

Cuarta Edición

2011 • 2012

Trabajos premidados



premio internacional
A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS
JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO

**MODELIZACIÓN DE LOS NIVELES DE SERVICIO
EN AUTOPISTAS EN TIEMPO PRESENTE PARA
LA GESTIÓN DINÁMICA DEL TRÁFICO**

accésit

BJÖRNULF B. BENATOV

**AUSCULTACIÓN DE LA FISURACIÓN
DESCENDENTE EN PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS MEDIANTE ULTRASONIDOS**

Presidente



D. JOSÉ LUIS ELVIRA MUÑOZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director Técnico de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento
Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Madrid
Encomienda de la Orden del Mérito Civil, Medalla al Mérito Profesional del C.I.C.C.P. y Medalla de Oro de la Carretera

Vocales (relacionados alfabéticamente)



D. JORGE O. AGNUSDEI (q.e.p.d.)

Doctor en Ciencias Químicas
Vicepresidente de la Comisión Permanente del Asfalto de Argentina
Secretario Permanente de los Congresos Ibero-Latinoamericanos del Asfalto



D. CÉSAR CAÑEDO-ARGÜELLES TORREJÓN

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Presidente de Prointec, S.A.
Medalla de Honor y Medalla al Mérito Profesional del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



D. HERNÁN OTONIEL FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ

Ingeniero Civil, Especialista en Vías Terrestres y Maestro en Ingeniería. Magister en Dirección Universitaria.
Ex-Rector y Profesor Emérito de la Universidad del Cauca, Profesor Honorario de la Universidad de Arkansas
Consultor de organismos internacionales en países latinoamericanos



D. JOSÉ MANUEL LOUREDA MANTIÑÁN

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Consejero de Sacyr Vallehermoso y de Repsol
Medalla de Honor del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



D. JOSÉ M. MORERA BOSCH

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Vicepresidente de la Comisión de Infraestructuras de la Confederación Española de Organizaciones Empresariales (CEOE)
Vicepresidente de la Asociación de Sociedades Españolas Concesionarias de Autopistas, Túneles, Puentes y Vías de Peaje (ASETA)



D. FÉLIX EDMUNDO PÉREZ JIMÉNEZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña
Premio Internacional a la Innovación en Carreteras “Juan Antonio Fernández del Campo” en su I Convocatoria

Secretario



D. JACOBO DÍAZ PINEDA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Secretario de la Fundación de la Asociación Española de la Carretera
Director General de la Asociación Española de la Carretera
Presidente de la Federación Europea de Carreteras
Presidente del Instituto Vial Ibero-Americano

Comisión de Valoración

D. VÍCTOR SÁNCHEZ BLANCO (Coordinador)

Banco Caminos

D. JOSÉ MANUEL CASTELLANOS BAUTISTA (q.e.p.d.)

Subdirector General de Construcción de la Dirección General de Carreteras de la Consejería de Transportes e Infraestructuras de la Comunidad de Madrid

D.ª ELENA DE LA PEÑA GONZÁLEZ

Subdirectora General Técnica de la Asociación Española de la Carretera

D. CARLOS JOFRÉ IBÁÑEZ

OFICEMEN-IECA

D. FRANCISCO JOSÉ LUCAS OCHOA

Jefe de Asistencia Técnica y Desarrollo de REPSOL

D. VICENTE PÉREZ MENA

Director Técnico de CEPSA-PROAS

D. MIGUEL SEISDEDOS PORTA

Director Técnico de IRIDIUM, Concesiones de Infraestructuras, S.A.

D.ª MARTA RODRIGO PÉREZ (Secretaria)

Fundación de la Asociación Española de la Carretera

Fallo del Jurado de la IV Edición del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo”, adoptado en reunión celebrada en Madrid, el día 11 de octubre de 2012

“El jueves, 11 de octubre de 2012, a las 12,30 horas, se reúnen en Madrid los miembros del Jurado de la IV Edición del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo”, actuando como Presidente D. José Luis Elvira Muñoz, y como Secretario D. Jacobo Díaz Pineda.

(...)

..., tras una intensa deliberación y por acuerdo unánime del Jurado, cuyos miembros han emitido su dictamen personalmente, se acuerda otorgar el galardón como mejor trabajo de innovación en carreteras presentado a la IV Edición del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo” al original que lleva por título **Modelización de los niveles de servicio en autopistas en tiempo presente para la gestión dinámica del tráfico** y del que es autor **D. Enrique Belda Esplugues**.

Asimismo, el Jurado acuerda reconocer con el Accésit Björnulf B. Benatov el trabajo titulado **Auscultación de la fisuración descendente en pavimentos asfálticos mediante ultrasonidos**, y del que son autores **D. Miguel Ángel Franesqui García** y **D. Juan Gallego Medina**.

CONTRA LA NADA DEL OLVIDO



Miguel Mª Muñoz Medina

Presidente de la Fundación de la Asociación Española de la Carretera (FAEC) y del Comité de Gestión del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo"

Han pasado dos años desde la última edición del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*". En aquella ocasión, iniciaba mis palabras de presentación del libro en el que se recogía el trabajo ganador aludiendo a ese olvido en el que a veces caen las carreteras por las que circulamos a diario, esas vías que siempre han estado ahí, desde mucho antes de que nacióramos, pero que acaban siendo una pincelada más en el paisaje de nuestra memoria que se diluye en mil y un recuerdos.

La pasada edición de este Premio fue convocada en 2009 y muchas cosas han cambiado desde entonces. Si en aquel momento la situación no era excesivamente halagüeña para el mundo de las infraestructuras viarias, en la actualidad, ya nadie duda de que las dificultades han ido a más. Y da la impresión de que ese olvido letal al que condenamos las cosas que no consideramos esenciales ha anegado por completo todo ese mundo. Parece un destino inexorable a juzgar por el trato que reciben últimamente las infraestructuras viarias.

Para comprobar hasta qué punto esto es cierto, sólo hay que observar el deterioro constante y sin freno que vienen sufriendo desde hace tiempo esas carreteras por las que viajamos a diario. Mientras tanto, a lo lejos vemos pasar trenes de alta velocidad que durante la última década han llegado a engullir la mitad de los presupuestos que los sucesivos Gobiernos han destinado año tras año a infraestructuras.

Entre bache y bache, nos preguntaremos por enésima vez cómo ha sido posible dilapidar tal cantidad de recursos públicos en un modo de transporte tan minoritario y costoso, mientras se reducía la conservación y el mantenimiento de carreteras a niveles tan ínfimos que han hecho retroceder nuestras vías a los años 80, como queda demostrado en un reciente estudio de la Asociación Española de la Carretera. Por enésima vez, no encontraremos respuesta razonable a tal despropósito.

Pese a ello, hay que recomponerse y abandonar todo pesimismo que nos impida revertir la situación. Certámenes como el "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*" apelan a este espíritu, ya que se basa en principios inequívocos de fomento de la investigación y el estudio en el ámbito viario, promoviendo la colaboración entre profesionales de todo el mundo. ¿Qué mejor manera de contribuir a que las carreteras recuperen, desde la base, el valor perdido?

Estos aspectos encajan de forma natural en la filosofía de la entidad que organiza este certamen, la Fundación de la Asociación Española de la Carretera (FAEC), cuya presidencia tengo el honor de ostentar.

Este Premio internacional es también el reconocimiento y el homenaje a una figura de la Ingeniería de Caminos que creyó en esos valores durante toda su vida: Juan Antonio Fernández del Campo y Cuevas. Por ello, se ha convertido en una leyenda para el mundo viario español y latinoamericano. En realidad, ya lo era antes de su temprano fallecimiento, en gran medida gracias a su brillante personalidad y a su ímpetu profesional, que lo empujaban a estar siempre dispuesto a ofrecer el máximo de sus capacidades.

Como en anteriores ediciones, el alto nivel técnico de los originales presentados a concurso ha sido la norma, obligando a los miembros del Jurado a ser especialmente ecuanímenes. La labor de este grupo de destacados y prestigiosos profesionales presidido por José Luis Elvira Muñoz, Director Técnico de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, ha sido extraordinaria y ha contribuido -una vez más- a otorgar un gran valor añadido a este certamen.

La investigación ganadora de la IV Edición de este Premio se reproduce íntegramente en las páginas del ejemplar que tiene entre sus manos. El título del trabajo es *Modelización de los niveles de servicio en autopistas en tiempo presente para la gestión dinámica del tráfico*, desarrollado por el Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos Enrique Belda Esplugues, a quien transmito mis felicitaciones por el galardón y por el excelente original que le ha hecho acreedor del Premio.

Como novedad, en su IV Edición, el "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*" ha contemplado la concesión del Accésit *Björnulf B. Benatov*, en memoria de este Ingeniero, Patrono de la FAEC y promotor del certamen, fallecido el pasado año. En este sentido, la presente publicación incluye también de forma íntegra el trabajo mecedor de esta distinción especial: *Auscultación de la fisuración descendente en pavimentos asfálticos mediante ultrasonidos*, de Miguel Ángel Franesqui García (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria) y Juan Gallego Medina (Universidad Politécnica de Madrid), a quienes también traslado mi más sincera enhorabuena.

Como Presidente de la Fundación de la Asociación Española de la Carretera, así como del Comité de Gestión del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo", no me gustaría finalizar estas líneas sin remarcar mi más sincero agradecimiento a todas las empresas e instituciones que patrocinan y apoyan esta iniciativa desde su nacimiento en 2005.

Me estoy refiriendo a Banco Caminos, CEPSA Productos Asfálticos y Repsol, como entidades patrocinadoras; a la Consejería de Transportes e Infraestructuras de la Comunidad de Madrid como administración colaboradora institucional; y a Dragados, Oficemen (Agrupación de Fabricantes de Cemento de España), Acciona Infraestructuras, Eiffage Infraestructuras; Euroconsult, FCC, Ferrovial Agroman, Isolux Corsán, OHL y Sacyr, como empresas colaboradoras. Y, por supuesto, gracias también a todos los profesionales que han remitido sus investigaciones a esta cuarta convocatoria de nuestro Premio. Les animo a que continúen su labor científica, sin caer en el desánimo. Sólo así será posible rescatar las carreteras de ese espacio al que muchos parece que quieren condenarlas, a esa dimensión ambigua y borrosa donde sólo habita la nada del olvido.

En Madrid, a 28 de noviembre de 2012

OTRO HORIZONTE ES POSIBLE



José Luis Elvira Muñoz
*Presidente del Jurado de la
IV Edición del "Premio
Internacional a la
Innovación en Carreteras
Juan Antonio Fernández
del Campo"*

Decíamos ayer -sin duda parece que fue ayer- que teníamos ante nosotros un "futuro prometedor" y que continuábamos avanzando con paso seguro por la senda del progreso de la mano de las infraestructuras viarias, garantes del desarrollo y el bienestar.

Y hoy, a pesar del cielo gris, del aire frío y de la sensación de desconcierto reinante, hemos de reafirmarnos en aquellas consideraciones. Las carreteras españolas han sido la sabia circulante de un desarrollo sin precedentes en nuestro viejo país. Han sido las arterias que han distribuido los nutrientes a todos los órganos de su compleja geografía. Y hoy, a pesar de todo, siguen siendo los capilares que llevan oxígeno hasta las zonas más recónditas del organismo peninsular.

Somos muchos los que estamos convencidos de que pronto, sobre nuestras infraestructuras viarias volverá a brillar el sol y las nubes quedarán diluidas tras un nuevo horizonte. Un convencimiento que nada tiene que ver -aunque pudiera parecerlo- con el romanticismo melancólico de quienes se resisten al cambio, sino todo lo contrario. Es la confianza que se deriva de la capacidad innovadora, del talento, el afán y el optimismo de todos los que creemos en la

Carretera, en sus bondades y, sobre todo, en su carácter irremplazable, querámoslo o no, como modo de transporte de personas y bienes.

El "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*" es una prueba fehaciente de cuanto acabo de afirmar. Una treintena de magníficas aportaciones científicas y tecnológicas, con posibilidades de aplicación práctica más allá de la pura conjetura y con una lucidez técnica que corrobora la capacidad y nivel de nuestros investigadores e ingenieros, han optado a este certamen en su cuarta convocatoria. Más de ochenta autores, equipos de trabajo multidisciplinarios, integrados también por expertos de otros países, adscritos al ámbito universitario, a la administración pública y al sector privado. Todos con mucho que ofrecer.

No puedo por menos que congratularme, una vez más, por formar parte de una iniciativa que me brinda la ocasión, en unos momentos tan difíciles, de constatar que la capacidad está ahí y que, de su mano, otro horizonte es posible.

Adéntrense en las páginas de este volumen y confirmen mis palabras leyendo los dos trabajos que han resultado premiados en esta ocasión con el máximo galardón que otorga el "Premio Internacional *Juan Antonio Fernández del Campo*" y con el Accésit *Björnulf B. Benatov*.

"Modelización de los niveles de servicio en autopistas en tiempo presente para la gestión dinámica del tráfico" es el título del original ganador, cuya

autoría corresponde al Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Enrique Belda Esplugues. Esta investigación define una nueva metodología de cálculo en tiempo real de los niveles de servicio en autopistas, que supera los actuales sistemas estáticos de medición. Un planteamiento que abre la puerta a futuras líneas de trabajo dirigidas a estudiar el comportamiento del tráfico en autopistas bajo la influencia de meteorología adversa e incluso a establecer la posible correlación entre el comportamiento de los conductores ante un suceso y los datos obtenidos del equipo de medida que registra dicho suceso.

Por su parte, el trabajo titulado **"Auscultación de la fisuración descendente en pavimentos asfálticos mediante ultrasonidos"**, del que son autores Miguel Ángel Franesqui García, de la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, y Juan Gallego Medina, del Departamento de Ingeniería Civil - Transportes de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Universidad Politécnica de Madrid, es el que ha sido distinguido con el Accésit.

Una de las principales causas del deterioro de los pavimentos asfálticos es la fisuración producida en la superficie de los mismos. Pese a ello, se trata de un aspecto que no está considerado convenientemente en los métodos tradicionales de diseño de carreteras. Con el fin de aportar luz en este sentido, los profesores Franesqui y Gallego han realizado una investigación con ultrasonidos para conocer con detalle el proceso de fisuración de los pavimentos, y así poder evaluar la profundidad de este tipo de fisuras. Además, la técnica propuesta

es no destructiva, de bajo coste y de rápida ejecución. También permite resolver algunos de los inconvenientes que presentan otros métodos de diagnóstico, caracterizados por su menor fiabilidad o su naturaleza destructiva.

Dos trabajos magníficos, sin duda, que, junto con los veintisiete restantes, han convertido la labor del Jurado de esta IV Edición del Premio en un auténtico reto, en tanto en cuanto ha sido necesario un análisis sumamente exhaustivo que permitiera, con criterios sólidos, descartar unos y optar por otros.

Una labor que, sin embargo, se ha visto ensombrecida por la desaparición de uno de los miembros del Jurado, que lo ha sido también en las tres convocatorias anteriores, el Doctor Jorge O. Agnusdei, una autoridad y una de las figuras más relevantes de Latinoamérica en materia de pavimentación.

No puedo dejar de mencionar al resto de los miembros del Jurado: César Cañedo Argüelles-Torrejón, Hernán Otoniel Fernández Ordóñez, José Manuel Loureda Mantiñán, José M^a Morera Bosch, Félix Edmundo Pérez Jiménez y Jacobo Díaz Pineda (Secretario), así como a los integrantes de la Comisión de Valoración: Víctor Sánchez Blanco (Coordinador), José Manuel Castellanos Bautista (recientemente fallecido), Elena de la Peña González, Carlos Jofré Ibáñez, Francisco José Lucas Ochoa, Vicente Pérez Mena, Miguel Seisdedos Porta y Marta Rodrigo Pérez (Secretaria).

Con todos ellos he tenido el honor de compartir el complejo proceso de selección de esta IV Edición del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo".

Y ellos, junto con los investigadores que han participado -en ésta y también en las convocatorias precedentes- son la garantía de que ese nuevo horizonte para nuestras carreteras no solo es posible, sino que está ahí, cerca, muy cerca.

En Madrid, a 28 de noviembre de 2012

Síntesis de la tesis doctoral:

**MODELIZACIÓN DE LOS NIVELES
DE SERVICIO EN AUTOPISTAS EN TIEMPO
PRESENTE PARA LA GESTIÓN
DINÁMICA DEL TRÁFICO**

Autor: Enrique Belda Esplugues

Dirigido por: Prof. Doctor Alfredo García García
Doctor Vicente Ramón Tomás López

Índice de contenidos

1	Introducción	19
2	Estado del Arte	21
2.1.-	Modelos estadísticos para el análisis del tráfico	21
2.2.-	Revisión de estudios sobre calidad de datos de las espiras electromagnéticas	23
3	Objetivos	26
3.1.-	Objetivo principal	26
3.2.-	Subobjetivos	26
4	Método	27
4.1.-	Hipótesis	27
4.2.-	Diseño Experimental	28
4.2.1.-	<i>Definición del área de estudio</i>	28
4.2.2.-	<i>Tramos de vía seleccionados</i>	28
4.2.3.-	<i>Criterios de tramificación</i>	29
4.2.4.-	<i>Criterios de selección de tramos en función de la localización de las ETDs</i>	30
4.2.5.-	<i>Caracterización de los tramos del estudio</i>	30
4.2.6.-	<i>Datos de tráfico</i>	30
4.3.-	Reducción de Datos	36
4.3.1.-	<i>Reducción de datos</i>	36
4.3.2.-	<i>Cálculo de la reducción de los datos de tráfico</i>	38
4.4.-	Propuesta de determinación de niveles de servicio	44
4.4.1.-	<i>Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico 1</i>	45
4.4.2.-	<i>Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico 2</i>	46

4.4.3.- Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación	51
4.4.4.- Comparativas de los 3 algoritmos	62
4.4.5.- Prueba de contraste	69
5 Conclusiones y líneas de investigación	70
5.1.- Conclusiones que se aportan	70
5.2.- Líneas de investigación y trabajos abiertos	72
5.3.- Aplicaciones	73
6 Referencias Bibliográficas	74

1. Introducción

El Libro Blanco del Transporte de la Unión Europea “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad”, así como su posterior revisión, marcó como uno de sus objetivos prioritarios para 2010 combatir la congestión, los accidentes y las emisiones del CO₂, sin por ello perturbar la dinámica del desarrollo económico en el territorio europeo. Para no afectar a esta dinámica, es necesario conocer los niveles de calidad de servicio, así como dar a conocer los mismos.

La seguridad vial y la confortabilidad o fluidez de la circulación dependen de muchos factores, entre los que se encuentran las características de las vías, las intensidades de tráfico, los conductores y los vehículos. La seguridad vial y la fluidez del tráfico dependen de una gestión y control del tráfico eficiente.

La gestión y control del tráfico consiste en la utilización adecuada del equipamiento existente para capturar la información de la carretera, procesarla para poder determinar el estado de la circulación y desarrollar las estrategias de gestión apropiadas para cada situación.

La aplicación de nuevas tecnologías a la ingeniería del tráfico ha permitido desarrollar un conjunto de sistemas conocidos como Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) que permiten mejorar la gestión

del tráfico y aumentar la seguridad vial haciendo un mejor uso de las infraestructuras viarias existentes al optimizar su utilización.

El desarrollo de los ITS ha permitido la gestión dinámica del tráfico. A partir de la utilización de los sistemas ITS, la gestión del tráfico se realiza en tiempo real y se adapta a las diferentes situaciones que se pueden producir en la circulación. Tal y como se expresa en el Manual de Capacidad del 2000, una de las variables más utilizadas en la gestión del tráfico y la que refleja de mejor manera la calidad de la circulación es el nivel de servicio de la vía, así lo corrobora Romana (1995) en el documento “Evaluación práctica de niveles de servicio en carreteras convencionales de dos carriles en España” y también en el trabajo de Roess (2009), “Level of Service Analysis of Freeway Weaving Segments”. El nivel de servicio describe cualitativamente las condiciones de funcionamiento de la circulación viaria, y la percepción de estas condiciones por los conductores y/o pasajeros. La definición de un nivel de servicio se describe generalmente en relación con variables tales como velocidad, tiempo de recorrido, libertad de maniobra, interrupciones de la circulación, comodidad y seguridad vial.

