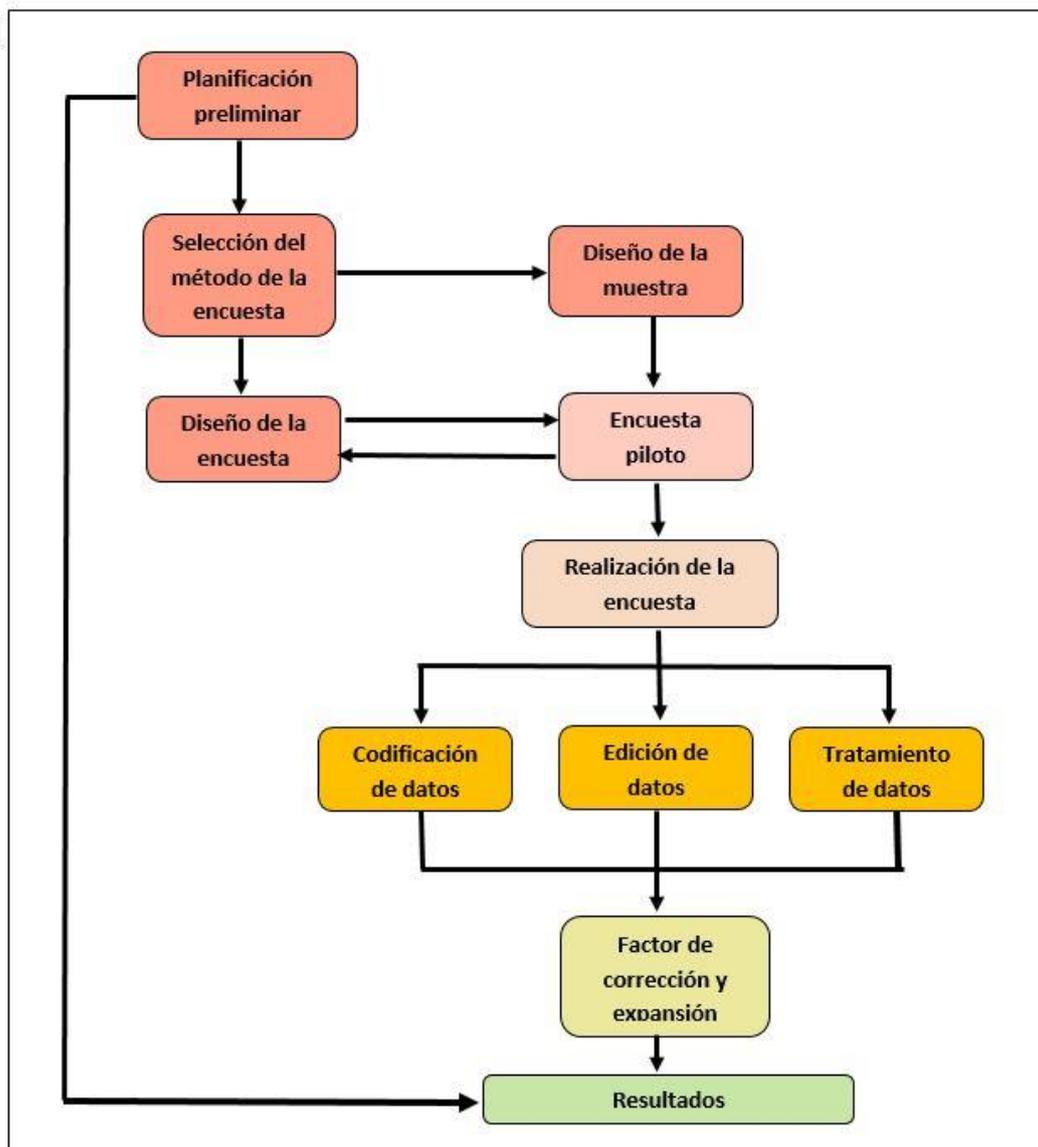


Gráfico 4. Proceso de diseño y realización de encuestas

Fuente: Ortúzar y Willumsen (Modelos de transporte) – UC 2008

2.2.2.4. Tamaño de la muestra

Si se trata de obtener una proporción, por ejemplo para obtener las matrices orígenes destino de los viajes, el tamaño de la muestra se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$m = \frac{k^2 N p (1 - p)}{e^2 (N - 1) + k^2 p (1 - p)}$$

Dónde:

m : Tamaño estimado para la muestra.

N : Tamaño de la población o universo (número total de posibles encuestados).

e : Error muestral deseado, en tanto por uno. El error muestral es la diferencia que puede haber entre el resultado que obtenemos preguntando a una muestra de la población y el que obtendríamos si preguntáramos al total de la población.

p : Proporción de individuos que poseen en la población la característica de estudio. Este dato es generalmente desconocido y se suele suponer que $p = 0.5$ que es la opción más segura.

k : Constante que depende del nivel de confianza que asignemos. El nivel de confianza indica la probabilidad de que los resultados de nuestra investigación sean ciertos. El valor de k para distintos niveles de confianza puede obtenerse de la tabla:

Valor de k	1,15	1,28	1,44	1,65	1,96	2,24	2,58
Nivel de confianza	75%	80%	85%	90%	95%	97,5%	99%

Tabla 3. Valor de k para distintos niveles de confianza

Si se trata de obtener una media, por ejemplo el tiempo medio en recorrer un determinado tramo de carretera, el tamaño de la muestra se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$m = \frac{N k^2 \sigma^2}{e^2 (N - 1) + k^2 \sigma^2}$$

Dónde n, N, e y k tienen el mismo significado que en la expresión anterior y σ es la desviación estándar estimada de la población. Si no se conoce, se puede suponer $\sigma = 0,5$.

Si tenemos en cuenta que no todas las encuestas realizadas serán válidas, bien porque estén incompletas o contengan errores, el número de encuestas a realizar será:

$$n = \frac{m}{1 - q}$$

Dónde n es el número de encuestas, m es el tamaño mínimo de la muestra estimado mediante los algoritmos anteriores y q es la proporción estimada de pérdidas en las encuestas a realizar (en tanto por uno).

Para la estimación del número mínimo de encuesta a realizar, se considerarán los siguientes valores límites de los parámetros.

- Error muestral $\leq 10\%$.
- Nivel de confianza $\geq 90\%$ (deseablemente 95%).
- % de pérdidas $\geq 5\%$

Una vez realizadas y codificadas las encuestas y los aforos de control, se calculará para cada punto de encuesta el error muestral realmente obtenido para el nivel de confianza deseado.

2.3. Caracterización del tráfico a partir de datos de aforos.

El proceso de cálculo de la IMD a partir de datos de aforos se realiza mediante la expansión de los datos utilizando valores de una estación afín del Plan de Aforos. En los apartados siguientes se detalla este proceso.

2.3.1. Establecimiento de afinidades

A partir de la distribución horaria del tráfico en los aforos realizados, se establecerá una afinidad con alguna estación primaria o permanente del Plan de Aforos.

La asignación de afinidades se hará en función de las distribuciones del tráfico, de la composición del mismo, de la ubicación de las estaciones (área geográfica, itinerarios, etc.) y de la actividad económica de la zona.

2.3.2. Expansión de los datos de aforo al día medio

Los aforos diarios se expandirán en función del periodo horario aforado de cada día, a partir de los datos proporcionados por los porcentajes horarios y coeficientes de variación horarios, obtenidos del DVD de tráfico en el epígrafe “Intensidades Horarias Medias en las 24 horas del día medio”.

El gráfico 5 representa la pantalla de consulta de la aplicación contenida en el DVD del mapa de tráfico para la obtención de estos valores.

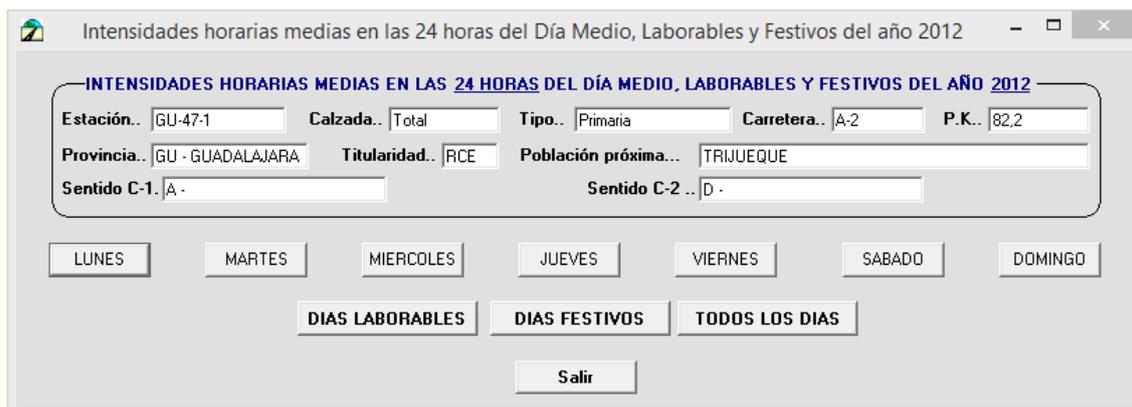


Gráfico 5. Consulta de intensidades horarias medias.

La Intensidad en 24 horas se obtendrá, por tipo de vehículo, a partir de la expresión:

$$I_{24} = \frac{100 A}{\sum_{h1}^{h2} L(h)}$$

Dónde:

I_{24} : Intensidad expandida a 24 horas del día de realización del aforo.

A : Aforo del periodo realizado en el intervalo horario (h1, h2)

$L(h)$: Porcentaje horario de la hora h correspondiente en la estación afín.

2.3.3. Cálculo de la IMD

2.3.3.1. Con la matriz de 84 días

El cálculo de la IMD con la matriz de 84 días se realiza de la siguiente forma:

$$IMD = I_{24} \frac{ID_{Afin}(m, d)}{IMD_{Afin}}$$

Dónde

IMD : Intensidad Media Diaria.

I_{24} : Intensidad de 24 horas.

$ID_{Afin}(m, d)$: Intensidad diaria de la estación afín, obtenida de la matriz de 84 días, correspondiente al mes m y día d de la semana en el que se realizó el aforo al que corresponde la I_{24} calculada anteriormente.

IMD_{Afin} : IMD de la estación afín.

Este cálculo se debe realizar por tipo de vehículo.

Si existen varios días de aforo, la IMD se calcula como la media de los valores obtenidos para cada día.

Se recomienda la utilización de este método de cálculo de la IMD basado en la matriz de 84 días frente al método clásico de los coeficientes que se describe en el apartado siguiente.

2.3.3.2. A partir de los coeficientes de distribución temporal

El método clásico de utilización de los coeficientes L , N , S permite conocer el comportamiento de un cierto periodo de tiempo respecto a otro mayor (días, meses, años) de forma que con aforos o encuestas realizadas en un breve periodo de tiempo se puede expandir a la totalidad del día, mes o año.

Los coeficientes y su significado son:

- Coeficiente de Nocturnidad N de un mes determinado, es la media de los coeficientes N del mes. Se obtiene cada día como media del tráfico registrado las 24 horas y el registrado las 16 horas que transcurren entre las 6 y las 22 del mismo día.
- Coeficiente Mensual de laborables L , es la relación entre la intensidad media de laborables del año y la del mes correspondiente. Se obtiene además del general L_m , el de ligeros (L_{lig}) y el de pesados (L_{pes}).
- Coeficiente Anual de sábados y domingos S , es la relación entre la IMD y la IMD de laborables en el mes considerado. Se obtiene además la S_{lig} y la S_{pes} .

Todos estos coeficientes se obtienen para la estación afín del DVD de tráfico.

El cálculo de la IMD, se realiza mediante la expresión:

$$IMD = I_{24} \cdot N \cdot L \cdot S$$

2.4. Cálculo de intensidades horarias de diseño

Los valores de la intensidades de tráfico en la hora 30, en la hora 100 y en la hora 500³, y los porcentajes de pesados correspondientes a esas intensidades, se obtienen directamente para todas las estaciones afines, mediante la aplicación de consulta contenida en el DVD del mapa de en el apartado “Detalles coeficientes y congestión”.

 GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE FOMENTO <small>SECRETARÍA GENERAL DE INFRAESTRUCTURAS DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS</small>		DETALLES, COEFICIENTES Y CONGESTIÓN. ESTACIÓN <u>GU-47-1</u> <u>2012</u>		
---	--	--	--	--

Vía:	A-2	PK: 82,23	Hora 30	Hora 100	Hora 500	
Calzada:	Total		Intensidad Horaria Total (veh/hora)	3957	2934	1932
Población:	GUADALAJARA		Porcentaje de Pesados (%)	4,2	8,2	17
Días Aforados:	352					

INTENSIDADES MEDIAS: IMD (VEH / DÍA)			
TIPO	TOTAL	MERCANCÍAS PELIGROSAS	VEH. EXTRANJEROS
MOTOS	62	0	0
COCHES	12925	0	79
COCHES CON CARAVANA	25	0	24
CAMIONETAS	1418	11	15
TRACTORES AGRICOLAS	0	0	0
VEHICULOS LIGEROS	14368	11	118
CAMIONES SIN REMOLQUE	762	41	23
CAMIONES ARTICULADOS	3827	86	519
TRENES DE CARRETERA	218	5	51
VEHICULOS ESPECIALES	29	0	2
AUTOBUSES	166	0	45
VEHICULOS PESADOS	5002	132	640
TOTAL	19432	143	758

Gráfico 6. Ejemplo de consulta del DVD para obtener las IH30, IH100 y la IH500

Además en las estaciones permanentes hay un detalle de las 200 horas de mayor tráfico.

Para analizar la variación del tráfico en una hora determinada del día, se puede calcular la intensidad horaria superada en un determinado porcentaje de las horas a partir de la intensidad horaria media y del coeficiente de variación horario de la estación afin en la hora analizada, utilizando la siguiente expresión⁴:

Para la hora considerada, si suponemos una distribución normal de las variaciones de tráfico, se puede calcular el periodo de mayor circulación a partir de la expresión:

$$IH_{p\%} = IH \left(1 + \alpha \frac{CV}{100} \right)$$

Dónde:

$IH_{p\%}$: Intensidad horaria superada en el p% de las horas.

IH : Intensidad media en la hora considerada.

³ Intensidades superadas solo durante 30, 100 o 500 horas al año.

⁴ Esta expresión se ha deducido suponiendo que las intensidades horarias dentro de la hora considerada siguen una distribución normal.

CV: Coeficiente de variación horario en % (σ/IH).

α : Coeficiente deducido de la distribución normal que adopta los valores de la tabla siguiente:

p%	α
50%	0,0000
75%	0,6745
85%	1,0364
90%	1,2816
99%	2,3263

3. Prognosis de tráfico

3.1. Modelos de crecimiento

Dado que la elección de la tasa de crecimiento del tráfico suele ser uno de los aspectos que más influencia genera sobre los resultados de la evaluación económica de un proyecto, resulta fundamental efectuar un análisis profundo de esta tasa.

La evolución de la demanda a lo largo del periodo de análisis depende esencialmente del comportamiento de los costes generalizados del transporte en la zona y de los factores socioeconómicos y demográficos que la determinan.

Los modelos más frecuentemente utilizados para la previsión de tráfico son: los modelos tendenciales, los modelos econométricos basados en series históricas y los modelos basados en la generación de viajes.