Sin embargo, el cálculo de niveles de servicio presenta una serie de problemas que es necesario

resolver para su utilización en la gestión dinámica del tráfico en autopistas. Por un lado es necesario disponer de una información de calidad. La monitorización e integración de la información monitorizada por los equipos colocados en la carretera debe ser analizada y tratada para garantizar su nivel de calidad y su utilización por los sistemas. Por otro lado, el cálculo de los niveles de servicio propuestos por el Transportation Research Board (2000) "Highway Capacity Manual", de aquí en adelante HCM 2000, es totalmente estático. Este modelo de cálculo es adecuado para el dimensionado de futuras redes viarias, pero no para la gestión dinámica del tráfico, ya que, no tienen en cuenta el estado del tráfico en tiempo presente para la determinación del nivel de servicio.

2. Estado del Arte

En el presente capítulo se recogen una aproximación a los principales modelos estadísticos que pueden ser utilizados para abordar la investigación sobre el análisis de los niveles de servicio en tiempo presente para la gestión dinámica del tráfico en autopistas.

El capítulo recoge además una revisión de los estudios sobre calidad de datos de las espiras electromagnéticas, que en su mayoría se centran en el análisis de la información de la espira a posteriori y que por tanto no pueden ser utilizados para el análisis en tiempo presente.

En la investigación en profundidad desarrollada en la tesis doctoral se caracterizan además las variables fundamentales de tráfico, los conceptos teóricos y relaciones entre las mismas, así como los equipos de adquisición utilizados para la obtención de estas variables que se emplean en el estudio objeto de la tesis.

2.1. Modelos estadísticos para el análisis del tráfico

Según Pardo C.E. y Del Campo, P.C. (2007) un modelo estadístico es una ecuación matemática que reproduce los fenómenos observados de la forma más exacta posible. Para ello tiene en cuenta los datos suministrados y la influencia que el azar tiene en las observaciones. Existen diferentes modelos estadísticos para el análisis de datos. Cada uno de estos modelos es ade-

cuado para diferentes casos en función de la utilidad que se quiera hacer de los datos dependiendo de las características del problema a analizar.

Con el avance de las TIC, cada vez más, existe un mayor número de datos a procesar. Everitt, B.S. (1995) descubrió que el problema de la clasificación de datos es uno de los primeros problemas que aparecen en la actividad científica. Uno de los aspectos que se tratan en esta tesis es agrupar un gran volumen de datos en diferentes grupos, esto es, realizar una clasificación de este conjunto de datos, que ayuden a validar las hipótesis establecidas en el punto 4.1.

En el marco de la tesis los datos son pares de elementos asociados a velocidad y ocupación. Cuando hablamos de clasificar un par de coordenadas como estas, (X,Y) en un grupo determinado, a partir de los valores de una serie de parámetros medidos, y además, esa clasificación tiene un cierto grado de incertidumbre, resulta razonable pensar en la utilización de una metodología estadística.

Desde el punto de vista estadístico es posible distinguir dos enfoques diferentes al problema de la clasificación. En el primer enfoque los grupos están bien definidos y se trata de determinar un criterio para etiquetar cada elemento, en nuestro caso pares (X,Y), como pertenecientes a alguno de los grupos, a partir de los valores

de una serie limitada de parámetros. En este caso las técnicas más utilizadas son básicamente técnicas de análisis discriminante, aunque existen otras posibles alternativas, tales como la utilización de la regresión logística, según Baíllo, A. y Grané, A. (2008).

En el segundo enfoque no se conoce a priori los grupos en los que se quiere clasificar los elementos y lo que precisamente se desea es establecer los grupos a partir de los datos existentes. Las técnicas estadísticas más utilizadas, según Olsen, S.F., Martuzzi, M., Elliot, P. (1996) así como las vistas en "Tratamiento de Datos" en esta área se basan en el análisis de "clusters", que podemos traducir como análisis de agrupaciones y también como análisis de conglomerados. Los métodos de clasificación se pueden dividir en jerárquicos y no jerárquicos. En los no jerárquicos el número de clases se establece previamente y el algoritmo de clasificación asigna los individuos a las clases, partiendo de algunos valores iniciales y buscando optimizar algún criterio establecido de antemano. En la clasificación jerárquica se construye un "árbol" o "dendrograma", (del griego dendron = árbol), cuyas ramas terminales representan a cada uno de los individuos y el tronco es la clase conformada por todos los individuos. Tal y como comentó Martín F. (1995), para obtener alguna clasificación particular se hace "un corte" en el árbol.

Como método no jerárquico se tiene el análisis de conglomerados, que es una técnica multivariante¹ que permite agrupar los casos o variables de un

conjunto de datos en función del parecido o similitud existente entre ellos, que ya vieron Pardo, C.E., y Del Campo, P.C. (2007). Esto es, divide un conjunto de datos en grupos o conglomerados (clusters) de forma que los perfiles de los elementos en un mismo grupo sean muy similares entre sí, dando una gran cohesión interna al grupo. Además, los objetos de un grupo o conglomerado son distintos a los objetos de otro conglomerado, propiedad que se conoce como aislamiento externo del grupo.

Este análisis ofrece diversas ventajas respecto a las otras técnicas estadísticas como el análisis discriminante o la regresión logística del primer enfoque:

- El análisis es similar a un análisis factorial, pero es menos restrictivo en sus supuestos al no exigir linealidad ni simetría en los datos.
- Permite la utilización de variables categóricas, como puede ser el nivel de servicio.
- Permite determinar el número óptimo de grupos y su composición basándose en la similitud existente entre los casos, no asumiendo ninguna distribución específica para las variables mientras que el análisis de discriminante efectúa la clasificación tomando como referencia un criterio o variable dependiente.

Dentro del análisis de conglomerados se pueden emplear diversos procedimientos para su tratamiento, como comenta Everitt, B.S. (1995):

- Análisis de conglomerados jerárquico. Este método determina el número óptimo de conglomerados existente en los datos pero no puede tratar con un gran volumen de datos.
- Análisis de conglomerados de K medias. Este método permite determinar el número de conglomerados basándose en las distancias existentes entre ellos y además, permite procesar un número ilimitado de casos.

Ambos métodos de análisis son de tipo aglomerado, en el sentido que parten del análisis de casos individuales e intentan agrupar casos hasta llegar a la formación de grupos o conglomerados homogéneos.

El análisis de conglomerados mediante K medias se puede emplear como técnica exploratoria, clasificando los casos e iterando para encontrar la ubicación de los centroides y posteriormente como técnica de clasificación, clasificando los casos a partir de los centroides obtenidos en el primer paso.

El análisis de conglomerados mediante K medias se ha utilizado en diferentes estudios como:

- Grané, A. y Veiga, H. (2009) lo emplean para la estimación de los requisitos para minimizar el capitalriesgo en inversiones de seguros y gestión de riesgos.
- Allende, H. y Galbiati, J. (2004) lo emplean como filtro no paramétrico para la recuperación de imágenes digitales.

- Díaz, E et al. (2001) analizan la influencia de las desigualdades sociales, la conflictividad social y la pobreza extrema sobre la morbilidad por tuberculosis.
- Borracci, R.A. y Arribalzaga, E.B. (2005) aplican análisis de conglomerados y redes neuronales artificiales para la clasificación y selección de candidatos a residencias médicas.
- Olsen, S.F., Martuzzi, M., Elliot, P. (1996) realizan un análisis de enfermedades, generando una estructura de causas, instantes de aparición y posibles grupos sociales afectados.

Las características de este modelo de análisis estadístico comentadas anteriormente, y los resultados de los estudios analizados han determinado que este tipo de análisis haya sido el utilizado para el modelado estadístico de los datos de esta tesis.

2.2. Revisión de estudios sobre calidad de datos de las espiras electromagnéticas

Los equipos de toma de datos basados en espiras electromagnéticas son uno de los sensores más utilizados en todo el mundo para la monitorización del tráfico. Sin embargo, la utilización de este tipo de sensores ha generado un debate, desde su implantación, sobre la calidad de la información que proporcionan.

Granato (1998) y Aunet (2000) presentan dos estudios con datos de tráfico. Para los estudios, utilizan un conjunto de técnicas estadísticas como el coeficiente de

¹ El análisis multivariante es un método estadístico utilizado para determinar la contribución de varios factores en un evento o resultado.

variación, análisis de conglomerados, gráficas de factores de tráfico mensuales y mapeo de estaciones de toma de datos sobre las gráficas. A partir de estas técnicas, obtienen un conjunto de factores y variaciones que aplican a los datos de tráfico para obtener unos datos de Intensidades Medias Diarias (IMDs) fiables. Ambos procesos no son extrapolables para al tratamiento de los datos del experimento de esta tesis, ya que se aplican a datos históricos para la modificación de IMDs con información errónea, y no para datos en tiempo presente como los que se utilizan en esta tesis.

En Lu, Xiao-Yun, Varaiya, Pravin, Horowitz, Roberto and Palen (2008) se presenta un análisis de los diferentes métodos utilizados para la detección y corrección de datos proporcionados por las espiras con fallos. En este estudio se analizan los diferentes niveles en los que se pueden producir los errores. Identifica errores: a) a nivel de agregación de datos, b) a nivel de espira o estación de toma de datos, c) a nivel de centro de control y d) a nivel de datos históricos frente a datos en tiempo presente. El estudio recomienda una aproximación para la detección en función del nivel de error. Las recomendaciones se centran en realizar análisis macroscópicos, microscópicos o mesoscópicos en función del nivel de error.

Wall, Z R, Dailey (2003) definen un algoritmo para la detección y corrección de errores en datos de tráfico almacenados. Este estudio se fundamenta en la realización de un análisis de datos off line para determinar si una estación de toma de datos funciona correctamente o no. El estudio parte de una estación de toma de datos correcta, y utiliza la información proporcionada

por la misma para analizar las estaciones adyacentes. El parámetro utilizado es el flujo de vehículos. El algoritmo, a partir del flujo de vehículos de la estación de toma de datos correcta, correlaciona los datos de la estación adyacente y analiza las variaciones. Si no aparece una variación significativa, la estación adyacente aparece como validada y se procede a realizar el análisis con la siguiente estación. Este algoritmo es adecuado para determinar la calidad de la información recogida por los equipos de toma de datos cuando se tiene un gran volumen de datos. Sin embargo, este algoritmo no se utiliza para la identificación de errores en tiempo presente, objeto de esta tesis.

Coifman (2001) y Zhanfeng, J., C. Chao, B. Coifman, and P. Varaiya (2001) presentan varios algoritmos para estimar la calidad de los datos proporcionados por las espiras. Ambos trabajos se centran en la información que proporciona una espira simple para determinar la calidad de la información que proporciona. En Coifman (2001) se presenta un algoritmo que permite estimar la velocidad media a partir de la ocupación y la longitud de los vehículos que circulan por ella. En Zhanfeng, J., C. Chao, B. Coifman, and P. Varaiya (2001) se extiende y mejora el algoritmo para la determinación de la velocidad con una calidad adecuada y utilizando una única espira. Ambos estudios se centran en estimar, con la mayor precisión, la longitud efectiva de los vehículos. A partir de esta longitud, y del flujo y la ocupación determinan la velocidad de los vehículos. Sin embargo, los estudios se centran en obtener un dato de velocidad con una buena calidad, partiendo del resto de parámetros proporcionados

por la espira, pero partiendo de la base que estos parámetros son correctos. Por lo tanto, este estudio tampoco es adecuado para la reducción de datos objeto de esta tesis, ya que no sólo no se comprueba la calidad de todos los datos, sino porque también se basa en datos proporcionados por espiras simples, mientras que los datos obtenidos para el experimento de esta tesis son proporcionados por espiras dobles.

Zhang, X, Nihan, N L, Wang, Y (2005) se presenta un estudio para el análisis de los datos proporcionados por espiras dobles. El estudio se centra en el potencial de las espiras dobles para obtener datos de calidad. Sin embargo, el algoritmo presentado en el estudio se centra en el análisis de la información para vehículos pesados y en situaciones de flujo libre. Así pues, este algoritmo tampoco puede aplicarse en el experimento propuesto, ya que en el experimento, no sólo se trabaja con todo tipo de vehículos, sino que también existen situaciones de congestión.

En May A.D, Coifman B, Caiford, R, Merritt, G (2004) se presenta el estudio para mantener, mejorar y fomentar la investigación sobre los sistemas de detección de datos de tráfico de Berkeley Highway Lab. En el estudio se presenta un esquema basado en nueve diagnósticos dinámicos para determinar la calidad y validez de los datos de tráfico. Los diagnósticos se basan en analizar el flujo de la información proveniente de la espira. Si no existe variación de los datos durante un periodo de tiempo determinado implica que la espira no funciona correctamente. Este estudio ha servido de base para definir alguno de los filtros presentados

en la reducción de datos de esta tesis. Sin embargo, los periodos de integración utilizados han sido menores, ya que el experimento de esta tesis está enfocado a la gestión de tráfico en tiempo presente.

Los estudios analizados han servido para conocer el estado del arte en materia de calidad de datos de las espiras electromagnéticas. Sin embargo, estos estudios no son extrapolables a la presente tesis, a excepción de May A.D, Coifman B, Caiford, R, Merritt, G (2004) por las siguientes razones principales:

- Todos los estudios se centran en el análisis de la información de la espira a posteriori. No pueden ser utilizados para el análisis en tiempo presente.
- Los estudios se centran en la identificación de qué espiras están mal calibradas y producen un elevado porcentaje de datos erróneos. No obstante, no determinan qué datos de los enviados por las espiras identificadas como correctas son erróneos.
- Se requiere una mayor aportación metodológica que permita disponer de datos totalmente depurados y validados para el análisis de datos en tiempo presente. Los estudios analizados detectaban cuándo una espira estaba mal (rota) o daba información incorrecta de forma general, pero de las espiras que daban información buena, no identificaba qué datos podrían ser erróneos, ya que no analizaban la coherencia de los datos obtenidos, así como tampoco la relación entre las variables de tráfico.

3. Objetivos

3.1. Objetivo principal

El objetivo general de esta tesis es la *definición de una nueva metodología de modelización en tiempo presente de los niveles de servicio en autopistas mediante la utilización de datos de sensores en carretera.*

Se pretende que esta modelización pueda ser utilizada por los sistemas de sensorización actualmente más extendidos para obtener una caracterización de los niveles de servicio más ajustada a su definición teórica, de forma que los gestores de tráfico puedan trabajar con información más precisa a la hora de la toma de decisiones.

3.2. Subobjetivos

Para conseguir el objetivo general deben resolverse los siguientes objetivos parciales:

- Estudiar la calidad de los datos obtenidos de las ETDs, analizando cuáles son los mecanismos existentes para incrementar la calidad del dato y proponiendo los más adecuados para mejorar la consistencia y filtrado de los datos obtenidos de los sensores en carretera. Aplicar estos mecanismos a los datos utilizados en el análisis de nivel de servicio en tiempo presente.

- Analizar la viabilidad de adaptar el modelo de cálculo de nivel de servicio del HCM, mediante la utilización de la información disponible por los sensores en carretera.
- Definir y ajustar un nuevo modelo matemático que permita un cálculo de los niveles de servicio teniendo cuenta el estado del tráfico en tiempo presente.
- Contrastar los resultados de los diferentes modelos propuestos para el cálculo del nivel de servicio de las carreteras.

4. Método

4.1. Hipótesis

Las hipótesis de partida de la presente tesis doctoral son:

- Los datos proporcionados por las estaciones de toma de datos, basadas en espiras electromagnéticas, en tiempo presente poseen errores inherentes al detector. Por lo tanto es necesario realizar una reducción de datos para poder trabajar con los datos correctos.
- El HCM 2000 es la única referencia técnica que detalla la metodología de cálculo del nivel de servicio. Se utiliza el HCM 2000 para obtener un patrón de referencia, que permita comparar los resultados de los modelos propuestos con el modelo HCM 2000.
- Los 6 niveles de servicio definidos en el HCM 2000 no se consideran adecuados para la gestión dinámica del tráfico ya que entre algunos de ellos no existen variaciones en las condiciones de circulación significativas. Así pues, se toma como hipótesis de partida la reducción a 4 niveles. Estos niveles surgen de agrupar los niveles A y B y los niveles E y F.
- Los parámetros para el cálculo del nivel de servicio se utilizan de forma dinámica. Esto es, dependiendo del método propuesto se utiliza como velocidad libre básica:

- El límite de velocidad de cada tramo.
- La velocidad libre básica; como la media geométrica de las velocidades cuando la intensidad es menor a 400 veh/h. Este valor viene determinado por la experiencia práctica, en la Dirección General de Tráfico (DGT) del Ministerio de Interior del Gobierno de España, que indica que cuando hay en la carretera una intensidad de hasta 400 veh/h. es cuando éstos circulan a la velocidad libre.
- La velocidad media por minuto, como dato proporcionado por la ETD cada minuto. Este periodo de integración es el mínimo intervalo de datos agregado por la estación de toma de datos y se considera adecuado para trabajar en la gestión del tráfico en tiempo presente.
- Se asimila la densidad de tráfico a la ocupación. Esta hipótesis se debe a la imposibilidad de medir la densidad con los equipos ITS actualmente desplegado en las carreteras del Estado, en los que se basa el experimento. Tal y como se define en Kim Y, Hall F. L. (2004), Hall, F. L. (1986) y en el Minnesota Department of Transportation (2000) la densidad tiene una relación directa con la ocupación. Así pues, puede calcularse directamente la densidad a partir de parámetros que proporciona la espira como la ocupación y la longitud del vehículo.

4.2. Diseño Experimental

4.2.1. Definición del área de estudio

La definición de una serie de criterios de selección es imprescindible para llevar a cabo la elección del tramo de estudio sobre el que se desarrollará el presente trabajo. Dichos criterios permitirán seleccionar un tramo de vía que se ajuste correctamente a las características del estudio.

Los criterios definidos se centran en dos hechos fundamentales. El primero de ellos es el análisis de la capacidad de la vía, y el segundo la homogeneidad de los viales correspondientes a la vía. Además, con objeto de relacionar los valores adquiridos por el equipamiento en carretera como las estaciones de toma de datos (ETD) se tendrá en cuenta la localización geográfica de éstas y la distancia existente entre ellas. La zona de estudio seleccionada deberá disponer de equipamiento de este tipo con una correcta localización y proximidad.

Además, los tramos seleccionados deberán ser lo más homogéneos posibles entre sí, ya que esto permitirá hacer una correcta comparación de los datos ofrecidos por su equipamiento. Tanto las características geométricas como los valores de las variables de tráfico de cada tramo deberán ser equivalentes. El objetivo de la búsqueda de esta similitud es obtener elementos prácticamente equivalentes, de forma que los análisis y resultados obtenidos a partir de cada tramo puedan ser directamente extrapolables entre sí.

Además, tal como se ha comentado en el punto anterior, uno de los criterios de clasificación de tramos consistirá en las características del tráfico de cada tramo. Una de las variables que pertenece a este conjunto es la capacidad de los viales, que adquiere una gran importancia, ya que los viales de alta capacidad presentan valores muy significativos del grupo de variables que conforman el fenómeno del tráfico (velocidad, intensidad, ocupación, etc.). Los análisis realizados sobre tramos con viales de este tipo consiguen eliminar los vehículos poco significativos para el estudio (ciclomotores, bicicletas, etc.), centrando el trabajo en los vehículos ligeros, que son los principales usuarios de este tipo de vías.

4.2.2. Tramos de vía seleccionados

La zona seleccionada cuenta con tramos de vía con estaciones de toma de datos (ETD) que trabajan de forma paralela almacenando la información correspondiente. No obstante, para analizar la información ofrecida por dicho equipamiento es necesario disponer de datos con frecuencia cada minuto, ya que de esta forma se consigue una continuidad que se ajusta correctamente a la realidad del tráfico. Tal como ocurre con el equipamiento instalado en determinados tramos de vía, la información almacenada presenta una frecuencia de minuto. Por lo tanto, para el presente estudio se analizarán aquellas vías que ofrezcan un equipamiento que proporcione datos con frecuencia cada minuto y que además presenten las siguientes características:

- Deben pertenecer a una autopista.
- Todos presentan dos carriles por sentido de circulación con separadores físicos entre ambos sentidos.
- El carril derecho de cada vía siempre está destinado preferentemente a la circulación de vehículos pesados, mientras que el carril izquierdo es de uso prácticamente exclusivo de los vehículos ligeros.