Es habitual que los modelos econométricos de demanda constituyan la metodología adecuada para esta predicción. Es posible, no obstante, que en determinados contextos la demanda de transporte dependa sólo de su trayectoria pasada. Si ello es así, un simple modelo tendencial permite hallar la tasa de crecimiento del tráfico a lo largo del tiempo. A continuación se describen los modelos existentes y el uso recomendado.

3.1.1. El modelo tendencial

Este modelo sólo recoge la evolución de la demanda existente y en ningún caso permite incorporar tráfico atraído o inducido. Existen diversas expresiones matemáticas para relacionar el tiempo con la variable a predecir. Dos alternativas simples y frecuentemente usadas son las siguientes:

$$y_t = \alpha + \beta \cdot t + u_t \text{ (Lineal)}$$

$$\ln(y_t) = \alpha + \beta \cdot t + \varepsilon_t \text{ (Semi-logarítmica)}$$

La predicción a partir de la extrapolación de la tendencia pasada es un método común, aunque a menudo excesivamente simple. Este método supone que el comportamiento pasado continuará en el futuro, supuesto que puede resultar excesivamente ingenuo.

Los datos de tráfico histórico (desde 1960) en las estaciones de aforo se pueden obtener directamente de los CD-ROM de tráfico.

El análisis del tráfico histórico de cada estación permite conocer la tendencia y analizar su evolución comparativamente con otras estaciones de aforo, con el conjunto del corredor o con el conjunto de la Red de Carreteras del Estado.

No se recomienda la utilización de modelos tendenciales simples, basados en el cálculo de tasas de crecimiento anuales obtenidas a partir de las tendencias observadas en aforos de años anteriores, sin ningún tipo de correlación con variables socioeconómicas.

3.1.2. El modelo econométrico

En el modelo econométrico⁵ la predicción de la demanda viene determinada por un conjunto de variables explicativas de la misma. Esta elección se realiza teniendo en cuenta el tipo de demanda a predecir y de los datos disponibles.

Las variables explicativas de la demanda de tráfico son de tipo socioeconómico y demográfico (población, empleo, PIB, índice de motorización, etc.) y también variables relacionadas con el coste generalizado del transporte en la red analizada (básicamente precio y tiempo).

Las tres funciones más utilizadas, basadas en la transformación Box - Cox tienen la forma:

$$y_i = \alpha + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_n X_{in} + \varepsilon_i \text{ (Lineal)}$$

$$\ln(y_i) = \alpha + \beta_1 \ln(X_{i1}) + \beta_2 \ln(X_{i2}) + \dots + \beta_n \ln(X_{in}) + \varepsilon_i \text{ (Doble logarítmica)}$$

$$\ln(y_i) = \alpha + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_n X_{in} + \varepsilon_i \text{ (Semi-logarítmica)}$$

Dónde:

- y_i : demanda de tráfico en el año i
- X_{ij} : valor de la variable explicativa j en el año i
- ε_i : perturbación aleatoria.
- β_j : coeficientes a calibrar.

Todas estas funciones tienen la ventaja de su linealidad con lo que pueden ajustarse fácilmente por regresión lineal.

Este enfoque permite efectuar predicciones condicionadas a la evolución de las variables socioeconómicas así como el diseño de escenarios alternativos teniendo en cuenta los cambios previsibles en las infraestructuras.

El principal problema es que es necesario predecir el valor que alcanzarán las variables explicativas en el futuro, con lo que se introduce un nuevo elemento de incertidumbre.

Un modelo simple de este tipo, es el modelo calibrado para predecir la demanda de transporte de mercancías por carretera en vehículos pesados⁶ a partir de los datos del Producto Interior Bruto del año siguiente:

$$D(i) = -208820 + 21,09414 \cdot PIB(i + 1)$$

⁵ Una buena descripción de estos modelos y de los sistemas de calibración de los mismos puede verse en la publicación "La predicción de la demanda en la evaluación de proyectos" de Anna Matas, José Luis Raymond, Mar González-Savignat y Adriana Ruíz (2009). Documento de trabajo del Manual de Evaluación Económica de Proyectos de Transporte. CEDEX (2010).

⁶ Este modelo está descrito en la publicación "Observatorio del transporte de mercancías por carretera. Oferta y Demanda. Enero de 2014. Dirección General del transporte Terrestre. Ministerio de Fomento" páginas 251-252, dónde se pueden ver los datos utilizados para el ajuste.

Siendo:

- $D(i)$: La demanda en el año i en millones de t-km
- $PIB(i + 1)$: El PIB en el año $i+1$ a precios constantes base 2008 (índice=100)

El ajuste obtenido tiene un coeficiente de determinación de $(r^2) = 0,959$

El gráfico 7 representa la correlación entre los valores observados y los obtenidos por el modelo.

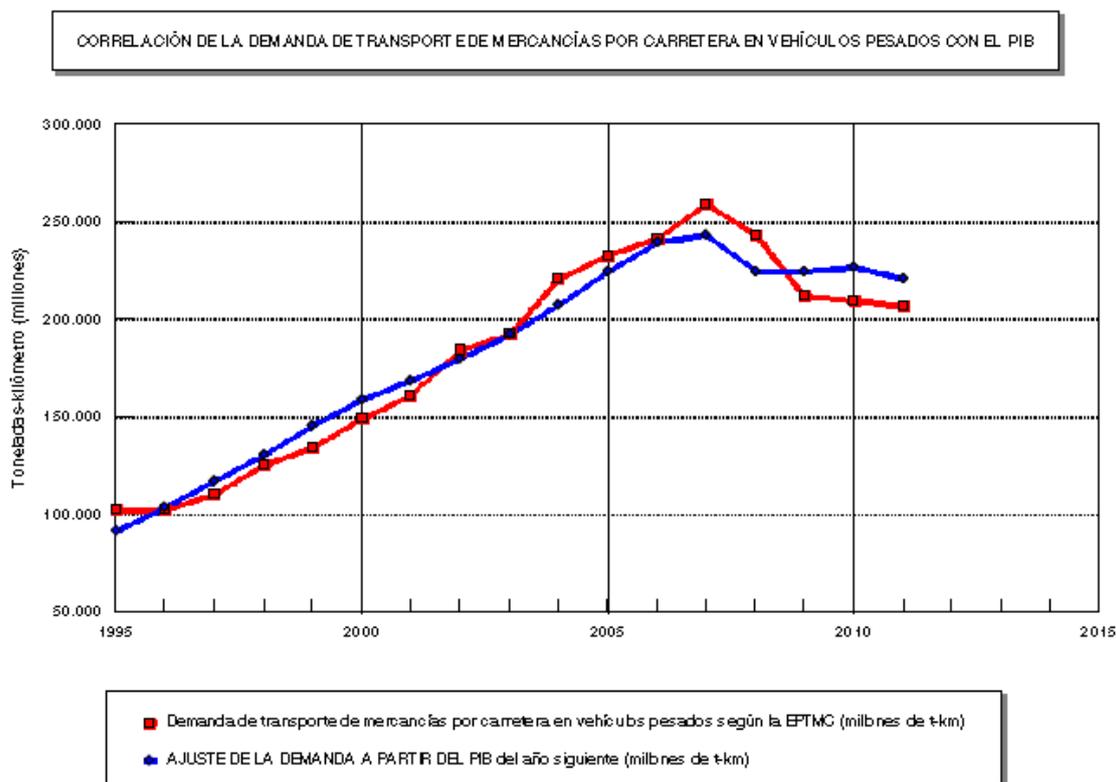


Gráfico 7. Correlación de la demanda de transporte de mercancías por carretera en vehículos pesados con el PIB.

También es de este tipo el modelo utilizado por la D.G.C. que permite realizar una previsión por corredores, teniendo en cuenta el crecimiento de la población y el comportamiento del PIB, matriculaciones y parque automovilístico.

La utilización de los modelos econométricos se recomienda para la previsión de la evolución del tráfico interurbano.

3.1.3. Modelos basados en la generación de viajes

Los modelos basados en generación de viajes⁷ pueden ser útiles para la predicción del tráfico en entornos urbanos y periurbanos.

En general se podrán aplicar cuando se disponga de una modelización de la generación de viajes basados en encuestas domiciliarias.

⁷ Ver Modelos de Transporte. Ortúzar y Willumsen. Universidad de Cantabria. 2008. Páginas 197-251.

A diferencia de los modelos econométricos descritos en el apartado anterior, estos modelos no están basados en series históricas, pero también permiten prever la evolución del tráfico basado en los valores previstos de variables socioeconómicas.

Aunque en general no es su campo de aplicación, también han sido aplicados con éxito en la previsión de evolución del tráfico interurbano, combinados en este caso con modelos Logit que calculan la probabilidad de que los viajes sean realizados.

Se recomienda su utilización en aquellas situaciones en que la complejidad de la demanda requiera modelizar la generación-atracción de viajes.

3.2. Comparativa con referencias oficiales

Tras la obtención de la tasa de crecimiento a partir del modelo elegido, se realizará una comparación con la Orden FOM/3317/2010, Instrucción para la mejora de la eficiencia en la ejecución de las obras públicas de infraestructuras ferroviarias, carreteras y aeropuertos del Ministerio de Fomento, o cualquier otra referencia⁸ en la que se establezcan tasas de crecimiento previstas en la red de carreteras nacional.

Incrementos de tráfico a utilizar en estudios	
Periodo	Incremento anual acumulativo
2013-2016	1,08%
2017 en adelante	1,44%

Tabla 4. Incrementos de tráfico establecidos en la Orden FOM/3317/2010

Si se propone la utilización de tasas de crecimiento de tráfico a largo plazo distintas a las establecidas por las referencias oficiales, estas se justificarán adecuadamente y se comunicará las circunstancias que aconsejan la adopción de nuevos valores a la Dirección del Estudio o Proyecto, para su aprobación.

3.3. Tráfico inducido

La distinción entre el tráfico existente y tráfico inducido es necesaria para realizar el análisis de rentabilidad económica en los Estudios Informativos, ya que su tratamiento es diferente, aplicándose a este último para la evaluación de beneficios la conocida “regla de la mitad”.

En este contexto, se considera como tráfico inducido al ocasionado por viajes que no existen en la demanda potencial del año base y que son originados por la actuación en la carretera en estudio, en general por un aumento de la frecuencia de los viajes, facilitados por la mejora de la accesibilidad y/o conectividad que proporciona la actuación a realizar.

También puede considerarse tráfico inducido el tráfico producido por el cambio en los usos del suelo, que estén condicionados a la realización de la actuación objeto del Estudio.

La redistribución de viajes como consecuencia de cambios en destinos no se considera tráfico inducido.

⁸ En la página Web del Ministerio de Fomento, en la fecha de redacción de este Manual, se especifica que está en fase de elaboración un documento sobre Previsiones de tráfico en la red de carreteras.

Para la estimación del tráfico inducido se recomienda la utilización de modelos de generación de viajes que sean sensibles a las variables de accesibilidad, combinados con modelos de distribución de viajes descritos en el apartado 9.3 de este documento.

Si el tráfico inducido tiene una participación significativa en el tráfico total, es conveniente contrastar las estimaciones con los resultados obtenidos en actuaciones similares que se hayan realizado anteriormente y que estén documentadas.

En la presentación de los resultados, el tráfico inducido debe estar separado del tráfico existente y deberá explicarse el método seguido para su estimación.

3.4. Periodo de transición

Los modelos de asignación consideran que los usuarios conocen desde el principio los beneficios de utilizar una carretera nueva. Sin embargo, esta suposición no siempre coincide con el comportamiento de los usuarios, en especial en el caso de una nueva carretera que forme parte de un itinerario del que existen otras alternativas competitivas en términos de coste y tiempo de viaje.

Otro caso en el que los beneficios no son conocidos desde el principio es el de las vías de peaje con una alternativa libre de peaje.

El periodo que transcurre desde la puesta en servicio hasta que los usuarios conozcan las ventajas y posibilidades que le ofrece la nueva carretera se denomina periodo de transición (en inglés “ramp-up”).

La duración del periodo de transición, que puede ser desde unos meses a más de un año, depende de:

- La proporción de usuarios habituales y la frecuencia con la que realizan los viajes.
- Las ventajas que ofrece la nueva carretera respecto a los itinerarios existentes.
- La información que se proporcione sobre la nueva carretera.

Otros periodos de transición a considerar son los motivados por la puesta en servicio parcial de tramos correspondientes a la actuación en estudio.

En los estudios de tráfico incluidos en Estudios Informativos se determinará si se debe considerar un periodo de transición de la demanda.

Se recomienda que la duración del periodo de transición y la evolución previsible del tráfico durante este periodo se establezca a partir del análisis del comportamiento del tráfico en actuaciones similares puestas en servicio.

4. Niveles de servicio

Para el cálculo de niveles de servicio se aplicará la metodología del Manual de Capacidad 2010 del Transportation Research Board de los Estados Unidos de América (HCM 2010).

Un aspecto importante a considerar es que en la versión en lengua inglesa del Manual de Capacidad, las unidades corresponden al sistema inglés, por lo que deben extremarse las precauciones en el uso de los algoritmos, recomendándose que los cálculos se realicen con unidades en el sistema inglés y los resultados sean transformados a unidades del sistema internacional.

4.1. Cálculo de nivel de servicio en Estudios Informativos

En los Estudios de tráfico de los Estudios Informativos se recomienda la utilización de las tablas de intensidades de servicio generalizadas (“Generalized Service Volume Tables”), que permiten calcular la máxima intensidad de tráfico que puede soportar un elemento de la vía para un determinado Nivel de Servicio.

La utilización de estas tablas permite una rápida estimación de los niveles de servicio, el pre-dimensionamiento de los elementos de la carretera para atender la demanda a largo plazo y su utilización en los modelos de demanda de tráfico.

El Anexo 2 contiene las tablas de intensidades de servicio generalizadas correspondientes a las clases de carreteras más habituales: carreteras convencionales de 100 km/h, multicarril con cuatro carriles de velocidad 100 km/h y autovías de cuatro carriles de velocidad 120 km/h.

4.2. Cálculo de niveles de servicio en Anteproyectos y Proyectos

En los estudios de tráfico de los anteproyectos y proyectos se deberá realizar una segmentación del trazado en elementos básicos y aplicar a cada elemento la metodología correspondiente del Manual de Capacidad.

La segmentación a considerar en el tronco de autopistas y autovías es: segmentos básicos, tramos de trenzado y zonas de confluencias y divergencias.

El gráfico 8 muestra los criterios básicos de tramificación de autopistas y autovías propuestos en el Manual de Capacidad HCM 2010.

La longitud máxima de trenzado es una cantidad variable que puede estimarse utilizando la tabla 5 a partir de la relación la intensidad de tráfico que trenza (que cambia de carril cruzándose con otras corrientes de tráfico) respecto a la intensidad total de tráfico en la sección considerada y del número de carriles afectados directamente por el trenzado.