Para determinar en qué fechas hubo sucesos representativos, esto es, variaciones significativas de los niveles de servicio, ha sido imprescindible la colaboración con la Dirección General de Tráfico a través del Centro de Gestión del Tráfico de la Comunidad Valenciana. Como resultado de dicha colaboración se han escogido varios tramos de la autovía A-3 ya que se ajustan adecuadamente al estudio asociado al presente trabajo.

4.2.3. Criterios de tramificación

Para realizar una tramificación óptima hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Se consideran tramos, todas aquellas longitudes de carretera en las cuales, tanto la *intensidad de los vehículos que por ahí circulan como la capacidad de la carretera sean de iguales ó semejantes características.*
- En cuanto a la intensidad, cada tramo estará limitado por las vías de incorporación o desvíos existentes; por lo tanto, un tramo se define entre

entradas y salidas, no pudiendo tener ningún tipo de desviación o incorporación que altere la intensidad de vehículos que por él circulan.

- Así mismo, un tramo debe tener en toda su longitud la misma capacidad de circulación y, por lo tanto, serán tramos distintos todos aquellos en que aumente o disminuya el número de carriles, la pendiente sea distinta, supere un máximo de radio de curvatura, el porcentaje de vehículos pesados que circulan varíe con respecto a otra sección de carretera, y en definitiva cualquier factor que afecte a la capacidad de la vía (factores según HCM 2000).
- Al tener que extrapolar los datos recogidos en una sección de medida a una longitud de carretera, a medida que esta longitud sea mayor, la fiabilidad de los datos es menor. Por término general se considera que la longitud de los tramos no debe exceder los 1.500 metros. Y para la estimación de tiempos de recorrido esta longitud disminuye hasta 1.100 metros. En el caso de la detección automática de incidentes en tramos conflictivos es conveniente disminuir esta separación entre ETD hasta incluso los 700 metros.
- Se consideran tramos especiales en los que, por problemas de congestión en vías de salida o de incorporación, el carril de circulación derecho de la vía troncal, se ve afectado en la continuidad del flujo circulatorio. En estos casos, la longitud de vía de la zona troncal afectada por la congestión de la vía de salida o de incorporación, se considerará como tramo independiente del troncal.

En el siguiente ejemplo, se observa la separación de las secciones de medida 1 y 2, como consecuencia de las retenciones que se producen en la salida (tramo 3); por lo tanto se considera como tramo especial el tramo 2 (sección de medida 2):

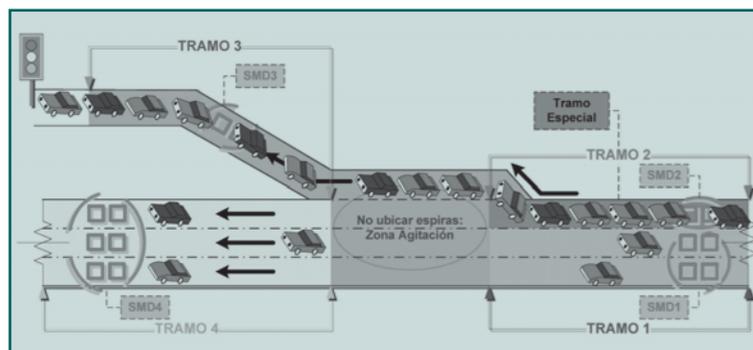


Figura 1.- Tramificación.

4.2.4. Criterios de selección de tramos en función de la localización de las ETDs

Cada tramo definido con los criterios expuestos anteriormente, es susceptible de ser controlado por un equipo detector. Como norma general, la ubicación de las ETD dentro de cada tramo corresponderá con el inicio de éste según el sentido de circulación, sin embargo se ha evitado seleccionar aquellos tramos que dispongan de ETD en las siguientes situaciones:

- Zonas de carretera que por disminuciones de velocidad provoquen cambios de carriles frecuentes en los vehículos.

- Proximidades de incorporaciones de otras vías a la zona troncal o bien de salidas (desvíos) de la vía troncal a otras vías. En estas zonas de trenzado se producen cambios de carriles de manera frecuente y se considera una **zona de agitación**.

- Zonas de **curvas** en la vía troncal, donde las medidas que se obtienen no son representativas, debido a que la velocidad de los vehículos disminuye considerablemente por el efecto de las frenadas en la curva.

4.2.5. Caracterización de los tramos del estudio

La caracterización de los tramos es una tarea importante no sólo para conocer exactamente la ubicación del punto de conteo y su dimensionamiento sino también para conocer sus características y definir el comportamiento del tramo bajo estudio.

En la tabla 1 se detallan los puntos donde se encuentran ubicadas las Estaciones de Toma de Datos y sobre las cuales se ha centrado el estudio.

4.2.6. Datos de tráfico

Un aspecto fundamental del experimento reside en una correcta obtención de los datos de las diferentes variables de tráfico. Las entidades sobre las que se obtienen las variables fundamentales de tráfico se

Punto Kilométrico	Sentido	Número de Carriles	Anchura carriles
186+500	CRECIENTE	2	3.5m
186+450	DECRECIENTE	2	3.5m
212+100	CRECIENTE	2	3.5m
212+780	DECRECIENTE	2	3.5m
242+000	CRECIENTE	2	3.5m
242+000	DECRECIENTE	2	3.5m
248+010	DECRECIENTE	3	3.5m
248+010	CRECIENTE	3	3.5m
255+290	DECRECIENTE	2	3.5m
255+290	CRECIENTE	2	3.5m
270+000	DECRECIENTE	2	3.5m
270+000	CRECIENTE	2	3.5m
285+150	CRECIENTE	2	3.5m
285+150	DECRECIENTE	2	3.5m
291+450	CRECIENTE	2	3.5m
291+450	DECRECIENTE	3	3.5m
296+475	CRECIENTE	2	3.5m
296+475	DECRECIENTE	2	3.5m

Tabla 1.- Listado de estaciones de toma de datos.

pueden clasificar en entidades físicas y entidades lógicas. Las entidades físicas se refieren a equipos de medida individuales mientras que las entidades lógicas son agrupaciones virtuales de las entidades físicas de acuerdo a criterios de ingeniería de tráfico.

Las entidades físicas lógicas del presente estudio son:

- **Detector: Entidad básica inferior** del que se obtienen las variables de tráfico correspondientes a un carril de la ETD. Es el dispositivo que detecta la presencia o el paso de vehículos mediante la variación de la inductancia de un lazo. En tráfico interurbano, el detector mide la detección de los vehículos que pasan por dos ETD que están alineados en el sentido longitudinal de circulación.

A partir de las variables de tráfico aportadas por las ETDs, el software de la aplicación obtiene nuevas variables para entidades de abstracción superior a la del carril (detector). Estas entidades lógicas son las denominadas **Entidades Superiores del Sistema**.

- **Sección de Medida: Entidad básica superior** que representa la unión lógica virtual de un conjunto de detectores de tráfico. Las secciones de medida pueden ser físicas o virtuales:

- La **sección de medida física** resulta de la agrupación lógica de los detectores del mismo tipo de una sección de la carretera de comportamiento de tráfico homogéneo. Es un ente de mayor abstracción en el que se tienen en cuenta las mismas variables de tráfico medidas por los detectores más el **Nivel de Servicio**. Su funcionalidad es la de servir de estación medidora que ofrezca datos de tráfico globales de un punto kilométrico de una vía en un único sentido de circulación definido.

- La **sección de medida virtual**, resulta de la combinación de secciones de medida reales, es decir la combinación de detectores de diferentes secciones de la vía. La única variable de tráfico fiable que se obtiene para esta entidad es la **intensidad** con el fin de obtener el aforo ó número de vehículos que pasan por una sección de medida como resultado de sumas y restas de las secciones de medida físicas que la componen.
- **Tramo**: Área comprendida entre 2 puntos de una red de carreteras con un comportamiento de tráfico homogéneo, situado en una misma vía y en un mismo sentido de circulación, sin interrupciones de accesos (entradas/salidas) ni variaciones de capacidad. Su funcionalidad es la de extrapolar las medidas de las variables de tráfico de la sección o secciones de medida contenidas en él, a un tramo de vía de comportamiento de tráfico homogéneo.

A continuación se detalla la información que se obtiene de la ETD, equipo de adquisición de datos utilizado en el estudio. Asimismo se detalla el tratamiento de datos que se realiza a nivel superior mediante un software del Centro de Control, a partir de las variables de tráfico aportadas por las ETD basado en una serie de integraciones/agregaciones para obtener las variables de tráfico aplicadas a las entidades superiores que se consideran.

4.2.6.1. Agregación de datos en tiempo presente

Los datos básicos de tráfico de la **ETD en tiempo real**, corresponden a los proporcionados por cada uno de los detectores de la ETD, pertenecientes al último **periodo de integración (PI) de 1 minuto** de tiempo. Éste periodo de integración viene recomendado por la norma UNE 135411-3:2004 Aenor (2004), como valor por defecto, para la integración de los datos sumin-

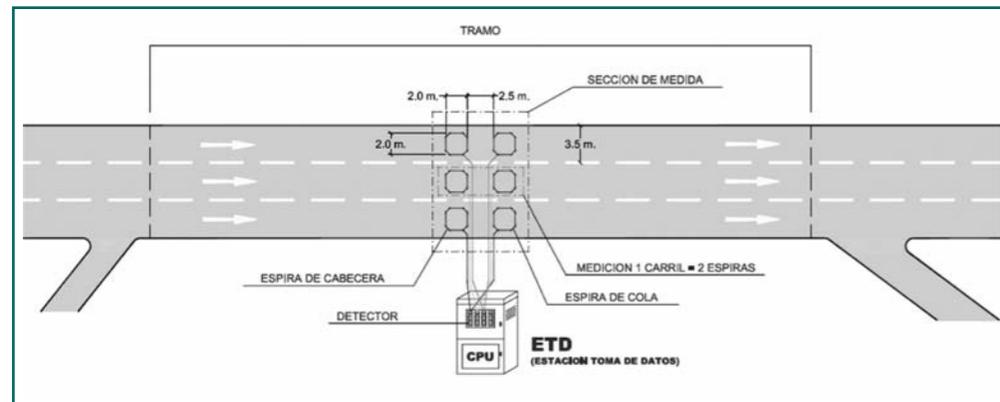


Figura 1.- Esquema de entidades físicas y lógicas.

istrados en tiempo presente por los detectores de las estaciones remotas.

Estos datos están referidos a las siguientes variables de tráfico que se obtienen a partir de todos los vehículos registrados por la **entidad inferior del sistema, detector** (formado por espiras dobles) ó **carril** durante el periodo de integración PI de 1 minuto:

- **Intensidad (I_D)**: Número de vehículos que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración PI de 1 minuto. Se expresa en *n*° vehículos ó veh/h realizando la siguiente conversión:

$$I_D(\text{veh/h}) = N^\circ \text{Vehiculos} * 60,$$

Porque 1 hora tiene 60 intervalos de 1 minuto. En el caso de agregaciones temporales:

- Si $PI = 5 \text{ min} \Rightarrow I_D(\text{veh/h}) = N^\circ \text{Vehiculos} * 12$, porque 1 hora tiene 12 intervalos de 5 minutos.
- Si $PI = 15 \text{ min} \Rightarrow I_D(\text{veh/h}) = N^\circ \text{Vehiculos} * 4$, porque 1 hora tiene 4 intervalos de 15 minutos.

- **Ocupación (O_D)**: Media aritmética de los tiempos de ocupación de los vehículos que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración. Se expresa en porcentaje % respecto del periodo de integración de 1 minuto:

$$O_D(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \text{TiempoOcupación}_i(\text{sg})}{n} * \frac{100}{PI = 60(\text{sg})},$$

siendo n el número de vehículos registrados en el periodo de integración PI.

- **Velocidad Media (V_D)**: Media aritmética de las velocidades de los vehículos que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración, medida en Km/h.
- **Distancia Media (D_D)**: Media aritmética de las distancias entre vehículos consecutivos registrados por el detector D en el periodo de integración, medida en metros *m*.
- **Longitud Media (L_D)**: Media aritmética de las longitudes de los vehículos que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración, medida en decímetros *dm*.
- **Composición Longitud (CL_{DC})**: Número de vehículos clasificados por longitud, de acuerdo a las categorías establecidas según los umbrales configurados, que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración. Se expresa en % de la categoría que corresponda, por ejemplo %L que corresponde al porcentaje de ligeros.

El sistema permite obtener hasta 2 clasificaciones distintas por longitud de acuerdo a los umbrales configurados. Normalmente se establecen 2 categorías, *ligero* y *pesado* a partir de un umbral:

- Si $L \leq 5,6 \text{ metros} \Rightarrow \text{LIGERO}$
- Si $L > 5,6 \text{ metros} \Rightarrow \text{PESADO}$

- **Composición Velocidad (CV_{DC})**: Número de vehículos clasificados por velocidad, de acuerdo a las categorías establecidas según los umbrales

configurados, que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración. El sistema permite obtener hasta 3 clasificaciones distintas por velocidad. Se expresa en % de la categoría que corresponda, por ejemplo %L que corresponde al porcentaje de ligeros.

- **Congestión (C_D):** Variable booleana que indica la existencia de alguna activación de alarma de congestión determinada por el algoritmo HIOCC (High Occupancy) implementado en el ETD en el periodo de integración. Se expresa en $Sí=1$ ó $NO=0$.
- **Alarma Kamikaze (K_D):** Variable booleana que indica la existencia de algún vehículo circulando en sentido contrario en el periodo de integración. Se expresa en $Sí=1$ ó $NO=0$.
- **Sentido Inverso (SI_D):** Variable booleana que indica que la circulación en el periodo de integración ha presentado una modificación de sentido respecto al habitual. Esto sucede en carril reversible, que en determinado instante varía su sentido de circulación, y puede ocurrir en mitad de un periodo de integración. Se expresa en $Sí=1$ ó $NO=0$.
- **Error (E_D):** Es el porcentaje de tiempo dentro del periodo de integración en que si hubiesen pasado vehículos, el detector D no los registra. Este parámetro representa la fiabilidad de la medida obtenida en el periodo de integración. Se expresa en %.

4.2.6.2. Agregación de datos de detectores a secciones

Las variables de tráfico de las secciones de medida resultan de la **agregación espacial** de los datos de los n detectores que las componen:

- **Intensidad (I_S):** Número total de vehículos que han sido registrados por los detectores D_i asociados a la sección de medida S en el periodo de integración. Se expresa en *nº vehículos ó veh/h* realizando la siguiente conversión:

$$N^{\circ} Vehiculos_S = \sum_{i=1}^{i=n} N^{\circ} Vehiculos_{D_i}$$

$$I_S (veh/h) = \sum_{i=1}^{i=n} N^{\circ} Vehiculos_{D_i} * 60,$$

porque 1 hora tiene 60 intervalos de 1 minuto. En el caso de agregaciones temporales:

- Si $PI = 5 \text{ min} \Rightarrow I_S (veh/h) = N^{\circ} Vehiculos * 12$, porque 1 hora tiene 12 intervalos de 5 minutos.
- Si $PI = 15 \text{ min} \Rightarrow I_S (veh/h) = N^{\circ} Vehiculos * 4$, porque 1 hora tiene 4 intervalos de 15 minutos.

- **Ocupación (O_S):** Media aritmética de los tiempos de ocupación de los detectores D_i asociados a la sección de medida S en el periodo de integración. Se expresa en porcentaje % respecto del periodo de integración de 1 minuto:

$$O_S (\%) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} TiempoOcupación_{D_i} (sg)}{n} * \frac{100}{PI = 60 (sg)}$$

- **Ocupación Ponderada (Op_S):** Media aritmética de las ocupaciones de los detectores D_i asociados a la

sección de medida S ponderada por las intensidades de los mismos en el periodo de integración PI de 1 minuto, medida en porcentaje %. Se utiliza **para el cálculo del Nivel de Servicio**, como **medida indirecta de la Densidad** de tráfico:

$$Op_S (\%) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} O_{D_i} * I_{D_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} I_{D_i}}$$

El valor de la variable Ocupación a nivel de sección de medida, tiene sentido en ingeniería de tráfico para la obtención de la variable Nivel de Servicio y para la algorítmica de detección automática de incidentes de forma automática.

- **Velocidad Media (V_S):** Media aritmética de las velocidades de los detectores D_i asociados a la sección de medida S ponderada por las intensidades de los mismos en el periodo de integración, medida en Km/h.

$$V_S (Km/h) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} V_{D_i} * I_{D_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} I_{D_i}}$$

- **Distancia Media (D_S):** Media aritmética de las distancias de los detectores D_i asociados a la sección de medida S ponderada por las intensidades de los mismos en el periodo de integración, medida en metros m .

$$D_S (m) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} D_{D_i} * I_{D_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} I_{D_i}}$$

- **Longitud Media (L_S):** Media aritmética de las longitudes de los detectores D_i asociados a la sección de medida S ponderada por las intensidades de los mismos en el periodo de integración, medida en decímetros dm .

$$L_S (dm) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_{D_i} * I_{D_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} I_{D_i}}$$

- **Composición Longitud (CLSC):** Número total de vehículos clasificados por longitud de los detectores D_i asociados a la sección de medida S, de acuerdo a las categorías establecidas según los umbrales configurados, en el periodo de integración. Se expresa en % de la categoría que corresponda, por ejemplo %L que corresponde al porcentaje de ligeros.

$$CL_{SC} = \sum_{i=1}^{i=n} CL_{DC_i}$$

siendo C la categoría de la composición.

- **Composición Velocidad (CVSC):** Número total de vehículos clasificados por velocidad de los detectores D_i asociados a la sección de medida S, de acuerdo a las categorías establecidas según los umbrales configurados, en el periodo de integración. Se expresa en % de la categoría que corresponda, por ejemplo %L que corresponde al porcentaje de ligeros.

$$CV_{SC} = \sum_{i=1}^{i=n} CV_{DC_i}$$

siendo C la categoría de la composición.

- **Congestión (Cs):** Variable booleana que indica la existencia de alguna activación de alarma de congestión HIOCC (High Occupancy) en alguno de los detectores Di asociados a la sección de medida S, durante el periodo de integración. Se expresa en $Sí=1$ ó $NO=0$.
- **Alarma Kamikaze (Ks):** Variable booleana que indica la existencia de alguna activación de alarma Kamikaze en alguno de los detectores Di asociados a la sección de medida S, durante el periodo de integración. Se expresa en $Sí=1$ ó $NO=0$.
- **Sentido Inverso (SIS):** Variable booleana que indica la existencia de alguna activación de alarma en Sentido Inverso en alguno de los detectores Di asociados a la sección de medida S, durante el periodo de integración. Se expresa en $Sí=1$ ó $NO=0$.

Es decir, la sección de medida S detectará alarma de Congestión, Kamikaze y/ó Sentido Inverso cuando alguno de los detectores Di que la forman detecte alarma de Congestión, Kamikaze y/ó Sentido Inverso en el periodo de integración.

A partir de los valores agregados de las variables de tráfico, se obtiene una nueva variable para la entidad Sección de Medida:

- **NIVEL DE SERVICIO**, que resulta de la combinación de las variables de tráfico: Velocidad y Ocupación.

4.3. Reducción de Datos

4.3.1. Reducción de datos

La reducción de datos es el proceso de análisis de los datos obtenidos, de las entidades lógicas, para garantizar su calidad. Este modelado aborda todo el proceso de reducción de datos realizado, a partir de los datos originales obtenidos para el estudio. Los datos resultantes de esta depuración serán los que se usarán para la obtención de los datos finales que serán analizados. Ello no sólo implica una revisión de los datos existentes en busca de anomalías, sino también un estudio pormenorizado de las variables existentes con el objetivo de determinar cuáles serán las finalmente utilizadas en el análisis.

4.3.1.1. Formato y procedencia de los datos

Los datos analizados, tal y como se ha comentado corresponden a tramos de la A-3 y son producidos por las Estaciones de Toma de Datos, procedentes de las espiras asociadas a cada una de ellas. El proceso de depuración se ha realizado de forma independiente, para cada una de las ETD existentes en los tramos seleccionados. Para cada dato de tráfico proporcionado cada minuto, se dispone de un conjunto de 21 registros, que se muestran en la Tabla 2.