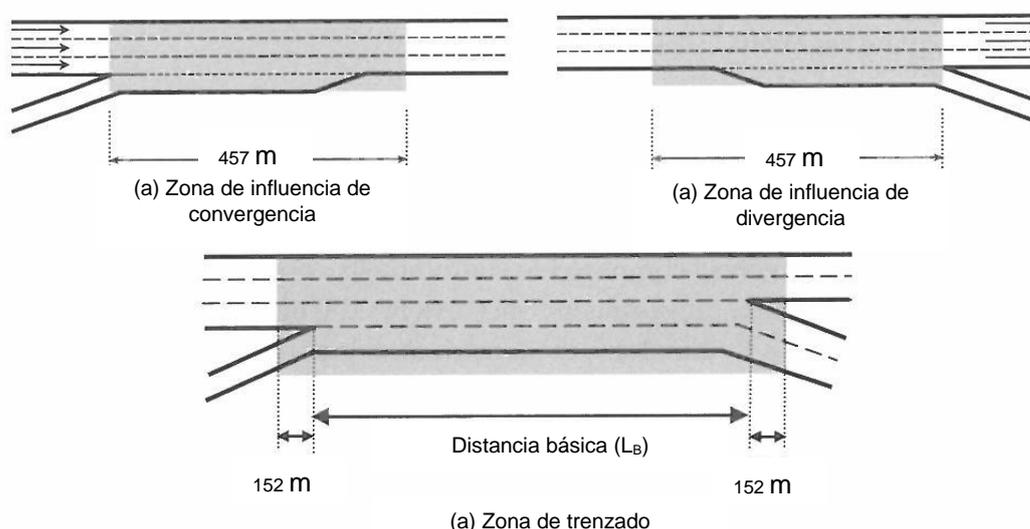


Gráfico 8. Criterios del HCM 2010 para tramificación del tronco en Autopistas y Autovías

La longitud máxima de trenzado, depende de la proporción relativa del tráfico que realiza maniobras de trenzado respecto al tráfico total ($\frac{I}{I_t}$) y del número de carriles que se ven afectados por las maniobras de trenzado (N_t)

Longitud máxima de trenzado L_{MAX} (m)		
$\frac{l}{l_t}$	Número de carriles de trenzado (N_t)	
	2	3
0,1	1080	602
0,2	1383	906
0,3	1703	1225
0,4	2038	1560
0,5	2387	1909
0,6	2751	2273
0,7	3128	2650
0,8	3519	3041

Tabla 5. Longitud máxima de trenzado

Si $L_S > L_{MAX}$ no se considerará que existe trenzado y el tramo comprendido entre zonas de influencia de convergencias y divergencias será considerado como un tramo básico.

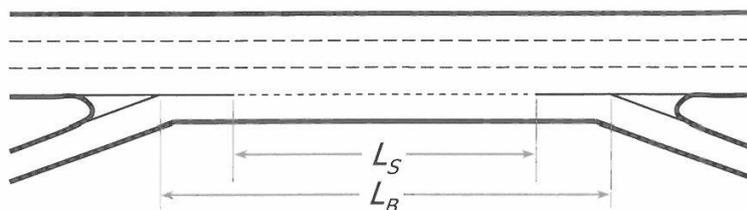


Gráfico 9. Longitudes para cálculo de trenzado

En los proyectos de nuevas carreteras o ampliación de existentes deberá comprobarse que el nivel de servicio en la hora de proyecto del año horizonte, es el que se establece en la Norma 3.1.IC Trazado de la Instrucción de Carreteras.

El Manual de Capacidad define los niveles de servicio mediante uno o dos factores instrumentales que pueden medirse y que son los más representativos del estado de la circulación para el tipo de elemento de carretera que se esté estudiando.

La variable básica para la determinación del nivel de servicio en autopistas y autovías es la densidad.

Las tablas 6 a 10 muestran los criterios de nivel de servicio para los siguientes elementos: segmentos básicos de autopistas/autovías, tramos de trenzado, convergencias y divergencias y carreteras multi-carriles.

NIVEL DE SERVICIO EN SEGMENTOS BÁSICOS DE TRONCO DE AUTOPISTAS/AUTOVÍAS	
Nivel de servicio	Densidad (veh. lig. eq./ km por carril)
A	≤ 7
B	$>7 - 11$
C	$>11 - 16$
D	$>16 - 22$
E	$>22 - 28$
F	>28 Demanda excede la capacidad

Tabla 6. Nivel de servicio en segmentos básicos de troncos de autopistas y autovías.

NIVEL DE SERVICIO EN TRAMOS DE TRENZADO		
Nivel de servicio	Densidad (veh. lig. eq./ km por carril)	
	Autopistas y Autovías	Carreteras multicarril o carreteras tipos C-D
A	≤ 6	≤ 7
B	$>6 - 12$	$>7 - 15$
C	$>12 - 17$	$>15 - 20$
D	$>17 - 22$	$>20 - 22$
E	>22	>22
F	Demanda excede la capacidad	

Tabla 7. Nivel de servicio en tramos de trenzado.

NIVEL DE SERVICIO EN CONVERGENCIAS Y DIVERGENCIAS		
Nivel de servicio	Densidad (veh. lig. eq./ km por carril)	Comentarios
A	≤ 6	Sin restricciones en la operación de los vehículos.
B	$>6 - 12$	Las maniobras de convergencia y divergencia empiezan a ser notadas por los conductores
C	$12 - 17$	La velocidad en la zona de influencia comienza a descender
D	$17 - 22$	Se empiezan a producir turbulencias en la zona de influencia.
E	>22	Las turbulencias pueden afectar virtualmente a todos los conductores
F	Demanda excede la capacidad	Se forman colas en el tronco y en el ramal

Tabla 8. Nivel de servicio en convergencias y divergencias.

NIVEL DE SERVICIO EN CARRETERAS MULTICARRIL		
Nivel de servicio	Velocidad libre (Km/h)	Densidad (veh. lig. eq./ km por carril)
A	Todas	≤ 7
B	Todas	$> 7 - 11$
C	Todas	$> 11 - 16$
D	Todas	$> 16 - 22$
E	96	$> 22 - 25$
	88	$> 22 - 26$
	80	$> 22 - 27$
	72	$> 22 - 28$
F	Demanda excede la capacidad	
	96	> 25
	88	> 26
	80	> 27
	72	> 28

Tabla 9. Nivel de servicio en segmentos básicos de troncos de autopistas y autovías.

En carreteras convencionales de dos carriles, las variables que definen el nivel de servicio para automóviles son: la velocidad media de recorrido, el porcentaje de tiempo que los vehículos circulan detrás de vehículos más lentos sin poder adelantar o alternativamente (para las carreteras de clase III) el porcentaje de la velocidad media de recorrido en relación a la del flujo libre.

El Manual de capacidad considera tres clases para el análisis de carreteras convencionales, dependiendo de su funcionalidad. Las clases consideradas son:

- Las de clase I, tienen como función el facilitar la movilidad a velocidades relativamente altas, como las que forman la red principal interurbana.
- Las de clase II, no tiene por qué facilitar el desarrollo de altas velocidades, bien por su función complementaria de las de categoría I, o por discurrir por terrenos accidentados, tener carácter turísticos, etc.
- Las de clase III, son las travesías de población y carreteras que discurren dentro de zonas urbanizadas.

El nivel de servicio en carreteras de dos carriles se determina mediante los criterios de la tabla 10.

NIVEL DE SERVICIO EN CARRETERAS DE DOS CARRILES				
Nivel de servicio	Clase I		Clase II	Clase III
	Velocidad media de recorrido (km/h)	Porcentaje de tiempo circulando en cola detrás de un vehículo más lento (%)	Porcentaje de tiempo circulando en cola detrás de un vehículo más lento (%)	Porcentaje de la velocidad media de recorrido en relación a la velocidad libre (%)
A	> 88	≤ 35	≤ 40	> 91.7
B	$> 80 - 88$	$> 35 - 50$	$> 40 - 55$	$> 83.3 - 91.7$
C	$> 72 - 80$	$> 50 - 65$	$> 55 - 70$	$> 75.0 - 83.3$
D	$> 64 - 72$	$> 65 - 80$	$> 70 - 85$	$> 66.7 - 75.0$
E	< 64	> 80	> 85	≥ 66.7
F	Si en una o en ambas direcciones la demanda excede la capacidad			

Tabla 10. Nivel de servicio en carreteras convencionales de dos carriles.

El cálculo de niveles de servicio en nudos viarios y en glorietas se describe en los apartados siguientes de este documento.

5. Estudio de tráfico en nudos

5.1. Información necesaria

Desde el momento mismo de la selección del tipo de nudo⁹, resulta imprescindible conocer:

- Las intensidades horarias de la circulación que se van a considerar en todos los movimientos posibles¹⁰, distinguiendo entre los de paso (que no cambian sensiblemente de dirección), y los de giro (que sí lo hacen).
- Sobre todo en las zonas urbanas, la composición del tráfico¹¹, incluso distinguiendo su variación horaria.
- La velocidad de los vehículos y la posibilidad de su regulación, en particular para mejorar la seguridad en los puntos de conflicto.
- La evolución de estos parámetros hasta el año horizonte.

Sobre todo donde las intensidades sean elevadas, se recomienda:

- Conocer para las intensidades de todos los movimientos su evolución horaria, diaria y mensual, ya que probablemente no coincidirán las horas punta de todos los movimientos, y puede ser necesario considerar el funcionamiento del nudo para distintas situaciones.
- Determinar las repercusiones en la seguridad del empleo de ciertos elementos del diseño (por ejemplo, los carriles centrales de espera para girar a la izquierda).

5.2. Niveles de servicio en nudos

5.2.1. Definición de niveles de servicio en nudos.

El estudio del tráfico de un nudo viario tiene como objeto fundamental la definición de su capacidad y de su nivel de servicio, es decir: de su límite de eficacia y de su nivel de eficiencia operativa desde la perspectiva del usuario, en distintos escenarios (presentes o futuros).

Todavía no se dispone de técnicas para analizar el tráfico de un nudo como una entidad completa; por lo que es necesario estudiar los diversos elementos simples que lo constituyen: tronco, vías de giro, ramales, divergencias, convergencias, cruces, trenzados, glorietas, etc. El estudio de cada elemento, tanto aislado como coordinado, se debe llevar hasta donde las herramientas de análisis lo permitan.

En este análisis de todos los elementos de un nudo viario, interesa detectar los que previsiblemente se agotarán primero con el aumento de la demanda previsible antes del año horizonte que, a la vista de la dificultad y del coste de acondicionar los nudos, no se debe tomar inferior a 30 años.

Las variables utilizadas para definir los niveles de servicio de los elementos de un nudo viario son los siguientes:

⁹ En este apartado se han integrado y actualizado los contenidos relativos al tráfico de la Guía de Nudos Viarios (O.C. 32/2012).

¹⁰ Teniendo en cuenta que la capacidad de los tramos viarios que concurren en el nudo puede limitar las intensidades en éste.

¹¹ Por ejemplo, una elevada proporción de vehículos pesados puede influir en la longitud de los carriles adicionales o de cambio de velocidad.

- Tramos básicos de vías de alta capacidad: la densidad.
- Divergencias y convergencias: la densidad.
- Trenzados: la densidad.
- Elementos ligados a la circulación discontinua (cruces, glorieta, etc.): la demora.

En los elementos de un nudo viario se pueden distinguir dos niveles de servicio en el año horizonte:

- Un nivel **normal** o aceptable, que corresponde al denominado C, y en el que se pueden garantizar a los conductores unas condiciones de circulación relativamente cómodas, como las siguientes:
 - Las detenciones son de muy corta duración (algunos segundos).
 - La velocidad media de avance es del orden de 50 km/h.
 - La probabilidad de un colapso generalizado de la circulación es inferior al 10 %.
- Un nivel **extraordinario**¹² en las horas punta, que corresponde al denominado D, en el que la circulación por algunos elementos del nudo se puede volver inestable¹³, y la probabilidad de un colapso generalizado es superior al 50 %. Sin embargo, los conductores pueden encontrar aceptables estas condiciones siempre que resulte muy claro:
 - Que son inevitables.
 - Que son localizadas y temporales.
 - Que más adelante las condiciones de circulación mejoran.

Aplicando los criterios de determinación del nivel de servicio del apartado 7.3., se deberá justificar:

- Si resulta admisible el número de horas anuales durante las cuales se rebasan los niveles de servicio normal y extraordinario definidos anteriormente.
- Que la formación de colas en las salidas del tronco no va a perturbar, por su longitud o duración, el funcionamiento de éste.

5.2.2. Criterios para determinar el nivel de servicio en nudos

El nivel de servicio de un elemento de una vía depende del valor que adopten en la realidad ciertos parámetros relacionados con el tráfico. En una carretera existente esos valores se pueden medir, obteniendo de la medición una apreciación bastante exacta del nivel de servicio; pero si la carretera o el elemento que se estudia están todavía en fase de proyecto es preciso recurrir a estimaciones basadas, generalmente, en modelos físico-matemáticos del comportamiento del tráfico.

En intersecciones los valores de los parámetros que determinan el nivel de servicio de las intersecciones, son los contenidos en las tablas 11 y 12.

Para los enlaces regulados por prioridad, que son la práctica totalidad de los enlaces interurbanos, se realizará una segmentación en elementos siguiendo los criterios del HCM 2010, aplicando a cada elemento los criterios descritos en el apartado anterior (apartado 6).

El capítulo 22 del Manual de Capacidad contiene una metodología específica para analizar el nivel de servicio en enlaces semaforizados de tipo diamante, trébol parcial y

¹² Aunque las intensidades de servicio que le corresponden a veces sólo sean ligeramente superiores a las del nivel normal.

¹³ Aunque permanezca estable la circulación por los tramos viarios, lejos del nudo.

enlaces urbanos en U, así como enlaces mediante glorietas. Esta metodología será utilizada exclusivamente en el caso de conexiones con vías urbanas que cumplan las condiciones establecidas en el HCM 2010.

Muchas de las intensidades de la circulación relacionadas con la capacidad o con los niveles de servicio de los elementos de un nudo viario se refieren a **vehículos ligeros equivalentes** por unidad de tiempo. En los nudos se podrá admitir que cada vehículo pesado equivale a un cierto número de vehículos ligeros: el cual se justificará, pero no será nunca inferior a 2.

NIVEL DE SERVICIO EN INTERSECCIONES REGULADAS POR SEMÁFOROS	
Nivel de servicio	Demora media (s/veh.)
A	≤10
B	>10 - 20
C	>20 - 35
D	>35 - 55
E	>55 - 80
F	>80 Demanda excede la capacidad

*Tabla 11 Nivel de servicio en intersecciones reguladas por semáforos.
Deducida de la tabla 18-5 del HCM 2010*

NIVEL DE SERVICIO EN INTERSECCIONES REGULADAS POR PRIORIDAD FIJA	
Nivel de servicio	Demora media (s/veh.)
A	≤10
B	>10 - 15
C	>15 - 25
D	>25 - 35
E	>35 - 50
F	>50 Demanda excede la capacidad

*Tabla 12 Nivel de servicio en intersecciones reguladas por prioridad fija.
Deducida de la tabla 19-1 del HCM 2010*

5.3. Niveles de servicio en glorietas

La tabla 13 establece los métodos de análisis recomendados para realizar el estudio de tráfico de las glorietas.