4.3.1.2. Variables consideradas

Del conjunto total de variables disponibles de tráfico, presentadas en la Tabla 2, se utilizan para el presente estudio un grupo reducido de ellos. La selección ha

Código	Código identificativo de la espira en carretera
Fecha/Hora	Fecha y hora de los datos
Intensidad	Intensidad de vehículos contabilizada
Ocupación	Porcentaje de ocupación de los vehículos en la espira
Congestión	Determina si hay una congestión o no
Kamikaze	Identifica los vehículos que circulan en sentido contrario
Dirección	Dirección de los vehículos
Velocidad	Velocidad media de los vehículos en el minuto transcurrido
Longitud Media	Longitud media de los vehículos
Distancia Media	Distancia media de separación de los vehículos
VehLong1	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Longitud1
VehVel1	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Velocidad1
VehLong2	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Longitud2
VehVel2	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Velocidad2
VehLong3	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Longitud3
VehVel3	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Velocidad3
VehLong4	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Longitud4
VehVel4	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Velocidad4
VehLong5	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Longitud5
VehVel5	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Velocidad5
Error	Identifica si ha habido un error en los datos

Tabla 2.- *Conjunto de variables de tráfico.*

sido realizada debido a que son los que aportan mayor información al estudio o son indispensables para el proceso de cálculo de los niveles de servicio. Aunque para la reducción de datos han sido aprovechados todas y cada una de las variables, para el procesamiento y cálculo de los niveles de servicio se

ha realizado una selección de los mismos. La selección de variables empleadas es las siguientes:

- Intensidad
- Ocupación
- Velocidad media

- Porcentaje de vehículos ligeros
- Porcentaje de vehículos pesados

La intensidad ha sido seleccionada por tratarse de una entrada para las ecuaciones tradicionales del cálculo del nivel de servicio, ya que aporta información sobre el flujo de vehículos en una sección dada. La ocupación ha sido escogida debido a que en una de las propuestas para el cálculo del nivel de servicio hace uso de la ocupación como variable para la estimación de la densidad.

La velocidad media se emplea también en el proceso del cálculo del nivel de servicio, al aportar información crucial sobre la fluidez y facilidad de circulación de los vehículos. Las últimas variables tratadas son el conteo de vehículos ligeros y pesados para la determinación del porcentaje de pesados, empleado en el cálculo del nivel de servicio. Sin este valor no se podría determinar la categorización de los vehículos, obteniendo valores para el nivel de servicio incorrectos al no disponer de dicho parámetro.

4.3.2. Cálculo de la reducción de los datos de tráfico

4.3.2.1. Depuración

Una vez determinadas las principales variables de interés para el análisis de este estudio se ha procedido a depurar los datos obtenidos. Posteriormente, para cada una de las variables del estudio se realizará un proceso de depuración orientado a los siguientes aspectos:

- Identificación y tratamiento de valores fuera del rango.
- Identificación y tratamiento de inconsistencias.
- Identificación y tratamiento de datos que falten.
- Identificación de sesgos sistemáticos.

Finalizado el proceso de depuración, se realizarán transformaciones y agrupaciones de variables de forma que posibiliten la utilización de determinadas técnicas estadísticas y faciliten la interpretación de los resultados.

En ocasiones el fallo de los sensores no aparece por la inexistencia de un dato, sino por la anomalía del mismo. La detección de estos datos erróneos no es fiable al 100%, ya que se basa en un análisis del orden de magnitud de los mismos. Los fallos en los datos de tráfico se han tratado de una manera diferente. Una vez analizados los datos en bruto se han detectado diversos errores en los mismos. Para la depuración de estos datos erróneos que entorpecerían en gran manera los estudios y conclusiones que de ellos se extrajeran, se ha recurrido a realizar una depuración basada en un conjunto de filtros. Para la detección de los errores en los datos de tráfico se propone realizar una depuración basada en un conjunto de 10 filtros:

- Filtro 1: se le asigna a carriles con espira cortada. Cuando ocurre esta situación, no hay intensidad y la ocupación es del 100% durante un tiempo $t=60s$, los datos del registro de cada minuto que cumplen con el filtro son descartados.

$(Intensidad=0)AND(Ocupación=100)AND(HIOCC=YES)$

- Filtro 2: cuando la intensidad medida por el detector supera la intensidad máxima del carril. La intensidad máxima de un carril, según el HCM2000 (I_{max} de un carril) no puede superar los 3200 veh/h. Por lo que si algún detector supera este valor se descartan los datos de dicho registro. En el lenguaje de la gestión del tráfico se denomina que la espira se ha quedado “enganchada” y cuenta constantemente vehículos.

$$I > I_{MAX}$$

- Filtro 3: cuando no hay intensidad ni ocupación durante un tiempo $t=86400s$, los datos del registro de cada minuto que cumplen con el filtro son descartados.

$$(Intensidad=0)AND(Ocupación=0)$$

- Filtro 4: cuando no hay intensidad y la ocupación es un valor positivo durante un tiempo $t=60s$. No se puede cumplir que haya ocupación y que no haya intensidad de vehículos, esto sería un error del detector, por lo que se descartan los datos que cumplen el filtro.

$$(Intensidad=0)AND(Ocupación>0)$$

- Filtro 5: cuando no hay intensidad y la velocidad media es positiva durante un tiempo $t=60s$. Este filtro es similar al anterior, no se puede cumplir que no haya intensidad y que la velocidad media sea superior a 0. Por lo que aquellos registros que cumplen el filtro son descartados.

$$(Intensidad=0)AND(Velocidad \neq 0)$$

- Filtro 6: Cuando la velocidad media es 0 y la intensidad es diferente de 0 durante un tiempo $t=60s$. No es lógico que si la velocidad media sea 0 haya intensidad de vehículos, por lo tanto cuando se cumple dicho filtro son descartados los registros.

$$(Velocidad=0)AND(Intensidad \neq 0)$$

- Filtro 7: Debido a la experiencia de la DGT, se realiza una comparación entre la ocupación del minuto anterior y el actual. Si la diferencia en valor absoluto de la ocupación entre un minuto y el anterior es superior al 25% se descartan los datos del detector en el periodo de integración actual, puesto que los datos no son fiables para la obtención del nivel de servicio.

De forma empírica se determina el valor del 25%, porque de un periodo de integración $i-1$ a un periodo de integración i , en situación de estado de tráfico normal, no se registran variaciones superiores al 5%. Por tanto para determinar que es una variación anormal, el valor del 25% se considera un salto brusco de un valor de ocupación de un periodo a otro de integración.

Cuando se pasa a un estado de tráfico lento o retención incluso congestión por alguna incidencia, tanto recurrente como no recurrente (accidente), se genera una situación de atasco en formación. Análogamente para la situación cuando se va deshaciendo el atasco. Por tanto es algo progresivo y no una variación repentina.

El valor en porcentaje que representa la ocupación, es el tiempo en el que un vehículo ha estado ocupando

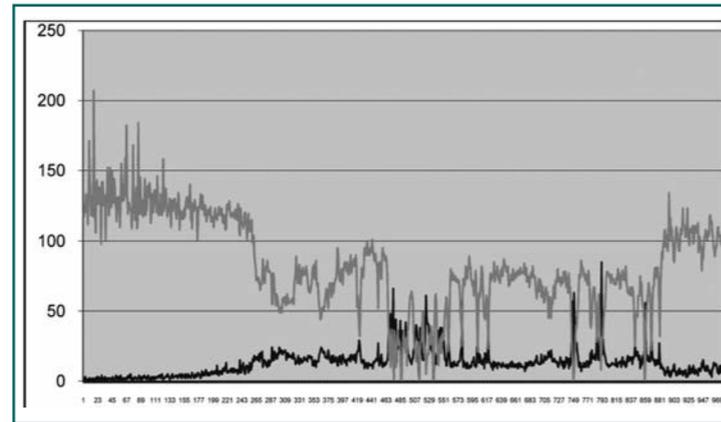
la espira durante el periodo de integración que son 60 segundos. Si durante los 60s, un vehículo ha estado detenido sobre la espira, la ocupación sería del 100%. En tráfico interurbano es muy difícil que se registren valores del 100%, porque incluso cuando hay situaciones de retención, los vehículos van avanzando, ya que no hay ningún obstáculo que impida que avancen. Mientras que en tráfico urbano, pueden registrarse estos valores de ocupación, porque cuando el semáforo está en rojo, el tiempo de la fase roja puede superar los 60 segundos, para ciclos a partir de 90 segundos por ejemplo, que es un valor muy habitual para la regulación semafórica.

$$|Ocupación_{(i)} - Ocupación_{(i-1)}| > 25\%$$

- Filtro 8: Se realiza una comparación entre la velocidad del minuto anterior y el actual. Si la diferencia en absoluto de la velocidad entre un minuto y el anterior es superior a 55km/h, se descartan los datos del detector en el periodo de integración actual, puesto que los datos no son fiables para la obtención del nivel de servicio.

$$|Velocidad_{(i)} - Velocidad_{(i-1)}| > 55km/h$$

La justificación del valor de velocidad es análoga al caso anterior, y por ello a continuación se presenta una gráfica temporal velocidad-ocupación con la tabla de valores como muestra de los datos registrados en la sección de medida ubicada en el PK 296,475 sentido creciente.



Gráfica 1.- Gráfica temporal que relaciona la velocidad y ocupación de la sección de medida PK 296,475 sentido creciente durante 24 horas.

En la gráfica puede observarse los valores de velocidad representados en color rojo y la ocupación en azul. Son valores de la sección de medida a lo largo de un periodo de tiempo, un día. En el primer tramo desde la izquierda, cuando la velocidad comienza a bajar, lo hace de forma escalonada y sin saltos bruscos. De la misma forma que los valores de ocupación comienzan a subir.

También puede observarse en la gráfica un "pico" de ocupación en la parte derecha de la curva, que corresponde a una variación brusca de ocupación de un periodo de integración al consecutivo, de forma que este valor, se desecharía.

- Filtro 9: se comprueba la congruencia entre los parámetros de número de vehículos y distancia de separación entre ellos. Si hay intensidad superior a 2

vehículos, la ocupación es positiva pero inferior al 100%, la distancia entre los vehículos debe ser superior a 0. Cuando algún registro incumple el filtro es descartado, puesto que es un error de detección de la espira.

$$(Intensidad > 2) \text{ AND } (Ocupación < 100\%) \text{ AND } (GAP > 0)$$

- Filtro 10: se comprueba que todas las variables de tráfico: velocidad, ocupación, intensidad, ligeros, pesados y distancia entre vehículos son iguales en el periodo de integración actual y el anterior. Si son iguales se descartan por mantenerse la información en el detector. En muchas ocasiones el detector se queda colgado y envía al centro de control la misma información hasta que es reparado o vuelve al correcto funcionamiento.

- Filtro 11: se comprueba que la suma de ligeros y pesados, no difiere del total del conteo en un X%. De forma que todos los vehículos que cuenta los clasifica, admitiendo un error de hasta un 20%, en este caso, de vehículos que no clasifique.

$$\left| N^{\circ} \text{vehículos}_{\text{total}} - \sum_{i=1}^n N^{\circ} \text{vehículos}_{\text{clasificados}} \right| > X\%$$

Siendo:

- $N^{\circ} \text{vehículos}_{\text{total}}$: el número de vehículos totales que se han contado, en conteo, medido en número de vehículos y no en intensidad (vehículos/hora).
- $\sum_{i=1}^n N^{\circ} \text{vehículos}_{\text{clasificados}}$: el número de vehículos que han sido clasificados por los "n" tipos de clasificación; en este caso la clasificación se

establece para 2 categorías, ligeros y pesados; medido en número de vehículos.

- X%, porcentaje que define la desviación de la "no coincidencia" del total de vehículos respecto a la suma de los "n" tipos clasificados:

$Contaje \neq \sum_{i=1}^n N^{\circ} \text{vehículos}_{\text{clasificados}}$, con el fin de englobar en dos grupos los datos: unos que la "no coincidencia" no sea >20%, y por tanto estos datos se pueden tratar para algoritmos de ingeniería de tráfico tales como niveles de servicio, estados de tráfico y/o tiempos de recorrido. Y otro grupo en el que esta desviación es muy amplia y por tanto este dato no se utilizará para algoritmos de ingeniería de tráfico.

El porcentaje de desviación utilizado, 20%, ha sido el propuesto por el subcomité 15 "Calidad de datos" del comité técnico de normalización 199 "equipamiento para la gestión del tráfico" en la propuesta de norma PNE199152-1-1 (2010) "Calidad de datos. Análisis de datos de tráfico".

$$Error_Conteo(\%) = \frac{N^{\circ} \text{veh}_{\text{aut}} - N^{\circ} \text{veh}_{\text{VIDEOVERIF}}}{N^{\circ} \text{veh}_{\text{VIDEOVERIF}}} * 100$$

donde:

- $Error_Conteo$ es el error de conteo expresado en porcentaje (%).
- $N^{\circ} \text{veh}_{\text{aut}}$ es el número de vehículos medidos de forma automática, por la ETD.
- $N^{\circ} \text{veh}_{\text{VIDEOVERIF}}$ es el número de vehículos reales que han pasado por la sección de medida,

obtenidos a partir de una videoverificación (contaje manual).

$$Error_Ligeros \rightarrow Pesados(\%) = \frac{N^{\circ} veh_lig \rightarrow pes}{N^{\circ} veh_lig} * 100$$

$$Error_Pesados \rightarrow Ligeros(\%) = \frac{N^{\circ} veh_pes \rightarrow lig}{N^{\circ} veh_pes} * 100$$

$$|Error_Clasificación(\%)| = \frac{N^{\circ} veh_lig \rightarrow pes + N^{\circ} veh_pes \rightarrow lig}{N^{\circ} veh_lig + pes} * 100$$

donde:

- $Error_Ligeros \rightarrow Pesados$ es el error de vehículos que siendo ligeros se han clasificado como pesados, expresado en porcentaje (%).
- $Error_Ligeros \rightarrow Pesados$ es el error de vehículos que siendo pesados se han clasificado como ligeros, expresado en porcentaje (%).
- $N^{\circ} veh_lig \rightarrow pes$ es el número de vehículos que siendo ligeros se han clasificado como pesados.
- $N^{\circ} veh_pes \rightarrow lig$ es el número de vehículos que siendo pesados se han clasificado como ligeros.
- $N^{\circ} veh_lig$ es el número de vehículos reales ligeros.
- $N^{\circ} veh_pes$ es el número de vehículos reales pesados.
- $N^{\circ} veh_lig + pes$ es el número de vehículos reales totales tenidos en cuenta para la clasificación.

Para los algoritmos de nivel de servicio, el error del 20% propuesto en la norma PNE199152-1-1 (2010), comentada al inicio del filtro, es admisible porque no desvirtúa los valores de niveles de servicio obtenidos tanto por el algoritmo de nivel de servicio basado en HCM está-

tico como dinámico. Y para el algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación, no interviene. El 20% representa un intervalo del +/-10% de vehículos por ello en valor absoluto es del 20%.

Una vez definidos todos los filtros se ha procedido a la aplicación de los mismos sobre los datos recopilados para la presente tesis. La aplicación de filtros se ha realizado de forma secuencial. El cómputo total de datos asciende a 42.350.422 registros. De todos ellos se han reducido más de la mitad de ellos, concretamente 23.727.235 registros, en base a la aplicación de los filtros, a datos nulos o registros sin información. Y han sido empleados en los cálculos 18.623.187 registros. En la siguiente tabla se puede apreciar cuantos registros ha despreciado o reducido cada uno de los filtros. En la tesis doctoral, en formato CD, se encuentran almacenados los datos originales, la aplicación de reducción de datos y los comandos para la extracción de los datos de la Base de Datos donde han sido almacenados para su extracción y posterior tratamiento. De esta manera se puede apreciar que todos ellos han eliminado en mayor o menor medida registros, implicando con ello que todos los filtros son útiles y necesarios para la reducción de datos.

Los filtros 1, 3, 6 y 11 han sido los que mayores registros han reducido. El filtro 1 y 6 están sobre el mismo orden de reducción de datos y el filtro 3 y 11 realizan un filtrado mucho mayor de registros, siendo el filtro 3 el que indica que no hay datos útiles puesto que no hay ni intensidad ni ocupación de la vía y el filtrado 11

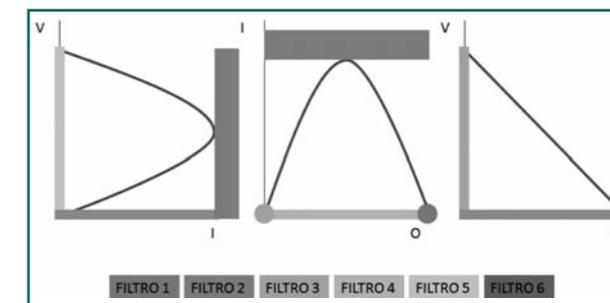
Filtro 1	1.504.651
Filtro 2	50
Filtro 3	9.130.687
Filtro 4	194.159
Filtro 5	1.335
Filtro 6	2.291.947
Filtro 7	232.737
Filtro 8	83.980
Filtro 9	9.473
Filtro 10	29.637
Filtro 11	8.559.308

Tabla 3.- Reducción de datos por cada una de las reglas.

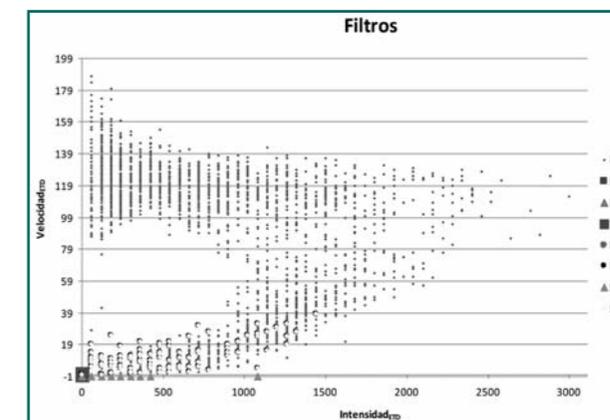
es el correspondiente a la comprobación del porcentaje de ligeros y pesados.

Si representáramos los resultados de aplicar cada uno de los filtros en las curvas características de las relaciones fundamentales de la ingeniería del tráfico, (velocidad-Intensidad, Intensidad-ocupación, Velocidad-Ocupación) tendríamos las representaciones que se muestran en la Gráfica 2. En ella se aprecian las diferentes zonas o puntos en los que trabajan cada uno de los filtros.

En las gráficas siguientes (Gráfica 3, Gráfica 4 y Gráfica 5) se han representado los filtros, sobre las curvas características (similar a la Gráfica 2), pero con datos reales. En las tres gráficas se han representado los mismos registros, pudiéndose observar la variabilidad de los puntos filtrados de una a otra curva carac-

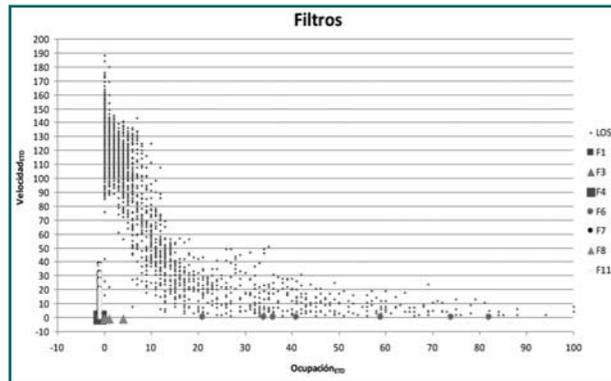


Gráfica 2.- Significado de los filtros sobre las tres curvas característica de las relaciones fundamentales de ingeniería de tráfico.

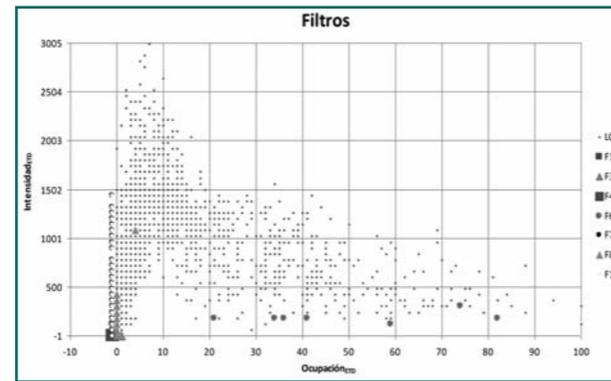


Gráfica 3.- Representación de los filtros calculados sobre una curva característica de velocidad-intensidad.

terística. Se puede apreciar, a su vez, que hay registros cuyos valores son negativos. Ello es debido a que cuando la espira no obtiene un dato válido o correcto lo registra con valores negativos, para indicar su invalidez, quedando el valor marcado como no útil.