Aplicación	Resultados buscados	Datos necesarios	Métodos de análisis recomendados
Diseño de glorietas con hasta dos carriles	Detalle de configuración de carriles	Intensidades de tráfico, geometría	HCM 2010, Modelos determinísticos
Diseño de glorietas con más de dos carriles y/o carriles cortos/abocinados	Detalle de configuración de carriles	Intensidades de tráfico, geometría	Modelos determinísticos
Tratamientos para peatones	Demora de vehículos, cola de vehículos, demora de peatones	Intensidades de tráfico vehicular y peatonal, diseño de pasos de peatones.	HCM 2010, Modelos determinísticos, Simulación.
Sistema de glorietas	Tiempo de recorrido, demoras y colas entre intersecciones	Intensidades de tráfico, geometría	HCM 2010, Simulación.

Tabla 13. Métodos recomendados para el análisis de tráfico en glorietas¹⁴

Estos métodos de análisis se describen en los siguientes epígrafes.

Como criterios de nivel de servicio se utilizarán los del Manual de Capacidad de 2010 del TRB (HCM 2010), expresados en la tabla 14.

NIVEL DE SERVICIO EN GLORIETAS	
Nivel de servicio	Demora media (s/veh.)
A	≤10
B	>10 - 15
C	>15 - 25
D	>25 - 35
E	>35 - 50
F	>50 Demanda excede la capacidad

Tabla 14. : Nivel de servicio en glorietas.

El HCM 2010 considera la demora como la suma del tiempo que un conductor gasta en la cola (demora por cola) y el tiempo que gasta al frente de la cola esperando un hueco aceptable para entrar a la glorieta (demora geométrica).

Los niveles de servicio se evaluarán por carril, acceso y conjunto de glorieta.

5.3.1. Método del HCM 2010

La aplicación de este método está limitada a las glorietas que cumplan todas las condiciones siguientes:

- Glorietas aisladas.
- Máximo de dos carriles por entrada.
- No más de un bypass por aproximación.

¹⁴ Extraída de la tabla 4-4 del NHCRP - Report 672

- Sin carriles cortos/abocinados.
- Tráfico moderado de peatones y ciclistas.

Si se cumplen todas estas condiciones se podrá aplicar la metodología para el cálculo del nivel de servicio descrita en el capítulo 21 del Manual de Capacidad de 2010.

Según esta metodología, el proceso de análisis del nivel de servicio en la glorieta es el siguiente:

- 1) Conversión de las intensidades de entrada de cada ramal en intensidades de circulación por la glorieta.
- 2) Cálculo de ajustes para tener en cuenta la composición del tráfico.
- 3) Cálculo de capacidad de cada entrada.
- 4) Cálculo de relaciones intensidad/capacidad.
- 5) Cálculo de las demoras de tiempo de acceso en cada ramal de entrada y de la demora media ponderada de la glorieta.
- 6) Cálculo de los niveles de servicio de cada ramal de acceso y del conjunto de la glorieta.
- 7) Cálculo de la longitud de cola en cada ramal de acceso para cada escenario considerado.

En el caso de que no se cumplan las condiciones descritas para aplicar la metodología del HCM 2010, se empleará alguno de los métodos de análisis descritos a continuación.

5.3.2. Métodos determinísticos

Para el cálculo del nivel de servicio en glorietas por medio de métodos determinísticos, es necesario calcular en primer lugar la capacidad y posteriormente la demora, ya que esta última está relacionada con la capacidad.

Existen varias aplicaciones de software que facilitan la realización del análisis de tráfico en glorietas, que se basan en la aplicación de las teorías descritas a continuación¹⁵.

5.3.2.1. Capacidad

Existen dos tipos de métodos para la estimación de la capacidad: los modelos que tratan de establecer los parámetros de esta relación de forma empírica (métodos empíricos) y los que intentan hacerlo a través de distintos modelos teóricos de tipo probabilístico.

La mayoría de países ha adoptado su modelo de capacidad basándose en alguno de estos dos métodos. La base de los modelos empíricos tiene su origen en el Reino Unido, mientras que la de los modelos probabilísticos basados en la teoría de la aceptación del hueco tiene su origen en Australia.

Modelos empíricos

Los modelos empíricos desarrollan relaciones entre las características geométricas de la glorieta y las medidas de su funcionamiento, tales como la capacidad y la demora.

El método empírico del Ministerio de Fomento se describe en el apartado 1.3 de las Recomendaciones sobre Glorietas de 1999.

¹⁵ Un análisis del estado del arte en el cálculo de capacidad y niveles de servicio en Glorietas, con una descripción detallada de métodos de cálculo puede verse en la publicación “*Estudio y mejora de la capacidad y funcionalidad de glorietas con flujos de tráfico descompensados mediante microsimulación de tráfico*”. IX Premio Abertis de Tesina/Proyecto. Mariló Martín Gasulla.

Otros métodos determinísticos muy utilizados son el método inglés, alemán, francés, suizo y danés.

A continuación se describe el método determinístico adoptado por el Ministerio de Fomento.

Según este método, la estimación de la capacidad se realiza en dos etapas: En primer lugar se determina la capacidad de cada entrada en función de la intensidad de la circulación anular (prioritaria) que la corta y en segundo lugar se debe calcular la intensidad que aporta cada entrada. Como ésta depende de la intensidad prioritaria que, a su vez, proviene de las entradas anteriores, el problema de predecir el equilibrio medio de todas las intensidades que entran a la glorieta se convierte en iterativo.

Así coexisten dos elementos:

a. Una relación entre la capacidad de cada entrada y la intensidad prioritaria que la corta:

$$Q_e = F - f \cdot Q_c$$

Dónde:

Q_e : Capacidad de una entrada (veh.lig.equivalente/h)

Q_c : Intensidad de tráfico anular (veh.lig.equivalente/h)

F y f : Parámetros en función del trazado en planta:

$$F = 303 \cdot x \cdot k$$

$$f = 0,210 \cdot t \cdot k \cdot (1 + 0,2 \cdot x)$$

$$x = v + \frac{e - v}{1 + 2 \cdot S}$$

$$k = 1 - \frac{\emptyset - 33}{259} - 0,978 \cdot \left(\frac{1}{R} - 0,05 \right)$$

$$t = 1 + \frac{0,5}{1 + e^{\left(\frac{D-60}{10} \right)}}$$

$$S = 1,6 \cdot \frac{e - v}{l}$$

Dónde:

e : Anchura de la entrada (m)

v : Semianchura de la calzada de acceso (m)

l : Longitud del abocinamiento de entrada (m)

\emptyset : Ángulo entre las trayectorias de entrada y anular (gonios)

R : Mínimo radio de la trayectoria de entrada (m)

D : Diámetro de la isleta central (m)

El gráfico 10a muestra gráficamente estos parámetros:

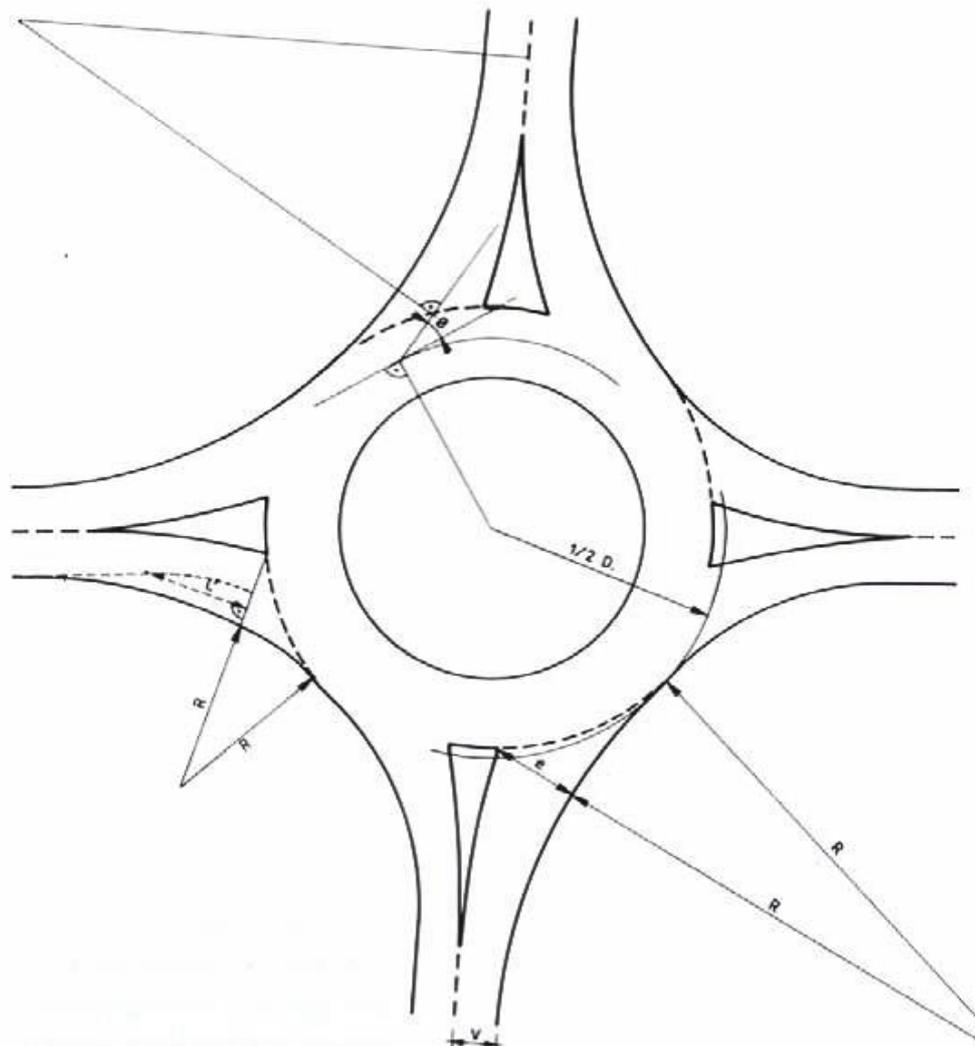


Gráfico 10a: Parámetros geométricos para cálculo de capacidad en entradas a glorietas

La formulación anterior corrige una errata detectada en las Recomendaciones sobre Glorietas¹⁶.

Esta ecuación establece una jerarquía entre los diferentes parámetros que influyen en el proceso. La anchura de los accesos y de la misma entrada, así como la longitud del abocinamiento, son los más importantes. El diámetro de la isleta central tiene un efecto pequeño pero importante. El ángulo y el radio de la entrada contribuyen con correcciones menores.

Otra ecuación, desarrollada a partir de mediciones en glorietas fuera de poblado, es la siguiente:

¹⁶ La ecuación para el cálculo de la variable t en la publicación de **Recomendaciones sobre Glorietas** es erróneamente $t = 1 + 0,5 \cdot \left(1 + e^{\frac{(D-60)}{10}}\right)$ lo que implicaría que la capacidad de la glorietta disminuiría con el diámetro de la misma. El error fue puesto de manifiesto en un estudio llevado a cabo por la Conselleria d' Infraestructures y Transport junto con Intercontrol Levante S.A. en 2008.

$$Q_e = (1330 - 0,7 \cdot Q_g) \cdot [1 + 0,1 \cdot (e - 3,5)]$$

Siendo:

$$Q_g = \left[Q_c + \frac{2}{3} Q_s \cdot \left(1 - \frac{m}{15} \right) \right] \cdot [1 - 0,085 \cdot (c - 8)]$$

Las anchuras se expresan en metros y las intensidades Q (ver gráfico 10b) se expresan en vehículos ligeros/hora, con un valor de 2 para el factor de equivalencia de vehículos pesados.

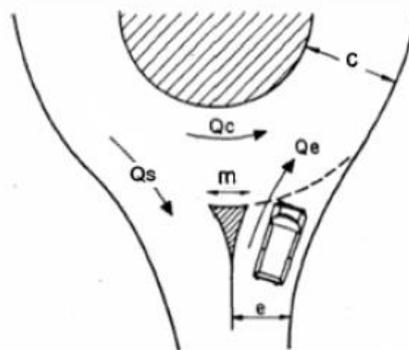


Gráfico 10b. Parámetros a tener en cuenta para el cálculo de capacidad de glorietas en el Método empírico del Ministerio de Fomento

b. Un proceso de equilibrio iterativo entre todas las intensidades que entran:

Teniendo en cuenta la ecuación anterior, se ha de proceder a diseñar un algoritmo que en un proceso iterativo calcule el equilibrio entre las intensidades de las diferentes entradas. El proceso comienza asumiendo una Q_c nula en un tramo de la calzada anular anterior a una entrada. La intensidad en esta entrada será el menor de los dos valores, F o la intensidad de demanda. Esta intensidad de entrada, una vez restados los vehículos que salen en la próxima salida, se convierte en la Q_c para la próxima entrada, cuya intensidad (de esta entrada) es igual al menor de los dos valores, intensidad de demanda o capacidad (calculada por la misma fórmula). Así se puede calcular la c Q para la próxima entrada, en progresión a lo largo de la glorieta. Cuando, después de un ciclo completo, se haya calculado la Q_c para la primera entrada, se puede determinar una Q_e revisada, que puede ser el comienzo de una segunda iteración, y se repite todo el proceso. Después de varias iteraciones, las intensidades de entrada de cada ramal convergen hacia sus valores finales.

Este proceso es una forma cómoda de resolver el sistema de n ecuaciones simultáneas (con la forma anteriormente indicada), en las que los valores Q_c son funciones de las proporciones de tráfico que salgan y de las intensidades de entrada desde los otros ni accesos.

Pueden resultar interesantes, para tanteos previos, las isócronas del tiempo de demora, en función de las intensidades Q_c y Q_g (impedimento) para las entradas de 3.5 m de anchura en glorietas interurbanas, que se reflejan en el gráfico 11.

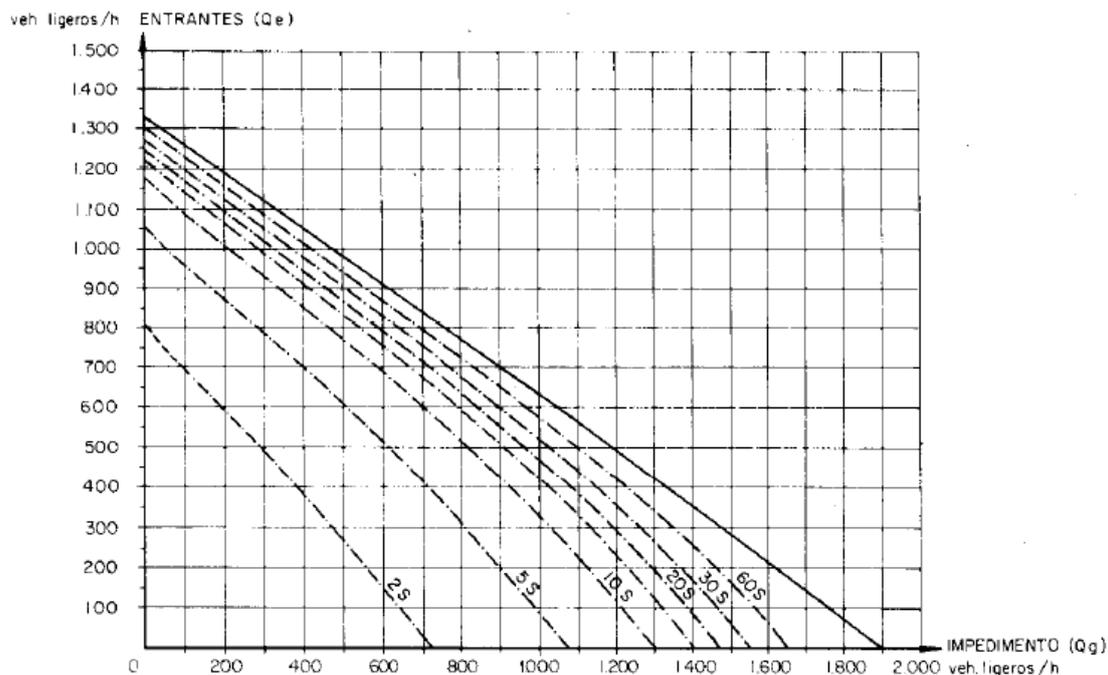


Gráfico 11. Capacidad de entrada (3,5 m de anchura) de una glorieta e isócronas del tiempo de espera.