Gráfica 4.- Representación de los filtros calculados sobre una curva característica de velocidad-ocupación.



Gráfica 5.- Representación de los filtros calculados sobre una curva característica de intensidad-ocupación.

4.4. Propuesta de determinación de niveles de servicio

En este apartado se definen los modelos propuestos para el cálculo de los niveles de servicio, basados en los datos de tráfico obtenidos por las ETDs (Estación de Toma de Datos):

- Algoritmo de nivel de servicio basado en HCM 2000, denominado HCM dinámico 1, que utiliza la metodología de cálculo del nivel de servicio definida en el HCM 2000 tomando como velocidad libre básica la velocidad máxima legal de cada tramo. Este modelo permite crear un patrón de referencia, utilizado solo a efectos de comparación, siendo la velocidad de flujo libre la calculada en gabinete.
- Algoritmo de nivel de servicio basado en HCM 2000, denominado dinámico 2. Es una adapta-

ción del algoritmo de nivel de servicio basado en HCM 2000, pero tomando como velocidad libre, la velocidad media geométrica para aquellos intervalos en los que los valores de intensidad de la sección de medida son estables e inferiores a 400 veh/h. Este valor, tal y como se ha comentado en las hipótesis de partida de la tesis, viene determinado por la experiencia práctica, en la DGT, que indica que cuando hay en la carretera una intensidad de 400 veh/h. es cuando éstos circulan a la velocidad libre.

- Algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz Velocidad-Ocupación.

Seguidamente se establece la comparativa de los resultados de los niveles de servicio obtenidos por cada modelo.

Para realizar la comparativa de resultados de cada uno de los modelos se ha tomado una muestra del experimento de 16 registros. Los datos obtenidos por la ETD de esta muestra se representan en la tabla 4.

4.4.1. Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico 1

Este método de cálculo del nivel de servicio es el definido en el Manual de Capacidad. Considera los valores de intensidad y porcentaje de vehículos pesados de la ETD y no se considera el valor de velocidad obtenida de la ETD. Este criterio es el que más se adapta a la metodología del HCM 2000. Por tanto para este

algoritmo el valor de Velocidad Libre Básica es un dato estático y siempre será el límite de velocidad de la vía, en este caso del experimento es $VLB = 120 \text{ Km/h}$.

Para la misma muestra del experimento, los valores obtenidos con el algoritmo dinámico 1 del HCM se muestran en la tabla 5.

A continuación se presentan dos gráficas, Gráfica 6 y Gráfica 7, que representan la relación velocidad, intensidad equivalente ($V-leq$), es decir, la representación de los pares de valores de los campos 7 y 2 de la tabla anterior, Tabla 5, calculados de acuerdo al algoritmo HCM dinámico 1, y que corresponden a las gráficas características del algoritmo HCM dinámico 1 de las

muestra Id	SECCIÓN DE MEDIDA	fecha	Nº carriles	Intensidad (veh/h)	Ocupación (%)	Velocidad (Km/h)	%Vehículos Ligeros	% Vehículos Pesados
1	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	2	2880	7	77	95,45	4,55
2	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	2	4380	7	120	75,76	24,24
3	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	2	1740	26	12	93,10	6,90
4	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	2520	7	63	97,62	2,38
5	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	2	3420	10	69	89,47	10,53
6	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	2	2880	7	77	95,00	5,00
7	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	2	4380	7	120	76,00	24,00
8	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	2	1740	26	12	93,00	7,00
9	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	2520	7	63	98,00	2,00
10	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	2	3420	10	69	89,00	11,00
11	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:36	2	3060	8	122	90,00	10,00
12	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:21	2	3240	9	123	92,00	8,00
13	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 10:23	2	2520	5	132	96,00	4,00
14	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 14:03	2	2460	5	92	89,00	11,00
15	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 17:22	2	2580	8	62	85,00	15,00
16	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 19:00	2	2160	3	106	88,00	12,00

Tabla 4.- Muestra del experimento de 16 registros de 4 secciones de medida. Datos de tráfico en periodo de 1 minuto.

muestra Id	1- VL	2-leq	3- fvp	4- C	5- Vc	6- IL	7- V	8- D	NS
1	111,70	1583,58	0,98	2358,50	84,23	1424,50	111,42	14,21	C
2	111,70	2640,27	0,89	2358,50	84,23	1424,50	57,18	46,17	F
3	111,70	967,74	0,97	2358,50	84,23	1424,50	111,70	8,66	B
4	111,70	1370,97	0,99	2358,50	84,23	1424,50	111,70	12,27	C
5	111,70	1935,48	0,95	2358,50	84,23	1424,50	105,97	18,26	D
6	111,70	1587,10	0,98	2358,50	84,23	1424,50	111,41	14,25	C
7	111,70	2637,42	0,89	2358,50	84,23	1424,50	57,51	45,86	F
8	111,70	968,23	0,97	2358,50	84,23	1424,50	111,70	8,67	B
9	111,70	1368,39	0,99	2358,50	84,23	1424,50	111,70	12,25	C
10	111,70	1939,84	0,95	2358,50	84,23	1424,50	105,85	18,33	D
11	111,70	1727,42	0,95	2358,50	84,23	1424,50	110,23	15,67	C
12	111,70	1811,61	0,96	2358,50	84,23	1424,50	108,92	16,63	D
13	111,70	1381,94	0,98	2358,50	84,23	1424,50	111,70	12,37	C
14	111,70	1395,32	0,95	2358,50	84,23	1424,50	111,70	12,49	C
15	111,70	1491,13	0,93	2358,50	84,23	1424,50	111,67	13,35	C
16	111,70	1230,97	0,94	2358,50	84,23	1424,50	111,70	11,02	C

Tabla 5.- Muestra del experimento de 16 registros de 4 secciones de medida. Obtención del nivel de servicio-algoritmo HCM dinámico 1.

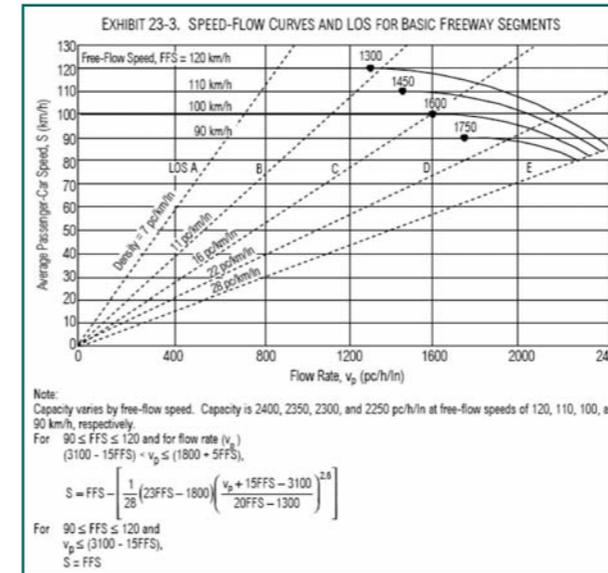
secciones de medida, donde se observa que todos los valores se mueven a lo largo de la curva con poca dispersión de nube de puntos, ya que en este caso, hasta alcanzar el nivel de servicio D, la velocidad media de los vehículos que pasan (campo 7 de la tabla) es constante V= 111,42 Km/h para una VLB tomada como constante=120 Km/h:

En la Gráfica 7 se representan los valores en intervalos de 1 minuto obtenidos del nivel de servicio basado en el algoritmo HCM dinámico 1. Se han representado todos los registros de 1 minuto correspondientes al

día 17/04/2006 de la sección de medida ubicada en el PK 285,15 en sentido creciente. Puede observarse la partición de las rectas correspondientes a las pendientes que van tomando los valores de la densidad D para identificar los 6 niveles de servicio alcanzados.

4.4.2. Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico 2

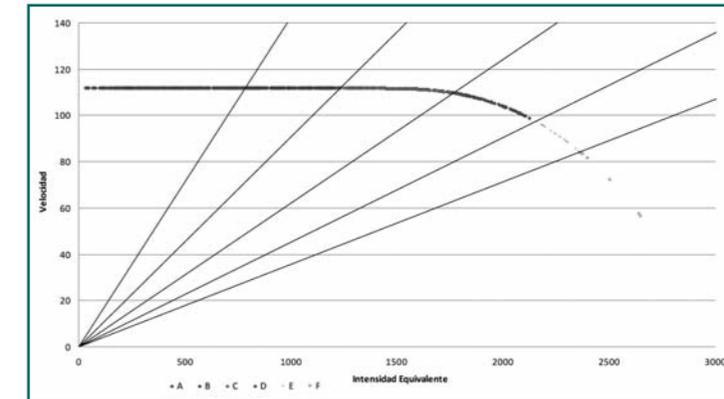
Este método está basado en una adaptación de la metodología de obtención del nivel de servicio del



Gráfica 6.- Curva característica del algoritmo del manual de capacidad. HCM 2000.

HCM 2000. Sin embargo esta propuesta considera la definición de la velocidad libre obtenida a partir de la velocidad media geométrica para aquellos intervalos en los que los valores de intensidad de sección de medida son inferiores a 400 veh/h.

La velocidad media geométrica se define como la máxima velocidad media que puede conseguirse en condiciones de seguridad en un tramo de carretera cuando las circunstancias meteorológicas y de tráfico son tan favorables que las únicas limitaciones vienen determinadas por las características del tramo. Esta



Gráfica 7.- Curva característica del algoritmo HCM 2000 dinámico 1 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente el día 17/04/2006, 24h.

velocidad es estable, no varía en cada periodo de integración, pero sí es específica de cada sección de medida. La tabla 6 muestra las velocidades geométricas de las secciones de medida del experimento.

La aplicación dinámica de este método se basa en considerar la velocidad libre como la velocidad media geométrica obtenida en cada sección de medida. Asimismo considera como valor de la intensidad, el valor obtenido por la ETD en el mismo periodo de integración.

A continuación se detalla el proceso de cálculo del nivel de servicio mediante el algoritmo HCM dinámico 2, tomando los datos de velocidad, intensidad y % vehículos pesados de la ETD en cada periodo de

SECCIÓN DE MEDIDA		Velocidad Media Geométrica	Nº registros
PK	SENTIDO		
186+450	DECREC	107,28	579.739
212+100	CREC	108,28	633.614
212+780	DECREC	114,74	333.301
242+000	CREC	110,23	649.842
248+010	DECREC	108,93	464.024
248+010	CREC	112,37	708.150
255+290	DECREC	112,68	451.573
255+290	CREC	106,86	505.285
270+000	DECREC	105,18	623.171
270+000	CREC	114,44	620.802
285+150	CREC	105,63	451.715
285+150	DECREC	109,61	477.476
291+450	CREC	110,63	310.596
296+475	CREC	107,57	373.090
296+475	DECREC	110,11	411.905

Tabla 6.- Velocidades geométricas de las secciones de medida.

integración de 1 minuto, para una muestra tomada del experimento. La metodología de cálculo se detalla en los siguientes pasos:

Paso 1: Se obtiene la velocidad libre en función de la velocidad geométrica de cada sección de medida, que es estable para todos los periodos de integración.

$$VL = V_{GEOM}$$

Paso 2: Obtención del factor de vehículos pesados, necesario para obtener la intensidad equivalente del paso 3:

$$f_{VP} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)}, \text{ tomando}$$

$$P_T = \%Pesados_{ETD}$$

$$E_T(\text{camiones_buses}) = 1,5$$

$$E_R(\text{recreo}) = 1,5$$

Paso 3: Se obtiene la intensidad equivalente en función del factor de hora punta y el factor de vehículos pesados:

FHP: factor de hora punta. El intervalo del factor de hora punta en autopistas y autovías está entre 0,80 y 0,95.

$$FHP = \frac{I_{60}}{4 * I_{max15}} < 1$$

Siendo:

I_{60} : Intensidad en la hora más cargada.

I_{max15} : Intensidad del cuarto de hora más alto de la hora.

$$I_{eq} = \frac{I}{FHP \cdot N \cdot f_{VP}}, \text{ tomando } I = I_{ETD}$$

$$FHP(0,85 - 0,95) = 0,93$$

Paso 4: Obtención de la capacidad

$$C = 1800 + 5VL \quad D_c = 28$$

Paso 5: Velocidad en capacidad

$$V_c = \frac{C}{D_c}$$

Paso 6: Intensidad límite

$$IL = 3100 - 15VL$$

Paso 7: Velocidad equivalente, en función de la velocidad libre. Según la condición que relaciona la intensidad equivalente con la intensidad límite.

$$V \begin{cases} I_{eq} < IL \Rightarrow V = VL = V1 \\ I_{eq} > IL \Rightarrow V = VL - (VL - V_c) \left(\frac{I_{eq} - IL}{C - IL} \right)^{2,6} = V2 \end{cases}$$

Paso 8: Obtención de la densidad

$$D = \frac{I_{eq}}{V}$$

A partir de los valores obtenidos en el paso 8 donde se obtiene la densidad, se toma el valor de nivel de servicio según corresponde a la tabla para la obtención de los niveles de servicio definida en el HCM 2000.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos en cada paso de cálculo del algoritmo para cada muestra del experimento, así como el nivel de servicio obtenido:

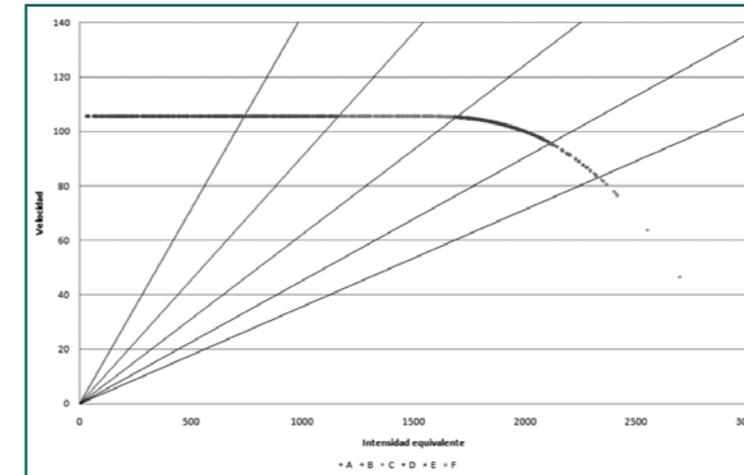
En la Tabla 7 se representa en la última columna los valores del nivel de servicio calculado basado en el algoritmo HCM dinámico 2 para cada registro de la muestra seleccionada. Cada columna desde la primera hasta la última, identifica cada valor obtenido en cada paso de cálculo del algoritmo. En la columna 1-VI se obtiene la velocidad libre, en la 2-Ieq la intensidad equivalente; en la 3-fvp el factor de vehículos pesados que interviene en el cálculo de la intensidad equivalente 2-Ieq; 4-C capacidad; en la 5-Vc velocidad en capacidad; en la 6-IL intensidad límite; en la 7-V es la velocidad equivalente en función de la velocidad libre según la relación entre intensidad equivalente e intensidad límite y en la 8-D densidad.

nuestra Id	1- VL	2-leq	3- fvp	4- C	5- Vc	6- IL	7- V	8- D	NS
1	105,63	1583,58	0,98	2328,15	83,15	1515,55	105,59	15,00	C
2	105,63	2640,27	0,89	2328,15	83,15	1515,55	53,29	49,55	F
3	109,61	967,74	0,97	2348,05	83,86	1455,85	109,61	8,83	B
4	109,61	1370,97	0,99	2348,05	83,86	1455,85	109,61	12,51	C
5	109,61	1935,48	0,95	2348,05	83,86	1455,85	104,48	18,52	D
6	105,63	1587,10	0,98	2328,15	83,15	1515,55	105,59	15,03	C
7	105,63	2637,42	0,89	2328,15	83,15	1515,55	53,63	49,18	F
8	109,61	968,23	0,97	2348,05	83,86	1455,85	109,61	8,83	B
9	109,61	1368,39	0,99	2348,05	83,86	1455,85	109,61	12,48	C
10	109,61	1939,84	0,95	2348,05	83,86	1455,85	104,36	18,59	D
11	110,11	1727,42	0,95	2350,55	83,95	1448,35	108,87	15,87	C
12	110,11	1811,61	0,96	2350,55	83,95	1448,35	107,65	16,83	D
13	110,11	1381,94	0,98	2350,55	83,95	1448,35	110,11	12,55	C
14	114,44	1395,32	0,95	2372,20	84,72	1383,40	114,44	12,19	C
15	114,44	1491,13	0,93	2372,20	84,72	1383,40	114,35	13,04	C
16	114,44	1230,97	0,94	2372,20	84,72	1383,40	114,44	10,76	B

Tabla 7.- Muestra del experimento de 16 registros de 4 secciones de medida. Obtención del nivel de servicio-algoritmo HCM dinámico 2.

A continuación se presenta la gráfica velocidad, intensidad equivalente (V-leq), es decir la representación de los pares de valores de los campos 7 y 2 de la tabla anterior calculados de acuerdo al algoritmo HCM dinámico 2, para la sección de medida ejemplo. En ella se puede observar que hay una dispersión de los valores y no se mueven a lo largo de un valor constante de velocidad hasta alcanzar el nivel de servicio C, como sí sucedía en la curva característica del algoritmo según HCM 2000 (Gráfica 6), porque el valor tomado en el experimento es VLB=Velocidad Geométrica y por tanto no es constante y varía en cada periodo de integración.

En la Gráfica 8 se representan los valores en intervalos de 1 minuto obtenidos del nivel de servicio basado en el algoritmo HCM dinámico 2. Se han representado todos los registros de 1 minuto correspondientes al día 04/09/2007 de la sección de medida ubicada en el PK 285,15 en sentido creciente. Puede observarse la partición de las rectas correspondientes a las pendientes que van tomando los valores de la densidad D para identificar los 6 niveles de servicio alcanzados.



Gráfica 8.- Curva característica del algoritmo HCM 2000 dinámico 2 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 04/09/2007.

4.4.3. Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación

Este nuevo método aplica una propuesta sobre una de las tres curvas fundamentales de Ingeniería de Tráfico, la que relaciona la velocidad media y el porcentaje de tiempo de ocupación, medidas a través de los equipos de obtención de datos de tráfico ETDs. Se toma el porcentaje de ocupación como medida indirecta de la densidad.

La ocupación viene definida como porcentaje de tiempo en el que la espira está ocupada. Se toma la

ocupación como medida indirecta de la densidad, debido a que la densidad es una variable complicada de evaluar y de hecho no se puede calcular en situaciones reales. El HCM 2000 indica que la única forma de obtener el valor real de la variable densidad sería mediante fotografía aérea, técnica que no se ha utilizado en el estudio.

Como se observan en las tres curvas fundamentales de la ingeniería de tráfico, la relación entre la velocidad-ocupación, es una relación unívoca; donde a cada valor de ocupación (densidad) le corresponde un único valor de velocidad y viceversa.

Mientras que en los casos anteriores, para cada valor de intensidad se obtienen dos valores de velocidad u ocupación según corresponda. Dependiendo de las dos posibles situaciones en que pueda encontrarse: una en la parte estable de la curva, cuando no se ha alcanzado la intensidad máxima, y otra en la parte de régimen inestable, cuando ya se ha alcanzado la intensidad máxima y la curva presenta una dispersión considerable. Por este motivo, se considera la curva velocidad-ocupación como la relación óptima para la obtención del nivel de servicio.

4.4.3.1. Matriz de Nivel de Servicio

En la tesis completa se propone simplificar el cálculo del nivel de servicio mediante una agrupación en 4

nuevos niveles de servicio en vez de los 6 niveles de servicio que cita el HCM 2000, con el objeto de:

- Simplificar el cálculo del nivel de servicio
- Simplificar la interpretación del nivel de servicio
- Interpretar adecuadamente el nivel de servicio existente con la consiguiente actuación en base a dicho nivel de servicio por parte de un organismo competente en materia de Tráfico y Seguridad Vial.