Modelos probabilísticos

Los modelos probabilísticos están basados en la teoría de la aceptación del hueco.

Según estos modelos para que un conductor entre en la glorieta, tiene que producirse un hueco mayor que un valor umbral que se denomina hueco crítico.

Para modelar el proceso de aceptación de huecos, es necesario describir la probabilidad de ocurrencia de una oportunidad de entrada de los vehículos a la glorieta. Para esto se requiere estudiar la distribución de los intervalos de tiempo entre vehículos que circulan por la misma.

5.3.2.2 Demora

La demora en las glorietas tiene dos componentes: la demora por cola y la demora causada por la existencia de la glorieta (demora geométrica). La demora media es la suma de ambas.

Para la estimación de la demora las dos metodologías de cálculo más utilizadas son:

- Modelos basados en la teoría de aceptación de intervalos: A este tipo pertenece el modelo de AustroRoads (Troutbeck, 1986).
- Modelos basados en el funcionamiento de sistemas de colas. El modelo más utilizado de este tipo es el del Transport Research Board (TRB) del Reino Unido (Kimber y Hollins¹⁷, 1979)

El modelo de Troutbeck calcula la *demora por cola* mediante la ecuación siguiente:

$$D = \frac{3600}{Q_e} + 900 \cdot T_f \cdot \left(x - 1 + \left((x - 1)^2 + \frac{8 \cdot K_d \cdot x}{Q_e \cdot T_f} \right)^{0,5} \right)$$

¹⁷ Kimber, R.M.; Hollis, E.M., Traffic Queues and Delays at Junctions, Transport and Road Research Laboratory, Report LR 909, Crowthorne, 1979.

Dónde:

D : Demora media en la entrada en línea de línea de ceda.

T_f : Duración del análisis (horas).

K_d : Parámetro de sobreflujo = 1.

x : Grado de saturación que se calcula como cociente del flujo de llegada q_a y la capacidad de la entrada Q_e .

$$x = \frac{q_a}{Q_e}$$

Para el cálculo de la *demora geométrica* se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$D_G = P_S \cdot D_S + (1 - P_S) \cdot D_U$$

Dónde:

P_S : Proporción de vehículos detenidos (en tanto por uno).

D_S : Demora geométrica de vehículos detenidos.

D_U : Demora geométrica de vehículos que no necesitan detenerse.

D_G : Demora geométrica media.

Los valores de las demoras geométricas de vehículos detenidos y de los que no necesitan detenerse se pueden estimar a partir de las tablas 15 y 16.

Velocidad aproximación V_a (Km/h)	Distancia alrededor de la glorieta D (m)	Velocidad de negociación a través de la glorieta (Km/h)							
		15	20	25	30	35	40	45	50
40	65	10	8	7	7	7			
40	195	19	15	12	9	7			
40	325		22	17	13	10			
40	460				18	14			
40	590					18			
60	65	13	11	10	10	10	10	10	10
60	195	23	18	15	13	10	10	10	10
60	325		26	21	18	15	12	10	10
60	460				22	19	15	12	10
60	590					23	19	15	10
80	65	17	15	13	13	13	13	13	13
80	195	26	22	19	17	14	13	13	13
80	325		29	25	21	19	16	13	13
80	460				26	23	19	16	13
80	590					27	23	19	16
100	65	20	18	17	17	17	17	17	17
100	195	30	25	22	20	18	17	17	17
100	325		33	28	25	22	20	17	17
100	460				30	26	23	20	17
100	590					30	27	24	20

Tabla 15. Demora geométrica para vehículos parados (seg/veh)

Velocidad aproximación V_a (Km/h)	Distancia alrededor de la glorieta D (m)	Velocidad de negociación a través de la glorieta (Km/h)							
		15	20	25	30	35	40	45	50
40	20	7	4	2	1	0			
40	60	17	11	7	4	0			
40	100		19	13	8	4			
40	140				13	8			
40	180					12			
60	20	11	8	5	4	3	2	1	1
60	60	20	15	11	8	4	2	1	1
60	100		22	17	13	9	5	1	1
60	140				17	13	8	4	1
60	180					17	12	7	2
80	20	14	11	9	7	6	5	4	3
80	60	24	19	15	11	8	5	4	3
80	100		26	20	16	13	9	5	3
80	140				21	17	13	9	4
80	180					21	16	12	7
100	20	18	15	12	10	9	8	7	6
100	60	27	22	18	15	12	9	7	6
100	100		29	24	20	16	13	10	6
100	140				25	20	17	13	12
100	180					25	20	16	

Tabla 16. Demora geométrica para vehículos no parados (seg/veh)

Los parámetros geométricos utilizados en las tablas se aclaran en el gráfico 12

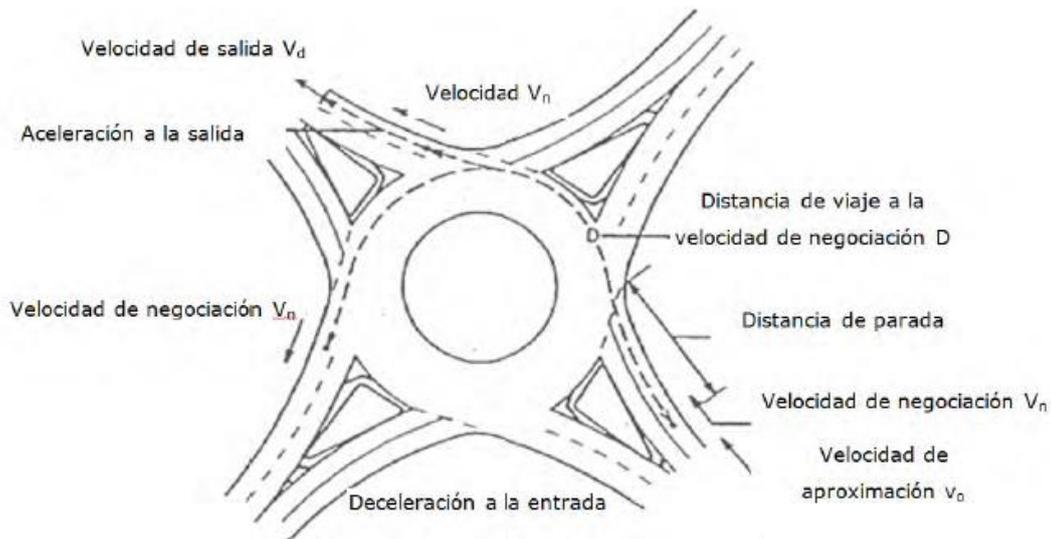


Gráfico 12. Parámetros geométricos para el cálculo de la demora geométrica.

5.3.3. Micro-simulación de tráfico

Los modelos de micro-simulación de tráfico en glorietas son útiles para analizar circunstancias especiales de glorietas aisladas (por ejemplo la presencia de un número importante de peatones y/o ciclistas) y también para analizar el funcionamiento de la glorieta de forma combinada con otras glorietas y/o intersecciones.

Los modelos de micro-simulación modelan el tráfico a nivel de vehículos individuales, es decir a nivel del comportamiento del conductor, su interacción con el resto de los vehículos y su interacción con la infraestructura. El comportamiento del modelo está basado en algoritmos de seguimiento de vehículo y cambio de carril por vehículos individuales.

La demanda se simula mediante matrices origen/destino dinámicas.

En estos modelos la infraestructura deberá de ser conocida de forma detallada no solo en su geometría, sino también en el sistema de regulación del tráfico (señalización y funcionamiento de los sistemas de control).

En general los modelos de micro-simulación están basados en la regla de “aceptación del hueco” para representar el comportamiento de los conductores que acceden a la glorieta.

Existen una gran variedad de aplicaciones y paquetes informáticos que permiten realizar las tareas de micro-simulación.

Estos simuladores son capaces de simular el comportamiento del tráfico en distintas situaciones de forma muy eficiente, disponiendo en general de potentes herramientas gráficas que permiten visualizar este comportamiento.

6. Modelización del tráfico

En este apartado se realizan recomendaciones para la utilización de modelos de previsión de la demanda de tráfico, basadas en la experiencia internacional en su utilización y teniendo en cuenta el estado de desarrollo de las técnicas de modelización.

La utilización de modelos distintos de los recomendados en este apartado, deberá ser justificada, describiendo las ventajas de su uso frente a las recomendaciones contenidas en este documento.

6.1. Criterios básicos para selección de modelos

La selección del tipo de modelo a utilizar estará basada en el análisis de la eficacia del mismo para explicar la mayor parte del *tráfico potencial* que podría utilizar la carretera en estudio.

La determinación del tráfico potencial se realizará a partir del análisis de la función de la carretera a estudiar y de los beneficios de la misma en términos de menores tiempos de viaje (para algunas relaciones O/D), mejor nivel de servicio, mayor seguridad, etc.

En general se deberá de utilizar el modelo más sencillo que pueda explicar el comportamiento de los usuarios que constituyen la parte sustancial del tráfico potencial.

En el caso de problemas sencillos como un nuevo tramo de conexión entre dos vías existentes o en nuevas carreteras interurbanas con pocas alternativas, lo más apropiado será generalmente utilizar un modelo Logit de elección entre alternativas discretas.

Para problemas más complejos, con más alternativas, o con posibilidades de intercambio modal es deseable adoptar un paquete de modelización comercial, que permiten el desarrollo completo de *modelos clásicos de 4/5 etapas*, *modelos basados en actividades*, etc.

Si es de esperar que se produzcan redistribución de viajes (cambios de destinos de los usuarios) y/o generación de nuevos desplazamientos (tráfico generado puro) de forma significativa, deberán utilizarse modelos de generación-atracción y distribución de viajes.

Siempre que se trate de una nueva carretera o de analizar el impacto de nuevos desarrollos urbanísticos y/o nuevas implantaciones comerciales, industriales o de servicios sobre una red viaria existente deberán utilizarse modelos de asignación a la red.

En general en los estudios de tráfico de los Estudios Informativos y siempre que se trate de una nueva carretera será necesario modelizar la demanda. En estos casos se deberá justificar el proceso de modelización a utilizar, que deberá de ser coherente con lo establecido en los párrafos anteriores.

6.2. Escenarios y periodos de modelización

Un escenario de modelización es un conjunto de condiciones, que afectan a la demanda potencial de la carretera objeto del estudio de tráfico.

En general las condiciones que afectarán a la demanda potencial futura serán las mismas que se consideren en el modelo de crecimiento de tráfico (ver apartado 5), además de los cambios significativos en la infraestructura del transporte y la implantación de nuevos desarrollos urbanísticos y/o nuevos centros de actividades o servicios en la zona de influencia de la carretera objeto del estudio.

Es importante señalar que los escenarios se plantean sobre la demanda potencial del área y no únicamente sobre el tráfico captado por la carretera en estudio.

Deberán considerarse al menos tres escenarios de modelización: un escenario base, uno pesimista y uno optimista.

El *Escenario Base* refleja las condiciones “normales” que cabe esperar de la evolución de las condiciones que afectan a la demanda potencial, utilizando las mejores proyecciones disponibles de éstas en el momento de realizar la modelación.

El *Escenario Pesimista* refleja unas condiciones menos favorables para el crecimiento del tráfico potencial que el Escenario Base, tanto en crecimiento de variables socioeconómicas (menor crecimiento), como en desarrollo de la red de infraestructuras y/o implantación de nuevos centros de generación/atracción de tráfico (modificación en las fechas previstas de operación).

El *Escenario Optimista* refleja unas condiciones más favorables para el crecimiento del tráfico potencial que las establecidas para el Escenario Base: mayor crecimiento de las variables socioeconómicas y/o modificación razonable de fechas de entrada en servicio de nuevas infraestructuras y/o implantaciones de centros de generación/atracción de tráfico que tengan como consecuencia el aumento de la demanda potencial.

Tanto el Escenario Pesimista como el Escenario Optimista deben ser consistentes con el Escenario Base y no deben recoger previsiones poco razonables de las condiciones que afectan al tráfico potencial. A este respecto, para su establecimiento, se deberá analizar cuál ha sido el comportamiento histórico de las variables básicas y contrastarlo con las previsiones que se realicen.

En los estudios de tráfico de los Estudios Informativos, los escenarios serán coincidentes con los utilizados en el análisis de rentabilidad económica de las alternativas consideradas.

Los periodos de modelización están definidos por el año horizonte de la modelización y por los años intermedios en los cuales es necesario aplicar la modelización de la demanda.

Se recomienda que el horizonte de modelización no sea superior a 20 años, ya que las hipótesis sobre los condicionantes de la demanda potencial a más plazo tendrán una alta incertidumbre.

En ausencia de condiciones determinantes de cambios bruscos en la demanda potencial (por ejemplo por la entrada en servicio de una nueva infraestructura que tiene un impacto significativo sobre la carretera en estudio) se recomienda realizar la modelización cada cinco años, interpolándose para los años intermedios.

Se puede requerir realizar prognosis de tráfico más allá del horizonte de modelización, por ejemplo si en el análisis de rentabilidad económica del Estudio Informativo se utiliza un periodo de análisis mayor o si en un proyecto el periodo de proyecto es mayor que el horizonte de modelización. En estos casos para calcular la demanda en los años que transcurren entre el horizonte de modelización y el periodo de análisis del Estudio Informativo o el periodo de proyecto deberán utilizarse las prognosis de tráfico a largo plazo establecidas por el Ministerio de Fomento, que en el momento de redacción de este documento son las establecidas por la Orden FOM/3317/2010.

6.3. Modelización del tráfico.

El gráfico 13 resume el proceso de modelización por etapas de la demanda de tráfico en una red viaria, expresando para cada etapa los datos necesarios y el tipo de modelo recomendado.

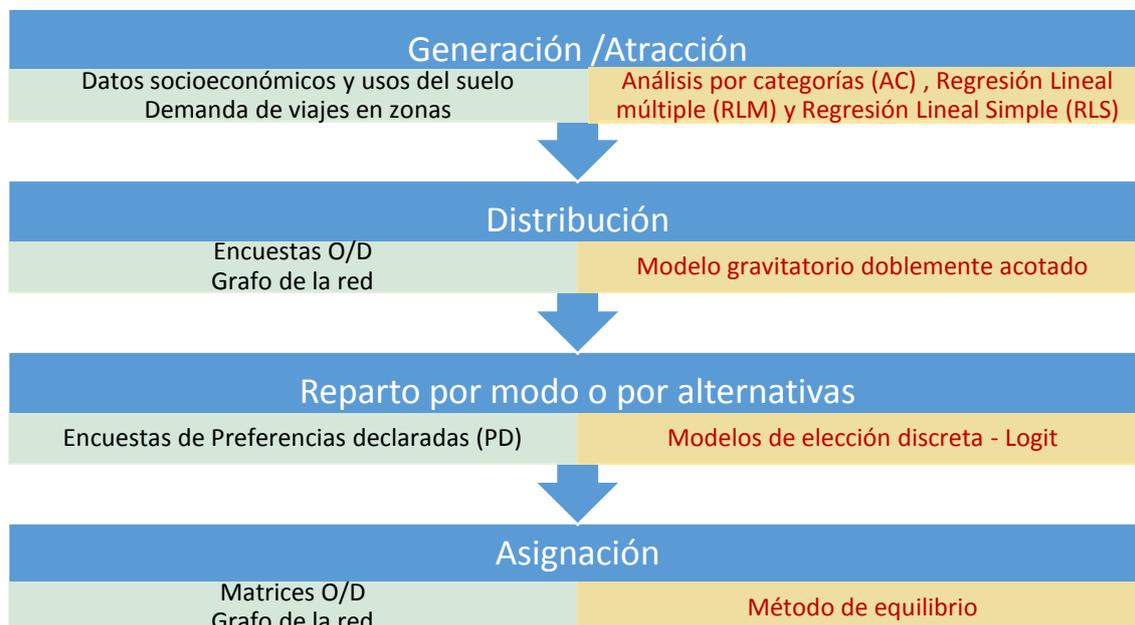


Gráfico 13. Modelización por etapas de la demanda de tráfico.

Dependiendo de la complejidad de la red a analizar, las matrices origen-destino pueden obtenerse directamente a través de las encuestas origen/destino y aforos realizados, complementando con un modelo de evolución del tráfico. Si este es el caso, se puede prescindir de las dos primeras etapas del modelo.

La tercera etapa de reparto modal o alternativas puede no ser necesaria o bien utilizarse directamente después de la estimación directa de las matrices O/D si se utiliza un modelo Logit con pocas alternativas.

En los apartados siguientes se describen los modelos a aplicar en cada etapa.

6.3.1. Modelos de generación y atracción de viajes

La modelización de la generación y atracción de viajes tiene por objetivo predecir el número total de viajes de vehículos que son generados por O_i (orígenes) y atraídos a D_j (destinos), para cada una de las zonas en que se ha desagregado el área en estudio. Estos modelos no están relacionados con la manera en que se hacen las conexiones entre orígenes y destinos de viajes.

La predicción de los totales: O_i y D_j , se realizará partiendo de datos estructurados como atributos socioeconómicos de hogar, obtenidos a partir de los datos de las encuestas origen/destino realizadas.

Para modelizar la generación de viajes más relevantes se considerará la clasificación de motivos de viajes siguientes:

- Generación de viajes basados en el hogar de ida
- Generación de viajes basados en el hogar de retorno.

- c) Generaciones de viajes no basadas en el hogar.

La generación de los viajes basados en el hogar de ida es explicada por las variables socioeconómicas asociadas al hogar del viajero. Por su parte, la generación de viajes no basados en el hogar y basados en el hogar de retorno puede ser explicada por aquellas variables asociadas a las actividades que se desarrollan en las zonas.

La generación de viajes basados en el hogar de ida será estimada mediante modelos de análisis de categorías (AC) o regresión lineal múltiple (RLM), en tanto que para los basados en el hogar de retorno y los no basados en el hogar se utilizarán modelos de regresión lineal múltiple (RLM).

Para modelizar la atracción de viajes, deben considerarse al menos dos tipologías:

- a) *Viajes atraídos basados en el hogar de ida y viajes no basados en el hogar.*
Para estos dos casos, las variables explicativas corresponden normalmente a equipamientos por zona, dedicados a cada actividad y no los hogares (recuérdese que ninguno de estos viajes tiene por destino el hogar). Estos modelos serán calibrados a nivel zonal para cada motivo de viaje y período de análisis definidos utilizando técnicas de regresión lineal múltiple (RLM).
- b) *Viajes atraídos basados en el hogar de retorno.*
En este caso, dado que el destino del viaje es el hogar, la única variable explicativa posible será el número de hogares por zona. En este caso, es posible utilizar tanto la técnica de regresión lineal simple (RLS) como modelos de tasas AC de atractividad (similar a los de generación para viajes basados en el hogar de ida) para modelar estos viajes. Es interesante comparar los resultados de la modelación utilizando RLM con el modelo de tasas AC obtenido, dado que ambos utilizan la misma variable explicativa.

Productores especiales de viajes

Los productores especiales de viajes, se caracterizan por tener una actividad homogénea y en grandes áreas y en ambientes físicos cerrados, tales como grandes centros comerciales, hospitales, estadios deportivos, universidades, grandes terminales intermodales de transporte, etc.

En la zonificación que se realice se utilizarán zonas singulares para estos productores especiales.

Las características de los viajes y los volúmenes de la demanda de estos centros productores especiales se determinarán directamente mediante la realización de encuestas origen/destino.

6.3.2. Modelos de distribución de viajes.

El modelo de distribución trata de estimar el número de viajes en cada celda de la matriz origen/destino, según la información disponible. Por tanto estos modelos simulan la elección de destino.

Para modelizar la distribución de viajes se recomienda¹⁸ utilizar un modelo gravitacional doblemente acotado.

¹⁸ En los últimos años se han empezado a utilizar modelos de elección discreta, basados en circunstancias personales de los usuarios, como los descritos en el apartado 9.3.3, para modelar la distribución de viajes (elección de destino, no obstante, se ha considerado que los modelos agregados propuestos en este documento son suficientes para modelizar la elección de destino en la Red de Carreteras del Estado.

La expresión de un modelo gravitacional doblemente acotado es:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(c_{ij})$$

Dónde T_{ij} es el número de viajes entre la zona i y j , O_i es el número de viajes totales con origen en i , D_j es el número total de viajes con destino en j , A_i y B_j son los factores de balanceo y $f(c_{ij})$ es una función generalizada de los costes de viaje con uno o más parámetros para la calibración. Esta función recibe el nombre de función de disuasión, debido a que representa el grado de desmotivación para viajar cuando la distancia (tiempo) o el coste aumentan. Las formas más utilizadas de esta función son:

$$f(c_{ij}) = \text{Exp}(-\beta c_{ij}), \text{ función exponencial};$$

$$f(c_{ij}) = k c_{ij}^{-n}, \text{ función potencial};$$

$$f(c_{ij}) = k c_{ij}^{-n} \text{Exp}(-\beta c_{ij}), \text{ función combinada.}$$

Dónde $n > 0$ y $\beta > 0$ y $k > 0$ son parámetros a calibrar y c_{ij} es el tiempo o costo generalizado entre un par con origen destino (i,j)

Los factores de balanceo se obtienen:

$$A_i = \frac{1}{\sum_j B_j D_j f(c_{ij})}$$

$$B_j = \frac{1}{\sum_i A_i O_i f(c_{ij})}$$

Los factores de balanceo son, por tanto, interdependientes; lo que significa que el cálculo de un conjunto requiere los valores del otro conjunto. Para su cálculo se debe realizar un proceso iterativo: dado un conjunto de valores para la función de disuasión $f(c_{ij})$, comenzar con $B_j=1$, resolver para los A_i y entonces utilizar estos valores para reestimar los B_j 's; se repite el proceso hasta que se alcance la convergencia.

Al finalizar esta etapa se dispondrá de un conjunto de matrices origen/destino por zonas y categorías consideradas.

6.3.3. Modelos Logit de elección discreta.

Los modelos de elección discreta se utilizan para estimar la parte de la demanda de tráfico que corresponde a cada modo o a cada itinerario alternativo.

Estos modelos se basan en la teoría de la utilidad aleatoria.

La teoría de la utilidad aleatoria¹⁹ afirma que:

- 1) *Los individuos, que pertenecen a una determinada población homogénea, actúan racionalmente y poseen información perfecta, esto es, eligen siempre la alternativa que maximiza su utilidad neta personal sujetos a sus pertinentes restricciones (legales, sociales, físicas y/o presupuestarias).*
- 2) *Existe un cierto conjunto de $\mathbf{A} = \{A_1, \dots, A_m, \dots, A_N\}$ alternativas disponibles y un conjunto de \mathbf{X} de vectores de atributos medibles de los individuos y de las*

¹⁹ Para una descripción teórica detallada de estos modelos puede verse la publicación Modelos de Transporte. Ortúzar y Willumsen. Universidad de Cantabria. 2008.

alternativas. Cada individuo dispone de un conjunto $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ de atributos, y en general, se enfrenta a un conjunto de opciones de elección disponibles $\mathbf{A}(q) \in \mathbf{A}$.

- 3) Cada alternativa $A_m \in \mathbf{A}$ tiene asociada una utilidad U^{qm} para cada individuo q . El modelizador, que es un observador del sistema, no posee información completa acerca de todos los elementos considerados por el individuo cuando hace una elección; por lo tanto, considera que la utilidad tiene dos componentes:
 - una parte sistémica, medible o representativa V^{qm} que es función de los atributos medibles \mathbf{x} ; y
 - una componente aleatoria ε^{qm} que representa los gustos (preferencias) de cada individuo y que incluye además los errores de medición que pueda cometer el modelizador.
- 4) El individuo q elige la alternativa que le proporciona su máxima utilidad, es decir que elige A_m si, y sólo si:

$$U^{qm} \geq U^{qi} \quad \forall A_i \in A(q)$$

Si introducimos la elección de alternativa entre cada par origen-destino (i,j) , la función de utilidad puede expresarse como:

$$U_{ij}^{qm} = V_{ij}^{qm} + \varepsilon_{ij}^{qm}$$

Dónde:

U_{ij}^{qm} es la función de utilidad completa de la alternativa m para el usuario q en su desplazamiento de i a j .

V_{ij}^{qm} es la parte observable de la función de utilidad.

ε_{ij}^{qm} es la parte no observable (aleatoria) de la función de utilidad.

La parte observable de la función de utilidad se expresa con una formulación lineal en los parámetros:

$$V_{ij}^{qm} = \delta^{qm} + \sum_k (\theta_k^{qm} X_k^{qm})$$

Dónde X_k^{qm} representa los atributos de los viajeros q y en la alternativa m . Típicamente esta expresión incluye como atributos de la alternativa sus variables de servicio (tiempo de viaje, costo de viaje, etc.) y como características del usuario, su ingreso, nivel educacional y otros.

Los coeficientes θ_k^{qm} representan el peso que los usuarios q asignan a cada variable incluida en la función de utilidad en la alternativa m . La constante δ^{qm} corresponde a una constante modal que representa ciertas características específicas que la alternativa m tiene para los usuarios q , y que no están representados en el resto de la función de utilidad. Por razones derivadas de la forma de estimar los coeficientes de la función, es necesario fijar en cero la constante modal de una de las alternativas de referencia. El resto de las constantes modales serán relativas a dicha alternativa de referencia.

Si los itinerarios alternativos entre los que hay que repartir el tráfico son independientes (es decir no están correlacionadas) se recomienda la utilización de un modelo Logit Multinomial (MNL), cuya expresión es muy sencilla:

$$p_{ij}^{qm} = \frac{\exp(V_{ij}^{qm})}{\sum_k \exp(V_{ij}^{qk})}$$

Donde:

p_{ij}^{qm} : Probabilidad de que un usuario q elija la alternativa m para viajar entre el par origen destino (i,j).

V_{ij}^{qk} : Función de utilidad de la alternativa k, entre un par origen destino (i,j) para un usuario q.

Se insiste en que para utilizar este modelo las alternativas deben de ser percibidas de forma claramente diferenciadas por los usuarios.

Si solo existen dos alternativas el modelo Logit se puede calibrar por regresión lineal utilizando la transformación de Berkson-Theil:

$$\log\left(\frac{p_1}{(1-p_1)}\right) = \beta(CG_1 - CG_2) + \beta \cdot \delta$$

Siendo:

p_1 : Probabilidad de elegir alternativa 1

CG_i : Coste generalizado en la alternativa i

β : Factor de escala.

δ : Constante específica de la alternativa 2, suponiendo que la alternativa 1 es la de referencia.

Si los itinerarios alternativos no son independientes se recomienda la utilización del modelo Logit Jerárquico (NL) que agrupa las alternativas correlacionadas y explica la elección modal como un proceso escalonado de decisiones.

La expresión más utilizada del modelo Logit jerárquico es el de dos niveles:

$$P_{ij} = \frac{\exp\left(\frac{V_{i/j}}{\phi_j}\right)}{\sum_m \exp\left(\frac{V_{m/j}}{\phi_j}\right)} \cdot \frac{\exp\left\{\phi_j \log\left(\sum_i \exp\left(\frac{V_{i/j}}{\phi_j}\right)\right)\right\}}{\sum_n \exp\left\{\phi_n \log\left(\sum_i \exp\left(\frac{V_{i/n}}{\phi_n}\right)\right)\right\}}$$

Dónde:

P_{ij} : Probabilidad de elegir la alternativa i del nivel j.

$V_{i/j}$: Función de utilidad de la alternativa i del nivel j.

ϕ_j : Variable a calibrar dependiente del nivel j.

La calibración de los modelos se deberá realizar a partir de los datos obtenidos en las encuestas orígenes/destinos, preferencias reveladas y preferencias declaradas.

Si exceptuamos el caso sencillo del modelo Logit Multinomial con dos alternativas, que puede ser calibrado por regresión lineal tal y como se ha descrito anteriormente, la

calibración de los modelos Logit Multinomial (MNL) y Logit Jerárquico (NL) exige la utilización de software específico²⁰.

Los modelos descritos anteriormente son válidos tanto para la elección de ruta como para la elección de modo. Si se requiere modelizar ambas situaciones, se recomienda que se utilicen modelos separados para elección de modo y ruta.

6.3.4. Modelos de asignación.

El modelo de asignación tiene por objetivo asignar los viajes definidos por las matrices origen/destino a los distintos tramos de la red.

El modelo de asignación es en la mayoría de los estudios de tráfico el modelo más importante y casi siempre está presente en los procesos de modelización.

Para su aplicación es necesario disponer de un grafo de la red, que contenga todos los tramos de carreteras que conectan los orígenes con los destinos y sus características para definir los costos generalizados.

La aplicación de los modelos de asignación exige en general la utilización de aplicaciones informáticas, comerciales o desarrolladas expresamente con este fin.

Los modelos de asignación se pueden clasificar en las siguientes categorías:

Modelos determinísticos “todo o nada”

En este modelo todos los viajes entre cada origen y destino se asignan a la ruta más corta (en términos de coste generalizado) entre ambos.

Una variante de este modelo es considerar la restricción de capacidad, lo que se realiza utilizando una función de coste que considera que a medida que en el proceso de asignación algunas rutas se congestionan (sus volúmenes se acercan a la capacidad de las mismas), los tiempos de viaje por ellas crecen y son menos atractivas.

Modelos estocásticos

Los dos modelos estocásticos de asignación más utilizados son: los métodos de simulación de Monte Carlo y los métodos proporcionales de elección entre rutas alternativas.