La utilización de seis niveles de servicio, de la A a la F, según el Manual de Capacidad, ofrece unas posibilidades muy amplias en la interpretación de una determinada condición de tráfico, que de forma muy similar puede establecer un nivel de servicio u otro de forma que no sea la elección más adecuada. Mediante la agrupación en menos niveles, se separan más los diferentes niveles entre sí, de forma que sea mayor la diferencia entre los diferentes niveles de servicio y la decisión tomada sea prácticamente inequívoca.

En esta tesis se propone la siguiente definición de niveles de servicio, estableciendo unos umbrales límite a nivel ilustrativo inicial:

- Nivel de servicio 1, tráfico fluido, circulación libre y la velocidad de los vehículos es prácticamente igual a la que eligen libremente sus conductores, y aunque se puedan ver influenciados por otros vehículos por un aumento de densidad, las características geométricas y las condiciones de la circulación son tales que los vehículos pueden

conseguir velocidades medias superiores a 72 Km/h en autovías y una ocupación media inferior a 16%.

- Nivel de servicio 2, tráfico lento, la velocidad de los vehículos en su mayor parte deberá ajustarse teniendo en cuenta las de los vehículos que les preceden, aunque las condiciones son tales que la velocidad media de los vehículos se establece empíricamente en un intervalo entre 32 y 72 km/h y una ocupación entre 16 y 28%. Las posibilidades de adelantamiento son reducidas y se forman grupos de vehículos que van a la misma velocidad. La circulación sigue siendo estable.
- Nivel de servicio 3, retenciones, se producen paradas intermitentes. Las velocidades son reducidas y los vehículos alcanzan velocidades medias entre 8 y 32 Km/h y se presentan ocupaciones entre el 28 y 35%, llegando a alcanzar la capacidad de la vía en ciertos instantes y aproximándose a la inestabilidad. Este estado presenta frecuentes detenciones bruscas y se circula con paradas y arrancadas sucesivas. Se observan largas colas, con una distancia entre vehículos muy pequeña, donde es casi imposible realizar adelantamiento entre vehículos.
- Nivel de servicio 4, congestión, corresponde a situaciones de paradas largas o detención total. El intervalo de la velocidad media está entre 0 y 8 Km/h y para una ocupación superior al 35%. En esta situación se supera la capacidad de la vía.

Así pues, según la definición anterior de los niveles de servicios propuestos en esta tesis, y la definición

propia de los niveles de servicio establecida en el HCM 2000, ambas podrían relacionarse de la siguiente manera quedando esta asimilación supeditada a la verificación final:

- Nivel 1, se podría relacionar en la mayoría de los casos con los niveles A, B, C y D del HCM2000.
- Nivel 2, se podría relacionar con los niveles D y E del HCM2000.
- Nivel 3, se podría relacionar con los niveles D, E y F del HCM2000.
- Nivel 4, se podría relacionar con el nivel F del HCM2000.

Como puede observarse existen solapes en algunas situaciones.

Para validar empíricamente la agrupación de los niveles de servicio presentados anteriormente, se han tomado diferentes capturas de imágenes de las cámaras de video vigilancia de tráfico a diferentes horas de las condiciones de tráfico de forma que muestren que las medidas adoptadas para ambos niveles de servicio A y B o E y F son similares en cada uno de las dos agrupaciones, según Tráfico Fluido o Congestión respectivamente.

En la tabla 8 se muestra la comparación entre diferentes niveles de servicio A y B.

En la tabla 9 se muestra la comparación entre diferentes niveles de servicio E y F.

Además de estos cuatro niveles de servicio, se considera una nueva categoría 'nivel de servicio indeterminado' que corresponde a una relación incoherente



Nivel de Servicio A



Nivel de Servicio B

Tabla 8.- Comparativa niveles servicio A y B del Manual de Capacidad.



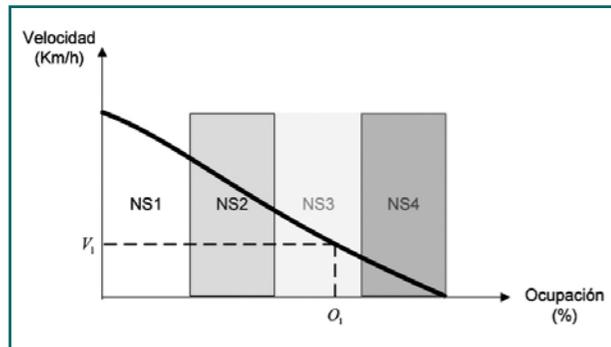
Nivel de Servicio E



Nivel de Servicio F

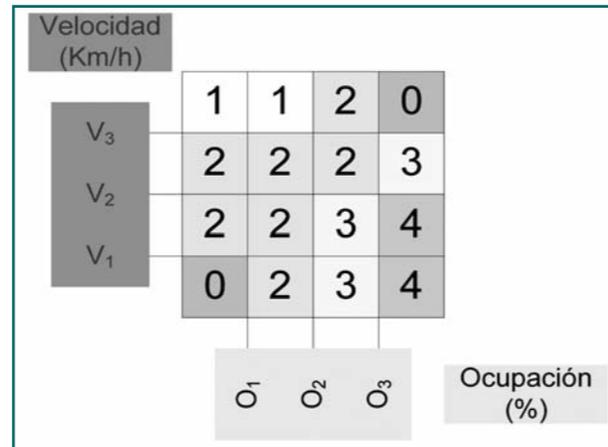
Tabla 9.- Comparativa niveles servicio E y F del Manual de Capacidad.

entre velocidad y ocupación asignándole el color gris. De esta forma, la curva característica de ingeniería de tráfico velocidad-ocupación, se divide en ejes generándose las zonas que identifican los 4 niveles de servicio:



Gráfica 9.- División en ejes sobre la curva fundamental de ingeniería de tráfico velocidad-ocupación.

Esta división en ejes da lugar a la matriz que asignando umbrales de velocidad y ocupación, permite obtener el nivel de servicio:



Gráfica 10.- Matriz del Nivel de Servicio Actual.

Se trata de un algoritmo, que únicamente requiere la configuración de 3 umbrales para la ocupación y 3 umbrales para la velocidad aplicado a la entidad tramo; y una matriz genérica para todo el sistema, siendo configurables los campos de la misma. El modo de funcionamiento es el siguiente:

Si por ejemplo una sección de medida tiene configurados los siguientes valores de umbrales (obtenidos a partir del ajuste de umbrales cuya metodología se detalla en el siguiente apartado):

- V₁ = 8, V₂ = 32 y V₃ = 72
- O₁ = 16, O₂ = 28 y O₃ = 35

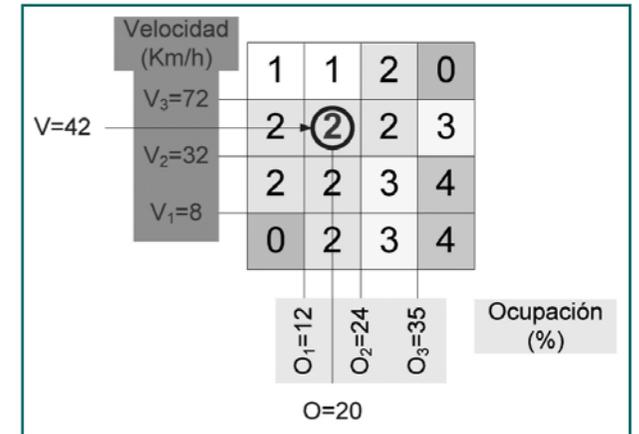
Y se obtiene en el periodo de integración de 1 minuto actual los siguientes valores de velocidad y ocupación:

- V = 42 Km/h y O = 20%

Entrando en la matriz configurada, se obtendría un nivel de servicio actual. Por lo tanto el tramo correspondería al valor 2 (color verde), y resultaría una situación de tráfico lento.

La matriz de nivel de servicio es configurable pero única para todo el sistema, es decir que una vez configurada es la que toma el algoritmo de nivel de servicio. De esta forma para cada par de valores del periodo de integración en tiempo real, es posible entrar en la matriz y de acuerdo a los umbrales configurados, asignar el valor de la casilla correspondiente de la matriz.

El nivel de servicio obtenido para la sección de medida a partir de los valores de ocupación y velocidad



Gráfica 11.- Ejemplo Obtención Nivel de Servicio Actual.

medidos en la misma, se extrapola a la entidad lógica superior tramo. Se define tramo como la entidad lógica jerárquica superior, que corresponde a un tramo de carretera homogéneo, es decir con el mismo número de carriles en toda su extensión, sin variaciones de capacidad y sin interrupciones por enlaces, zonas de trenzado y/o accesos.

Lo normal es que un tramo esté formado por una única sección de medida; en este caso, el valor del nivel de servicio para la entidad tramo será el obtenido en la sección de medida.

4.4.3.2. Metodología para el ajuste de umbrales de las secciones de medida

Se trata de determinar los umbrales de velocidad: V₁, V₂ y V₃ y de ocupación: O₁, O₂ y O₃ para cada sección

de medida. Los umbrales varían para cada sección de medida, por tanto se calculan para cada una de ellas. Aunque bien es cierto que hay muchas secciones de medida que se comportan de la misma forma y por tanto los umbrales coinciden o son muy similares. Si un punto de medida está situado en un acceso a una ciudad, la velocidad a la que se circula en situación de tráfico fluido, es inferior a la que se circula por un tramo de autopista.

De igual forma hay que considerar la geometría de la autopista (terreno llano y ondulado, rampas, pendientes y carriles adicionales), es decir en un tramo de curvas de la autopista, la velocidad media, será inferior que en los tramos rectos, siendo la situación de tráfico fluido en ambos casos.

En cuanto a la ocupación, hay que tener en cuenta que hay tramos de autopista con mayor flujo vehicular, por tanto el porcentaje de ocupación será mayor que otros, siendo el tráfico fluido.

Tras haber considerado los puntos anteriores, la determinación de los umbrales de velocidad y ocupación para cada punto de medida se realiza mediante los 3 pasos siguientes.

4.4.3.2.1. Obtención del tamaño de muestra

Se obtiene una muestra representativa sobre el número de gráficas históricas de cada sección de medida. Este tamaño de muestra estará basado sobre la totalidad de los vehículos que circulan por la autopista durante

“n” meses. Se establece tomar una muestra, a partir de los datos almacenados en la base de datos del sistema, que sea estadísticamente representativa, razonable en tiempo de almacenamiento de datos y refleje el comportamiento total de la población.

Para determinar el tamaño y fiabilidad de la muestra hay que considerar los siguientes parámetros:

- Nivel de confianza de la muestra.
- Composición y niveles de servicio (que se encuentren los 4 niveles de servicio: 1, 2, 3 y 4).
- Errores de detección de datos, o intervalos en el que no se han registrado valores de velocidad y ocupación, que determinan los niveles de servicio de la sección de medida.
- Tamaño total de la población, considerando la población como el número de gráficas correspondientes a un día de toma de datos por sección de medida.

La fórmula para el cálculo del tamaño de la muestra a utilizar en una sección de medida sometida al proceso de verificación, según Fernández P.S. (1996) será la siguiente:

$$N = \frac{N_p}{1 + \frac{(p_m - p_{pob})^2 * (N_p - 1)}{Z^2 * p * q}}, \text{ donde:}$$

- N es el tamaño de la muestra estadísticamente representativa.

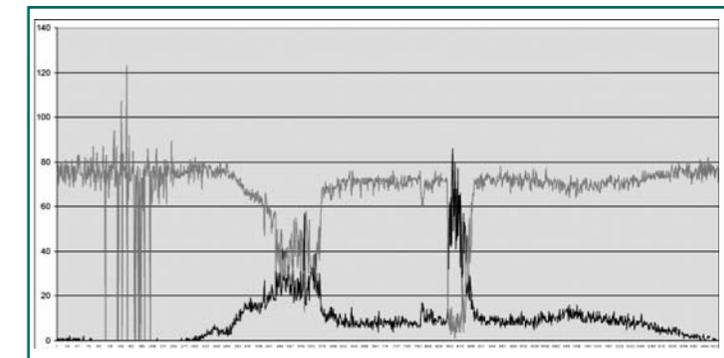
- N_p es el tamaño total de la población, que corresponderá a la IMD registrada en la sección de medida.
- $(p_m - p_{pob})$ es el margen de error tolerable. Se considera un 2%.
- p_m es el margen de error admisible.
- p_{pob} es el margen de error permanente en la medición de la variable a estimar.
- q este parámetro asume qué proporción de la muestra no puede representar las mismas características de la población, debido a diversos factores subjetivos y objetivos de los individuos u objetos que conforman la población. Para tamaños de población elevados, como es el caso que nos ocupa, se adoptan parámetros entre el 2 y el 10%.
- p es la probabilidad que tiene la muestra en poseer las mismas cualidades de la población (homogeneidad). Como $p + q = 1$ (probabilidad máxima), entonces: $p = 1 - q$
- Z es el valor tipificado del Nivel de Confianza que en una distribución Normal $N(0,1)$ genera un valor X que deja dentro del intervalo $(-X, X)$ un porcentaje de área total igual al límite de confianza establecido, normalmente un 95% $\rightarrow Z = 1.96$.

Con este valor se asegura que los valores que se obtengan sobre la muestra tienen una probabilidad del 95% de ser iguales a los obtenidos en caso de haber evaluado el 100%.

Una vez calculados los umbrales con el tamaño de muestra obtenida para cada sección de medida, se mantendrían estos umbrales obtenidos por el método de los conglomerados hasta que se aprecie una variación significativa en la IMD, en cuyo caso se procedería a un nuevo cálculo de umbrales con un nuevo tamaño de muestra.

4.4.3.2.2. Definición de intervalos genéricos por niveles de servicio

Aplicando esta fórmula estadística, se generan las Z gráficas correspondientes para cada sección de medida. En una gráfica de muestra se obtienen los datos históricos de las variables de tráfico de velocidad y ocupación de cada una de las secciones de medida, en periodos de 1 minuto de 1 día, para hacer un seguimiento del comportamiento de ambas variables. La gráfica que se genera por día es de este tipo:



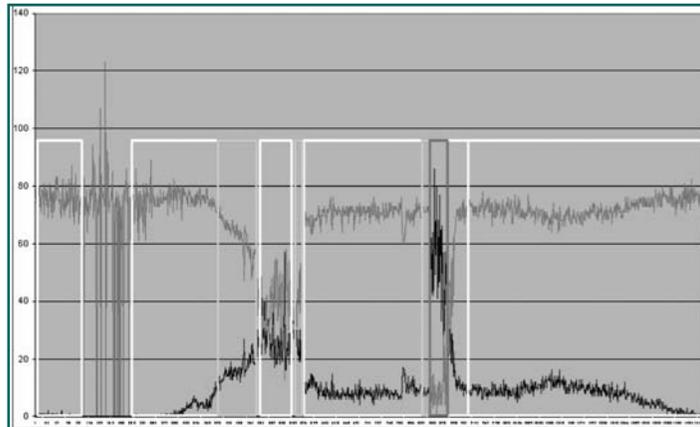
Gráfica 12.- Representación temporal de la relación fundamental Velocidad-Ocupación de una sección de medida en 24 horas por pares de valores en periodos de 1 minuto (1.440 registros).

La variable de velocidad se expresa por la curva de color rojo, expresada en (Km/h) y la curva de color azul corresponden a los valores de ocupación expresados en (%). Se observa la inflexión de los datos, a valores altos de velocidad, la ocupación es baja y viceversa. Cuando la velocidad baja, la ocupación sube. Las inflexiones determinan los pares de valores velocidad-ocupación que definen los 4 niveles de servicio.

Por tanto para cada gráfica, se establecen los intervalos que determinan los 4 niveles de servicio 1, 2, 3 y 4.

Como puede observarse en la gráfica de ejemplo, se establecen:

- 4 intervalos de nivel de servicio 1 en color blanco, que corresponde a un estado de tráfico fluido.



Gráfica 13.- División en intervalos por niveles de servicio sobre la gráfica Velocidad-Ocupación de una sección de medida.

- 3 intervalos de nivel de servicio 2 en color verde, situación de estado de tráfico lento.
- 2 intervalos de nivel de servicio 3 en color amarillo, estado de tráfico con retenciones.
- 1 intervalo de nivel de servicio 4 en color rojo, estado de tráfico con congestión.

Durante las horas nocturnas (hasta las 06:00 horas aproximadamente), los valores de ocupación son muy bajos (aproximadamente del 0%), y los valores de velocidad muy altos, alcanzándose velocidades medias de hasta 120 Km/h. Se observan caídas de velocidad, es decir con valores de 0 Km/h, que corresponden a periodos de tiempo en los que no ha pasado ningún vehículo (en este caso, si se obtuviera la variable intensidad para el mismo periodo de integración de 1 minuto, dicho valor sería 0).

En la gráfica se observa hora punta de mañana en el intervalo de 08:00 a 10:00 horas, donde la velocidad baja considerablemente a la vez que la ocupación sube. Esto se repite en intervalo de punta de la tarde que sería de 18:00 a 20:00 horas aproximadamente.

Puede diferenciarse que la hora punta de la mañana es menos acentuada que la de la tarde, por lo que se distinguiría que en la punta de la mañana se forma el tráfico lento y se llegaría hasta la situación de demoras, mientras que la hora punta de la tarde representaría un estado de tráfico de congestión

porque los valores de ocupación suben alcanzando valores máximos y los de velocidad bajan hasta registrarse periodos de integración con velocidades medias de 0 Km/h, lo que representa la situación clara de congestión.

Esta situación debe reforzarse con el ajuste visual mediante cámara de TV, de forma que se analicen los diferentes estados de tráfico que van sucediendo y ver la variación de los datos de velocidad y ocupación, de forma que permita optimizar los valores de los umbrales.

4.4.3.2.3. Análisis de conglomerados para la determinación de umbrales

La determinación de los umbrales de velocidad y de ocupación para cada sección de medida se justifica en la tesis mediante el análisis de conglomerados usando la técnica de las K-medias sobre el conjunto total de datos para cada uno de los puntos kilométricos estudiados. Según Pardo y Del Campo (2007), el análisis de conglomerados (cluster analysis) es una técnica multivariante que permite agrupar los casos o variables de un archivo de datos en función del parecido o similitud existente entre ellos. Este análisis calcula la distancia de cada uno de los puntos a un punto centroide del conjunto total de puntos, generándose de esta manera diferentes agrupaciones. Este algoritmo obtiene una partición directa de un conjunto de valores por variables cuantitativas. La propuesta de Lebart, L.; Morineau, A.; Piron, M. (1995) es utilizarlo para obtener una partición que minimice

la inercia intraclases. Para el cálculo de conglomerados se ha hecho uso de una herramienta estadística, como es el SPSS (Statistical Package for the Social Sciences).

Conforme se van introduciendo valores uno a uno en el procedimiento, los centroides se van desplazando de su punto original al punto final a través de las diferentes iteraciones del procedimiento. El sistema detiene su cálculo cuando tras una iteración no ha habido cambios en el centroide obtenido. Una vez obtenidos los valores de los centroides, se deben determinar los límites, para ello se deben calcular los puntos medios entre cada uno de los centroides, tal y como se observa en el trabajo presentado por el Development Core Team (2007).

Para todas y cada una de las secciones de medida se ha realizado un estudio de k-medias sobre días con características similares de tráfico, a modo de ejemplo se presentan los resultados para la sección del PK 285+150 sentido creciente.

PK 285+150 Sentido creciente

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	6,00	43,00	24,00	37,00
Velocidad	81,00	9,00	19,00	13,00

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	24,835	23,244	9,111	10,956
2	7,078	5,487	7,305	,414
3	4,518	4,334	4,737	,898
4	3,085	2,927	2,883	1,577
5	1,840	1,657	1,539	1,684
6	1,220	,833	,622	1,569
7	,807	,000	,315	1,368
8	,713	,000	,349	1,475
9	,327	,000	,318	,798
10	,297	,000	,000	,671
11	,206	,000	,000	,537
12	,000	,000	,306	,060
13	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	1,87	53,09	14,14	30,24
Velocidad	118,33	12,24	41,73	14,75

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

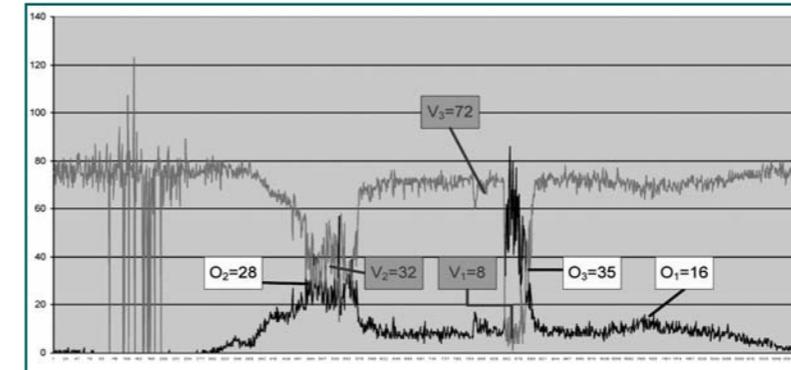
	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	40,65	24,99	8,01	0,00
Velocidad	0,00	13,50	28,24	80,03

4.4.3.3. Umbrales ajustados para las secciones de medida del estudio

Como puede observarse en la gráfica 14, el análisis en detalle de los conglomerados se corresponde a un análisis estadístico de alto nivel para determinar los umbrales asociados a cada intervalo.

Una vez fijados los umbrales, debe verificarse por cámara de TV para asegurarse que los valores fijados para cada sección de medida corresponden al tráfico real en carretera, con el fin de evitar malas interpretaciones (ejemplo: en un periodo de integración han pasado 2 camiones a una velocidad media de 85 Km/h, cuando las circunstancias normales por esa sección de medida se circula en situación de tráfico fluido a 125 Km/h).

La tabla 10 presenta los umbrales asignados a cada una de las secciones de medida del estudio, basado en los datos obtenidos de cada ETD.

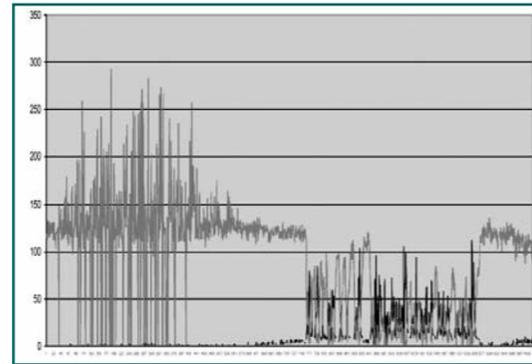


Gráfica 14.- Determinación de umbrales por aproximación genérica de alto nivel sobre la gráfica temporal de la sección de medida.

SECCIÓN DE MEDIDA		UMBRALES DE VELOCIDAD			UMBRALES DE OCUPACIÓN		
PK	SENTIDO	V1	V2	V3	O1	O2	O3
186+450	DECREC	17	35	80	10	22	40
212+100	CREC	16	40	89	7	19	42
212+780	DECREC	18	42	88	8	21	40
242+000	CREC	20	44	92	7	21	41
248+010	DECREC	21	42	85	7	20	41
248+010	CREC	17	36	83	9	22	39
255+290	DECREC	15	33	84	9	22	39
255+290	CREC	14	30	81	9	22	42
270+000	DECREC	16	39	85	8	20	38
270+000	CREC	16	35	88	7	17	35
285+150	CREC	14	28	80	8	25	41
285+150	DECREC	15	32	81	7	18	35
291+450	CREC	21	38	82	12	29	46
296+475	CREC	20	45	87	10	23	43
296+475	DECREC	17	32	73	7	22	41
PROMEDIO		17	37	84	8	22	40

Tabla 10.- Umbrales alcanzados por el método de aproximación de conglomerados de las secciones de medida objeto de la tesis.

PK285,15 CRECIENTE					
80	V3	1	1	2	0
28	V2	2	2	2	3
14	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		8	25	41	



Gráfica 15.- Representación de los umbrales de la sección de medida del PK285,15 en sentido creciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

4.4.3.4. Caso práctico obtención nivel de servicio Matriz Velocidad-Ocupación del experimento

En este apartado se presenta, a modo de ejemplo, los umbrales ajustados del experimento para la sección de medida PK 285+150 sentido creciente sobre la matriz que es única para todo el sistema, así como las gráficas sobre las que se ha realizado el ajuste.

En la gráfica anterior se han representado sobre la matriz del nivel de servicio basada en el algoritmo de la matriz velocidad-ocupación, los umbrales obtenidos para las secciones de medida tomadas como muestra del experimento. A la derecha de la matriz, se observa una de las gráficas de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación para esta sección de medida.

Para una muestra de 16 registros tomada del experimento, el nivel de servicio obtenido por este método es el representado en la parte amarilla, con la equivalencia de valores a las letras del HCM.

En la Gráfica 16 se representan los valores en intervalos de 1 minuto obtenidos del nivel de servicio basado en el algoritmo de la matriz velocidad-ocupación. Se han representado todos los registros de 1 minuto correspondientes al día 17/04/2006 de la sección de medida ubicada en el PK 285,15 en sentido creciente. Puede observarse la agrupación por niveles de servicio donde se distinguen perfectamente los escalones en cada paso.

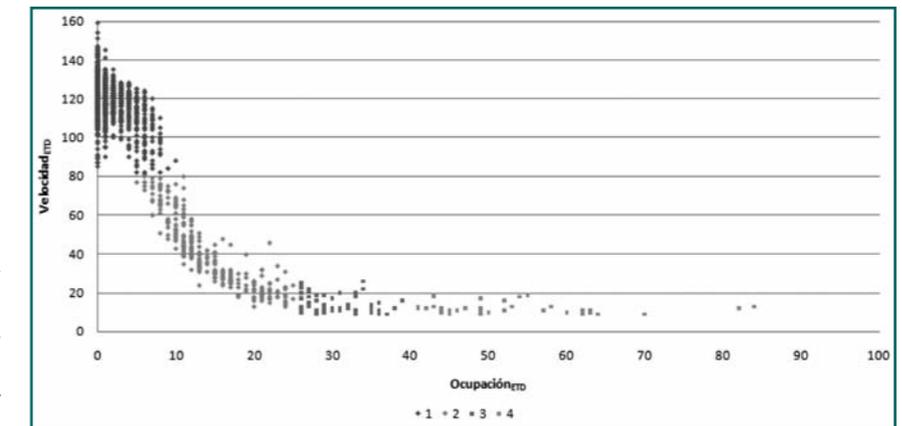
4.4.4. Comparativas de los 3 algoritmos

A continuación se presenta gráficamente la comparativa entre los tres algoritmos de determinación de nive-

muestra id	SECCIÓN DE MEDIDA	fecha	Nº carriles	Intensidad (veh/h)	Ocupación (%)	Velocidad (Km/h)	%Vehiculos Ligeros	% Vehiculos Pesados	NS (V/O)	NS
1	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	2	2880	7	77	95,45	4,55	2	C
2	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	2	4380	7	120	75,76	24,24	1	A,B
3	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	2	1740	26	12	93,10	6,90	3	D
4	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	2520	7	63	97,62	2,38	2	C
5	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	2	3420	10	69	89,47	10,53	2	C
6	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	2	2880	7	77	95,00	5,00	1	A,B
7	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	2	4380	7	120	76,00	24,00	1	A,B
8	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	2	1740	26	12	93,00	7,00	3	D
9	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	2520	7	63	98,00	2,00	2	C
10	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	2	3420	10	69	89,00	11,00	1	A,B
11	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:36	2	3060	8	122	90,00	10,00	1	A,B
12	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:21	2	3240	9	123	92,00	8,00	1	A,B
13	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 10:23	2	2520	5	132	96,00	4,00	1	A,B
14	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 14:03	2	2460	5	92	89,00	11,00	2	C
15	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 17:22	2	2580	8	62	85,00	15,00	2	C
16	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 19:00	2	2160	3	106	88,00	12,00	1	A,B

Tabla 11.- Muestra del experimento de 16 registros de 4 secciones de medida. Obtención del nivel de servicio-algoritmo matriz velocidad-ocupación.

Gráfica 16.- Curva característica del algoritmo matriz velocidad-ocupación para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.



les de servicio analizados, a partir de la representación de las 2 curvas fundamentales de la ingeniería del tráfico (velocidad-intensidad, curva con tendencia de parábola, a cada valor de intensidad le corresponden dos valores de velocidad) y (velocidad-ocupación, curva cuya tendencia es lineal, a cada valor de velocidad le corresponde uno de ocupación y viceversa).

La tercera curva fundamental de ingeniería de tráfico (intensidad-densidad) no se ha considerado porque es análoga a la curva (velocidad-intensidad) en el sentido de tendencia en forma de parábola y por tanto para cada valor de intensidad se estaría ante dos situaciones diferentes: una de tráfico fluido, es decir para un valor de intensidad reflejaría que estarían pasando

muestra Id	SECCIÓN DE MEDIDA	fecha	NS (V/O)		NS HCM dinámico 1	NS HCM dinámico 2
1	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	2	C	C	C
2	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	1	A,B	F	F
3	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	3	D	B	B
4	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	C	C	C
5	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	2	C	D	D
6	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	1	A,B	C	C
7	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	1	A,B	F	F
8	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	3	D	B	B
9	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	C	C	C
10	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	1	A,B	D	D
11	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:36	1	A,B	C	C
12	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:21	1	A,B	D	D
13	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 10:23	1	A,B	C	C
14	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 14:03	2	C	C	C
15	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 17:22	2	C	C	C
16	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 19:00	1	A,B	C	B

Tabla 12.- Muestra del experimento de 16 registros de 4 secciones de medida. Comparativa en la obtención de los niveles de servicio por los tres algoritmos objeto del experimento.

pocos vehículos porque el valor de la densidad es bajo, y otra de estado de tráfico con retenciones y/o congestión, donde estarían pasando pocos vehículos porque la densidad de circulación es muy elevada. Además la ETD da el valor de la velocidad, mientras que la ocupación se ha adoptado como medida indirecta de la densidad.

La Tabla 12 resume los niveles de servicio obtenidos por los tres algoritmos objeto del experimento para 16 registros tomados como muestra representativa. Las columnas amarillas corresponden al nivel de servicio basado en el algoritmo de la matriz velocidad-ocupación (metodología propuesta); la columna azul corresponde al algoritmo de nivel de servicio basado en el HCM dinámico 1 donde la velocidad libre básica

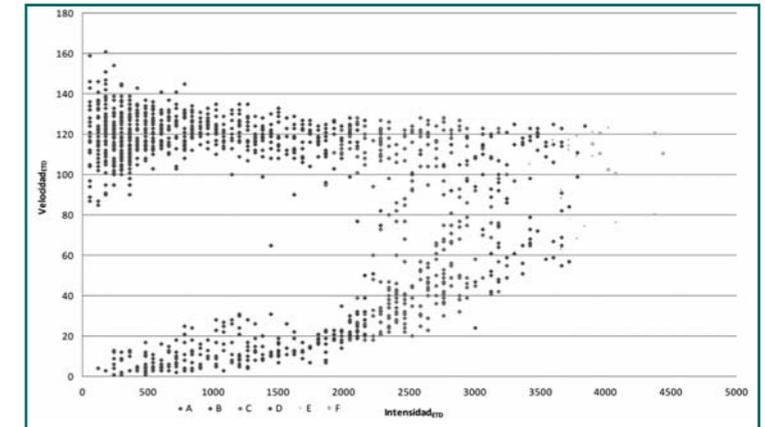
no varía ya que en esta vía es de 120 Km/h; la columna rosa corresponde al algoritmo de nivel de servicio basado en el HCM dinámico 2 donde la velocidad libre básica se corresponde a la velocidad geométrica y por tanto es variable en cada sección de medida.

Por tanto, se representan los pares de valores I-V de la ETD, y V-O de la ETD. Cada par de valores están representados por un color que corresponden a los valores de nivel de servicio calculados por cada algoritmo de NS propuesto (HCM dinámico 1, HCM dinámico 2 y matriz velocidad-ocupación). Así puede observarse como un mismo par de valores, alcanza un nivel de servicio que puede llegar a ser distinto en cada algoritmo como se han representado en la tabla anterior de los calculados y tomados como ejemplo:

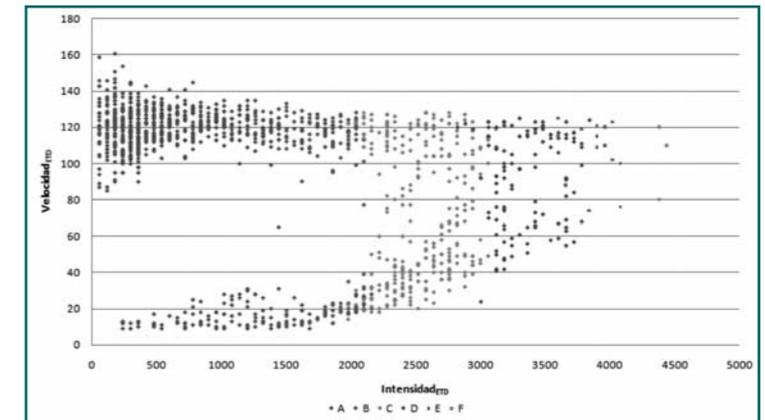
En la Gráfica 17 se representan los pares de valores de velocidad e intensidad obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 1. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

En la Gráfica 18 se representan los pares de valores de velocidad e intensidad obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 2. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

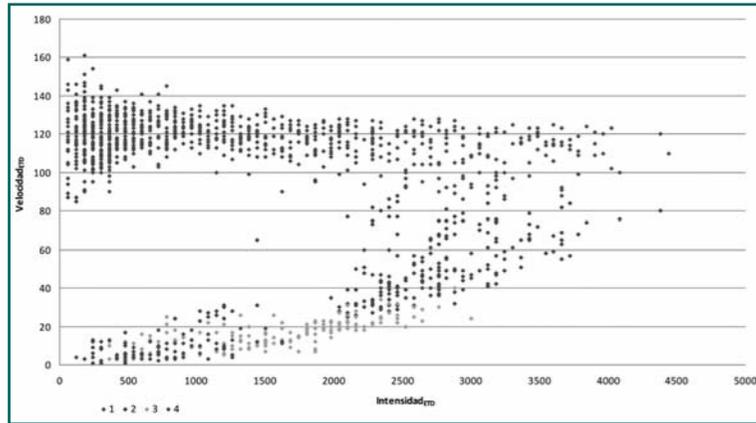
En la Gráfica 19 se representan los pares de valores de velocidad e intensidad obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa



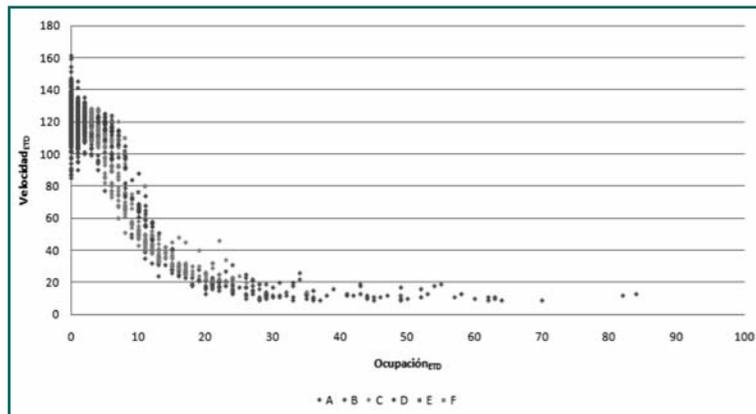
Gráfica 17.- Curva característica de la relación fundamental velocidad-intensidad generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 1 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.



Gráfica 18.- Curva característica de la relación fundamental velocidad-intensidad generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 2 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.



Gráfica 19.- Curva característica de la relación fundamental velocidad-intensidad generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo matriz velocidad-ocupación para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.



Gráfica 20.- Curva característica de la relación fundamental velocidad-ocupación generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 1 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.

cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en la Matriz Velocidad-Ocupación. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

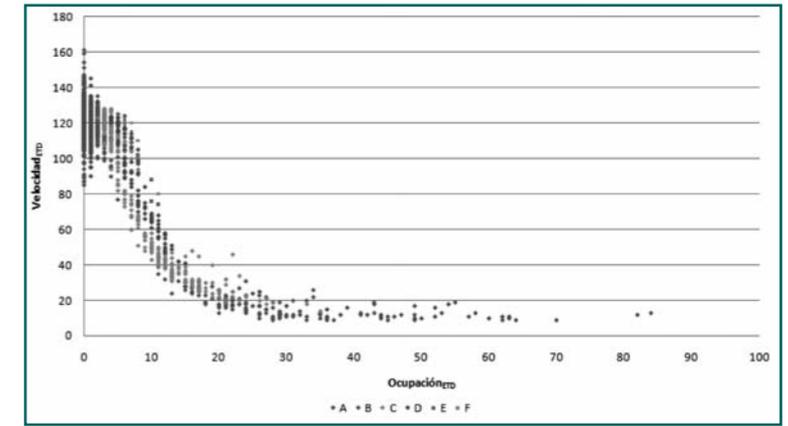
En la Gráfica 20 se representan los pares de valores de velocidad y ocupación obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 1. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

En la Gráfica 21 se representan los pares de valores de velocidad y ocupación obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 2. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

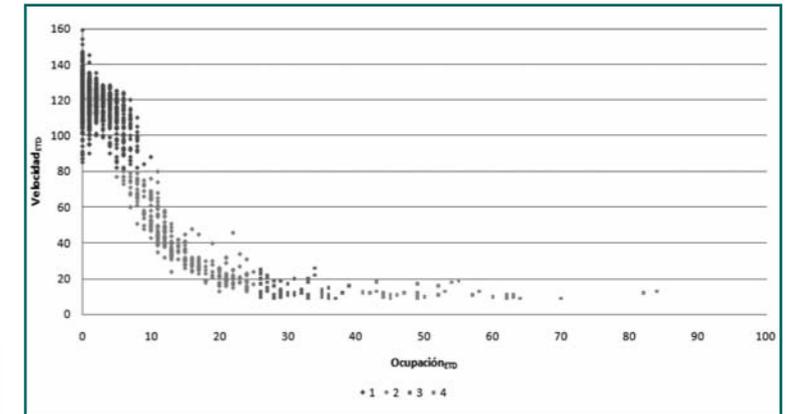
En la Gráfica 22 se representan los pares de valores de velocidad y ocupación obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en la Matriz Velocidad-Ocupación. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

De la observación de los algoritmos basados en HCM, los dinámicos 1 y 2, se observa que obtienen el nivel de servicio a partir de la densidad considerada como la relación entre la intensidad equivalente y la velocidad media (Average Passenger-Car Speed) donde se observa cómo afecta el valor de intensidad frente a la velocidad, ya que la densidad es función de la intensidad equivalente en mayor proporción que la velocidad media. Y la velocidad puede ser función de la intensidad equivalente cuando:

$$V \begin{cases} I_{eq} < IL \Rightarrow V = VL = V1 \\ I_{eq} > IL \Rightarrow V = VL - (VL - V_C) \left(\frac{I_{eq} - IL}{C - IL} \right)^{2,6} = V2 \end{cases}$$



Gráfica 21.- Curva característica de la relación fundamental velocidad-ocupación generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 2 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.



Gráfica 22.- Curva característica de la relación fundamental velocidad-ocupación generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo matriz velocidad-ocupación para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.

Por tanto de nuevo tendría mayor peso la variable intensidad que la velocidad. Mientras que en el algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación, se considera la variable velocidad en la misma proporción que la variable ocupación (densidad), ambas al 50%.