Los métodos de Monte Carlo suponen que los usuarios no perciben un único valor de coste generalizado para cada tramo. Un ejemplo de estos métodos es el método de Burrell en el coste generalizado se obtiene mediante un muestreo aleatorio, realizándose asignaciones todo-o-nada para cada muestra extraída. De esta forma se obtienen rutas diferentes para cada par O-D y se produce una diversificación del tráfico.

Estos métodos al utilizar números aleatorios, dependen del método de generación de estos números.

Los métodos proporcionales identifican puntos de elección de rutas y asignan tráfico a cada ruta potencial en proporción a sus costos generalizados relativos. Estos métodos usan diferentes procedimientos para identificar un número manejable de rutas potenciales, a partir de condicionantes impuestos para su selección (por ejemplo

²⁰ Además de varios programas de software comercial que facilitan esta tarea, existe un software no comercial de uso gratuito que permite calibrar modelo MNL y NL, llamado BIOGEME ^[5]

considerar en cualquier tramo que forme parte de una ruta seleccionada debe permitir alejarse del origen y acercarse al destino).

La desventaja de los métodos proporcionales es que dependen excesivamente de la estructura y definición del grafo realizada.

Modelos de equilibrio

La aplicación de modelos basados en el principio de Wardrop, garantizan que en las situaciones de congestión, todas las rutas utilizadas por cada par origen/destino tienen el mismo costo para el usuario y las que no se usan tienen un costo igual o mayor.

La función de flujo-costo utilizada por estos modelos es monótona creciente (el costo no disminuye al aumentar el flujo).

Este tipo de modelos que están disponibles en todos los paquetes de software especializado de modelización de tráfico, permiten además utilizar varios tipos de usuarios para cada tipo de vehículo, lo que es muy aconsejable cuando se trata de un estudio de tráfico de una vía de peaje.

Si la red analizada tiene una cierta complejidad se recomienda el uso de modelos de asignación de equilibrio frente a los otros modelos de asignación descritos.

Validación de modelos de asignación

El modelo de asignación aplicado deberá ser validado.

La validación consistirá en la demostración de bondad de la asignación realizada mediante la utilización de las técnicas descritas a continuación:

a) Análisis de regresión

- Se deberá realizar la asignación sobre la red del año base (sin la nueva carretera).
- Se deberá realizar un gráfico en el que se muestren las parejas de valores de volúmenes de tráfico obtenidos en cada tramo mediante la asignación (eje vertical) y mediante la observación real mediante aforos (eje horizontal).
- Se ajustará una recta de regresión con los valores del gráfico anterior.
- Se comprobará que:
 - El valor de la pendiente es cercano a 1.
 - El valor de interceptación del eje y es cercano a 0.
 - El coeficiente de determinación r^2 sea deseablemente mayor que 0,7.

b) Cálculo del indicador %RMSE

Para todas las parejas de valores observadas – reales, se calculará el indicador %RMSE²¹ (raíz cuadrada del error cuadrático potencial):

$$\%RMSE = 100 \sqrt{\frac{\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{N - 1}}{\frac{\sum O_i}{N}}}$$

Dónde:

E_i : Valor estimado por el modelo

²¹ %RMSE es el acrónimo inglés de Percentage Mean Square Error.

O_i : Valor observado por aforos

N : Número de observaciones

El valor de %RMSE debe ser inferior al 30%.

En redes complejas con muchos tramos, para asegurar la validez de la calibración deberá de cumplirse también esta condición en una muestra de las observaciones, cuyos valores no hayan sido utilizados en la calibración del modelo. El tamaño de esta muestra de contraste será al menos del 10% de los aforos.

6.4. Análisis de sensibilidad.

El uso de modelos de tráfico deberá complementarse con un análisis de la sensibilidad a las variables básicas del modelo.

Se recomienda la realización de análisis de sensibilidad del volumen de tráfico a las siguientes variables:

- Valor del tiempo.
- Sensibilidad a tarifa en vías de peaje.

La variación de las variables socioeconómicas (crecimiento de la economía, población, etc.) y la variación las fechas de puesta en servicio de proyectos clave en el área de estudio, ya fue considerada en la definición de los escenarios de planificación.

Los análisis de sensibilidad se realizarán sobre el escenario base considerado.

6.4.1. Sensibilidad al valor del tiempo

El valor del tiempo de viaje es uno de los parámetros que más influyen en los resultados de los modelos de tráfico.

Aunque es posible determinar mediante técnicas basadas en encuestas de preferencias reveladas (PR) y preferencias declaradas (PD) el valor del tiempo de viaje, este planteamiento tiene una gran dificultad práctica por lo que no se considera necesario realizarlo en el marco de un estudio de tráfico.

Se recomienda utilizar como valores del tiempo de viaje los contenidos en las *“Prescripciones y recomendaciones técnicas relativas a los contenidos mínimos a incluir en los estudios de rentabilidad de los estudios informativos de la Subdirección General de Estudios y Proyectos (Nota de servicio 3/2014)”* o en otra publicación oficial que pueda actualizar los valores contenidos en la misma.

En cualquier caso el valor del tiempo considerado en el Estudio de rentabilidad del Estudio Informativo y en el Estudio de tráfico del mismo deberá ser coincidente.

Un aspecto importante es la variación del valor del tiempo de viaje en el tiempo, sobre el que estudios realizados en el ámbito internacional²² sugieren que no es directamente proporcional al aumento de los ingresos. Se recomienda que la proyección de la variación del valor del tiempo con el ingreso se realice mediante la siguiente expresión:

$$VT_t = \left(\frac{I_t}{I_{t-1}} \right)^{0,5} VT_{t-1}$$

²² Waters, W.G. (1993) The value of travel time savings and the link with income: implications for public project evaluation. Working Paper ITS-WP-93-18, Institute of Transport Studies, University of Sydney

Dónde:

I_t es el ingreso en el año t (por ejemplo PIB per cápita a precios constantes)

VT_t es el valor del tiempo en el año t

El análisis de sensibilidad al valor del tiempo se realizará aplicando los modelos en el escenario base con un incremento del 20% y una disminución del 20% en el valor del mismo para cada categoría de usuario considerada.

6.4.2. Sensibilidad a la tarifa en vías de peaje

El análisis de sensibilidad a la tarifa en vías de peaje es uno de los análisis clave para el análisis de la viabilidad de las concesiones.

Este análisis tiene como objetivos determinar cuál es la tarifa que produce los ingresos máximos y determinar la elasticidad del tráfico a cambios en la tarifa, lo que se logra aplicando los modelos con distintos niveles de tarifa.

7. Alcance del estudio y presentación de resultados

El alcance de las actividades a realizar en los estudios de tráfico depende del tipo de estudio o proyecto y de la naturaleza de la actuación.

La tabla 17 resume las actividades a realizar para los estudios y proyectos más habituales que se realizan en esta Subdirección General de Estudios y Proyectos y el alcance de cada una de ellas dependiendo del tipo de estudio o proyecto.

Las campañas complementarias de toma de datos, suponen en general un esfuerzo importante en su realización y tienen un costo económico significativo, por lo que debe garantizarse que los datos obtenidos pueden utilizarse de forma completa y transparente en otras etapas de los estudios e incluso en otros estudios que pueda realizar el Ministerio. Por esta razón se exige que la información básica recopilada y los datos expansionados se integren en una base de datos y se entregue a la Dirección del Estudio o Proyecto y a esta Subdirección General de Estudios y Proyectos para garantizar su transparencia y difusión.

Para la creación de la base de datos se utilizará alguno de los formatos habituales de gestión de base datos o de hojas de cálculo.

También deben de entregarse en un soporte abierto susceptible de utilizarse por otros usuarios (preferiblemente en hoja de cálculo) la codificación de los grafos si se han utilizado en la modelización del tráfico y las matrices origen-destino.

Los resultados del estudio deben de ser comunicados de forma clara y transparente para que puedan ser entendidos y utilizados por los destinatarios y otros usuarios en estudios posteriores.

Si se utiliza un proceso de modelización con ayuda de aplicaciones informáticas o software comercial, no será suficiente con presentar los resultados, sino que se deben describir los fundamentos técnicos y los métodos utilizados por las mismas.

En los Estudios Informativos se darán resultados de la asignación con y sin proyecto, para su utilización en el análisis de rentabilidad.

Si en la asignación de tráfico se considera tráfico atraído de otros itinerarios y/o tráfico inducido los resultados se presentarán desagregados respecto al tráfico normal.

RESUMEN DEL ALCANCE DE LOS ESTUDIOS DE TRÁFICO EN ESTUDIOS Y PROYECTOS			
Actividad	Estudios Informativos	Anteproyectos y Proyectos	
		Nuevo trazado	Acondicionamiento o ampliación de capacidad
Recopilación de datos básicos de tráfico y movilidad	Datos de tráfico, movilidad y socioeconómicos.	Actualización de datos del E.I.	Datos de tráfico
Ámbito del estudio	<u>Ámbito</u> : Corredores en estudio y corredores alternativos para tráfico significativo. <u>Tramificación</u> : Tramos limitados por nudos viarios.	<u>Ámbito</u> : idem al E.I. <u>Tramificación</u> : segmentación según el HCM 2010 para tramo proyecto y tramos limitados por nudos viarios para resto red.	<u>Ámbito</u> : tramo proyecto y carreteras que conectan. <u>Tramificación</u> : segmentación según el HCM 2010 para tramo proyecto y conexiones con otras carreteras.
Toma de datos complementaria	Definición y realización de campaña de aforos y encuestas	Actualización datos del E.I.	Aforos complementarios (si son necesarios).
Caracterización del tráfico a partir de datos de aforos	Cálculo de IMDs	Cálculo de IMDs e Intensidades horarias de proyecto	Cálculo de IMDs e Intensidades horarias de proyecto
Crecimiento de tráfico	Si hay tráfico inducido significativo: modelos econométricos o basados en generación de viajes	Si hay tráfico inducido significativo: modelos econométricos o basados en generación de viajes	Modelos de crecimiento econométricos o previsiones oficiales (Orden FOM/3317/2010)
Niveles de servicio	Utilización de tablas de intensidades de servicio generalizadas ("Generalized Service Volume Tables") del HCM 2010	Análisis detallado de elementos mediante HCM 2010 previa segmentación del proyecto.	Análisis detallado de elementos mediante HCM 2010 previa segmentación del proyecto.
Estudios detallados de nudos viarios y glorietas	No procede en esta etapa.	Análisis detallado de tráfico según apartado 7 y 8.	Análisis detallado de tráfico según apartado 7 y 8.
Modelización del tráfico	<u>Matriz O/D</u> : obtención directa de aforos y encuestas y prognosis o alternativamente modelización de generación / atracción / distribución. <u>Asignación</u> : preferentemente método de equilibrio. <u>Tráfico inducido</u> : basado en modelo de crecimiento o modelo generación	<u>Matriz O/D</u> : actualización datos E.I. <u>Asignación</u> : Preferentemente método de equilibrio con la matriz O/D actualizada.	<u>Asignación</u> directa a la red a partir de datos de aforos y prognosis.
Modelos Logit elección discreta	Alternativa a modelización si hay pocas alternativas y en nuevas vías de peaje.	Aplicación si se ha utilizado en E.I.	Solo si hay problemas de capacidad en vías de peaje.

Tabla 17. Resumen de alcance de los Estudios de tráfico en Estudios y Proyecto

Se recomienda la utilización de gráficos para la presentación de resultados, especialmente en la calibración de los modelos y en los resultados de los modelos de evolución del tráfico.

Los resultados de asignación deben desagregarse por tipo de vehículo.

Deberá de confeccionarse una tabla con la IMD de cada tramo (segmento en el caso de anteproyectos y proyectos) y el nivel de servicio esperado en el año base, el año de puesta en servicio, el año horizonte y en los años intermedios en los que se haya modelado la demanda.

ANEXO Nº 1: ENLACES DE INTERÉS Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ENLACES DE INTERÉS

DATOS DE TRÁFICO Y MOVILIDAD EN EL PORTAL WEB DEL MINISTERIO DE FOMENTO		
Página	Contenido de interés	Enlace web
Tráfico, velocidades y accidentes en la RCE	<p><i>Mapas de tráfico.</i></p> <p><i>Evolución histórica</i></p> <p><i>Variación del tráfico en los últimos años</i></p>	<p>1.</p> <p>http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/CARRETERAS/TRAFICO_VELOCIDADES/</p>
Tráfico en autopistas estatales de peaje	Series históricas mensuales y anuales de tráfico para cada una de las autopistas estatales de peaje.	<p>2.</p> <p>http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ATENCION_CIU_DADANO/INFORMACION_ESTADISTICA/Transporte/Carreteras/</p>
Encuesta de movilidad de las personas residentes en España (MOVILIA)	Datos sobre encuestas realizadas en los años 2000/2001 y 2006/2007 que contienen información sobre pautas de movilidad de la <i>población residente en España en viviendas familiares</i> sus características y determinantes.	<p>3.</p> <p>http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ATENCION_CIU_DADANO/INFORMACION_ESTADISTICA/Movilidad/</p>
Transporte de mercancías por carretera (EPTMC)	Resultados de la Encuesta Permanente de Transporte de Mercancías por Carretera (EPTMC).	<p>4.</p> <p>http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ATENCION_CIU_DADANO/INFORMACION_ESTADISTICA/Transporte/EPTMC/default.htm</p>
Base de Datos del Observatorio del Transporte y la Logística en España (OTLE)	Información sobre oferta y demanda de los distintos modos de transporte en España y sobre información socioeconómica útil para analizar la movilidad.	<p>5.</p> <p>http://observatoriortransporte.fomento.es/OTLE/LANG_CASTELLANO/BAS_EDATOS/</p>

OTROS ENLACES DE INTERÉS

1. <http://www.ine.es/>
2. <http://www.ine.es/censos2011/visor//?locale=es>
3. <http://www.anuarioeco.lacaixa.comunicacions.com>
4. <http://www.bbvaresearch.com/KETD/ketd/esp/previsiones.jsp>
5. <http://biogeme.epfl.ch/>
6. <http://www.fomento.es/>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MANUAL DE ENCUESTAS DE MOVILIDAD (Preferencias Reveladas). Ángel Ibeas Portilla. Universidad de Cantabria Ministerio de Fomento.
2. LA PREDICCIÓN DE LA DEMANDA EN LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS. Anna Matas, José Luis Raymond, Mar González-Savignat y Adriana Ruíz (2009). Documento de trabajo del Manual de Evaluación Económica de Proyectos de Transporte. CEDEX (2010).
3. MODELOS DE TRANSPORTE. Ortúzar y Willumsen. Universidad de Cantabria. 2008. Páginas 197-251.
4. HIGHWAY CAPACITY MANUAL (2010). Transportation Research Board de los Estados Unidos de América.
5. (NCHRP) REPORT 672: ROUNDABOUTS: AN INFORMATIONAL GUIDE. TRB's National Cooperative Highway Research Program.
6. ESTUDIO Y MEJORA DE LA CAPACIDAD Y FUNCIONALIDAD DE GLORIETAS CON FLUJOS DE TRÁFICO DESCOMPENSADOS MEDIANTE MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO. IX Premio Abertis de Tesina/Proyecto. Mariló Martín Gasulla.
7. TRAFFIC QUEUES AND DELAYS AT JUNCTIONS. Kimber, R.M.; Hollis, E.M., Transport and Road Research Laboratory, Report LR 909, Crowthorne, 1979.
8. THE VALUE OF TRAVEL TIME SAVINGS AND THE LINK WITH INCOME: IMPLICATIONS FOR PUBLIC PROJECT EVALUATION. Waters, W.G. (1993). Working Paper ITS-WP-93-18, Institute of Transport Studies, University of Sydney
9. MODELACIÓN DE DEMANDA PARA CARRETERAS DE CUOTA. MANUAL DE MODELACIÓN 2006. Secretaría de Comunicaciones y Transportes de Mexico. Realizado por Steer Davies Gleave y Transconsult en cooperación con la Dirección General de Desarrollo Carretero.
10. OBSERVATORIO DEL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS POR CARRETERA. OFERTA Y DEMANDA. ENERO DE 2014. Dirección General del transporte Terrestre. Ministerio de Fomento”.
11. GUÍA DE NUDOS VIARIOS (O.C. 32/2012). Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento.
12. PRESCRIPCIONES Y RECOMENDACIONES TÉCNICAS RELATIVAS A LOS CONTENIDOS MÍNIMOS A INCLUIR EN LOS ESTUDIOS DE RENTABILIDAD DE LOS ESTUDIOS INFORMATIVOS DE LA SUBDIRECCIÓN GENERAL DE ESTUDIOS Y PROYECTOS (NOTA DE SERVICIO 3/2014). Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento.