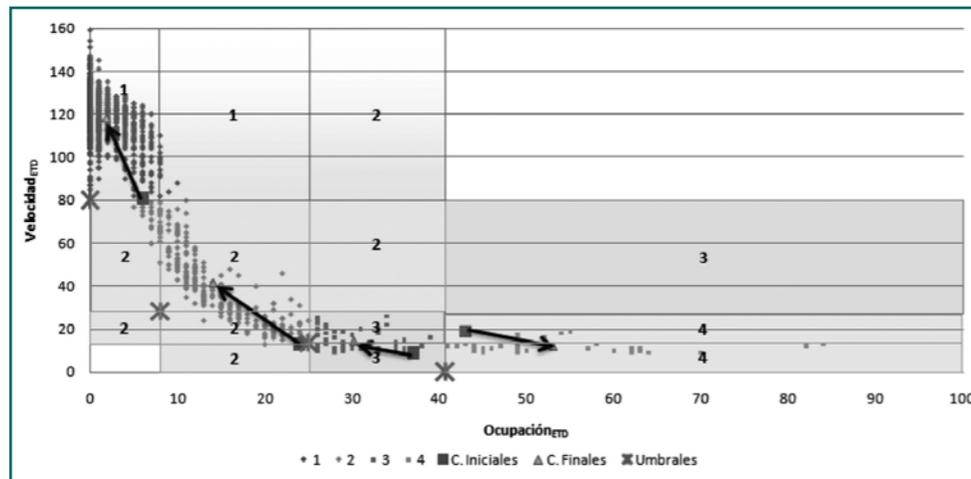
Para demostrar la eficiencia de la matriz Velocidad-Ocupación en la identificación del nivel de servicio óptimo, sobre los datos de tiempo presente para la gestión dinámica del tráfico basado en el algoritmo de los conglomerados de las K medias, se ha procedido a superponer en las gráficas, correspondientes a las secciones de medida de la comparativa entre algoritmos, el conjunto de valores de los centroides iniciales, los centroides finales obtenidos, así como los umbrales calculados por dicho algoritmo.

Esto se ha representado en la curva característica de este algoritmo formada por los pares de valores de velocidad y ocupación de la ETD y se han creado líneas asociadas a los umbrales, que se ajustan a las filas y columnas de la matriz. Tal y como se puede ver en la Gráfica 23.

En la representación se aprecia que se realizan cambios graduales de nivel de servicio, no siendo normalmente posible un salto doble de un nivel de servicio a otro, teniendo que pasar previamente por su antecesor o sucesor.

Por todo esto, se concluye que el algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación, se considera adecuado para aplicar las estrategias de la gestión del tráfico en tiempo presente.

Gráfica 23.- Representación del movimiento de los centroides y los umbrales que determinan la matriz, sobre la nube de puntos que forman la curva característica (V-O), para la muestra de la sección de medida del PK285,15 sentido creciente.



4.4.5. Prueba de contraste

Con el objeto de comprobar y validar los resultados expuestos en el apartado anterior, se realizó una aplicación práctica que sirvió como prueba de contraste y que permite comparar los métodos en las limítrofes, zonas de cambio, de un nivel de servicio a otro. La prueba de contraste se realizó en la carretera A-6 de la Coruña en la provincia de Madrid en el PK 17+300 sentido creciente y consistió en comparar y contrastar, en estas zonas, los resultados de aplicar tres métodos:

- El primer método consiste en determinar el nivel de servicio según el criterio subjetivo del ingeniero de tráfico, actuando como observador.
- El segundo método consiste en determinar el nivel de servicio según el criterio de umbrales gráficas de Velocidad/Ocupación.
- El tercer método consiste en determinar el nivel de servicio según el criterio de ajuste algoritmo Conglomerados.

5. Conclusiones y líneas de investigación

5.1. Conclusiones que se aportan

Las contribuciones principales que se derivan del presente trabajo se pueden clasificar en dos áreas la reducción de datos y la definición de un nuevo modelo para la determinación de los niveles de servicio para la gestión del tráfico.

Los datos tratados en el estudio han sido los correspondientes a las 17 secciones de medida, un total de 65 detectores, en datos almacenados en periodos de agregación de 1 minuto, desde Mayo de 2005 hasta Abril de 2009, un total de 52 meses.

En el área de la reducción de datos se ha propuesto un conjunto de filtros que permite garantizar la calidad de los datos proporcionados en tiempo real por las estaciones de toma de datos, basadas en espiras electromagnéticas.

Los filtros presentados identifican posibles errores en los datos. Los filtros eliminan aquellos datos que se encuentran fuera de los rangos posibles; eliminan también, mediante la correlación de las variables de las ETD, aquellos datos que son inconsistentes. Además, la reducción de datos propuesta identifica los sesgos sistemáticos que se producen en la captura de datos y también es capaz de identificar la falta de datos y tratar su ausencia lo que se denomina restauración de datos.

El análisis de la aplicación de los filtros sobre los datos de las distintas ETDs proporciona resultados muy positivos. Los resultados obtenidos son coherentes ya que se aprecia un suavizado de los datos sin eliminar excesivos datos ni modificar significativamente la relación de las variables fundamentales del tráfico.

La propuesta de filtros resultante de la tesis, concretamente los filtros centrados en los valores empíricos, se han propuesto para formar parte de la norma *Equipamiento para la gestión del tráfico. Calidad de datos. Análisis de datos de tráfico* del subcomité 15 "calidad de datos" del comité técnico de normalización 199 (Equipamiento para la gestión del tráfico). Conclusión que para el autor de la tesis supone una aportación de vital importancia en el desarrollo práctico de la gestión del tráfico en tiempo presente.

El objetivo principal del estudio es la obtención de un algoritmo de nivel de servicio para la gestión del tráfico en tiempo presente basado en la curva velocidad-ocupación tomando como referencia comparativa las técnicas del HCM. Por ello a continuación se detallan las conclusiones obtenidas respecto a los algoritmos probados en el experimento.

Como ha quedado demostrado en el experimento, los algoritmos HCM dinámico 1 y dinámico 2, no reflejan la realidad del estado del nivel de servicio en un tramo de carretera en un instante determinado, es decir para

la gestión del tráfico en tiempo presente. Esto es porque han resultado niveles de servicio mayores al nivel A, en la zona de nivel de servicio A de la curva característica de este algoritmo (velocidad-intensidad equivalente). Por tanto se concluye que los HCM dinámicos 1 y 2 son algoritmos teóricos útiles para el dimensionamiento de carreteras con una IMD horizonte y no se considera apropiado para los sistemas de gestión y explotación de tráfico, en tiempo presente.

Por ello se propone un nuevo modelo basado en la curva fundamental de ingeniería de tráfico del HCM velocidad-densidad (EXHIBIT 7-2 del HCM 2000). Así pues se aplican directamente las técnicas del HCM 2000, considerando la única curva de las tres que tiene una relación unívoca, es decir para un valor de velocidad corresponde uno de densidad y no hay posibilidad de estar en dos situaciones diferentes como en el caso de las relaciones velocidad-intensidad ni intensidad-densidad, donde para un valor de velocidad o de densidad hay dos posibles estados de intensidad.

En este modelo se realiza una primera aproximación que corresponde a la gestión de 4 niveles de servicio en vez de los 6 que considera el HCM, porque resulta más práctico y eficiente a la hora de identificar los estados de tráfico. Esto es porque como se ha demostrado, los valores de las variables de tráfico (velocidad, ocupación e intensidad) en los niveles de servicio A y B son aproximados y de la misma forma se aproximan los valores de los niveles E y F.

En el modelo del nivel de servicio velocidad-ocupación se ha demostrado que se puede considerar la variable ocupación como medida indirecta de la densidad por sus valores fiables que representan esta variable.

Con este modelo se concluye que los resultados de niveles de servicio obtenidos corresponden a una agrupación más real y con una clasificación sin dispersión, y sin obtener niveles de servicio superiores a los niveles A y B en la zona de nivel A ó B.

La ventaja de este modelo es que se ha obtenido un nuevo método estadístico basado en los conglomerados, para la aproximación óptima de los umbrales de velocidad y ocupación característicos de cada sección de medida, que puede implementarse de forma dinámica con el fin de automatizar el sistema y además considera el comportamiento histórico recurrente de cada sección de medida.

Los resultados obtenidos en la comparativa realizada entre los 3 métodos muestran la agrupación de los pares de valores de acuerdo a los niveles de servicio calculados. En los dos primeros algoritmos, dinámico 1 y 2, tiene un mayor peso la variable intensidad que la velocidad. Mientras que en el algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación, se considera la variable velocidad en la misma proporción que la variable ocupación (densidad), ambas al 50%.

Así pues, se determina que el algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación,

aunque sea un método empírico, se considera adecuado para aplicar las estrategias de la gestión del tráfico en tiempo presente. Además, las pruebas de contraste realizadas en el desarrollo de la tesis doctoral para determinar los niveles de servicio en las zonas umbrales, es decir donde se produce el cambio, de los niveles de servicio, corroboran y apoyan esta afirmación.

Remarcar por último, que las velocidades libres obtenidas están dentro del rango de valores permitidos por el HCM 2000 para la obtención y uso de la Velocidad libre.

5.2. Líneas de investigación y trabajos abiertos

Vistas las conclusiones del trabajo, en primer lugar, podemos establecer futuras líneas de investigación dirigidas a mejorar la calidad de datos. Cuando hablamos de calidad de datos, no nos referimos sólo a parámetros del tráfico tomados desde ETDs compuestas por detectores de lazos inductivos, sino a todos los datos utilizados también en los Centros de Gestión del Tráfico como son los meteorológicos y los medioambientales.

También queda como trabajo abierto el establecimiento de medidas correctoras de datos de tráfico procedentes de otros medios de captación, ya que estos datos pueden incorporarse fácilmente al método de cálculo de nivel de servicio propuesto.

Las investigaciones iniciales como consecuencia de este documento están sirviendo como base para el desarrollo de documentos de Normalización dentro del Subcomité 15 del CTN-199 "Calidad de datos".

En segundo lugar futuras líneas de investigación podrían ir dirigidas a estudiar el comportamiento del tráfico en autopistas pero bajo la influencia de meteorología adversa, definiendo ésta como la presencia de lluvia, viento o la combinación de ellos según diferentes estados del clima.

El problema que esta investigación conlleva es la dificultad real de encontrar todos los estados del clima y todos los estados del tráfico en carreteras homogéneas. Problema que hace todavía más interesante la investigación.

Todo lo hasta ahora mencionado en un tratamiento cuantitativo de los datos sería muy interesante y abriría nuevos trabajos la comparación de los resultados del experimento con un análisis del comportamiento de los conductores (de la percepción de la situación por parte de ellos) estableciendo la correlación existente entre el comportamiento del conductor ante un suceso y los datos cuantitativos procedentes del equipo de medida que registra el mencionado evento.

Los siguientes puntos se presentan como trabajos abiertos relacionados con los logros obtenidos por la tesis:

- Sobre la metodología de la reducción de los datos de tráfico instantáneos obtenidos para la medición de carril o detector: con el fin de evaluar el funcionamiento de los sistemas de la gestión de tráfico, tanto en ámbito urbano como interurbano. Así como la determinación de métodos algorítmico-estadísticos de reconstrucción y sustitución de datos inexistentes o incoherentes.
- A partir del método de obtención de nivel de servicio basado en el algoritmo de la matriz velocidad-ocupación:
 - Alcanzar método estadístico de determinación de umbrales a partir del método empírico desarrollado en el experimento.
 - Alcanzar la relación del algoritmo dinámico que relacione con diferentes estados de climatología: lluvia, viento, nieve de gran importancia en los sistemas de gestión y explotación dinámica del tráfico.
- La consideración del minuto como duración del periodo de referencia, nace de la propia definición de la tesis como modelización de los niveles de servicio en autopistas en tiempo presente para la gestión dinámica del tráfico y en principio hasta aquí se quería llegar. El análisis de estabilidad de la aplicación del algoritmo para este periodo podría arrancar futuras líneas de investigación basadas en la aplicación del método a datos integrados en periodos de tiempo de mayor duración (5', 10', 15') y sus resultados y relaciones.

- También es posible y necesario que con los resultados de niveles de servicio según los datos de minuto, se elabore una metodología de gestión que asegure la consistencia en el tiempo de los niveles de servicio a facilitar.

5.3. Aplicaciones

Debido a la estrecha colaboración con el subcomité 15 de calidad de datos del comité técnico de normalización 199 (Equipamiento para la gestión del tráfico), se ha propuesto incluir el conjunto de filtros resultante de la tesis, concretamente los filtros centrados en los valores empíricos, como parte de la norma Equipamiento para la gestión del tráfico. Calidad de datos. Análisis de datos de tráfico. Aplicación, que para el autor de la tesis supone una aportación de vital importancia en el desarrollo práctico de la gestión del tráfico en tiempo presente.

Así mismo, las investigaciones iniciales como consecuencia de este documento están sirviendo como base para el desarrollo de diversos documentos de Normalización dentro del Subcomité 15 del CTN-199 "Calidad de datos".

6. Referencias Bibliográficas

- AENOR (2004): *Norma Española, UNE 135411-3. Equipamiento para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 3: características funcionales.*
- ALLENDE, H. y GALBIATI, J. (2004): *A non-parametric filter for digital image restoration, using cluster analysis.* Pattern Recognition Letters, vol. 25, pp. 841-847.
- AUNET, B.(2000) *Wisconsin's approach to variation in traffic data.* North American Travel Monitoring Exhibition and Conference. 2000.
- BAÍLLO, A. y GRANÉ, A. (2008): *Local linear regression for functional predictor and scalar response.* Functional and Operational Statistics, Dabo-Niang, S. and Ferraty F. (Eds.), Springer. (ISBN 978-3-7908-2061-4).
- BORRACI, R.A. y ARRIBALZAGA, E.B. (2005): *Aplicación de análisis de conglomerados y redes neuronales artificiales para la clasificación y selección de candidatos a residencias médicas.* Educación Médica vol 8 número 1. ISSN 1575.
- BOX, P.C. y OPPENLANDER, J.C. (1976): *Manual for Traffic Engineering Studies.* 4th Edition, Institute of Transportation Engineers, Arlington, Virginia, EEUU.
- CÁSTOR, G., et al. (2006): *Tratamiento de Datos.* Ediciones Díaz de Santos. ISBN 84-7978-736-8.
- COIFMAN, B (2001). *Improved Velocity Estimation Using Single Loop Detectors.* Transportation Research A, Vol. 35, No. 10, 2001, pp. 863-880.
- COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS (2006): *Libro Blanco - La política Europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad.* Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo. COM(2001)370 FINAL. SEC(2006) 768. Bruselas.
- COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS (2006): *Por una Europa en movimiento. Movilidad sostenible para nuestro continente. Revisión intermedia del Libro Blanco del transporte de la Comisión Europea de 2001.* Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo. COM(2006)314 FINAL. SEC(2006) 768. Bruselas.
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN CTN 135/SC4. (2004): *Regulación del tráfico. Norma UNE 135441-3 (Equipamiento vial para carreteras. Sensores de variables atmosféricas en carreteras). Parte 3: Equipamiento.*
- DEVELOPMENT CORE TEAM (2007): *A Language and Environment for Statistical Computing,* Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. ISBN: 3-900051-07.
- DÍAZ, E. et al. (2001): *Influencia de las desigualdades sociales, la conflictividad social y la pobreza extrema sobre la morbilidad por tuberculosis.* Revista Española de Salud Pública. Vol 75. número 6, pág 517-528. Noviembre - Diciembre 2001.
- EVERITT, B. S. (1995): *Commentary: Classification and cluster analysis.* BMJ 1995; 311: 535-536.
- FERNÁNDEZ, P.S. (1996): *Determinación del tamaño muestral.* Cad Aten. p. 138-141.
- GALIN, D. (1981): *Velocidad en carreteras rurales de dos caminos - un análisis de regresión múltiple sobre dos carriles.* Ingeniería de tráfico y el Control, no. 22, 1981, pp. 453-460.
- GRANATO S.: *The Impact of Factoring Traffic Counts for Daily and Monthly Variation in Reducing Sample Counting Error.* Transportation Conference Proceedings. 1998.
- GRANÉ, A. y VEIGA, H. (2009): *Outliers and the estimation of minimum capital risk requirements.* Investigaciones en Seguros y Gestión de Riesgos, Heras, A., Vilar, J.L., Guillén, M. (Eds.), Fundación MAPFRE. (ISBN 978-84-9844-158-1).
- HALL, F. (1986): *The Relationship Between Occupancy and Density.* Transportation Forum, Dec. 1986, pp. 46-52.
- INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS (2000): Norma 3.1 - IC Trazado. 27 de diciembre de 1999. BOE de 2 de Febrero de 2000.
- KIM Y, HALL F. (2004): *Relationships Between Occupancy and Density Reflecting Average Vehicle Lengths.* Transportation Research Record. ISSN 0361-1981 (Print). Volume 1883/2004.85-93DOI 10.3141/1883-10. 2004.
- KLAVER, K. et al. (2007): *Analysis and modeling of auto users' perceptions of quality of service on urban streets.* Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Transportation Research Board of the National Academies. Pag 167-175. Vol. 1883/2004. ISSN: 0361-1981.
- KRAEMER, C.; PARDILLO, J.; ROCCI, S.; ROMANA, M.; SÁNCHEZ, V. Y DEL VAL, M. (2009): *Ingeniería de Carreteras,* volumen I, 2ª edición. Mc Graw Hill. Madrid.
- LEBART, L.; MORINEAU, A.; PIRON, M. (1995): *Statistique exploratoire multidimensionnelle,* Collection: Sciences Sup. Dunod Ed., Paris.
- LU, XIAO-YUN, VARAIYA, PRAVIN, HOROWITZ, ROBERTO AND PALEN, JOE (2008): *Faulty Loop Data Analysis/Correction and Loop Fault Detection.* 15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America's 2008 Annual Meeting. 2008.
- MARTÍN, F. (1995): *Congruencia taxonómica y clasificaciones.* Boletín de la Asociación Española de Entomología 19:5.
- MAY A.D. (1990): *Traffic flow fundamentals.* Prentice Hall, New Jersey.
- MAY A. D, COIFMAN B. CAYFORD R, MERRITT G (2004): *Automatic Diagnostics of Loop Detectors and the Data Collection System in the Berkeley Highway Lab UCB.* ITS-PRR-2004-13California PATH Research Report. 2004.
- MCQUEEN (1999): *Intelligent transportation systems architecture.* Pages 201-258. Artech House Books.
- Minnesota Department of Transportation (2000): *Density Calculation from detector data.* <http://data.dot.state.mn.us/datatools/Density.html>. 2000.
- OLSEN, S.F.; MARTUZZI, M.; ELLIOT, P. (1996): *Cluster analysis and disease mapping-why, when, and how? A step by step guide.* BMJ 1996; pag 313 N° 863-6.

- PARDO, C. E. y DEL CAMPO, P. C. (2007): *Combinación de métodos factoriales y de análisis de conglomerados en R: el paquete FactoClass*, Revista Colombiana de Estadística Volumen 30, nº 2, p231-245. Bogotá.
- PINGNATARO, L.J. (1975): *Traffic Engineering. Theory and Practice*. Prentice Hall, New Jersey.
- PNE199152-1-1 (2010): *Calidad de datos. Análisis de datos de tráfico*. Pre norma del sub comité 15 del comité técnico de normalización CTN199.
- ROESS, R.P. y ULERIO, J.M. (2009): *Capacity of Freeway Weaving Segments*. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board. Pag 34-41. Vol 2130/2009. ISSN: 0361-1981.
- ROESS, R.P. y ULERIO, J.M. (2009): *Level of Service Analysis of Freeway Weaving Segments*. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board. Pag 25-33. Vol 2130/2009. ISSN: 0361-1981.
- SMEED, R.J. y BENNET, G. (1949): *Research on road safety and traffic flow*. Institute of Civil Engineers. Road Paper nº.29, London.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2011): *75 years of the fundamental diagram for traffic flow theory*. Transportation Research Circular Number E-C149. Washington D.C., June 2011.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2000): *Highway Capacity Manual*. National Research Council. Washington D.C., EEUU.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2010): *Highway Capacity Manual*. 5th Edition. National Research Council. Washington D.C., EEUU.
- WALL, Z R, DAILEY, D J.(2003): *Algorithm for detecting and correcting errors in archived traffic data*. Transportation Research Record No. 1855, Transportation Data Research. ISSN: 0361-1981. 2003.
- ZHANFENG, J., CHAO C., COIFMAN B., AND VARAIYA P. (2001): *The PeMS Algorithms for Accurate, Real-Time Estimates of g-Factors and Speeds from Single-Loop Detectors*. IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings, 2001, pp. 536-541.
- ZHANG, X, NIHAN, N L, WANG, Y (2005). *Improved Dual-Loop Detection System for Collecting Real-Time Truck Data*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board Issue Number: 1917 Publisher: Transportation Research Board ISSN: 0361-1981. 2005.

*Editado en Madrid,
28 de noviembre de 2012*