ANEXO Nº 2: TABLAS DE INTENSIDADES DE SERVICIO GENERALIZADAS

ANEXO 2. TABLAS DE INTENSIDADES DE SERVICIO GENERALIZADAS

Las tablas de intensidades de servicio generalizadas (“Generalized Service Volume Tables”) del Manual de Capacidad HCM-2010, permiten calcular la máxima intensidad de tráfico que puede soportar un elemento de la vía para un determinado Nivel de Servicio.

La utilización de estas tablas permite una rápida estimación de los niveles de servicio, el pre-dimensionamiento de los elementos de la carretera para atender la demanda a largo plazo y su utilización en los modelos de demanda de tráfico.

En este Anexo se recoge una adaptación de las tablas del Manual, utilizando unidades del sistema internacional, a las clases de carreteras más habituales en nueva construcción: carreteras convencionales de 100 km/h, multicarril con cuatro carriles de velocidad 100 km/h y autovías de cuatro carriles de velocidad 120 km/h.

Los factores K y D utilizados en las tablas tienen el siguiente significado:

- K: Cociente entre intensidad horaria de cálculo e IMD expresado en tanto por uno (0,08; 0,10; 0,12 y 0,14).
- D: Relación de intensidades de tráfico entre sentidos en el sentido más cargado (0,50; 0,55; 0,60 y 0,65).

Las tablas únicamente se han obtenido para terrenos llanos (con pendiente en valor absoluto inferior al 2%) y ondulados (con pendiente en valor absoluto comprendida entre 2% y 4%).

Para otros datos y tipos de carreteras se debe acudir directamente a las tablas (“Generalized Service Volume Tables”) del Manual de Capacidad HCM 2010 o a la aplicación de la metodología general del citado Manual.

TABLA A1.1.

Intensidad Media Diaria (IMD) de una carretera convencional C-100 (x 1.000 vehículos/día).

FACTORES		PORCENTAJE DE TRAMOS DE PROHIBICIÓN DE ADELANTAMIENTO															
		20 %				40 %				60 %				80 %			
		NIVELES DE SERVICIO				NIVELES DE SERVICIO				NIVELES DE SERVICIO				NIVELES DE SERVICIO			
K	D	B	C	D	E	B	C	D	E	B	C	D	E	B	C	D	E
TERRENO LLANO																	
0,08	0,50	6	9	15	32	4	8	14	32	4	7	13	32	3	7	13	32
	0,55	6	9	15	35	5	9	14	35	3	8	13	35	3	7	13	35
	0,60	5	9	14	32	4	8	13	32	3	7	12	32	3	7	12	32
	0,65	5	9	14	29	4	8	12	29	3	7	12	29	3	7	12	29
0,10	0,50	5	8	14	29	4	7	12	29	3	7	12	29	3	6	12	29
	0,55	5	7	12	28	4	7	11	28	3	6	11	28	3	6	11	28
	0,60	4	7	11	26	3	6	10	26	2	6	10	26	2	6	10	26
	0,65	4	7	11	24	3	6	10	24	2	6	10	24	2	5	10	24
0,12	0,50	4	7	11	24	3	6	10	24	3	5	10	24	2	5	10	24
	0,55	4	6	10	23	3	6	10	23	2	5	9	23	2	5	9	23
	0,60	4	6	9	21	3	5	9	21	2	5	8	21	2	5	8	21
	0,65	4	6	9	20	3	5	8	20	2	5	8	20	2	4	8	20
0,14	0,50	4	6	10	21	3	5	9	21	2	5	8	21	2	5	8	21
	0,55	3	5	9	20	3	5	8	20	2	4	8	20	2	4	8	20
	0,60	3	5	8	18	2	4	7	18	2	4	7	18	2	4	7	18
	0,65	3	5	8	17	2	4	7	17	2	4	7	17	2	4	7	17
TERRENO ONDULADO																	
0,08	0,50	4	7	15	32	3	7	13	32	2	6	12	32	2	6	12	32
	0,55	4	7	15	35	3	7	14	35	2	6	12	35	2	6	12	35
	0,60	4	7	14	32	3	7	12	32	2	6	12	32	2	6	11	32
	0,65	4	7	14	29	3	7	12	29	2	6	11	29	2	6	11	29
0,10	0,50	4	6	14	29	3	6	12	29	2	5	11	29	2	5	11	29
	0,55	4	5	12	28	3	6	11	28	2	5	10	28	2	5	10	28
	0,60	3	5	11	26	3	5	10	26	2	5	9	26	1	5	9	26
	0,65	3	5	11	24	3	5	10	24	2	5	9	24	1	4	9	24
0,12	0,50	3	5	11	24	2	5	10	24	2	4	9	24	2	4	9	24
	0,55	3	4	10	23	2	5	9	23	2	4	8	23	1	4	8	23
	0,60	3	4	9	21	2	4	8	21	1	4	8	21	1	4	7	21
	0,65	3	4	9	20	2	4	8	20	1	4	7	20	1	4	7	20
0,14	0,50	3	4	10	21	2	4	8	21	2	4	8	21	1	4	8	21
	0,55	3	4	8	20	2	4	8	20	1	4	7	20	1	3	7	20
	0,60	2	4	8	18	2	4	7	18	1	3	7	18	1	3	6	18
	0,65	2	4	8	17	2	4	7	17	1	3	6	17	1	3	6	17

TABLA A1.2.

Intensidad Media Diaria (IMD) de una carretera multicarril C-100 de cuatro carriles (x 1.000 vehículos/día).

FACTORES		PORCENTAJE DE VEHÍCULOS PESADOS															
		5 %				10 %				15 %				20 %			
		NIVELES DE SERVICIO				NIVELES DE SERVICIO				NIVELES DE SERVICIO				NIVELES DE SERVICIO			
K	D	B	C	D	E	B	C	D	E	B	C	D	E	B	C	D	E
TERRENO LLANO																	
0,08	0,50	48	69	88	96	46	66	84	92	44	63	80	88	42	60	77	84
	0,55	44	62	80	88	42	60	76	84	40	57	73	80	38	55	70	77
	0,60	40	57	73	80	38	55	70	77	37	52	67	73	35	50	64	70
	0,65	37	53	68	74	35	50	65	71	34	48	62	68	32	46	59	65
0,09	0,50	43	61	78	86	41	58	75	82	39	56	71	78	38	53	68	75
	0,55	39	56	71	78	37	53	68	74	36	51	65	71	34	49	62	68
	0,60	36	51	65	71	34	49	62	68	33	46	59	65	31	45	57	63
0,10	0,65	33	47	60	66	31	45	57	63	30	43	55	60	29	41	53	58
	0,50	39	55	70	77	37	52	67	74	35	50	64	70	34	48	62	68
	0,55	35	50	64	70	33	48	61	67	32	46	58	64	31	44	56	61
	0,60	32	46	59	64	31	44	56	61	29	42	54	59	28	40	51	56
0,11	0,65	30	42	54	59	28	40	52	57	27	39	49	54	26	37	47	52
	0,50	35	50	64	70	33	48	61	67	32	46	58	64	31	44	56	61
	0,55	32	45	58	64	30	43	56	61	29	41	53	58	28	40	51	56
	0,60	29	42	53	58	28	40	51	56	27	38	49	53	26	36	47	51
0,12	0,65	27	38	49	54	26	37	47	51	25	35	45	49	24	34	43	47
	0,50	32	46	59	64	31	44	56	61	29	42	54	59	28	40	51	56
	0,55	29	42	53	58	28	40	51	56	27	38	49	53	26	36	47	51
	0,60	27	38	49	54	26	36	47	51	24	35	45	49	23	33	43	47
0,65	25	35	45	49	24	34	43	47	23	32	41	45	22	31	39	43	
TERRENO ONDULADO																	
0,08	0,50	46	66	84	92	42	60	77	84	39	55	71	78	36	52	66	72
	0,55	42	60	76	84	38	55	70	77	35	50	65	71	33	47	60	66
	0,60	38	55	70	77	35	50	64	70	32	46	59	65	30	43	55	60
	0,65	35	50	65	71	32	46	59	65	30	43	55	60	28	40	51	56
0,09	0,50	41	58	75	82	38	53	68	75	35	49	63	69	32	46	59	64
	0,55	37	53	68	74	34	49	62	68	31	45	57	63	29	42	53	58
	0,60	34	49	62	68	31	45	57	63	29	41	53	58	27	38	49	54
	0,65	31	45	57	63	29	41	53	58	27	38	49	53	25	35	45	49
0,10	0,50	37	52	67	74	34	48	62	68	31	44	57	62	29	41	53	58
	0,55	33	48	61	67	31	44	56	61	28	40	52	57	26	37	48	53
	0,60	31	44	56	61	28	40	51	56	26	37	47	52	24	34	44	48
	0,65	28	40	52	57	26	37	47	52	24	34	44	48	22	32	41	45
0,11	0,50	33	48	61	67	31	44	56	61	28	40	52	57	26	37	48	53
	0,55	30	43	56	61	28	40	51	56	26	37	47	51	24	34	44	48
	0,60	28	40	51	56	26	36	47	51	24	34	43	47	22	31	40	44
	0,65	26	37	47	51	24	34	43	47	22	31	40	44	20	29	37	40
0,12	0,50	31	44	56	61	28	40	51	56	26	37	47	52	24	34	44	48
	0,55	28	40	51	56	26	36	47	51	24	34	43	47	22	31	40	44
	0,60	26	36	47	51	23	33	43	47	22	31	39	43	20	29	37	40
	0,65	24	34	43	47	22	31	39	43	20	28	36	40	19	26	34	37

TABLA A1.3.
Intensidad Media Diaria (IMD) de una carretera A-120 de cuatro carriles (x 1.000 vehículos/día).

FACTORES		PORCENTAJE DE VEHÍCULOS PESADOS															
		5 %				10 %				15 %				20 %			
		NIVELES DE SERVICIO				NIVELES DE SERVICIO				NIVELES DE SERVICIO				NIVELES DE SERVICIO			
K	D	B	C	D	E	B	C	D	E	B	C	D	E	B	C	D	E
TERRENO LLANO																	
0,08	0,50	60	80	96	109	57	77	92	104	55	73	88	99	53	70	84	95
	0,55	55	73	88	99	52	70	84	94	50	67	80	90	48	64	77	86
	0,60	50	67	80	90	48	64	77	86	46	61	73	83	44	59	70	79
	0,65	46	62	74	84	44	59	71	80	42	56	68	76	40	54	65	73
0,09	0,50	53	71	86	97	51	68	82	92	49	65	78	88	47	62	75	84
	0,55	49	65	78	88	46	62	74	84	44	59	71	80	42	57	68	77
	0,60	45	60	71	80	42	57	68	77	41	54	65	73	39	52	62	70
	0,65	41	55	66	74	39	52	63	71	38	50	60	68	36	48	58	65
0,10	0,50	48	64	77	87	46	61	74	83	44	59	70	79	42	56	67	76
	0,55	44	58	70	79	42	56	67	75	40	53	64	72	38	51	61	69
	0,60	40	54	64	72	38	51	61	69	37	49	59	66	35	47	56	63
	0,65	37	49	59	67	35	47	57	64	34	45	54	61	32	43	52	58
0,11	0,50	44	58	70	79	42	56	67	75	40	53	64	72	38	51	61	69
	0,55	40	53	64	72	38	51	61	69	36	49	58	66	35	46	56	63
	0,60	36	49	58	66	35	46	56	63	33	44	53	60	32	43	51	58
	0,65	34	45	54	61	32	43	51	58	31	41	49	55	29	39	47	53
0,12	0,50	40	54	64	72	38	51	61	69	37	49	59	66	35	47	56	63
	0,55	36	49	58	66	35	46	56	63	33	44	53	60	32	43	51	58
	0,60	33	45	54	60	32	43	51	58	30	41	49	55	29	39	47	53
	0,65	31	41	49	56	29	39	47	53	28	38	45	51	27	36	43	49
TERRENO ONDULADO																	
0,08	0,50	57	77	92	104	53	70	84	95	49	65	78	88	45	60	72	81
	0,55	52	70	84	94	48	64	77	86	44	59	71	80	41	55	66	74
	0,60	48	64	77	86	44	59	70	79	40	54	65	73	38	50	60	68
	0,65	44	59	71	80	40	54	65	73	37	50	60	67	35	46	56	63
0,09	0,50	51	68	82	92	47	62	75	84	43	58	69	78	40	54	64	72
	0,55	46	62	74	84	42	57	68	77	39	52	63	71	36	49	58	66
	0,60	42	57	68	77	39	52	62	70	36	48	58	65	33	45	54	60
	0,65	39	52	63	71	36	48	58	65	33	44	53	60	31	41	49	56
0,10	0,50	46	61	74	83	42	56	67	76	39	52	62	70	36	48	58	65
	0,55	42	56	67	75	38	51	61	69	35	47	57	64	33	44	53	59
	0,60	38	51	61	69	35	47	56	63	32	43	52	58	30	40	48	54
	0,65	35	47	57	64	32	43	52	58	30	40	48	54	28	37	44	50
0,11	0,50	42	56	67	75	38	51	61	69	35	47	57	64	33	44	53	59
	0,55	38	51	61	69	35	46	56	63	32	43	51	58	30	40	48	54
	0,60	35	46	56	63	32	43	51	58	29	39	47	53	27	37	44	49
	0,65	32	43	51	58	29	39	47	53	27	36	44	49	25	34	40	46
0,12	0,50	38	51	61	69	35	47	56	63	32	43	52	58	30	40	48	54
	0,55	35	46	56	63	32	43	51	58	29	39	47	53	27	37	44	49
	0,60	32	43	51	58	29	39	47	53	27	36	43	49	25	33	40	45
	0,65	29	39	47	53	27	36	43	49	25	33	40	45	23	31	37	42